

EVALUATION DU COMPORTEMENT DE MATÉRIAUX MARGINAUX STABILISÉS AVEC DU CIMENT, DE LA CHAUX ET UN POLYMÈRE

N. Pérez & P. Garnica

Instituto Mexicano del Transporte, México

nperez@imt.mx, pgarnica@imt.mx

RESUMÉ

Les argiles sont des matériaux qui généralement ne remplissent pas les spécifications pour être utilisés comme de matériaux de construction de chaussées. C'est pour cela qu'il est fréquent de faire appel à des techniques de stabilisation pour améliorer leur comportement. Dans ce travail on montre à quel degré on peut modifier les propriétés d'une argile de haute compressibilité, en utilisant des essais de compression simple, du CBR et le module de résilience. Les résultats montrent qu'il y a toujours un seuil d'amélioration avec le temps.

1. INTRODUCTION

La construction des voies de communication est une partie fondamentale dans le développement d'un pays. On peut citer les autoroutes, les aéroports, les ports, les voies ferrées, etc. Les chaussées peuvent utiliser du béton hydraulique ou bitumineux pour les couches de roulement, et les routes secondaires peuvent être revêtues ou bien conformées avec les matériaux locaux sans revêtement.

Tous les pays ont des institutions chargés de tous les aspects des voies de communications. Au Mexique, c'est le cas du Ministère des Communications et des Transports, qui a la tâche, entre autres, de définir les spécifications de qualité des matériaux pour la construction du réseau routier dans le pays. Bien entendu, il faut localiser les sources de matériaux pouvant remplir ces spécifications pour chacune de couches qui doivent conformer la structure. Il y a cependant d'occasions où on est obligé à l'utilisation des matériaux locaux tels que les argiles de haute compressibilité, surtout pour des routes secondaires, et on doit donc utiliser des agents de stabilisation pour l'amélioration des propriétés. On présente dans ce qui suit quelques généralités sur la stabilisation des sols et les résultats obtenus du travail réalisé.

2. STABILISATION DES MATÉRIAUX

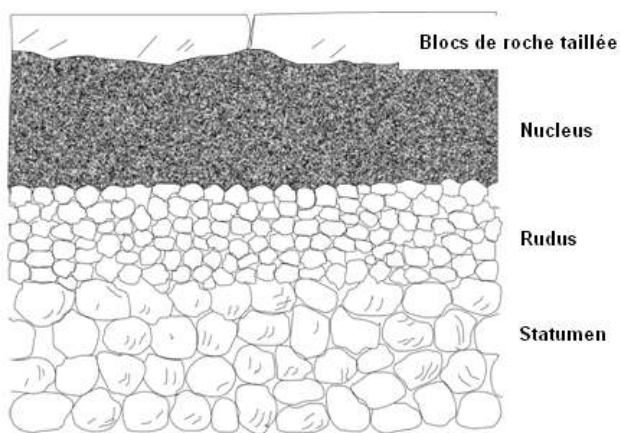
La stabilisation des sols est une technique utilisée depuis les anciens temps pour l'obtention des différents objectifs, tels que les suivants.

1. Control du gonflement ou contraction d'un sol
2. Augmenter la résistance
3. Réduction des épaisseurs des couches de chaussée
4. Utilisation des matériaux locaux
5. Control de la susceptibilité au changement de la teneur en eau
6. Control de la génération de poussière au pas des véhicules
7. Construction des plateformes de travail, etc.

Pour mener à bien la stabilisation d'un matériau, on doit pouvoir évaluer les possibles bénéfices d'un certain produit en accord avec les propriétés souhaitées d'amélioration. En général, les agents de stabilisation produisent dans le sol trois types de mécanismes: agglomération des particules, création des liaisons chimiques et génération des nouvelles composantes. Le degré et vitesse dans lesquels chacun des mécanismes peut se présenter dépend de la composition chimique de l'agent de stabilisation. Par exemple, le bitume peut agglomérer les particules du sol et générer des liaisons, tout en contribuant à une augmentation de la résistance et une diminution de la susceptibilité à changement de la teneur en eau. Les cendres volantes nécessitent d'un agent actif, tel que la chaux ou le ciment, et puis l'ajout d'eau pour générer des réactions de cimentation et donc la liaison entre particules, conduisant ainsi au changement des propriétés mécaniques. De son côté, le ciment avec de l'eau produit l'hydratation et la formation des nouvelles composantes. Dépendant de la composition chimique du ciment, il peut se produire une réaction entre les silicates d'aluminium d'une argile que produit une formation rapide des liaisons qu'impose un compactage rapide du mélange.

2.1. Stabilisation avec de la chaux

La production de chaux se réalise déjà par les romains qui l'employée pour la construction de ses chemins. La structuration se faisait en quatre couches. Au fond de chaussée on avait une couche de roche appelé *statumen*, puis une couche conformée par du sable et du gravier qui se nomme *rudus*. Ensuite on trouve de la roche triturée et mélangée avec de la chaux, nommée *nucleus*, et au dessus le revêtement constitué par des blocs de roche taillée (Figure 1).



(a) Structuration des chaussées romaines

(b) La Vía Apia

Figure 1 – (a) Structuration des chaussées romaines; (b) Vue de la vía Apia [1]

Il faut donc ne pas être surpris que la chaux soit jusqu'à nos jours un des produits de stabilisation le plus utilisé pour l'amélioration des propriétés des matériaux. L'état de l'art du thème établit qu'un système sol-eau, quand il est mélangé avec de la chaux, produit une réaction de type exothermique. La réaction initiale est le résultat d'un échange cationique de Ca^{2+} par les cations existants dans l'argile. L'effet initial est l'obtention d'un matériau plus sec et fragile [2]. Au long terme on a un phénomène de solidification comme résultat d'une réaction pouzzolanique, qui est facilité par l'alcalinité du mélange, et qui promue la dissolution de l'aluminium et de la silice de l'argile [2]. Ce processus a comme conséquence la formation des pouzzolanes d'aluminium et de silice pour que la réaction

avec le calcium puisse se donner [3]. Puis on a la production des composés avec des propriétés de cémentation qui fait l'augmentation progressive de la résistance. La chaux est un matériau utilisé pour la stabilisation des sols en général, si bien que c'est pour l'argile qu'on a les meilleurs effets. Au fait, le traitement avec la chaux est conseillé pour des sols avec au moins un 25% d'argile et un indice de plasticité supérieur au 10%.

2.2. Stabilisation avec du ciment

Le ciment est constitué par des silicates et des aluminates de calcium qu'avec l'eau s'hydratent et forment des matériaux aux propriétés de cémentation. Durant la réaction il est formé un hydroxyde de calcium (de la chaux) qui fait possible la réaction pouzzolanique avec l'aluminium et la silice qui se présentent avec les matériaux argileux et sont à l'origine des changements dans les propriétés du sol stabilisé [4]. Dans les références on trouve plusieurs études sur le comportement du sol-ciment, comme celui de Geiman (2005), qui montre l'effet, sur la résistance à la compression simple, du temps de repos du mélange sol-ciment avant le compactage. On remarque en particulier qu'après des temps de repos supérieurs à 15 jours on atteint un seuil de résistance qui dépend du type de sol et du pourcentage de ciment (Figure 2).

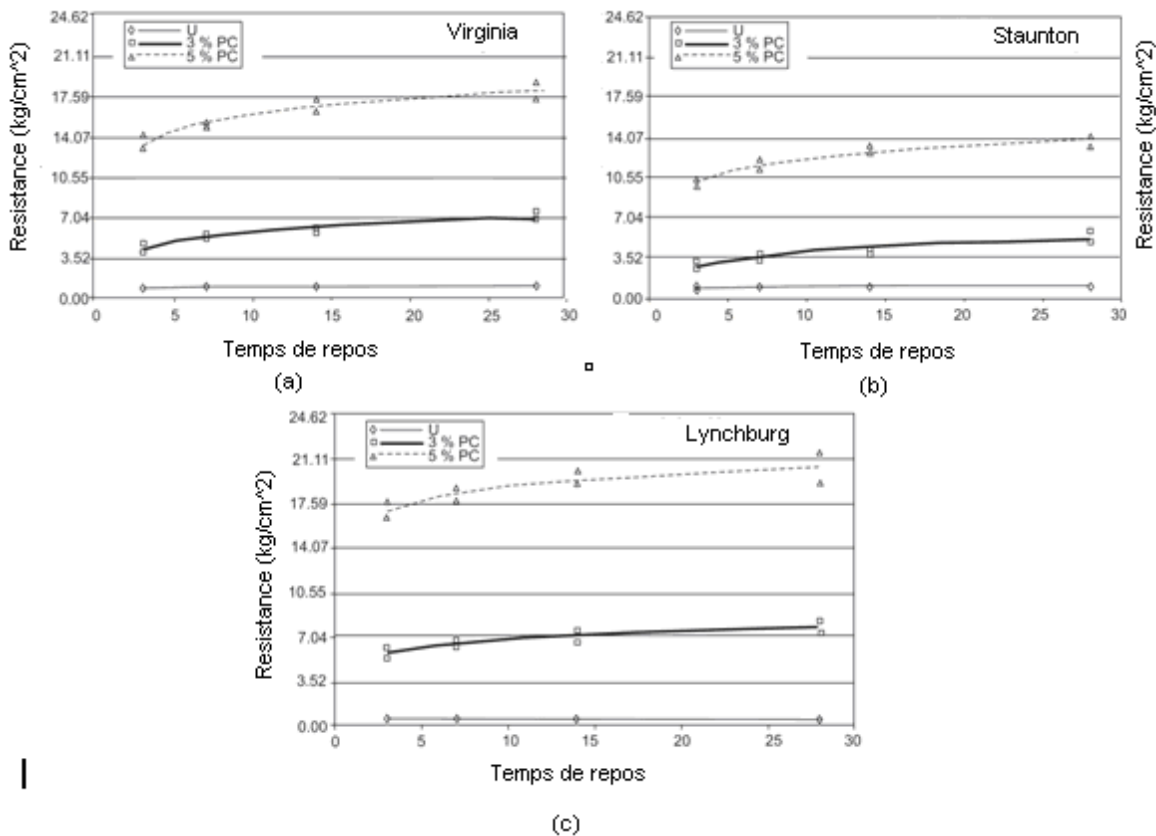


Figure 2 – (a) Argile du nord de Virginia; (b) Argile de Staunton; (c) Sable de Lynchburg [5]

2.3. Stabilisation avec d'autres produits

Dans l'actualité un grand nombre de produits de stabilisation existent dans le marché. Pour la plupart ce sont des produits présentés sous forme liquide que travaillent avec le mécanisme d'agglomération des particules du sol. Dans ce travail un de ces produits, un polymère, a été considéré.

3. PROCEDURES D'ESSAI

Tous les essais dans ce travail ont été réalisés en conformité avec les normes ASTM, sauf le cas de l'essai du module de résilience qu'a été réalisé avec la procédure NCHRP 1-28A. Dans ce qui suit on décrit quelques aspects de ces essais.

3.1. Essais de compression simple

La charge a été appliquée avec une vitesse de 1.2 %/min.

3.2. Essai du CBR (*California Bearing Ratio*)

Réalisé sur un échantillon de sol compacté aux conditions optimales et puis saturé pendant 96 heures.

3.3. Essai de module de résilience

C'est un essai cyclique sous des conditions triaxiales. On applique toute une série de contraintes de confinement et déviatoriques (Tableau 1). Pour chaque combinaison on détermine le module sécant moyen des derniers cycles. Les modules de résilience ainsi déterminés sont la propriété fondamentale actuelle pour le dimensionnement des chaussées.

Tableau 1 – Séquence d'application des contraintes de confinement et déviatoriques dans l'essai de module de résilience

Séquence No.	σ_d , kPa	σ_3 , kPa	cycles	Séquence No.	σ_d , kPa	σ_3 , kPa	cycles
0	48.3	27.6	1000	9	69.0	55.2	100
1	27.6	55.2	100	10	69.0	41.4	100
2	27.6	41.4	100	11	69.0	27.6	100
3	27.6	27.6	100	12	69.0	13.8	100
4	27.6	13.8	100	13	96.6	55.2	100
5	48.3	55.2	100	14	96.6	41.4	100
6	48.3	41.4	100	15	96.6	27.6	100
7	48.3	27.6	100	16	96.6	13.8	100
8	48.3	13.8	100				

4. PREPARATION DES ECHANTILLONS D'ESSAI

Pour le cas de la chaux et du ciment, on a utilisé un 4% et un 8% par rapport au poids du sol sec, respectivement. Avec le polymère présenté sous forme liquide (Figure 3), on a utilisé des proportions définies par le fabricant.



Figure 3 – Apparence de l'eau de compactage ajoutée d'un agent de stabilisation liquide (polymère).

4.1. Compactage des échantillons pour les essais de compression simple et module de résilience

Le procédé de compactage a été le suivant:

- Préparation du mélange sol-chaux, sol-ciment et sol-agent liquide.
- Compactage en 8 couches dans un moule cylindrique de 14.4 cm d'hauteur et 7.1 cm de diamètre. Les échantillons de sol-chaux et sol-ciment ont été compactés toute suite après le mélange. Pour les échantillons de sol naturel le compactage a été réalisé un jour après la préparation du mélange avec l'eau. L'énergie de compactage est celle défini à l'essai Proctor standard.
- Mesure des poids et des dimensions.
- Repos des échantillons pour 0, 7, 14, 28, 60, 90 y 180 jours, dans une chambre à humidité contrôlée.
- Realisation des essais.

Le range de variation de la teneur en eau était de $w_{opt} \pm 0.5 \%$ y $\gamma_{dmax} \pm 1 \%$.

5. MATÉRIAUX D'ESSAI

5.1. Propriétés Indice

Les sols utilisés ont été classifiés comme CH selon le SUCS, avec une limite de contraction de 9.8% (Figure 4) et les propriétés montrées sur le Tableau 2.

Tabla 2 – Propriétés

Sol	Class	Limites d'Atterberg			Pourcentage fines	G_s
		LL (%)	LP (%)	IP (%)		
1	CH	94	62	32	95.6	2.74
2	CH	55	30	25	81.4	2.59



Figure 4 – Aspect d'un échantillon de sol au limite de contraction.

5.2. Caractéristiques du compactage

Pour les sols utilisés les courbes de compactage se montrent sur la Figure 5.

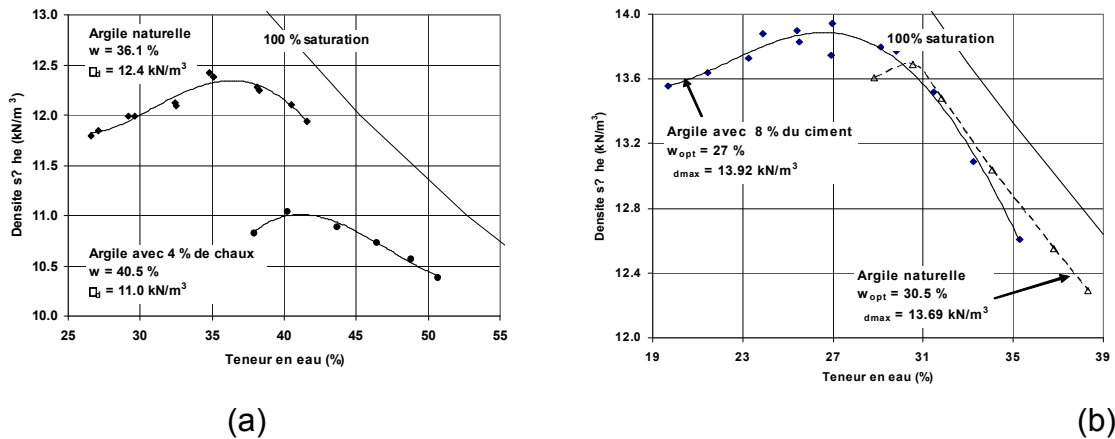


Figure 5 – (a) Courbe de compactage du sol 1; (b) Courbe de compactage du sol 2

6. RESULTATS

6.1. Résultats pour les sols traités à la chaux et au polymère

Sur la Figure 6 on montre des courbes contrainte-déformation du sol naturel pour un temps de repos de 7 jours. Ce sont les résultats des trois répétitions.

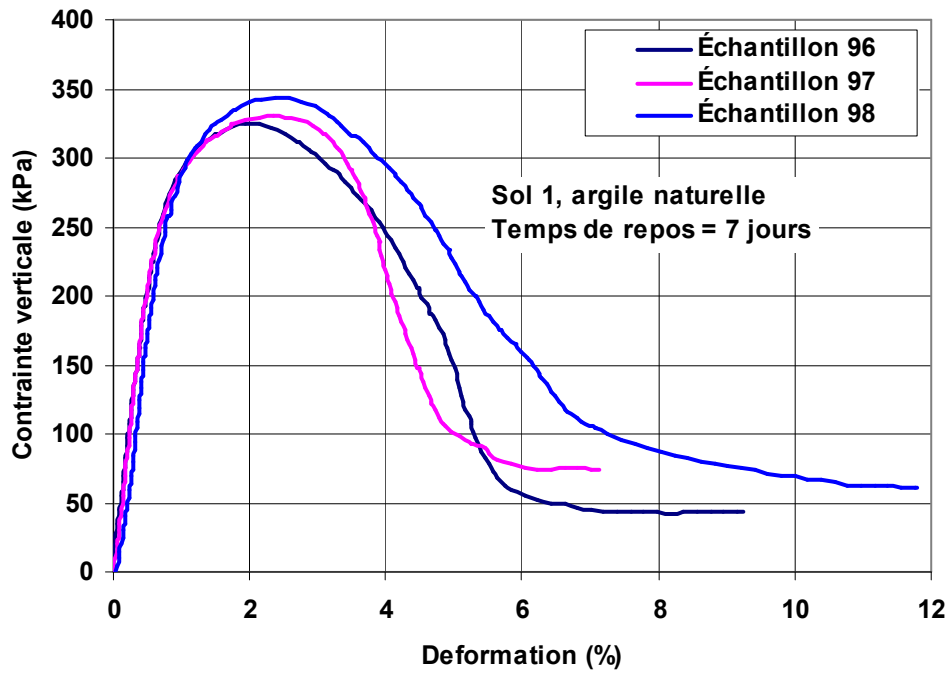


Figure 6 – Courbes contrainte-déformation du sol naturel avec un temps de repos de 7 jours.

La Figure 7 montre l'influence observé du temps de repos sur la résistance à la compression simple pour les cas du sol naturel, du sol traité à la chaux et du sol traité avec l'agent de stabilisation liquide. Il est clair que le sol traité à la chaux présente une augmentation bien marquée de la résistance, jusqu'à atteindre 3.5 fois celle du sol naturel à 28 jours. On peut remarquer la faible contribution de l'agent de stabilisation liquide.

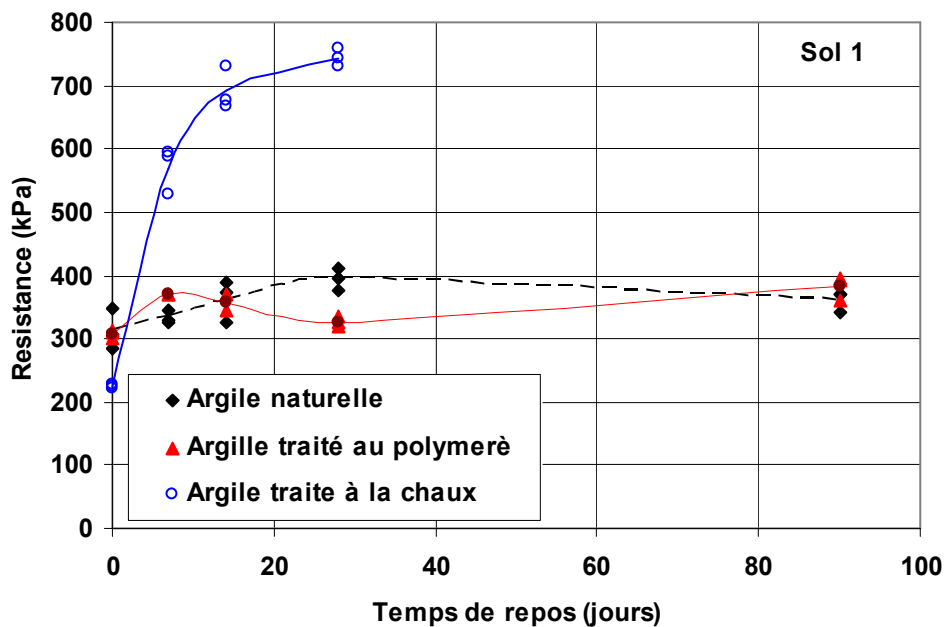


Figure 7 – Comportement du sol naturel et traité à la chaux et avec l'agent de stabilisation liquide.

Les résultats obtenus de l'essai de CBR pour les sols traités à l'agent liquide et à la chaux se montrent dans les Tableaux 3 et 4, respectivement, pour un temps de repos de 28 jours. L'effet du temps de repos peut s'apprécier sur les Figures 8 et 9. L'effet de la chaux est significatif pour augmenter les valeurs du CBR et réduire les niveaux de gonflement. L'effet de l'agent de stabilisation liquide est à nouveau peu significatif.

Tableau 3 – Valeurs de CBR y gonflement avec le sol traité à l'agent liquide pour un temps de repos de 28 jours.

Echantillon	w (%)	γ_d (kN/m ³)	CBR prom. (%)	Gonflement prom. (%)
23	35.5	12.51	0.6	12.5
24	35.6	12.38		
25	36.3	12.36		
17	36.4	12.38	0.6	13.9
18	36.1	12.46		
19	37.5	12.31		
20	36.2	12.37	0.9	13.7
21	36.5	12.35		
22	36.1	12.42		
11	36.7	12.40	0.8	12.4
12	36.5	12.48		
13	36.2	12.45		
14	36.1	12.41	0.9	11.3
15	36.6	12.41		
16	36.0	12.46		

Tableau 4 – Valeurs de CBR et gonflement pour le sol traité à la chaux pour un temps de repos de 28 jours.

Echantillon No.	w (%)	γ_d (kN/m ³)	CBR prom (%)	Gonflement prom. (%)
47	40.3	11.20	27.1	0.4
48	40.8	11.27		
49	40.2	11.21		
44	40.1	11.00	45.5	0.02
45	41.0	11.02		
46	40.4	11.04		
41	40.6	11.10	48.9	0.04
42	40.4	11.10		
43	39.6	11.21		
38	40.3	10.91	48.1	0.12
39	39.9	10.96		
40	40.6	10.93		
35	40.5	10.93	48.8	0.15
36	40.5	10.95		
37	40.7	11.02		

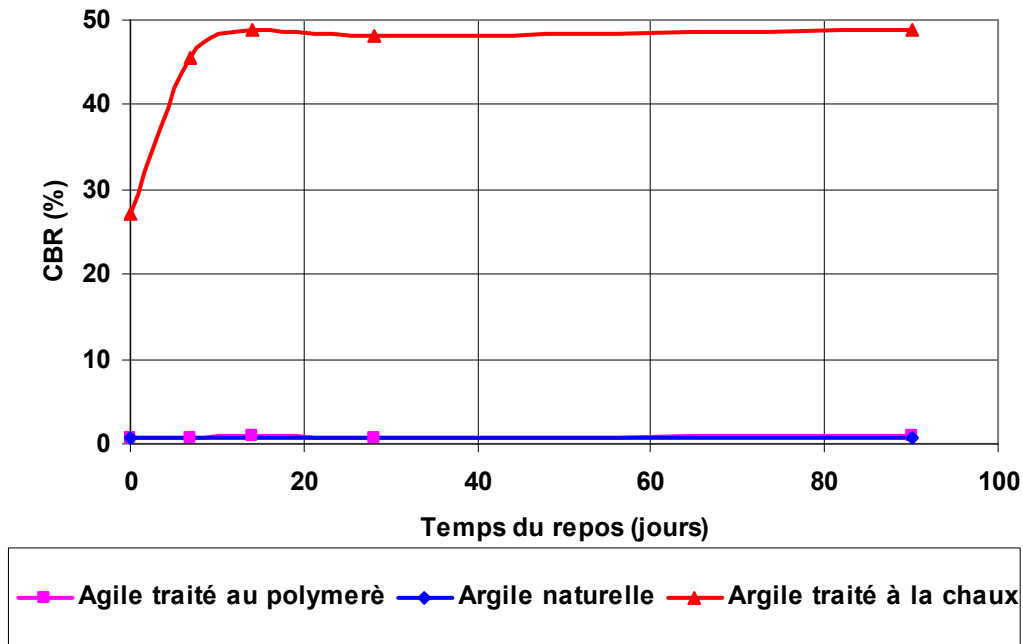


Figure 8 – Evolution du CBR avec le temps de repos.

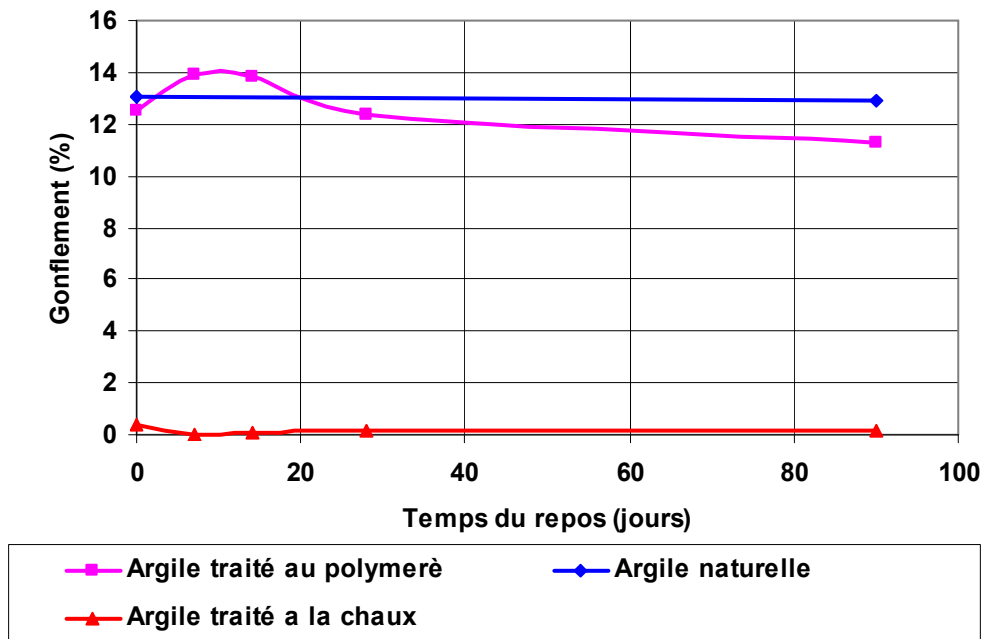


Figure 9 – Evolution du niveau de gonflement avec le temps de repos.

Pour ce qui concerne le module de résilience les résultats du sol naturel se présentent sur la Figure 10. L'effet de différents traitements peut s'apprécier sur la Figure 11. Comme le module est très dépendant de l'état de contraintes, la comparaison d'agents de stabilisation dans ce qui suit se fera avec le module qui correspond à une contrainte de confinement de 14 kPa et une contrainte déviatorique de 84 kPa.

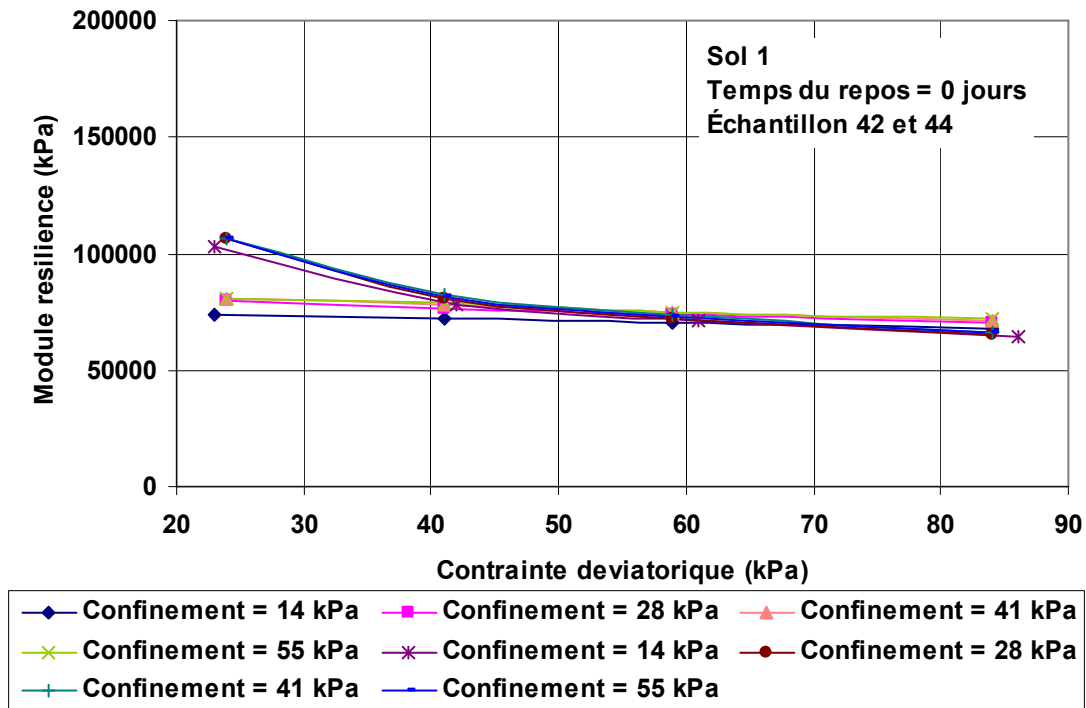


Figure 10 – Modules de résilience pour le sol naturel

Si se comparan por ejemplo los valores de módulo de resiliencia para especímenes de suelo natural y los estabilizados con líquido aglutinante o con cal viva para un tiempo de curado de 7 días, se puede observar que las curvas de módulos de suelo natural y estabilizadas con el líquido no tienen diferencias importantes y se encuentran en el rango de 100 a 150 MPa, sin embargo, los valores de los especímenes estabilizados con cal viva están muy por encima con valores entre 190 y 270 MPa.

Por otro lado, también se observa que en los especímenes estabilizados con cal viva el efecto del confinamiento tiene mayor importancia ya que las curvas para cada valor de confinamiento tienen cierto grado de separación, no así las gráficas de probetas con suelo natural o estabilizado con el líquido aglutinante.

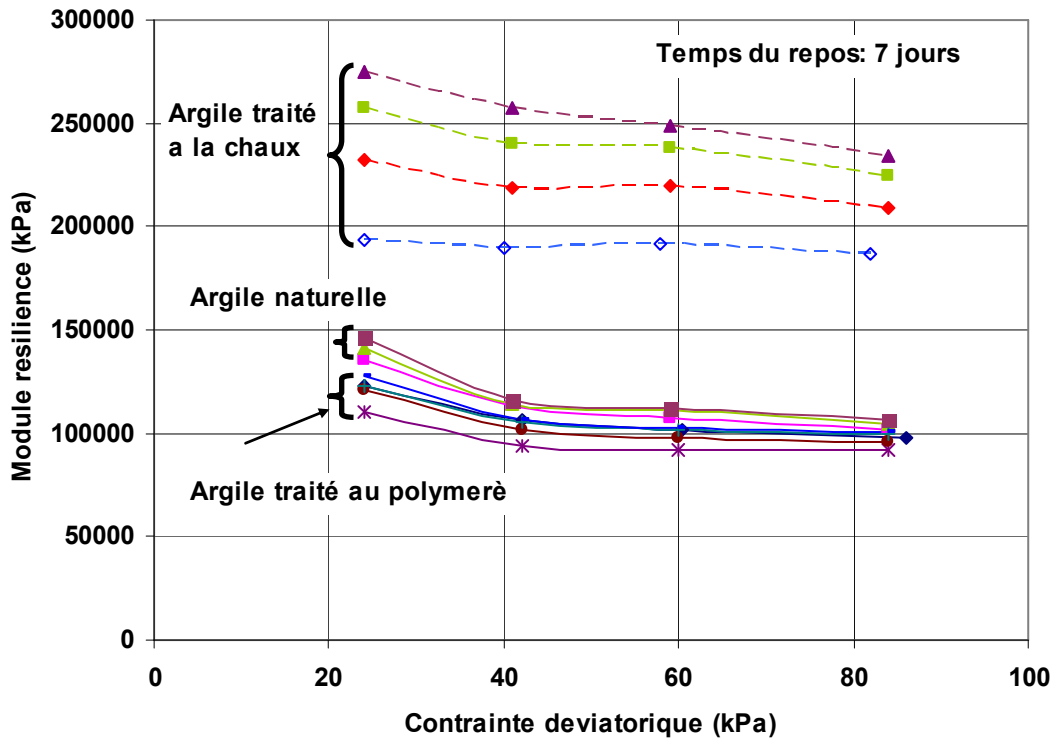


Figure 11 – Effets des agents de stabilisation étudiés sur les valeurs de module de résilience.

La Figure 11 démontre l'effet du temps de repos sur les modules obtenus. L'effet de la chaux est à nouveau très marqué et celui du polymère pratiquement inexistant. Il faut cependant remarquer que, pour la chaux, il semble que les valeurs des modules diminuent avec le temps de repos après avoir atteint un maximum aux alentours des 15 jours.

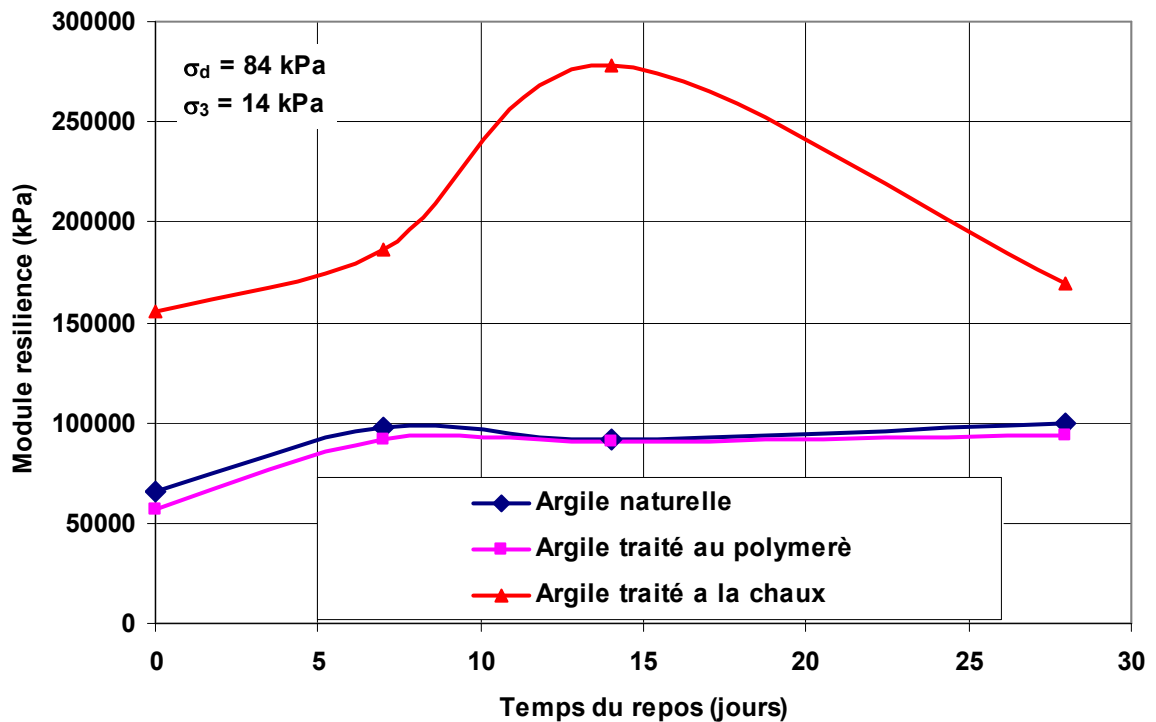
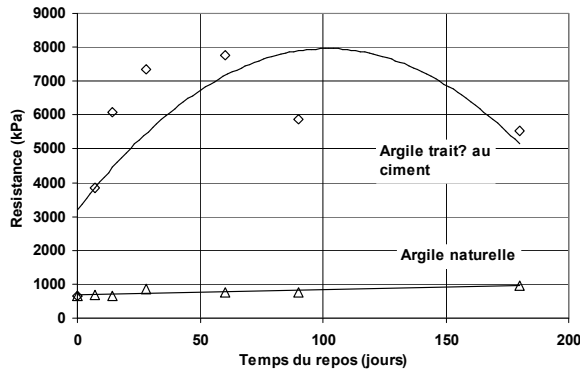


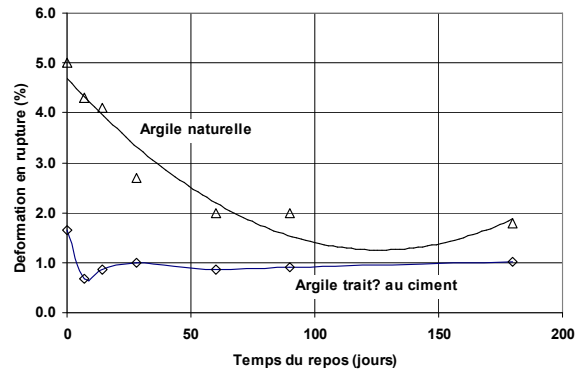
Figure 11 – Effet du temps de repos sur le module de résilience.

6.2. Résultats pour le sol traité au ciment

La Figure 12 montre la comparaison des résultats de compression simple entre un sol traité au 8% de ciment et le sol naturel.



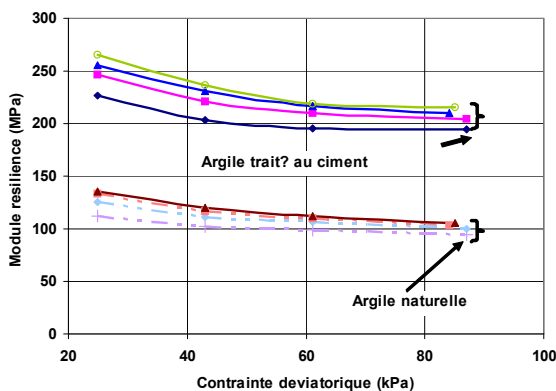
(a) Evolution de la résistance



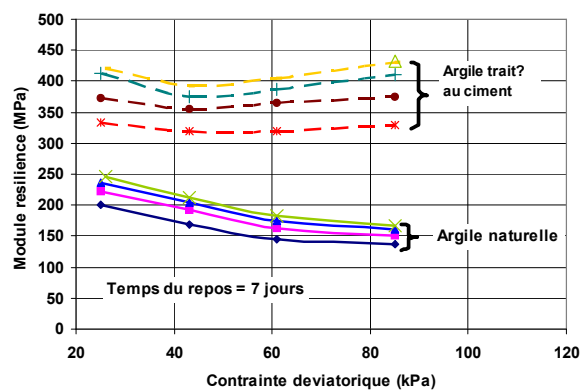
(b) Evolution de la déformation à la rupture

Figure 12 Comportement du sol traité au ciment.

La Figure 13 montre les valeurs des modules de résilience pour 0 et 7 jours de temps de repos.



(a)



(b)

Figure 13 – Comportement des modules de résilience

7. CONCLUSIONS

Les résultats de ce travail permettent de mettre en évidence l'importance d'évaluer les produits de stabilisation qu'arrivent chaque année sur le marché. Pour le cas du polymère considéré dans l'étude, le protocole d'essai qui a été suivi a été définitif pour lui mettre en défaut. Au même temps, on a remarqué les effets des agents de stabilisation classiques, comme la chaux et le ciment, aussi bien avec des essais conventionnels, comme la compression simple et le CBR, qu'avec l'aide des essais plus sophistiqués comme celui du module de résilience.

En particulier on a montré que pour le sol traité à la chaux, l'augmentation des valeurs du module de résilience semble ne pas être permanente.

REFERENCES

1. Muñiz, S.J.C. (2006). Las Vías Romanas.
2. Boardman, D.I., Glendinning, S., and Rogers, C.D.F. (2001). Development of soil stabilization and solidification in lime-clay mixes. *Géotechnique* 50, No. 6, 533-543.
3. Piñero, R.C.S. (2000). Use of high volume fly ash cement for stabilization of expansive soils with high soluble sulfates content. PhD Dissertation. Texas A & M University. December 2000.
4. Little, D.N., Males, E., E. Prusinski, J. and Stewart, B. (?). Cementitious Stabilization. A2J01: Committee on Cementitious Stabilization.
5. Geiman, C.M. (2005). Stabilization of soft clay subgrades in Virginia Phase I Laboratory Study. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.