

IBRAHIM ALIMI-ICHOLA, GERARD DIDIER*

Stabilisation à la chaux d'argiles gonflantes et de limon en vue de leur réutilisation dans le domaine routier

1. Introduction

Lors de la réalisation d'une chaussée, la recherche des matériaux nobles, présentant une bonne portance et une tenue à l'eau est un impératif pour le constructeur. Lorsque le tracé traverse des zones où il y a des affleurements de sols expansifs, il est recommandé de prendre des dispositions pour prévenir les désordres inhérents à ces sols.

Souvent un important terrassement est nécessaire pour garantir la viabilité de la chaussée. D'importants déblais sont alors envoyés à la décharge. Le coût de ces opérations de préparation amène le projeteur à rechercher les conditions de réutilisation de ces sols de mauvaises qualités.

La stabilisation de ces sols et à l'eau et à la chaux est une des techniques préconisées pour les améliorations. Cette technique qui est connue depuis des millénaires, apporte aux sols jugés inutilisables à cause de leur faible résistance et surtout de la chute de celle-ci lors de la venue d'eau, les propriétés nécessaires pour la tenue des ouvrages envisagés. Lorsque le sol présente des aptitudes au gonflement, cette amélioration doit rechercher la réduction importante de son taux de gonflement.

Afin de définir les conditions d'utilisation de tels sols, nous avons étudié en laboratoire, l'évolution dans le temps, des mélanges sol, chaux et eau pour différents pourcentages de chaux. Les paramètres retenus pour caractériser cette évolution, sont

*I. ALIMI-ICHOLA, G. DIDIER, Laboratoire Géotechnique INSA de Lyon, 20 Avenue Albert Einstein 69621 Villeurbanne Cedex.

les limites d'Atterberg, la valeur de bleu (quantité de bleu adsorbée par 100 g de sol), l'indice CBR et la résistance à la compression simple.

2. Caractéristiques des sols étudiés

2.1. Propriétés physico-chimiques

Les sols utilisés pour évaluer l'influence de la chaux sont une argile de Berrechid, une argile de Sidi Kacem et un limon de Marrakech. Ces sols qui présentent une certaine aptitude au gonflement, diffèrent par le taux de gonflement qu'on obtient sur un échantillon compacté et par le pourcentage des inférieurs à 2μ . D'après leurs limites d'Atterberg indiquées sur le tableau I, les argiles de Berrechid et de Sidi Kacem

Tableau I

Caractéristiques physico-chimiques

Sols	$W_L\%$	$I_p\%$	$\% < 80\mu$	$\% < 2\mu$	VB	$CO_3Ca\%$	A_{cB}
Argile de Berrechid	74	53	53	27	7,5	25	27
Argile de Sidi Kacem	58	26	86	57	8,5	15	15
Limon de Marrakech	36	15	40	10	1	29	10

sont des argiles marneuses très plastiques et le limon qui se trouve dans le domaine des argiles peu plastiques, est un limon calcaire peu actif au sens de Skempton. Les activités définies selon Lautrin (1989), par $A_{cB} = \frac{100VB}{\% < 2\mu}$, de ces sols montrent que les deux argiles sont classées nocives ($(\% < 2\mu) > 10, A_{cB} > 12$) et le limon actif ($(\% < 2\mu) < 30, 8 < A_{cB} < 13$).

2.2. Propriétés mécaniques

Sur le tableau II, nous avons rassemblé les caractéristiques de résistance de ces sols après compactage. Les trois sols présentent un indice CBR à l'optimum modifié acceptable lorsqu'ils ne sont pas imbibés. Mais cet indice chute de manière désastreuse pour les deux argiles lorsqu'elles sont imbibées. Ceci s'explique par le gonflement de ces deux argiles dont les taux de gonflement sont respectivement de 14% pour l'argile de Berrechid et de 9% pour l'argile de Sidi Kacem lors de l'imbibition. La résistance à la compressions simple des trois sols est relativement faible.

Tableau II

Caractéristiques mécaniques

Sols	γ_{OPN} [kN/m ³]	W_{OPN} %	γ_{OPM} [kN/m ³]	W_{OPM} %	CBR immédiat	CBR imbibé	R_C [kPa]
Argile de Berrechid	14,25	20,4	16	19,5	47	6	243
Argile de Sidi Kacem	15,4	24	17,4	19,7	69	3	350
Limon de Marrakech	17,5	17,5	19	13,5	54	39	203

Nos essais de stabilisation ont été réalisés à l'aide d'une chaux disponible dans la région dont les caractéristiques sont les suivantes:

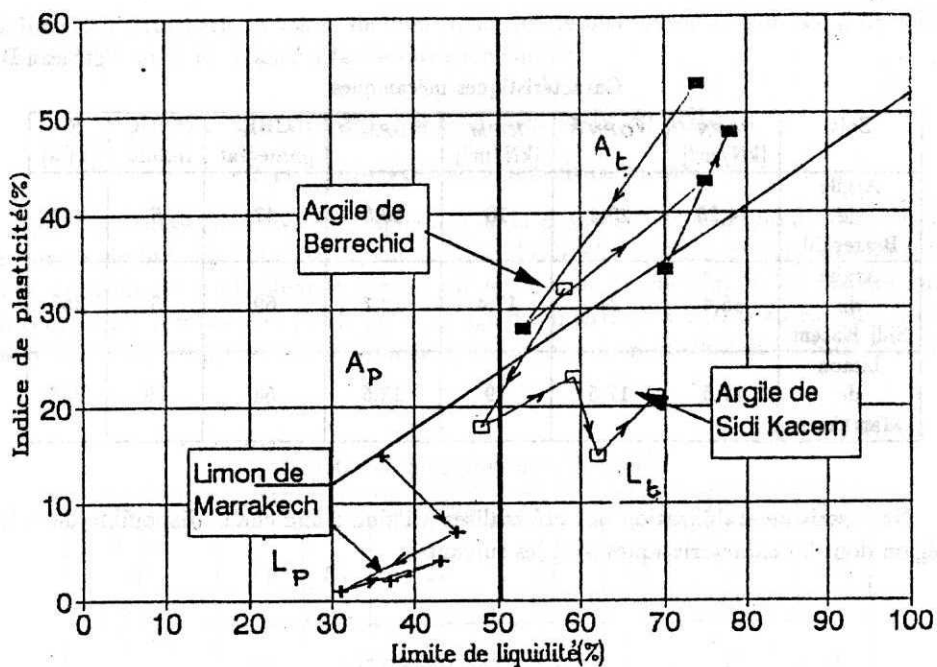
Ca (OH) ₂	48%
CaO	36,5%
PH	12,45
VB	3
% < 80 μ	50

3. Evolution des propriétés physico-chimiques

3.1. Evolution de la consistance des sols traités

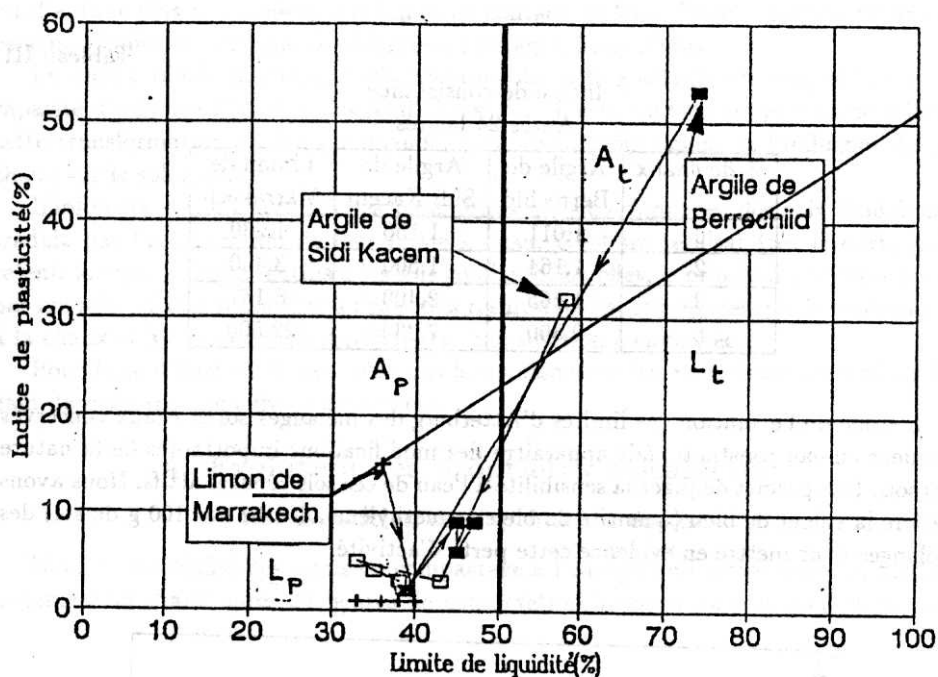
L'évolution des paramètres physico-chimiques est suivie pendant 60 jours. Nous avons noté sur le diagramme de Casagrande l'évolution simultanée de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité pendant 60 jours pour une teneur en chaux de 2% et de 6%. On remarque, (Fig. 1 et Fig. 2), que les argiles qui sont très plastiques à l'état naturel, voient leur consistance évoluer vers celle d'un limon très plastique, tandis que le limon dont la consistance est celle d'une argile peu plastique évolue vers un limon peu plastique. Nous constatons ainsi, que l'ajout de la chaux réduit la consistance des sols fins.

Pour traduire cette évolution de la consistance, nous avons calculé l'indice de consistance définie par $I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$, en prenant pour teneur en eau de référence (w), la teneur en eau à l'optimum Proctor normal du sol non traité. On remarque que cet indice augmente avec le pourcentage de chaux ajouté au sol. D'après la classification de Terzaghi, ces sols gonflants deviennent de moins en moins sensible à l'eau grâce à l'ajout de la chaux.



LIMITES D'ATTERBERG 2% DE CHAUX						
Temps(jours)	BERRECHID		LIMON DE MARRAKECH		SIDI KACEM	
	WL	Ip	WL	Ip	WL	Ip
0	74	53	45	15	58	32
1	53	28	31	7	48	18
7	75	43	43	1	59	23
28	70	34	37	4	62	15
60	78	48	38	2	69	25

Fig. 1. Variation des limites d'Atterberg pendant 60 jours
Teneur en chaux: 2%



LIMITES D'ATTERBERG 6% DE CHAUX						
Temps(jours)	BERRECHID		LIMON DE MARRAKECH		SIDI KACEM	
	WL	Ip	WL	Ip	WL	Ip
0	74	53	36	15	58	32
1	39	2	40	1	27	3
7	45	9	33	1	33	5
28	45	6	38	1	35	5
60	47	9	36	1	38	4

Fig. 2. Variation des limites d'Atterberg pendant 60 jours

Teneur en chaux: 6%

Tableau III

Indice de consistance
Après 24 heures

% de chaux	Argile de Berrechid	Argile de Sidi Kacem	Limon de Marrakech
0	1,011	1,156	1,230
2	1,164	1,500	3,430
3	1,565	2,400	8,167
6	9,300	7,330	22,500

L'étude de l'évolution des limites d'Atterberg des mélanges sol et chaux conservés à teneur en eau constante, fait apparaître des modifications importantes de la nature des sols. Elle permet de juger la sensibilité à l'eau de ces sols réputés actifs. Nous avons mesuré la valeur de bleu (quantité de bleu de méthylène adsorbé par 100 g de sol) des mélanges pour mettre en évidence cette perte d'activité.

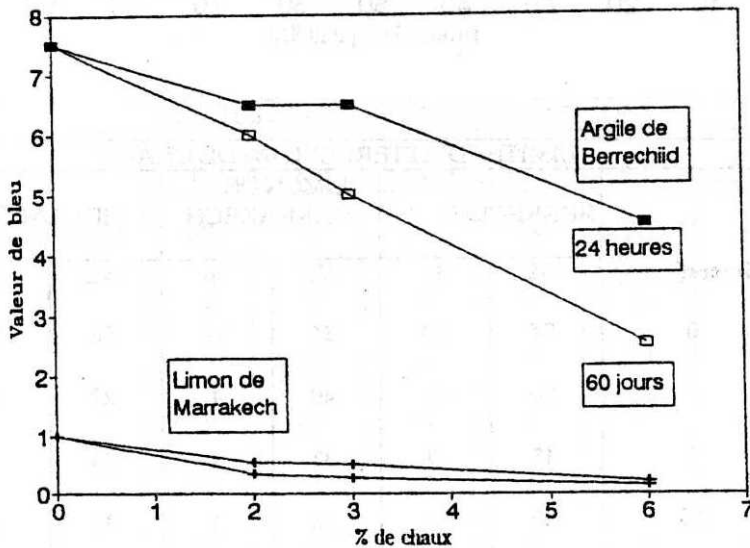


Fig. 3. Variation de la valeur de bleu avec teneur en chaux

3.2. Evolution de la valeur de bleu

Nous représentons sur la figure 3 l'évolution de la valeur de bleu avec la quantité de chaux ajoutée, après 24 heures et 60 jours de contact. Nous remarquons, à la différence de limites d'Atterberg, une diminution continue de la valeur de bleu. Cette diminution

est d'autant plus accentuée que le temps de contact est long. Cette évolution confirme celle de l'indice de consistance observée au paragraphe ci-dessus.

La chaux réduit la capacité d'adsorption des sols gonflants étudiés, réduit leur capacité d'échange d'ion donc les rend plus stable. L'essai au bleu qui permet de suivre cette transformation est à recommander pour le contrôle rapide de l'influence de la chaux sur le sol à traiter.

L'influence de la chaux sur les paramètres physico-chimiques des sols étudiés se traduit par l'amélioration de leur tenue à l'eau. C'est un résultat très important à retenir lorsqu'on désire réutiliser les sols gonflants. En effet, le principal problème posé par ces sols est leur sensibilité à l'eau. Ces résultats laissent présager que le traitement à la chaux et à l'eau des sols gonflants est une solution à envisagée.

Pour la réutilisation de ces sols dans le domaine routier, nous devons examiner le gain de résistance qu'offre ce traitement.

4. Evolution des propriétés mécaniques

4.1. Evolution de l'optimum Proctor

Nous avons réalisé des essais de compactage à l'énergie de Proctor modifié, sur les mélanges sol-chaux après 24 heures de conservation à teneur en eau constante. Ces

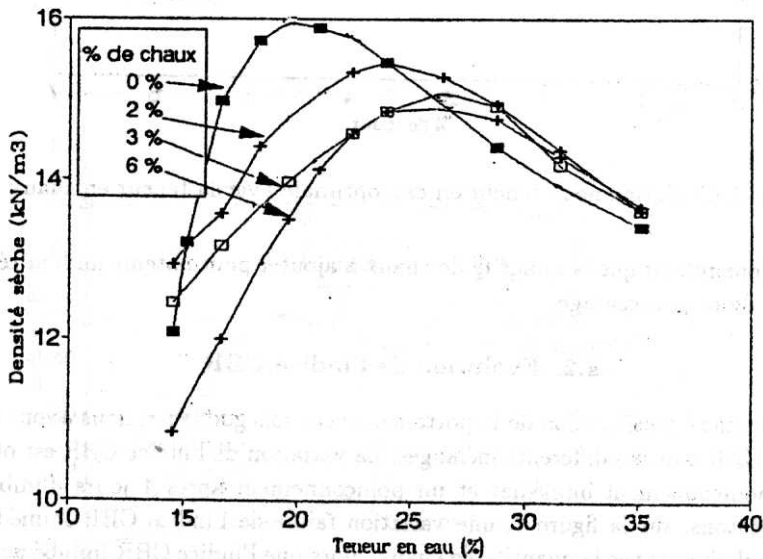


Fig. 4. Courbes Proctor à différentes teneur en chaux

essais nous permettent de voir l'évolution de la densité sèche maximale en fonction de la quantité de chaux ajoutée. Les différentes courbes Proctor tracées sur la figure 4 nous permettent de faire les remarques suivantes:

- l'ajout de la chaux abaisse la densité sèche maximale
- la teneur en eau optimale augmente

Il est possible de compacter les mélanges à des teneurs en eau plus élevées et atteindre des densités sèches acceptables. Les figures 5 et 6 montrent que cette évolution de l'optimum avec la quantité de chaux se stabilise; à partir de 3% pour les sols étudiés.

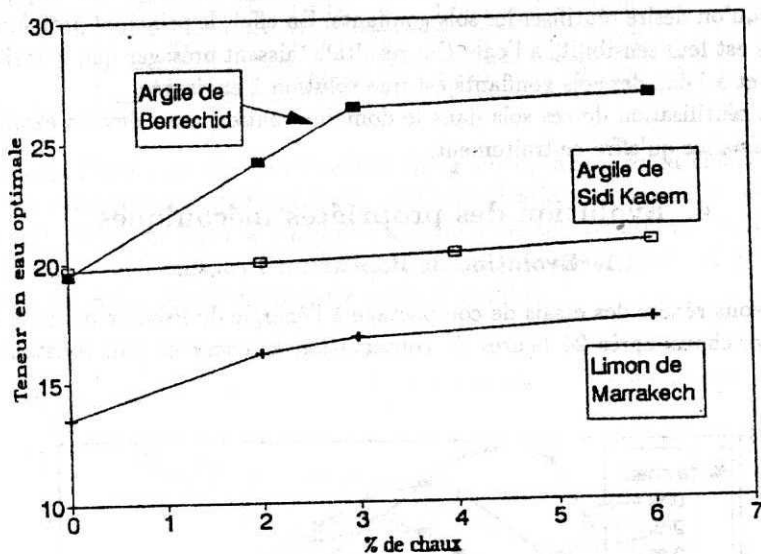


Fig. 5. Evolution de la teneur en eau optimale avec la teneur en chaux

Nous pouvons retenir que la quantité de chaux à ajouter pour obtenir un bon résultats est voisine de ce pourcentage.

4.2. Evolution de l'indice CBR

Pour évaluer l'amélioration de la portance de ces sols gonflants, nous avons réaliser des essais CBR avec les différents mélanges. La variation de l'indice CBR est observée pour un poinçonnement immédiat et un poinçonnement après 4 jours d'imbibition. Nous constatons, sur la figure 7, une variation faible de l'indice CBR immédiat des mélanges sol-chaux avec la quantité de chaux, alors que l'indice CBR imbibé augmente progressivement. Les valeurs obtenues après imbibition sont remarquables; entre 40 et 80. On peut noter l'influence primordiale du temps de contact sur l'indice CBR. Lorsqu'on réalise le poinçonnement après 28 jours de conservation à l'air ou dans l'eau, les valeurs atteignent 200. De telles valeurs de l'indice CBR n'ont plus de signification pour les chaussées souples. On préconise alors la détermination de la résistance à la compression simple pour le dimensionnement de la chaussée.

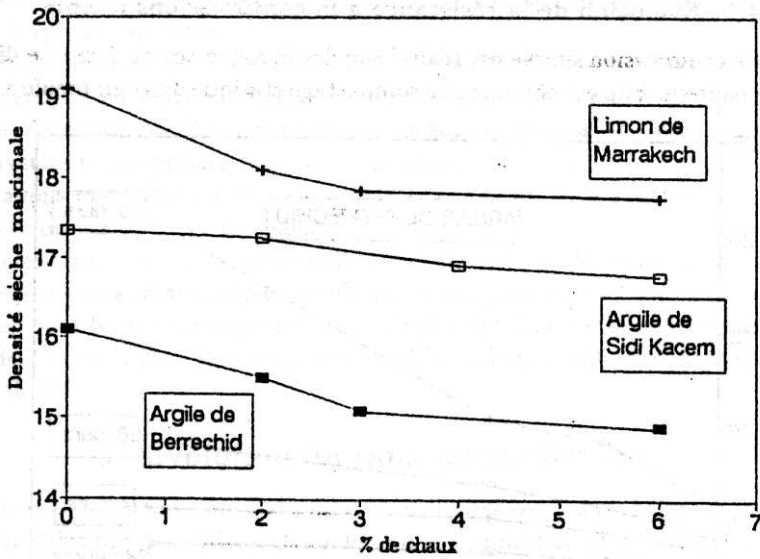


Fig. 6. Evolution de densité sèche maximale avec la teneur en chaux

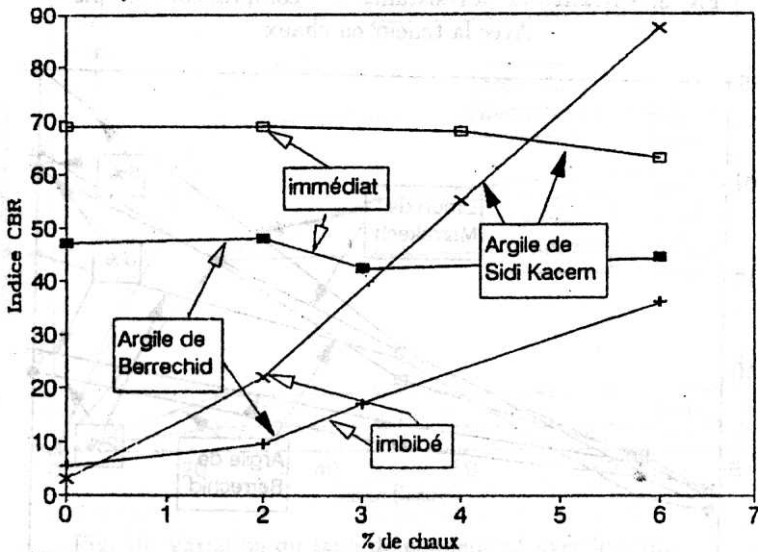


Fig. 7. Variation de l'indice CBR avec la teneur en chaux

4.3. Evolution de la résistance à la compressions simple

L'essai de compression simple est réalisé sur des éprouvettes de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Elle est obtenue par compactage statique dans un moule à double effet.

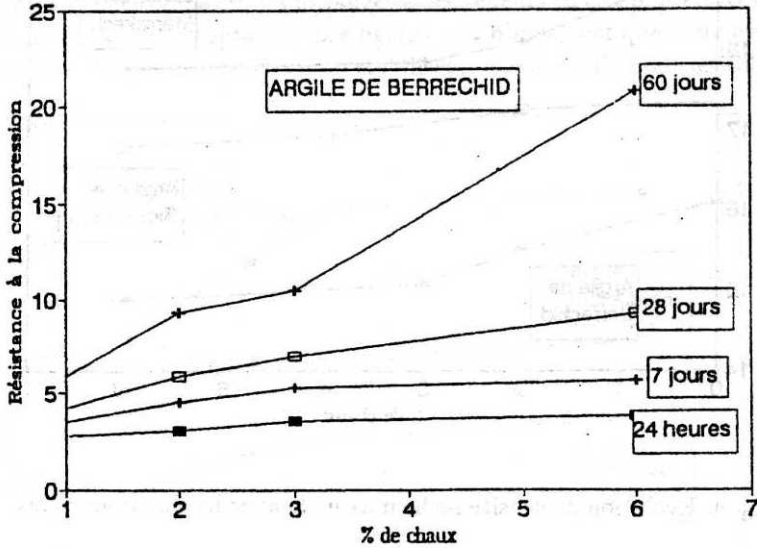


Fig. 8. Variation de la résistance à la compressions simple Avec la teneur en chaux

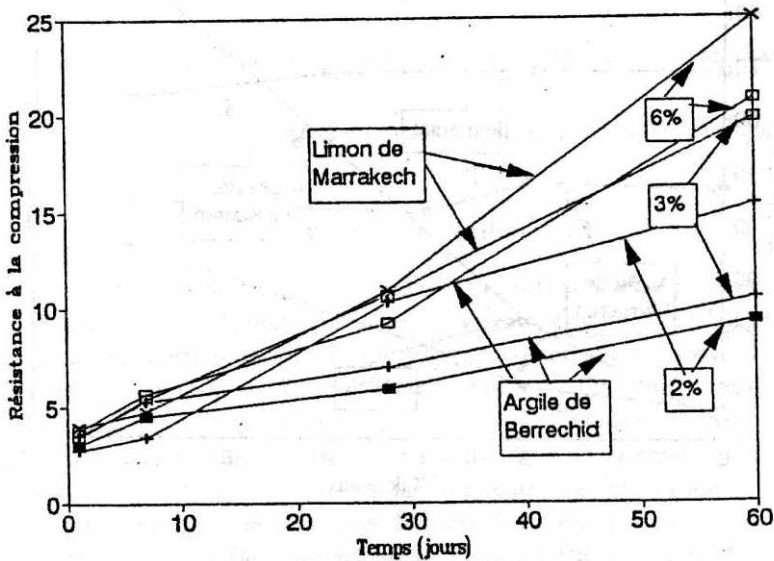


Fig. 9. Variation de la résistance à la compressions simple Avec le temps

La densité et la teneur en eau est à l'optimum Proctor modifié. La compression s'effectue à vitesse constante.

Nous comparons ici, les éprouvettes conservées à l'air mains emballées pour éviter le dessèchement. En effet, les éprouvettes ne peuvent être conservées dans l'eau qu'après 7 jours de conservation à l'air teneur en eau constante. Nous avons observé le délitage des éprouvettes plongées dans l'eau avant ce délai.

Nous avons rassemblé sur les figures 8 et 9 l'évolution de la résistance en fonction du temps et du pourcentage de chaux.

Nous constatons une augmentation de la résistance avec la pourcentage de chaux. Cet accroissement est d'autant plus rapide que le temps de contact est important. Nous constatons, pour les pourcentages de chaux ajoutés, que la résistance double de valeurs au bout de 7 jours et atteint une valeur de 2 MPa au bout de 60 jours avec une teneur en chaux de 6%.

5. Evolution du taux de gonflement

L'étude du gonflement a été réalisée sur les mélanges compactés à l'optimum Proctor modifié, dans les moules CBR. Les moules ont été immédiatement plongés dans l'eau après leur préparation. Le gonflement a été noté tous les 24 heures pendant 4 jours. Nous présentons sur la figure 10, l'évolution du taux de gonflement avec le temps pour les différentes teneurs en chaux. Les observations effectuées nous permet de constater

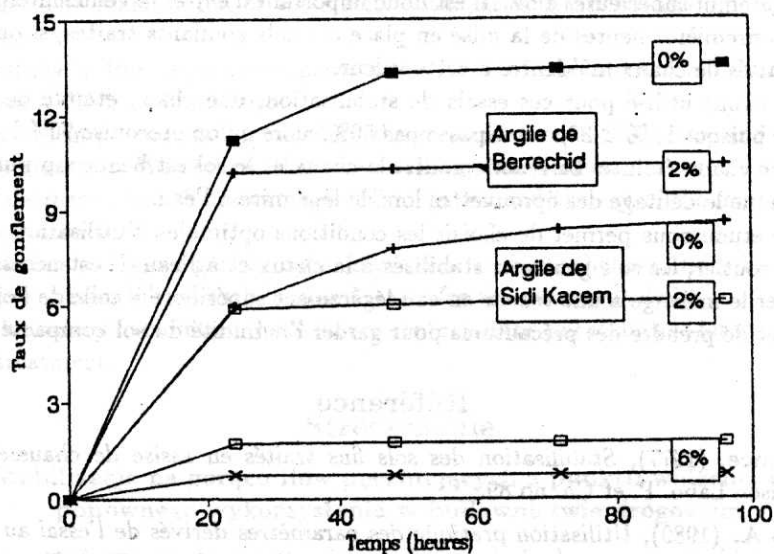


Fig. 10. Variation du taux de gonflement avec le temps

la réduction du taux de gonflement. Cette réduction immédiate du gonflement devient importante quand la quantité de chaux augmente. Pour les deux argiles traitées à 2% de chaux, la réduction du gonflement à 96 heures est de l'ordre de 3% mais le taux de

gonflement reste encore élevé. Il devient inférieur à 3% lorsque la quantité de chaux ajoutée est de 6%.

Ce taux de gonflement demeure élevé du fait que l'attaque des particules d'argile par la chaux est très lente. Lorsqu'on conserve l'échantillon dans le moule à teneur en eau constante pendant 28 jours, le taux de gonflement mesuré ne dépasse pas 0,7% pour les deux argiles pour un pourcentage de chaux supérieur à 2%.

6. Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude montre que le traitement à l'eau et à la chaux améliore de manière remarquable, les propriétés des sols gonflants. On observe une amélioration immédiate des caractéristiques physico-chimiques et une amélioration après cure, des propriétés mécaniques. L'amélioration se poursuit dans le temps si l'humidité des sols traités est maintenue.

À part la baisse de la densité sèche, nous avons une augmentation des valeurs des caractéristiques mécaniques que l'on prend en compte lors de l'analyse d'un sol utilisé pour le corps de chaussée. La baisse de la densité sèche ne pénalise aucunement cette technique puisque l'indice CBR s'améliore avec le temps.

Nous remarquons qu'une teneur en chaux de moins de 6% suffit pour avoir de bons résultats vis à vis de la tenue à l'eau et de la portance. Mais il semble que le gonflement ne devient négligeable dès les premières heures, que pour des teneurs en chaux légèrement supérieures à 6%. Il est donc important d'éviter la venue intempestive d'eau, les premières heures de la mise en place des sols gonflants traités, si on utilise des quantités de chaux inférieures à cette valeur.

Nous avons utilisé pour ces essais de stabilisation, une chaux éteinte de qualité médiocre puisque le % < 80 μ ne dépasse pas 50%, alors qu'on préconise 90% lorsqu'on utilise une chaux éteinte. La réaction entre la chaux et le sol est beaucoup plus lente; ceci explique le délitage des éprouvettes lors de leur mise à l'eau.

Cette étude nous permet de choisir les conditions optimales d'utilisation, dans le domaine routier, les sols gonflants stabilisés à la chaux et à l'eau. Il est nécessaire de compacter le mélange à une teneur en eau légèrement supérieure à celle de l'optimum Proctor et de prendre des précautions pour garder l'humidité du sol compacté.

Référence

- Deleurence, (1977), *Stabilisation des sols fins traités en assise de chaussée*, Bull. liaison Labo. P. et Ch. no 89.
- Lautrin A. (1989), *Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil*, Bull. liaison Labo. P. et Ch. no 160.
- Leplat J., Relotius F., Vivier M., Andrieux P. (1969), *Limons Traités à la chaux dans le nord de la France*, Bull. liaison labo. P. et Ch. no 47.
- Le Roux A. (1969), *Traitement des sols argileux par la chaux*, Bull. liaison Labo P. et Ch. no 40.

- Le Roux A., Legroun N. (1987), *Amélioration des sols argileux expansifs Cas des „Tirs” marocains*, 6ème Congrès International des Sols Expansifs, New Delhi, 1-3 Déc.
- Legroun A., Derrider E. *Influence à long terme de la stabilisation à la chaux d'un sol argileux*, Rapport interne du CNER (Rabat - Maroc).
- L. P. E. E., *La stabilisation des Tirs à la chaux*, Comptes Rendus de la 2^{ème} Conférence Routière Africaine.
- Nejjar A., Kablawat D., Alimi I. (1986), *Stabilisation des sols fins à la chaux et au ciment*, Rapport interne de l'E.H.T.P, (Casablanca - Maroc).
- Tran Ngoc Lan, (1981), *Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier*, Bull. liaison Labo P. et Ch. no 111.

Summary

Stabilisation of the expending clays and sandy silts by heating from the point of the application for road engineering

Expansive clayey or silty soils are not recommended for pavement or pavement's subgrade. The stabilisation of these soils obtained with added lime improves their strength.

We study in this paper two expansive clays (from Berrechid and Sidi Kacem Morocco) and a silt from Marrakech.

This soil improvement is noticed by the measurement of CBR ratio and the compression strength. We observe that the swelling, the plasticity index and the "Blue Value" decrease when the percentage of lime in soil and the age of the mixture of soil and lime increase.

With this study, we get the optimal criteria to choice the conditions in using the expansive soils stabilized with lime and water for the pavement design.

It's necessary to maintain the moisture content of the soil stabilized for the efficiency of the treatment.

Streszczenie

Stabilizacja na gorąco ilów pęczniących z punktu widzenia ich ponownego wykorzystania w budownictwie drogowym

Iły pęczniące i grunty pylaste nie są zalecane do budowy nasypów i jako podłoża nasypów. Stabilizacja tego rodzaju gruntów za pomocą wapnia zwiększa ich wytrzymałość. W pracy zbadano dwa ily pęczniące (z Berrechid i Sidi Kacem w Maroku) i pył z okolicy Marrakeszu. Ulepszenie gruntów określa się przez pomiar współczynnika CBR i wytrzymałości na ściskanie. Zaobserwowano, że pęcznienie, wskaźnik plastyczności i wskaźnik błękitu metylenowego zmniejszają się wraz ze wzrostem zawartości cementu w

gruncie i wieku mieszaniny gruntu i cementu. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono optymalne kryteria wyboru warunków stosowania gruntów pęczniejących stabilizowanych cementem i zawartości wody dla celów projektowania nasypów. Niezbędne jest utrzymywanie odpowiedniej wilgotności stabilizowanych gruntów dla zapewnienia większej wydajności prac.