

Stabilisation physico-chimique des sols gonflants (sable de dune + sel)

M. LAMARA
M. K. GUEDDOUDA
B. BENABED

Laboratoire de recherche
de génie civil
Université de Amar Tledji
BP 35G
Laghouat (Algérie)
medlamara@hotmail.com

Résumé

Cette étude a été réalisée sur deux sols expansifs provenant de deux sites différents du sud de l'Algérie, où des dégâts ont été enregistrés (endommagement des structures, fissuration et destruction partielle des chaussées). Dans la première étape, le gonflement des sols est estimé par des méthodes indirectes basées sur les caractéristiques géotechniques. Par la suite, des mesures directes des paramètres de gonflement (taux et pression de gonflement) ont été effectués. La seconde étape de cette investigation porte sur l'effet de l'ajout du sable dunaire sur le potentiel de gonflement. L'ajout de sable a conduit à une diminution des limites de consistance et à une réduction importante des paramètres de gonflement. Enfin, une technique de stabilisation combinée, par l'association de sel plus sable, a été réalisée. Les résultats sont très encourageants et montrent que pour certaines combinaisons, le taux de réduction du potentiel de gonflement est très important (environ 95 %).

Mots-clés : sable de dune, sols expansifs, potentiel de gonflement, stabilisation.

Physical and chemical stabilisation of expansive soils (dune sand + salt)

Abstract

This study has been conducted on two soils belonging to two different sites in the south of Algeria, where damages have been recorded (damage of structure, cracking and partial destruction of road pavements). First, the swelling of soils is estimated using indirect methods based on the geotechnical characteristics, thereafter direct measurement of swelling parameters (magnitude and pressure of swelling) is carried out. Secondly, the study of the effect of dune sand addition on the swelling potential of soils is investigated. Sand addition leads to a decrease in the limits of consistency and an important reduction of swelling parameters. Finally, a combined stabilisation technique that associates salts and sand has been achieved. Results are very encouraging and show that for certain combinations the reduction rate in swelling potential is very important (about 95 %).

Key words : dune sand, expansive soils, swelling potential, stabilization.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} décembre 2006.

Introduction

Le gonflement des sols se manifeste généralement dans les régions arides et semi-arides caractérisées par un climat sec et chaud suivi par une période pluviale, ce qui induit des fluctuations importantes de la teneur en humidité sur des profondeurs considérables.

La présence des sols gonflants pose de nombreux désordres aux constructions. Ce type de sol est présent dans de nombreux pays à travers le monde. En Algérie, ce phénomène encore mal apprécié affecte des centaines de kilomètres carrés répartis un peu partout à travers le territoire national. Les dégâts causés par le gonflement des sols aux constructions et aux ouvrages légers sont considérables, comme à Batna (hôpital de N'Gaous) (Tas, 1992); à Illizi (raffinerie de In-Aménas) (Derriche et Kebaili, 1998); à Oran (hôpital Sidi Chahmi) (Hachichi et Fleureau, 1999); et à Laghouat (université Amar Tledji) (Lamara et Merah, 2002) et (base de vie station de pompage n° 5) (Lamara et al., 2005).

Compte tenu du nombre important de paramètres et malgré de nombreux travaux de recherche sur ce thème, des solutions rationnelles satisfaisantes n'ont pas encore été trouvées. Toutefois, et afin de limiter les désordres dans les constructions, des solutions basées sur diverses techniques de stabilisation ont été élaborées avec des résultats plus ou moins satisfaisants. Récemment, la technique de stabilisation par ajout de sable a semblé donner des résultats encourageants (Kaoua et al., 1994; Louafi, 1997, Bengraa, 2005).

Le travail présenté dans cet article est une contribution à la technique de stabilisation par ajout de sable de dune aux sols provenant de deux sites différents de l'Algérie (Laghouat, base de vie station de pompage n° 5 (BVSP 5) et Illizi, raffinerie de In-Aménas) où plusieurs cas de désordres ont été signalés (Fig. 1).

Dans un premier temps, les sols étudiés ont été identifiés et caractérisés par des essais géotechniques classiques et par des analyses minéralogiques et chimiques. Ces essais ont été complétés par des mesures directes des paramètres de gonflement (taux et pression de gonflement).

Dans une seconde étape, l'étude a porté sur l'effet de l'ajout de sable dunaire à différents pourcentages sur le potentiel et sur la pression de gonflement. Enfin, une étude de stabilisation combinée par l'association de sel (NaCl) et sable de dune a été réalisée.

2

Caractérisation des sols

Notre étude de stabilisation est réalisée sur deux sols: le premier sol nommé (ELG) appartient à la région de Laghouat à 400 km au sud d'Alger. Le second sol provient de la région d'In-Aménas à 1 600 km au sud d'Alger est appelé (EAM).

2.1

Argiles

Pour le sol (ELG), il provient d'une zone située à 20 km au nord-ouest de la ville de Laghouat (BVSP 5).



FIG. 1 Sites de localisation des deux sols.
Location sites of two soils.

Du point de vue géologique, cette zone présente plusieurs couches dont la première est recouverte d'une couche végétale d'une épaisseur d'environ 30 cm, puis une couche de limon sablo-gravillonneuse et enfin d'une couche de marnes verdâtres et rougeâtres avec présence de cristaux de gypse à une profondeur de plus de 1 m. Notre échantillon est prélevé à une profondeur de 3,50 m (3^e couche).

En ce qui concerne le sol (EAM) provenant de la région de In-Aménas, plusieurs études ont été réalisées sur ce sol (Tas 1992; Derriche et Kebaili, 1998). La synthèse de ces études montre que les argiles de la région se présentent suivant une stratigraphie assez régulière selon la succession de différentes couches. Une couverture sableuse d'une dizaine de centimètres, un horizon supérieur constitué de matériau limono-argileux de couleur rougeâtre et d'une épaisseur de 1,50 m, une couche argileuse compactée de couleur plus sombre que la couche supérieure, et enfin une couche verdâtre relativement mince constituent le sol. Le sol étudié est prélevé dans la troisième couche.

2.1.1

Essais d'identification

En premier lieu, l'analyse granulométrique est effectuée par deux opérations successives et complémentaires: le tamisage sous l'eau (par voix humide) complété par la sédimentométrie pour les particules de dimensions inférieures à 80 μm .

Les courbes granulométriques pour les deux sols sont représentées sur la figure 2 et les résultats des essais d'identification sont regroupés dans le tableau 1. D'après l'abaque de plasticité de Casagrande, les sols (ELG) et (EAM) appartiennent au groupe des sols argileux très plastiques. Le coefficient d'activité de Skempton (1953) est donné par la formule suivante: $A = I_p/C_2$ qui définit l'activité des argiles, le minéral prédominant dans les deux sols (ELG) et (EAM) pourrait être une montmorillonite.

I_p : indice de plasticité;

C_2 : pourcentage des particules inférieur à 2 μm .

TABEAU I Paramètres d'identification des sols.
Identification parameters of soils.

	Z (m)	C ₂ < 2 μm	W _l (%)	W _p (%)	W _{fl} (%)	I _p (%)	I _{pl} (%)	A _p	A _l	SS _t (m ² /g)
ELG	3	35,74	69	33,52	11,66	35,48	57,34	0,99	1,38	350,7
EAM	1,3	55	62,3	21,7	13	40,6	57,6	0,74	0,90	437

SS_t : surface spécifique obtenue à partir de l'essai au bleu de méthylène.

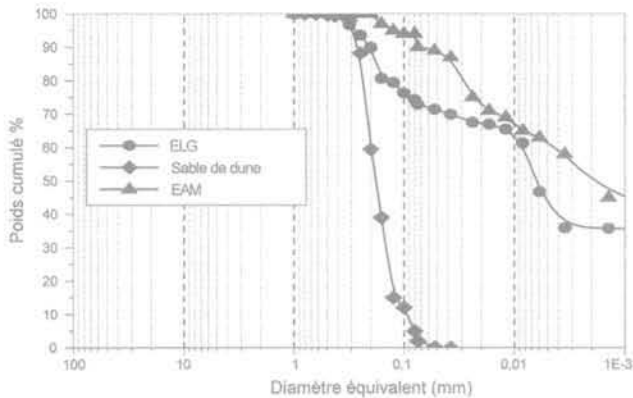


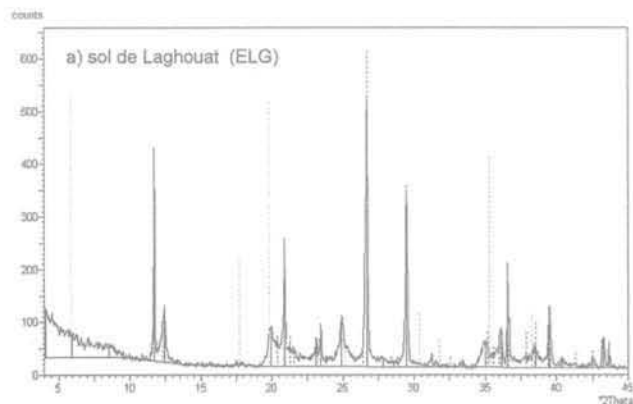
FIG. 2 Courbes granulométriques des sols étudiés.
Grain size distribution of studied soils.

2.1.2

Analyses minéralogiques

Le diffractomètre aux rayons X a été utilisé dans cette étude afin de déterminer les différentes proportions de minéraux constituant l'échantillon. Les résultats sont donnés dans la figure 3.

Les diffractogrammes révèlent que le sol de Laghouat (ELG) présente des mélanges de Montmorillonite-kaolinite, avec la présence de quartz et de calcite. Pour le sol de In-Aménas (EAM), le diffractogramme montre la présence de kaolinite, d'illite, d'interstratifiés illite-montmorillonite et de quartz. Ces résultats devront être confirmés par d'autres analyses quantitatives plus détaillées.



2.1.3

Analyse chimique

Pour compléter les analyses minéralogiques, des analyses chimiques ont été effectuées et les résultats sont donnés dans le tableau II.

TABEAU II Analyses chimiques des sols.
Chemical analysis of soils.

Composé	Symboles	Unités	ELG	EAM
Silice	SiO ₂	%	58,94	56,30
Alumine	Al ₂ O ₃	%	6,03	20,44
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	17,70	1,98
Chlorure de Sodium	NaCl	%	0,12	-
Oxyde de Potassium	K ₂ O	%	traces	2,20
Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	%	1,02	7,00
Sulfates	SO ₄	%	3,25	-
Perte au feu	P.F ¹	%	12,83	12,03
Eau de combinaison	H ₂ O	%	3,36	10,80
Anhydride carbonique	CO ₂	%	9,47	1,23
Matière organique	MO	%	-	-

$$P.F^1 = H_2O + CO_2 + M.O$$

Les principaux constituants minéralogiques du sol de Laghouat (ELG) sont ainsi la silice, l'alumine et la calcite et ceux du sol de In-Aménas (EAM) sont la silice et l'alumine. La silice et l'alumine sont deux minéraux à la base de la structure des argiles. De plus, la présence de carbonate de calcium nous indique que le sol (ELG) appartient au groupe des argiles calcaires. La teneur en potassium K₂O dans le sol de In-Aménas confirme la présence

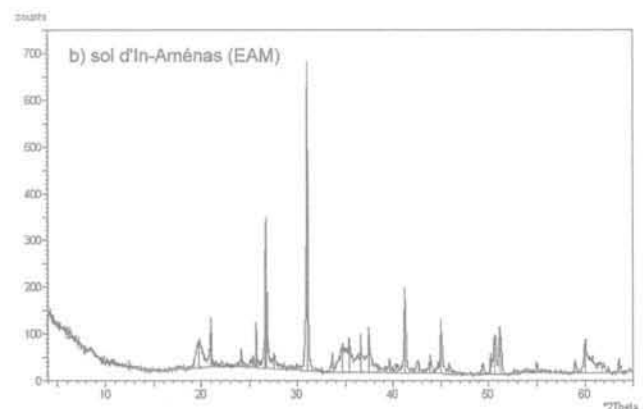


FIG. 3 Analyse minéralogique des sols.
Mineral analysis of soils.

d'illite. Par ailleurs, on remarque que les deux sols présentent des pourcentages en SiO_2 inférieurs à 80 %, valeur frontière entre les sols gonflants et non gonflants (Hachichi *et al.*, 2003), ce qui permet de prédire que ces deux sols ont naturellement une tendance à gonfler.

2.2

Sable de dune

La zone de provenance du sable de dune est située dans les environs de la ville de Laghouat (oasis nord), donc c'est un matériau local et largement disponible.

2.2.1

Essais d'identification

Les résultats des essais d'identification du sable dunaire sont inclus dans le tableau III, la courbe granulométrique est représentée dans la figure 2.

D'après la classification des sols du LCPC, le sable de dune se classe parmi les sables propres mal gradués (SM), de granulométrie moyenne. Sa courbe est unimodale et très peu étalée.

TABLEAU III Paramètres d'identification du sable de dune.

Identification parameters of dune sand.

Paramètres	Granulométrie		Équivalent de sable	
	Cu	Cc	ES _v	ES _p
Valeur	1,67	1,1	86,17	74,20

2.2.2

Analyses minéralogiques

L'analyse minéralogique du sable dunaire révèle, que le sable est formé en grande quantité de l'espèce SiO_2 (silice), avec présence de quelques traces d'espèces calciques et magnésiques.

2.2.3

Analyse chimique

La présence d'un fort pourcentage en silice (supérieur à 80 %) indique que le sable de dune de Laghouat est un sable siliceux (Tableau IV).

TABLEAU V Estimation indirecte du potentiel de gonflement des sols.

Indirect estimation of swelling potential of soils.

Les auteurs	Paramètres	ELG	EAM
Classifications selon un seul paramètre			
Snethen (1977)	I_p	haut	haut
Snethen <i>et al.</i> (1977)	w_L	élevé	élevé
Serratos (1957)	w_R	marginale	marginale
Classifications selon deux paramètres			
Seed <i>et al.</i> , 1962	A_c, C_2	élevé	élevé
Snethen (1977)	I_p, w_L	élevé	élevé
Williams et Donaldson (1980)	I_p, C_2	très élevé	très élevé
Classifications selon trois paramètres			
Holtz et Gibbs(1956)	C_c, I_p, w_R	important	important
Snethen (1977)	I_p, w_L, w_R	élevé	élevé

C1 : taux de particules inférieur à 1 μm .

TABLEAU IV Analyse chimique du sable de dune. Chemical analysis of dune sand.

	Symboles	Unité	Sable de dune
Résidu insoluble	SiO_2 + silice	%	95,87
Sulfates	SO_3	%	0,91
Chlorures	Cl^-	%	0,36
Carbonate de calcium	CaCO_3	%	2,5
Matières organiques	MO	%	-

3

Étude du gonflement des argiles

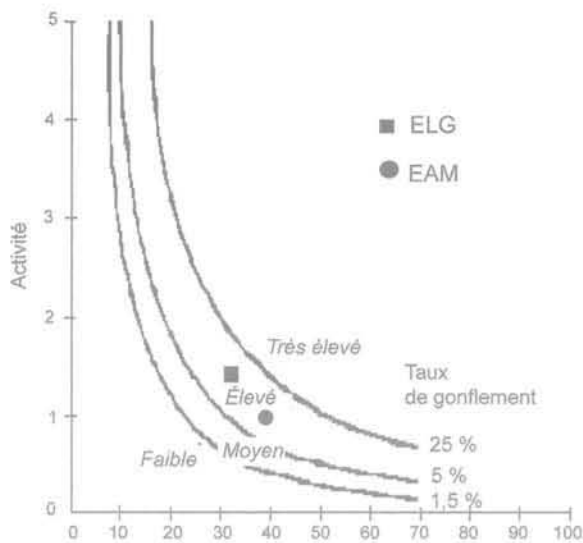
Le gonflement des argiles est un phénomène fort complexe. Il dépend de plusieurs paramètres, en particulier la densité sèche, la teneur en eau naturelle et la nature minéralogique des dépôts argileux. Le gonflement peut être prédit à partir des caractéristiques physiques du sol, simples à déterminer au laboratoire, comme les limites de consistance. Néanmoins, ces modèles de prédiction du gonflement restent grossiers. Donc des mesures directes des paramètres de gonflement sont nécessaires pour confirmer et quantifier le caractère gonflant d'une argile.

Dans cette étude du potentiel de gonflement des deux sols, les essais sont réalisés sur des échantillons reconstitués par compactage statique (utilisant une presse à la vitesse de 1,27 mm/min).

3.1

Mesure indirecte du potentiel de gonflement

Un nombre considérable d'approches empiriques, introduites par différents auteurs basées sur des caractéristiques physiques des sols (Holtz et Gibbs, 1991), sont utilisées pour l'évaluation du potentiel de gonflement. Certains auteurs ont proposé des abaques de classifications basées soit sur l'activité corrigée (Seed *et al.*, 1962) (Fig. 4), ou sur des paramètres physiques (Williams et Donaldson, 1980) (Fig. 5). Le tableau V présente les classifications de ces deux sols selon les méthodes indirectes.



Pourcentage de particules argileuses (de taille inférieure à 2 µm)

FIG. 4 Abaque d'évaluation du potentiel de gonflement.
Chart for swelling potential evaluation (Seed, 1962).

L'activité corrigée de Seed *et al.* (1962) est exprimée par :

$$Ac = I_p / (C_2 - n)$$

avec $n = 5$: cas des sols naturels ; $n = 10$: cas des sols reconstitués.

En général, toutes les classifications montrent que, les deux sols possèdent un potentiel de gonflement élevé à très élevé, ce qui est en accord avec le minéral prédominant qui est la montmorillonite.

Pour confirmer la classification obtenue par les méthodes indirectes, des mesures directes du potentiel de gonflement ont été effectuées.

3.2

Mesure directe des paramètres de gonflement

3.2.1

Mesure du potentiel de gonflement

Les essais de gonflement libre sont effectués dans un œdomètre classique dont les dimensions des échantillons sont : hauteur $H = 20$ mm, diamètre $D = 50$ mm.

Dans un premier temps, on procède à la préparation de l'échantillon (broyage, tamisage, séchage et compactage statique) à la teneur en eau optimale ($\omega_{opt} = 15\%$) et au poids volumique sec maximal ($\gamma_d = 18,2$ kN/m³) déterminé à partir de l'essai de compactage.

L'échantillon est placé dans une cellule cylindrique entre deux pierres poreuses. Puis par imbibition, il est autorisé à gonfler verticalement sous la pression du piston durant plusieurs jours jusqu'à la stabilisation. Le gonflement total est déterminé d'après la formule suivante :

$$G(\%) = \frac{(H_f - H_i)}{H_i} \times 100$$

H_i : hauteur initiale ;

H_f : hauteur finale après stabilisation.

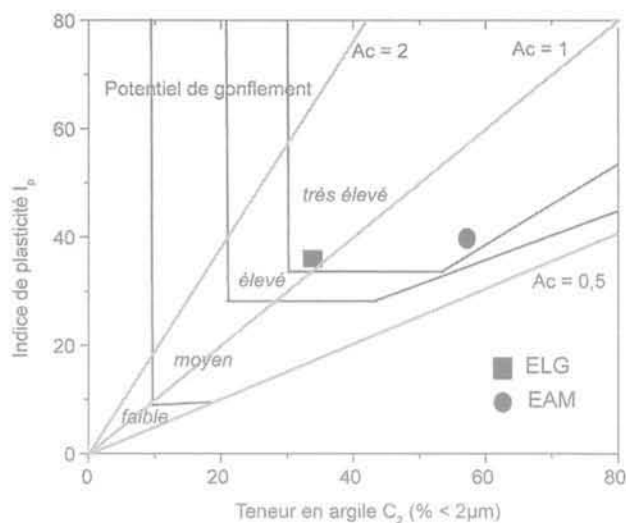


FIG. 5 Classification des potentiels de gonflement de Williams et Donaldson (1980).
Classification of swelling potential by Williams and Donaldson (1980).

3.2.2

Mesure de la pression de gonflement

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la pression de gonflement à l'œdomètre (Fig. 6).

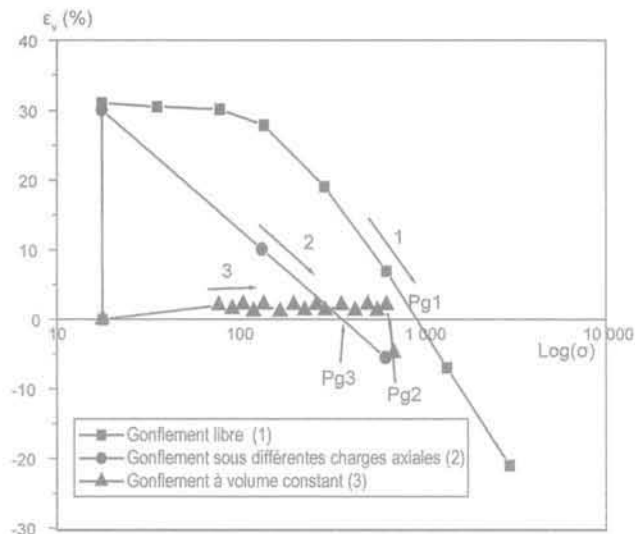


FIG. 6 Différentes procédures d'essais de pression de gonflement (Sridharan *et al.*, 1986).
Various procedures for swelling pressure.

- *Méthode de gonflement libre* : après la phase de gonflement libre sous faible charge (poids du piston), l'échantillon quasi saturé suit un chemin de chargement jusqu'à ce que son volume revienne à sa valeur initiale. La contrainte correspondante est la pression de gonflement (Jenning et Knight, 1957; Chen, 1988).

- *Méthode de volume constant* : la méthode de gonflement à volume constant est réalisé selon la norme

ASTM D 4546-90 (American Society for Testing and Materials). La tendance de l'échantillon à gonfler est neutralisée par l'application d'une charge croissante dès que le déplacement du comparateur atteint 1/100 mm. La valeur de la charge, lorsque l'échantillon est stabilisé, représente la pression de gonflement (Chen, 1988).

• *Méthode de gonflement sous différentes pressions*: appelée aussi essai de gonflement en parallèle ou encore essai gonflement-effondrement, elle consiste à placer plusieurs éprouvettes d'un même matériau dans différentes cellules œdométriques, chaque éprouvette étant chargée par une contrainte axiale constante après imbibition. Les résultats obtenus après stabilisation des déformations (gonflement ou tassement) sont représentés sous forme d'une courbe (en ordonnée les déformations et en abscisse les contraintes axiales). L'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses ou les déformations sont nulles représente la pression de gonflement (Philipponnat, 1991).

Dans cette étude, l'estimation de la pression de gonflement est faite suivant deux méthodes: la méthode de gonflement libre et la méthode de volume constant.

Pour la préparation des échantillons, les mêmes procédures que celles utilisées pour mesurer le gonflement libre sont adoptées en gardant les mêmes caractéristiques initiales des échantillons (hauteur, diamètre, densité sèche et teneur en eau).

3.3

Résultats

En ce qui concerne le potentiel de gonflement, la figure 7 montre l'évolution du gonflement libre (G %) en fonction du temps pour les deux sols. On constate qu'au début de l'imbibition les deux sols gonflent d'une manière similaire, mais que, par la suite, le sol de In-Aménas (EAM) présente un taux de gonflement plus important. Après 7 jours, les taux de gonflement sont de 20 % pour le sol de Laghouat (ELG) et d'environ 30 % pour le sol de In-Aménas (EAM). Ces résultats montrent le caractère gonflant des deux sols et confirment les constatations obtenues à l'aide des méthodes indirectes.

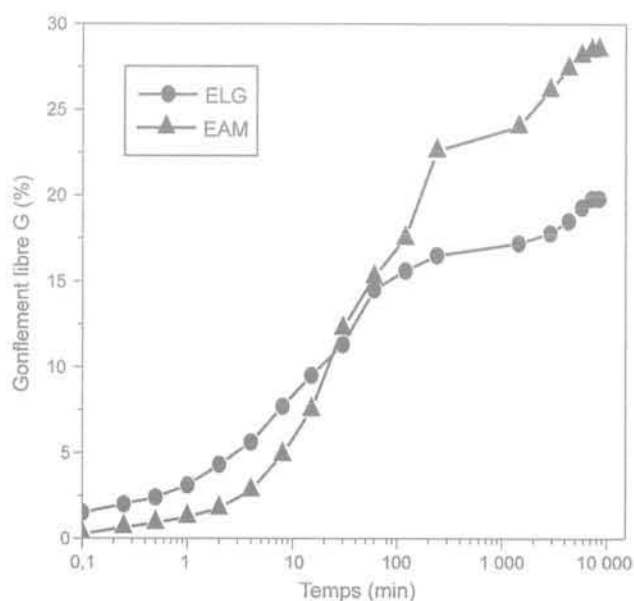


FIG. 7 Évolution du gonflement libre en fonction du temps.
Evolution of free swelling over time.

Les résultats des paramètres de gonflement (taux et pression de gonflement) sont résumés dans le tableau VI. On constate que les deux sols développent des pressions de gonflement très proches avec des valeurs un peu plus élevées pour le sol de In-Aménas. Par ailleurs, on note que la pression de gonflement obtenue par la méthode du gonflement libre est supérieure à celle obtenue par la méthode du volume constant et cela pour les deux sols. Ceci est en accord avec les résultats donnés par Sridharan *et al.*, 1986 (cité par Philipponnat, 1991). Cette différence est attribuée au frottement qui se développe pendant la phase de recompression de l'échantillon après gonflement libre.

TABEAU VI Résultats des paramètres de gonflement.
Results of swelling parameters.

	G (%)	Pg ₁ (kPa)	Pg ₂ (kPa)
Sol de Laghouat (ELG)	19,8	412,5	400
Sol de In-Aménas (EAM)	28,5	585	370

G % : Gonflement libre

Pg₁ : Pression de gonflement (méthode du gonflement libre).

Pg₂ : Pression de gonflement (méthode du volume constant).

4

Stabilisation des sols

Stabiliser un sol, c'est modifier certaines de ses propriétés en vue d'améliorer ses performances mécaniques. Il existe plusieurs techniques de stabilisation, parmi lesquelles la stabilisation par ajout de sable.

4.1

Stabilisation par ajout de sable

C'est vers les années 70 que des chercheurs ont commencé à étudier l'influence de l'ajout de sable sur les sols gonflants. L'emploi du sable comme matériau traitant est une technique relativement récente.

Pour l'étude de la stabilisation par ajout de sable de dune, les pourcentages de sable additionnés sont respectivement 15 %, 30 % et 45 %.

Les conditions d'essais utilisés pour mesurer le potentiel de gonflement sont les mêmes que celles utilisées auparavant ($w = 15\%$ et $\gamma_d = 18,2 \text{ kN/m}^3$).

Les méthodes utilisées pour la mesure de la pression de gonflement sont les mêmes que celles utilisées précédemment et qui sont la méthode du gonflement libre et la méthode du volume constant. Les échantillons sont préparés par le compactage statique avec les mêmes dimensions que celles utilisées pour la détermination du taux de gonflement. La figure 8 représente l'évolution, en fonction du temps, du taux de gonflement pour les différents mélanges argiles-sable.

Les résultats des essais sont résumés dans les tableaux VII et VIII. Ils montrent que :

– à faible pourcentage de sable ajouté (15 %), les particules de sable sont dispersées dans la masse argileuse. L'effet de l'ajout de sable sur la porosité est faible et, par conséquent, la réduction du gonflement n'est pas importante;

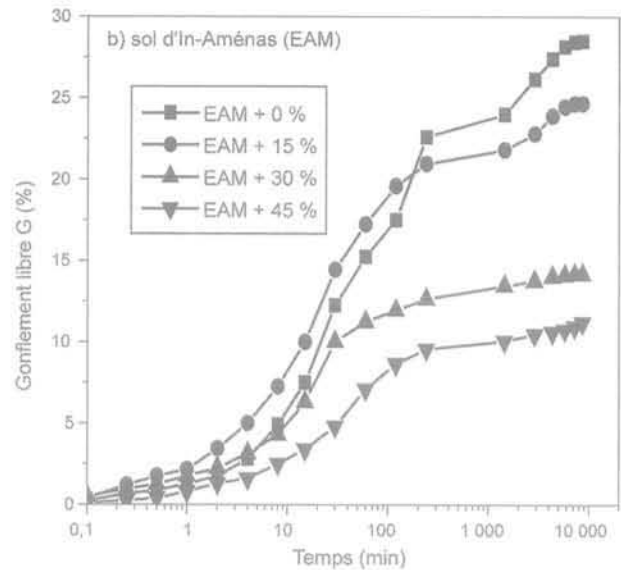
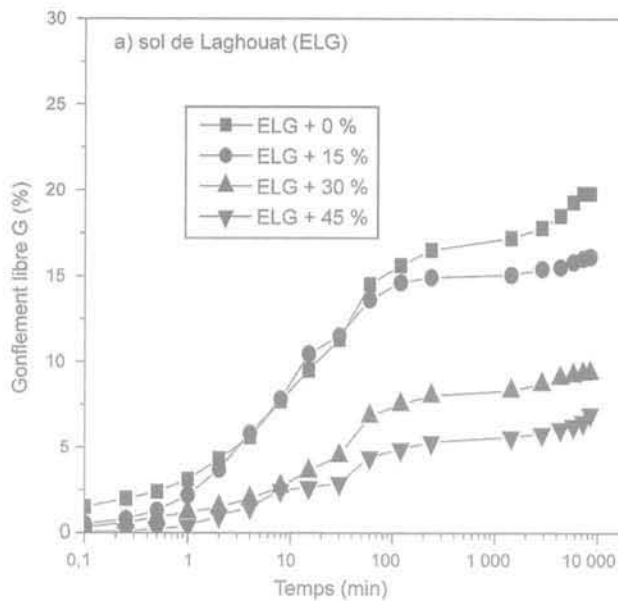


FIG. 8 Évolution du gonflement des mélanges argile-sable en fonction du temps.
Swelling evolution of clay-sand mixtures over time.

–à moyen et fort pourcentage de sable ajouté, la quantité de sable additionnée permet de créer des vides plus au moins importants à l'intérieur de la masse du sol, ce qui permet d'encaisser, au sein de la structure, les variations de volume engendrées par les particules argileuses, ce qui résulte à une réduction importante du potentiel de gonflement ;

–les résultats obtenus sont très encourageants et sont en bon accord avec ceux trouvés par Derriche *et al.* (1994) et Bengraa (2005). Le sable de dune peut être utilisé comme stabilisant pour ces sols expansifs.

avec :

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{G_0(\%) - G_p(\%)}{G_0(\%)} \quad \frac{\Delta P_g}{P_g} = \frac{P_{g_0} - P_{g_p}}{P_{g_0}}$$

TABLEAU VII Stabilisation par ajout de sable de dune (ELG).
Stabilisation by dune sand addition (ELG).

Pourcentage de sable de dune	Sol de Laghouat (ELG)					
	G (%)	$\Delta G/G$ (%)	P_{g_1} (kPa)	$\Delta P_{g_1}/P_{g_1}$ (%)	P_{g_2} (kPa)	$\Delta P_{g_2}/P_{g_2}$ (%)
0 %	19,8	Réduction	412,5	Réduction	4	Réduction
15 %	16,10	18,69	212,5	49,50	185	53,75
30 %	9,35	52,78	125	69,70	100	75,00
45 %	6,95	65	50	87,80	42	89,50

TABLEAU VIII Stabilisation par ajout de sable de dune (EAM).
Stabilisation by dune sand addition (EAM).

Pourcentage de sable de dune	Sol de In-Aménas (EAM)					
	G (%)	$\Delta G/G$ (%)	P_{g_1} (kPa)	$\Delta P_{g_1}/P_{g_1}$ (%)	P_{g_2} (kPa)	$\Delta P_{g_2}/P_{g_2}$ (%)
0 %	28,5	Réduction	585	Réduction	370	Réduction
15 %	24,65	13,51	325	44,45	250	32,43
30 %	14,15	50,35	155	73,50	130	64,87
45 %	11,2	60,71	90	82,90	70	81,10

G_0 et P_g sont respectivement le gonflement et la pression de gonflement de l'argile sans ajout.

G_p et P_{g_p} gonflement et pression de gonflement de l'argile + sable à un pourcentage égale à « p ».

4.2

Stabilisation combinée (sable + sel)

A partir des résultats de Bengraa (2005) pour la stabilisation des sols expansifs de la région d'Oran (Sidi Chahmi et Mers el-Kebir) par ajout de différents types de sables (rivière, carrière et plage), on a constaté que le sable de plage représente un bon stabilisant pour les sols expansifs. La réduction du potentiel et de la pression de gonflement peut aller jusqu'à environ 85 % pour 40 % de sable de plage ajouté. En revanche, pour le même pour-

centage de sable additionné, le sable de rivière et le sable de carrière entraînent des réductions d'environ 52 % et 60 % respectivement (Tableau IX).

TABEAU IX Gonflement final et relatif de tous les sols (Bengraa 2005).
Final and relative swelling of all soils (Bengraa 2005).

		0 % 40 %	S.RV 40 %	S.PL 40 %	S.CR
Sidi Chahmi	G (%)	26,3	12,4	3,8	10,3
	$\Delta G/G$	0	52,9	85,6	60,8
Mers el-Kebir	G (%)	21,2	8	2,9	7,8
	$\Delta G/G$	0	62,3	86,3	63,2

S.RV : sable de rivière.
S.PL : sable de plage.
S.CR : sable de carrière.

L'examen des courbes granulométriques des trois sables (Fig. 9), montre que le sable de plage est plus fin que le sable de carrière. Or, la figure 10 montre que l'ajout du sable de plage (non lavé) réduit d'une manière plus importante le potentiel de gonflement que le sable de carrière, ce qui est en contradiction avec les résultats reportés dans les références bibliographiques, pour le même pourcentage additionné, plus le sable est grossier plus le taux de réduction de gonflement est élevé (Satyanarayana, 1969; Didier, 1972; Suratman, 1985). Ceci peut s'expliquer par le fait que le sable de plage contient des sels, et que le processus de stabilisation est assuré par la combinaison sel + sable. Dans ce contexte, nous avons envisagé de procéder à une stabilisation combinée par l'hydratation des mélanges argiles-sable de dune avec une solution saline (eau distillée + NaCl).

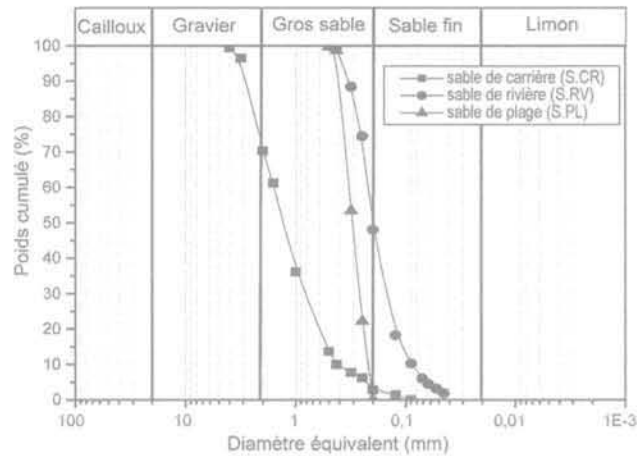


FIG. 9 Courbes granulométriques des trois sables (Bengraa, 2005).
Grain size distribution of three sands (Bengraa, 2005).

En premier lieu, on a étudié l'effet du sel sur les paramètres de gonflement. Les deux argiles (ELG) et (EAM) sont hydratées par une solution saline à différentes concentrations : 0,1 M; 0,5 M et 1,5 M (M est la molalité de la solution saline ; M = mole/litre). Par la suite, l'effet de l'association du sable de dune à la solution saline (sable + sel) sur le potentiel de gonflement est considéré. Les combinaisons (sable + sel) sont les suivantes :

0,1 M + 15 % ; 0,1 M + 45 % ; 1,5 M + 15 %
et 1,5 M + 45 %.

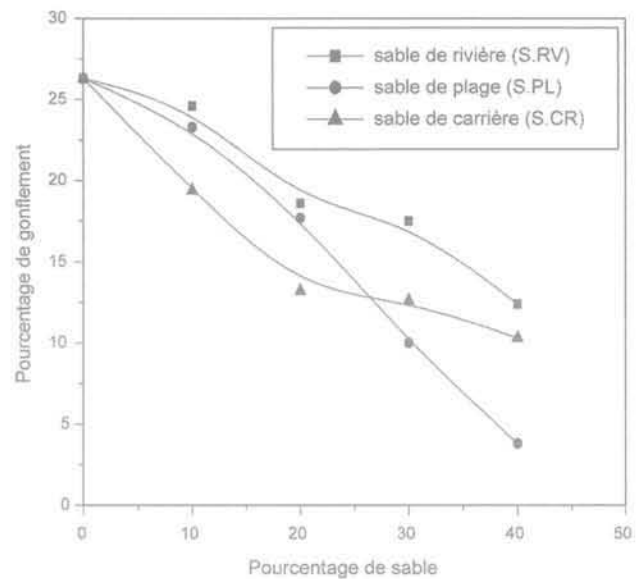


FIG. 10 Influence de l'ajout de sable sur le gonflement libre, argile de la région d'Oran (Sidi Chahmi) (Bengraa, 2005).
Effect of sand addition on the free swelling, clay of Oran region (Bengraa, 2005).

On constate, pour les deux sols, que le taux de réduction du potentiel de gonflement par la solution saline est proportionnel à la concentration en sel (Fig. 11). Pour une faible concentration (0,1 M), la réduction du taux de gonflement est uniquement de 17,68 % et de 10 à 20 % pour la pression de gonflement. Pour une forte concentration (1,5 M), la réduction du taux de gonflement est de 51,26 % et plus de 80 % pour la pression de gonflement. Les résultats sont indiqués sur les tableaux X et XI.

On peut conclure que le sel (NaCl) est plus efficace pour réduire la pression de gonflement que le taux de gonflement. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats obtenus par Abou Baker *et al.* (2004).

En ce qui concerne la stabilisation combinée, où le mélange argile-sable est hydraté par une solution saline, les résultats de ce processus de stabilisation sont indiqués dans les tableaux XII et XIII, on constate que :

- pour l'addition d'un faible pourcentage de sable de dune (15 %) aux sols, puis hydratation de ce mélange par une solution saline de faible concentration (0,1 M), la réduction des paramètres de gonflement est importante (de l'ordre de 65 % pour le taux de gonflement et 63 % pour la pression de gonflement) ;
- avec l'ajout de quantités faibles de sable (15 %) et l'hydratation par des solutions salines à différentes concentrations, les résultats de stabilisation sont très satisfaisants ;
- pour un pourcentage élevé de sable de dune (45 %) et par l'hydratation du mélange argile-sable avec une solution saline de forte concentration (1,5 M), la réduction des paramètres de gonflement est de l'ordre de 95 %.

On peut conclure que la méthode de stabilisation combinée (sable + sel) donne de meilleurs résultats que ceux obtenus en utilisant uniquement le sable ou le sel (Fig. 12).

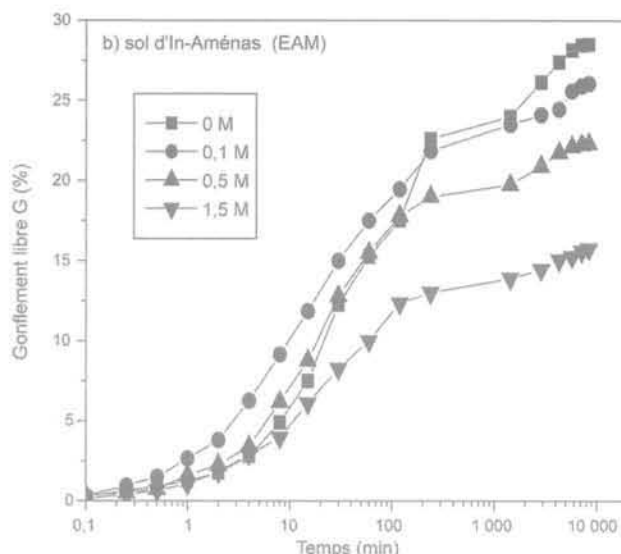
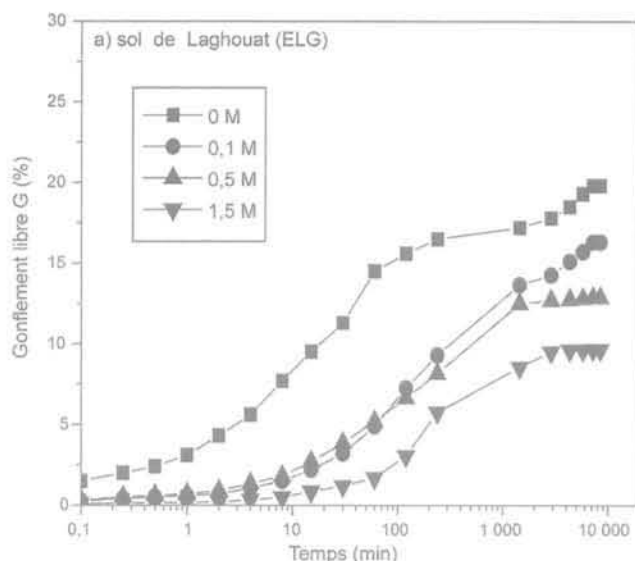


FIG. 11. Évolution du gonflement libre en fonction du temps (sable + solution saline NaCl). Free swelling evolution over time (sand + NaCl).

TABLEAU X. Stabilisation par hydratation avec la solution saline (ELG). Stabilisation by wetting with saline solution (ELG).

Concentration en NaCl (mole/litre)	Sol de Laghouat (ELG)					
	G (%)	$\Delta G/G$ (%)	P_{g_1} (kPa)	$\Delta P_{g_1}/P_{g_1}$ (%)	P_{g_2} (kPa)	$\Delta P_{g_2}/P_{g_2}$ (%)
0 %	19,8	Réduction	412,5	Réduction	400	Réduction
0,1	16,3	17,68	380	7,88	320	20
0,5	12,85	35,10	170	58,78	130	67,5
1,5	9,65	51,26	62,5	84,77	75	81,25

TABLEAU XI. Stabilisation par hydratation avec la solution saline (EAM). Stabilisation by wetting with saline solution (EAM).

Concentration en NaCl (mole/litre)	Sol de In-Aménas (EAM)					
	G (%)	$\Delta G/G$ (%)	P_{g_1} (kPa)	$\Delta P_{g_1}/P_{g_1}$ (%)	P_{g_2} (kPa)	$\Delta P_{g_2}/P_{g_2}$ (%)
0 %	28,5	Réduction	585	Réduction	370	Réduction
0,1	26,05	8,6	420	28,20	330	10,81
0,5	22,3	21,75	255	56,41	155	58,11
1,5	15,75	44,74	150	74,36	50	86,49

TABLEAU XII. Stabilisation combinée (sable de dune + sel) (ELG). Combined stabilisation (dune sand + salt) ELG.

Solution saline + sable de dune	Sol de Laghouat (ELG)					
	G (%)	$\Delta G/G$ (%)	P_{g_1} (kPa)	$\Delta P_{g_1}/P_{g_1}$ (%)	P_{g_2} (kPa)	$\Delta P_{g_2}/P_{g_2}$ (%)
0 %	19,8	Réduction	412,5	Réduction	400	Réduction
0,1 M + 15 %	6,8	65,66	160	61,21	140	65
0,1 M + 45 %	1,75	91,16	90	78,18	70	82,5
1,5 M + 15 %	5,6	71,71	30	92,73	15	96,25
1,5 M + 45 %	0,6	96,97	16	96,12	4	99

TABEAU XIII Stabilisation combinée (sable de dune + sel) (EAM).
Combined stabilisation (dune sand + salt) EAM.

Solution saline + sable de dune	G (%)	$\Delta G/G$ (%)	P_{g1} (kPa)	$\Delta P_{g1}/P_{g1}$ (%)	P_{g2} (kPa)	$\Delta P_{g2}/P_{g2}$ (%)
0 %	28,5	Réduction	585	Réduction	370	Réduction
0,1 M + 15 %	9,12	68	205	64,95	145	60,81
0,1 M + 45 %	6,85	92,63	110	81,2	80	78,38
1,5 M + 15 %	2,1	75,97	65	88,89	45	87,84
1,5 M + 45 %	1,5	94,74	35	94,02	15	95,95

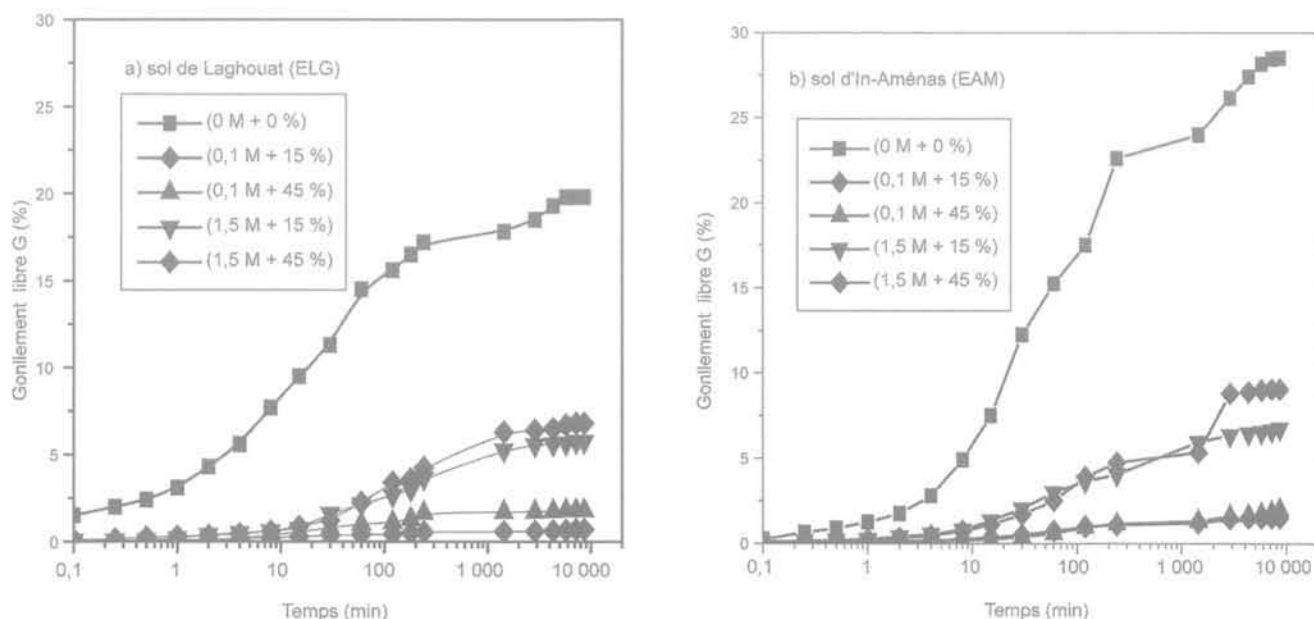


FIG. 12 Évolution du gonflement libre en fonction du temps (sable + solution saline NaCl).
Free swelling evolution over time (sand + NaCl).

5

Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la stabilisation des sols gonflants par ajout de sable de dunes. Une technique de stabilisation combinée (sable + sel) est également présentée.

Les études qui ont été menées (minéralogie, essais d'identification et essais de gonflement) ont confirmé le caractère gonflant des deux sols étudiés. L'argile de In-Aménas possède un potentiel de gonflement plus élevé que celui de l'argile de Laghouat.

La stabilisation par ajout de sable de dunes devient significative pour des pourcentage au-delà de 30 % de la masse du sol stabilisé. Par ailleurs, la stabilisation chimique par une solution saline à base de NaCl semble

moins efficace : pour une forte concentration (1,5 M), la réduction du potentiel de gonflement est environ de 50 %. En revanche, la stabilisation combinée (association sel + sable) donne une réduction très significative des paramètres de gonflement pour les deux sols traités.

Cette solution est d'autant plus attractive que :

- le problème de lessivage rencontré dans les processus de stabilisation par les sels a proscrit l'utilisation d'une trop forte quantité de sel ;
- la quantité de sable seul à ajouter aux sols gonflants pour aboutir à une réduction satisfaisante du potentiel de gonflement serait également trop importante ;
- ces deux matériaux locaux (sable et sel) sont largement disponibles au niveau de la région à des prix raisonnables.

La technique de stabilisation combinée (sable + sel) s'impose donc comme une alternative efficace et économique pour le traitement des argiles gonflantes.

- Aboubeker N., Sidi Mohamed A.M. – Stabilisation des sols gonflants par les sels. *Géo-Beyrouth 2004*, p. 415-422.
- Bengraa L., Hachichi A., Bourokba S., Benaïssa A. – Étude de la stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable. *2^{es} Journées d'études sur les sols gonflants*, Tlemcen (Algérie) 13-14 nov. 2005, p. 101-112.
- Chen F.H. – *Foundations on expansive soil*. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 54, Elsevier Publishing Co. Amsterdam, 1988, 464 p.
- Derriche Z., Kebaili M. – Prédiction du gonflement des argiles d'In-Aménas. *Bulletin de liaison des LPC*, n° 218, novembre-décembre, 1998, p. 15-23.
- Didier G. – *Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites, sa prévision*. Thèse de docteur ingénieur, université Claude-Bernard, Lyon, 1972.
- Hachichi A., Fleureau J.-M. – Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. *Revue française de géotechnique*, n° 86, 1999, p. 37-51.
- Hachichi A., Benaïssa A., Bourokba S., Boudia M. – Étude de la stabilisation chimique des sols gonflants de la région d'Oran. *Proc. 13th CRA L'implication de la géotechnique dans le développement des infrastructures en Afrique*, Marrakech. (Maroc), 8-11 déc. 2003, p. 371-379.
- Holtz W.G., Gibbs H.J. – Engineering properties of expansive soils. *Trans. of ASCE*, vol. 121, 1956, p. 641-679.
- Holtz W.G., Gibbs H.J. – *Introduction à la géotechnique*. Édition de l'École de polytechnique de Montréal, Canada, 1991, trad. J. Lafleur, 794 p.
- Jennings J.E., Knight ?? – The prediction of amount and rate of heave likely to be experienced in engineering construction on expansive soils. *2nd IRECECS*, Texas, 1957, p. 98-112.
- Kaoua F., Derriche Z., Laradi N. – Contribution à l'étude de la stabilisation des sols gonflants par ajout de sable. *Revue technique de l'École nationale des travaux publics, Algérie Équipement*, n° 15, septembre 1994, p. 12-15.
- Lamara M., Merah A. – Analyse d'un cas pathologique de gonflement de sol rencontré de l'université de Laghouat. *Journées d'études sur les sols gonflants*, Tlemcen (Algérie) 27-28 oct. 2002, p. 101-110.
- Lamara M., Gueddouda M.K., Goual I. – Stabilisation des sols gonflants par ajout de sable de dune, cas région de Laghouat. *2^{es} Journées d'études sur les sols gonflants*, Tlemcen (Algérie) 13-14 nov. 2005, p. 129-139.
- Louafi B. – *Stabilisation d'une bentonite par ajout de sable*. *Interaction sol-matériau d'amendement*. Thèse de magistère, université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, 1997, 115 p.
- Philipponnat G. – Retrait gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Revue française de géotechnique*, n° 57, 1991, p. 5-22.
- Satyanarayana B., Ranganatham ?? – A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. *Proc. of the 6th ICSMFE*, Montréal, 1965.
- Satyanarayana B. – Behaviour of expansive soil treated on cushioned with sand. *Proc. of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive clay soils*, Texas, 1969.
- Seed H.B., Woodward R.J., Lundgren R. – Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division ASCE*, vol. 88, n° SM4, 1962, p. 107-131.
- Skempton A.W. – The colloidal activity of clays. *Proc. of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, vol. 1, 1953, p. 57-61.
- Snethen D.R., Johnson L.D., Patrick D.M. – *An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils*. Federal Highway Administration, Washington D.C. June, 1977, report, FHWA RD-77-94.
- Suratman I. – *Contribution à l'étude de la cinétique et de la stabilisation du gonflement des argiles*. Diplôme de docteur ingénieur, INSA de Lyon (France), 1985.
- Sridaharan A., Rao A.S., Sivapullalah P.V. – Swelling pressure of clays. *Geotech. Test. JGTJDDJ*, vol. 9, n° 1, 1986, p. 24-33.
- Tas M. – *Influence des procédures expérimentales sur l'estimation en laboratoire des paramètres de gonflement des argiles expansives*. Thèse de magistère, École nationale polytechnique, Alger (Algérie), 1992, 148 p.
- Tran Ngoc Lan – Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassements routiers. *Bulletin de liaison des LPC*, 111, 1981, p. 5-16.
- Williams A.B., Donaldson G.W. – Developments related to building on expansive soils in South Africa: 1973-1980. *Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils*, Denver, vol. 2, 1980, p. 834-844.