



sols

ÉTUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MÉCANIQUE D'UNE MARNE ARGILEUSE TRAITÉE À LA CHAUX ÉTEINTE. CAS DE L'AUTOROUTE EST-OUEST TRONÇON OUED FODDA/KHEMIS MILIANA (ALGÉRIE)

F. MELLAL, B. LAMRI

Université Hassiba Benbouali de Chlef, Route de Sendjas, BP 161, Chlef, Algérie

1. INTRODUCTION

Les marnes sont des roches relativement tendres qui présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non résistantes, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures. La technique de traitement à la chaux est la solution idéale pour stabiliser ces types de sols pour des raisons économique, écologique et technique. L'ajout de la chaux aux sols argileux permet de réduire leur sensibilité à l'eau par une augmentation immédiate de la limite de plasticité, de la limite de retrait et de la teneur en eau optimale, d'une réduction de l'indice de plasticité et de

retrait, de la valeur au bleu de méthylène et de la masse volumique sèche, et une conservation de la limite de liquidité (Kolias et al., 2005 ; Yucel et al., 2007). A long terme la chaux implique une augmentation de l'indice CBR, de la résistance à la compression R_c , des paramètres de cisaillement (cohésion C et angle de frottement interne Φ) et une diminution des paramètres de compressibilité, du potentiel et de la pression de gonflement (Kolias et al., 2005 ; Yi et al., 2006 ; Raymond et al., 2007 ; Deneele, 2008). L'amélioration du comportement des sols traités est justifiée par la présence des réactions chimiques entre les minéraux argileux et la chaux hydratée (Sdhakar et al, 1998). Cette étude s'attache à évaluer au laboratoire le traitement d'une marne argileuse provenant des zones de déblai



situées au PK 3+900 du tronçon de l'autoroute, section des 27 km mis en dépôt au PK 5+800 par des quantités en pourcentage de chaux puis une application de ce traitement sur un remblai avec 2 % de chaux au niveaux de l'axe secondaire de l'autoroute Est-Ouest.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1. Préparation des mélanges et procédure d'essais

Les quantités de sol marneux, caractérisé par la fraction de 0/5 mm, et de chaux, utilisés pour la préparation des mélanges, sont déterminées selon un pourcentage massique. Le malaxage se fait à sec à l'aide des pelles jusqu'à l'homogénéisation. Cette opération dure environ 5 à 10 min pour éviter la perte de la réactivité de la chaux. Les paramètres physiques et mécaniques des mélanges sont déterminés conformément aux normes françaises (NF P94-056 et NF P94-057 pour l'analyse granulosédimentométrique, NF P94-051 pour les limites d'Atterberg, NF P94-060-1 pour la limite de retrait, NF P94-068 pour l'essai au bleu de méthylène, NF P94-093 pour les caractéristiques de compactage (Proctor normal et modifié), NF P94-078 pour l'indice portant californien CBR, NF P94-090-1 pour la compressibilité, le gonflement de la marne et la pression de gonflement, NF P94-071-1 pour l'essai de cisaillement).

2.2. Sol (la marne)

Les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la marne sont regroupées dans le tableau 1. La quantité de carbonate de calcium (CaCO_3) peut classer la marne comme étant une marne argileuse.

| $\% > 80 \mu\text{m}$ | WL (%) | IP (%) | IR (%) | VB (g/kg) | CBR | DG (%) | FR (%) | $(\text{CaCO}_3) (%)$ |
|-----------------------|--------|--------|--------|-----------|-----|--------|--------|-----------------------|
| 70 | 60 | 32 | 34 | 6.5 | 3.3 | 12 | 8.3 | 21.2 |

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques et mécaniques de la marne

| CaO (%) | MgO (%) | 80 mm (%) | Teneur en eau libre (%) |
|---------|---------|-----------|-------------------------|
| 73.25 | < 4 | 96 | 0.5 |

Tableau 2. Caractéristiques de la chaux

| Chaux (%) | IP (%) | IR (%) | VB (%) | $\gamma d (\text{kN/m}^3)$ (OPM) | w (OPM) (%) |
|-----------|--------|--------|--------|----------------------------------|-------------|
| 0 | 32 | 34 | 6.5 | 19.4 | 13.5 |
| 1 | 28 | 30 | 6 | 18.9 | 13.9 |
| 2 | 20 | 28 | 5.3 | 18.5 | 14.3 |
| 3 | 18 | 22 | 4.5 | 18.3 | 15.0 |
| 4 | 15 | 17 | 4.7 | 18.2 | 15.3 |

Tableau 3. Variation des caractéristiques physiques de la marne en fonction du pourcentage en chaux additionnée

Selon le guide des terrassements routiers (Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR 92)), la fraction de la marne inférieure à 50 mm est de la classe A3 et les éléments rocheux (supérieur à 50 mm) sont de la classe R 34 ts. Les matériaux de la classe A3 sont caractérisés par une forte plasticité et un état hydrique très humide et les matériaux de classe R 34 ts sont caractérisés par un état en place surconsolidé semi rocheux avec des états hydriques très secs. Leur réemploi en l'état naturel, pour la construction des remblais, pose des problèmes délicats au moment de la mise en œuvre (problème de la haute plasticité qui implique des difficultés de malaxage et de compactage), surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage (risques d'évolution granulométrique dans le temps).

2.3. La chaux

La chaux utilisée provient de l'usine de Saida. Les caractéristiques de cette chaux sont récapitulées dans le tableau 2. Selon les résultats du tableau 2 ainsi que les normes de spécification (NF 196-2, NF 044 – 145), on peut dire que la chaux hydratée de Saida est conforme pour son utilisation dans le traitement des remblais routiers.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Effet de la chaux sur les caractéristiques physiques de la marne

Selon le tableau 3 ci-dessous, on remarque que l'augmentation du pourcentage de chaux implique une réduction importante des indices de retrait et de plasticité et de la



valeur au bleu. Un pourcentage de 4% de chaux fait réduire les deux indices d'un taux de 50% ainsi que la masse volumique sèche à l'optimum Proctor et une augmentation de la teneur en eau optimale.

3.2. Effet de la chaux sur l'IPI

La figure 1 montre qu'il y a une tendance générale d'accroissement des valeurs du CBR et de l'IPI avec l'augmentation du pourcentage en chaux, un taux de 1% de chaux donne une augmentation de 50% de CBR.

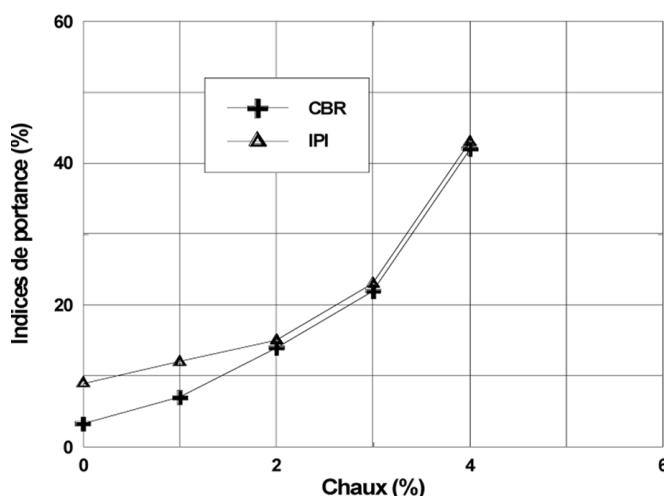


Figure 1. Variation de l'indice de portance IPI et du CBR en fonction des différents pourcentages de chaux

3.3. Effet de la chaux sur la résistance à la compression des mélanges

La résistance à la compression de la marne concassée à l'état naturel est très faible, elle est de l'ordre de 0.64 MPa. Selon la figure 2, on remarque que pour une durée de cure nulle (écrasement immédiat), la résistance à la compression garde sa valeur faible pour les différents mélanges.

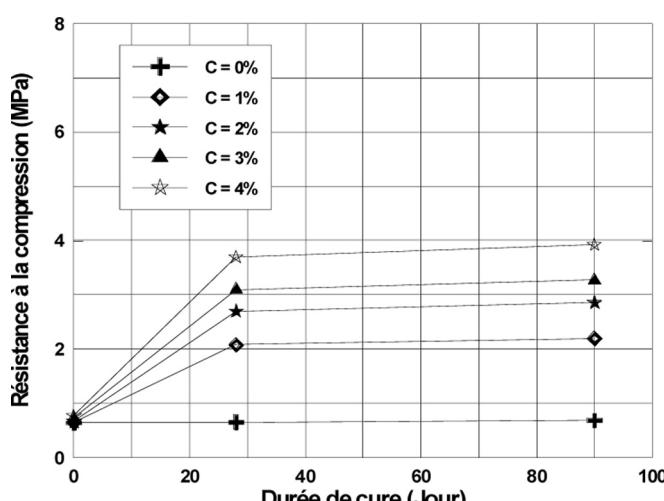


Figure 2. Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure et le pourcentage en chaux additionné

A partir d'une durée de cure de 28 jours, on constate une évolution importante avec l'augmentation du pourcentage de la chaux puis elle est stabilisée à une durée de cure de 90 jours. La forte augmentation de la résistance à la compression après 28 jours est justifiée par la réaction d'hydratation de la chaux pendant cette période.

3.4. Effet de la chaux sur la compressibilité

Le gonflement des matériaux est considéré lorsque l'indice de gonflement $C_g \geq 4\%$. A l'état naturel de la marne étudiée, les valeurs de l'indice de compressibilité C_c et l'indice de gonflement C_g sont respectivement 3.32 % et 4.11%, ce qui donne une marne argileuse très peu compressible et gonflante.

La figure 3 montre une diminution de l'indice de compression et de l'indice de gonflement au fur et à mesure que le pourcentage de chaux augmente. On constate que le sol perd sa sensibilité au gonflement à partir de 1% de chaux.

3.5. Effet de la chaux sur le potentiel et la pression de gonflement

La figure 4 représente la variation du potentiel et de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux additionné ($C = 1, 2, 3$ et 4%).

A l'état naturel, la marne possède un potentiel et une pression de gonflement élevés ($G = 5\%$, $P_g = 360$ kPa). Le gonflement des sols peut être considéré aussi pour des valeurs de potentiel et de pression de gonflement respectivement supérieures ou égales à 4% et à 100 KPa. Donc on peut dire qu'on est en présence d'une marne argileuse gonflante. Selon la figure 4, on observe les paramètres de gonflement qui varient inversement proportionnel avec l'augmentation du pourcentage en chaux ; un mélange traité à 2 % de chaux fait passer la marne de son état gonflant à un état non gonflant avec un potentiel de 2.1% et une pression de 98 kPa.

3.6. Paramètres du cisaillement direct

Les variations de la cohésion et de l'angle de frottement avec le pourcentage en chaux évaluées immédiatement à 7, 14 et 28 jours sont illustrées dans la Figue 5.

On remarque une forte amélioration de la cohésion et de l'angle de frottement interne des mélanges à durée de cure de 7 jours et une légère augmentation à 14 et 28 jours.

D'après cette étude, On peut dire que l'introduction d'un faible pourcentage de chaux dans les sols marneux argileux a un effet considérable sur son comportement physique et mécanique. Il a été constaté une diminution des limites d'Atterberg, de la valeur au bleu et du gonflement ainsi qu'une amélioration de la portance et de la résistance. Pour les raisons techniques énumérées, et l'intérêt économique (minimisation du coût), on favorise la réutilisation des quantités de déblais de la marne argileuse mise en dépôts dans les travaux de remblais par le biais d'un traitement à la chaux avec un pourcentage de 2%.

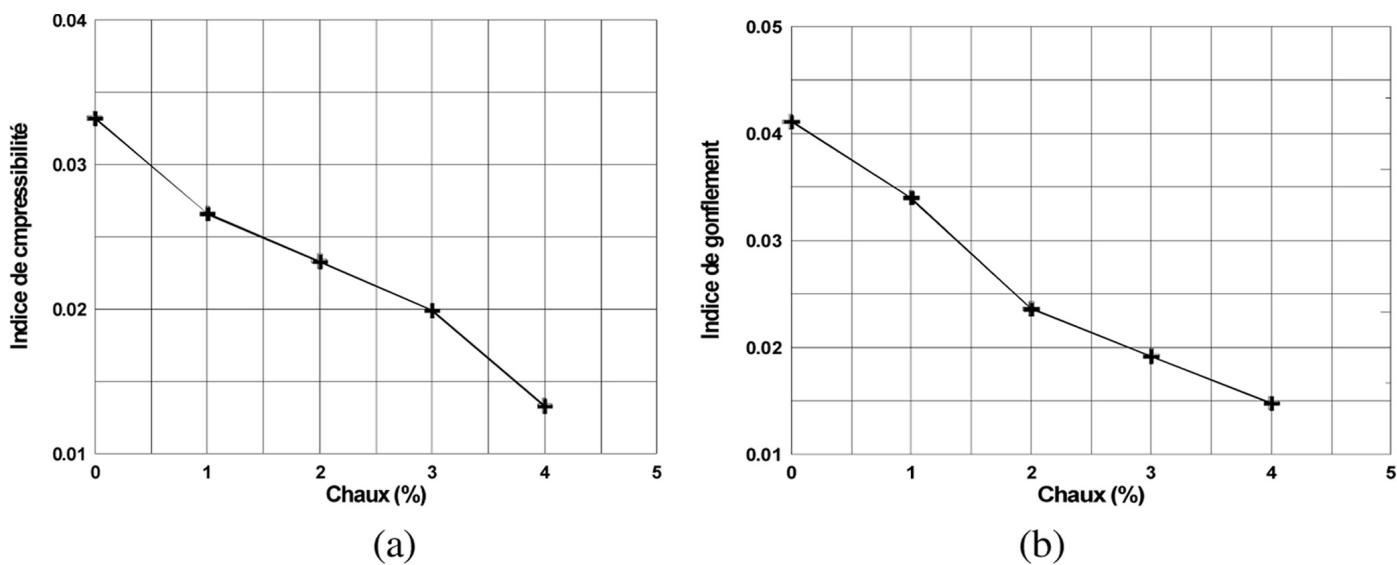


Figure 3. Variation des paramètres de compressibilité en fonction du pourcentage en chaux additionnée
(a) Indice de compressibilité C_c (b) Indice de gonflement C_g

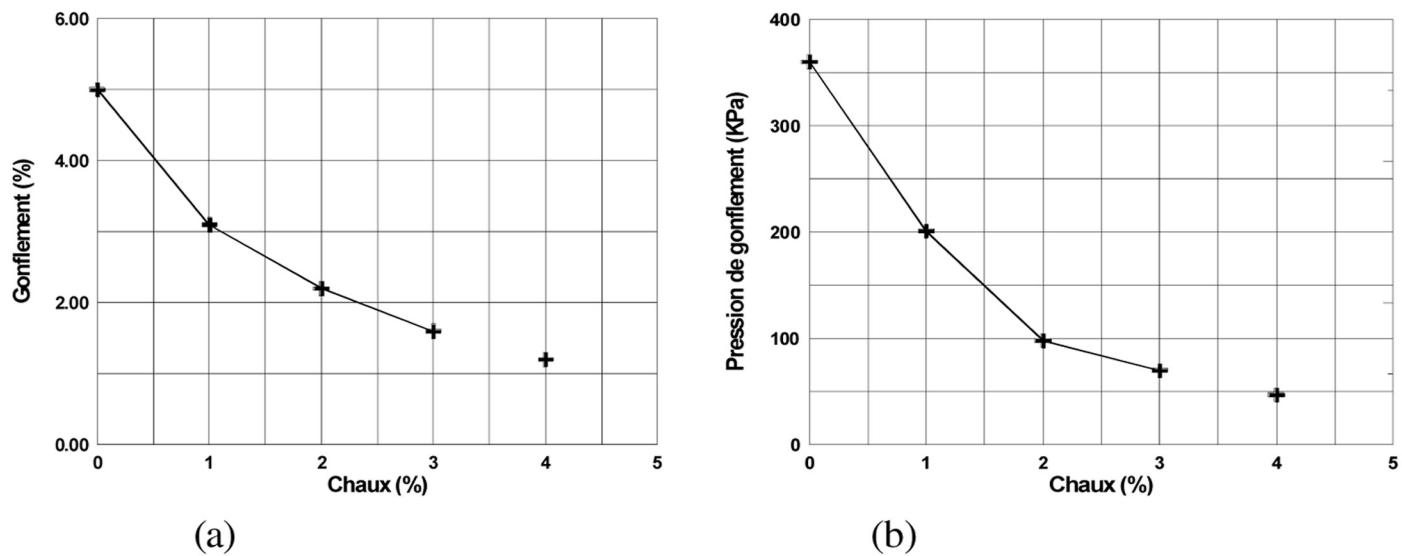


Figure 4. Variation du potentiel et de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux additionnée
(a) Potentiel de gonflement G (b) Pression de gonflement P_g

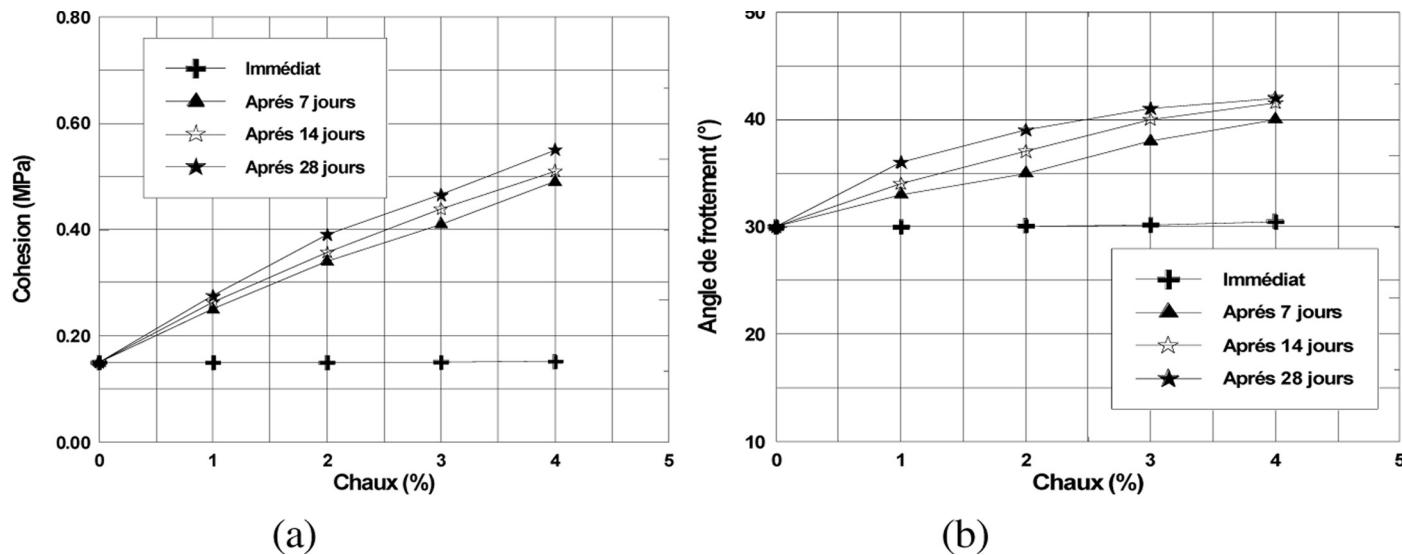


Figure 5. Variation des paramètres de cisaillement en fonction du pourcentage de chaux additionné pour les différentes durées de cure
Cohésion (b) Angle de frottement interne



4. APPLICATION DU TRAITEMENT

4.1. Exécution du traitement

L'exécution est faite par épandage des matériaux, un malaxage et un compactage comme illustrée à la figure 6. L'étalage des matériaux à traiter est réalisé par les engins de fragmentation mécanique : bulldozers, niveleuses qui interviennent pour réduire les matériaux à une mouture de classe 0/20 mm sur 30 cm. L'épandage de la chaux se réalise par sac sur le sol préalablement quadrillé (figure 6 (a)). Chaque carré de 1m² définit la surface sur laquelle un sac de 25 kg doit être répandu.

Le malaxage s'effectue immédiatement (1/4 h) après l'épandage de la chaux pour éviter la dispersion de l'agent de traitement par le vent et la perte de réactivité de la chaux (figure 6 (b)). Il faut veiller à ce que l'humidité du sol après traitement corresponde à l'optimum déterminé par l'étude en laboratoire (14,3%). Le malaxage s'exécute par des passes longitudinales et transversales successives par : bulldozers, niveleuses, tracteur avec disque. Les opérations

d'épandage et de malaxage sont menées de façon à limiter la production de poussière.

Le compactage de la marne traitée demande une attention toute particulière. Il est important que le compactage s'étende à toute l'épaisseur de la couche malaxée (0.3 m à 0.5 m) pour une épaisseur de remblai de 10 m avec un nombre de passes limite (3 à 4 passes) par un rouleau vibrant (figure 6 (c)).

4.2. Résultats des essais in situ et interprétations

Le contrôle du compactage au niveau de chantier est vérifié par la mesure des deux paramètres importants qui sont la compacité et la portance.

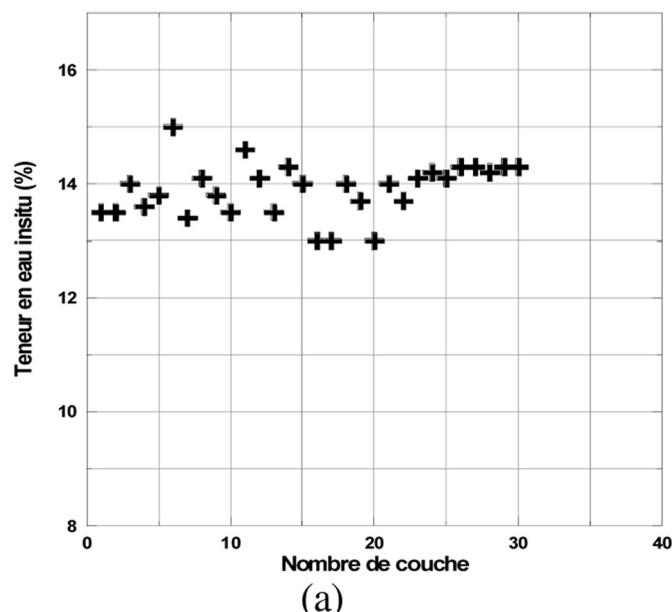
a. Compacité :

Les densités et les teneurs en eau in situ sont déterminées au moyen d'un Troxler selon la norme française (NF P 94-061-1). La figure 7 représente les valeurs de la

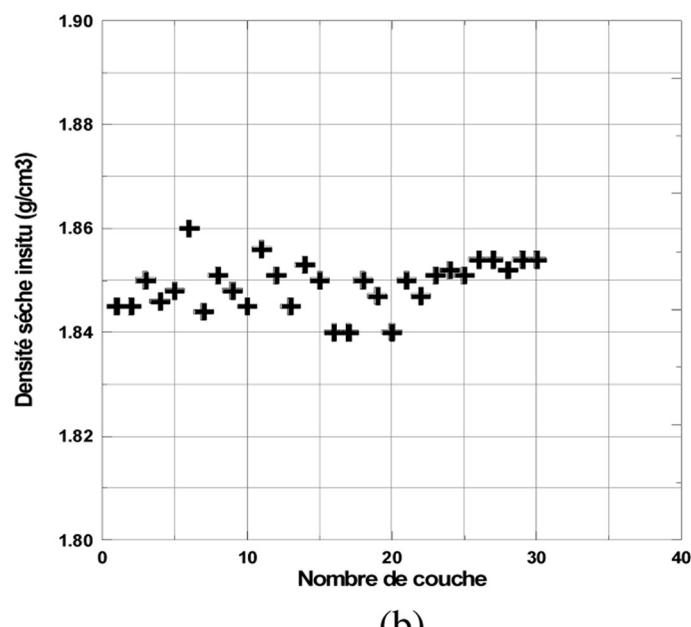


(a) *Epandage de la chaux* (b) *Malaxage* (c) *Compactage du sol traité*

Figure 6. Opérations d'épandage, de malaxage et de compactage



(a)



(b)

Figure 7. Variation de la teneur en eau (a) et de la densité sèche (b) in situ en fonction du nombre de couches

teneur en eau et de la densité sèche in situ en fonction du nombre de couches traitées du remblai.

Selon les valeurs mesurées mentionnées, on constate que la majorité de ces valeurs sont proches des paramètres à l'Optimum Proctor mesurées au laboratoire ($W_{opt} = 14,3\%$ et $\gamma_d = 18,45 \text{ kN/m}^3$). Les résultats sont conformes aux prédictions faites par l'étude en laboratoire

b. Portance :

Les essais de déformabilité sont effectués par le biais d'une plaque de diamètre $\phi 600 \text{ mm}$ (NF P94-117-1) sur chaque ensemble de trois couches de remblai. La figure 8 représente la variation du module de déformabilité (module sous chargement à la plaque EV2) en fonction du nombre de couches.

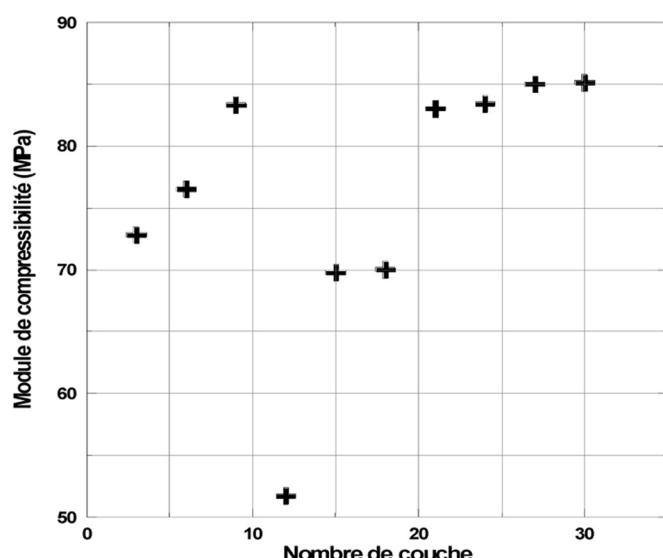


Figure 8. Variation du module de déformabilité en fonction de nombre de couches

Les résultats illustrés par la figure 8 montrent une variation de la valeur du module de déformabilité de 51 à 85 MPa en fonction du nombre de couches. Cette variation est due à la difficulté de malaxage du mélange (marne - chaux) avec les engins traditionnels tel que le bulldozer et la niveleuse. Mais malgré ça, on remarque que toutes les valeurs de EV2 sont supérieures à la valeur exigée par le guide géotechnique de traitement (LCPC / Setra, 2000) (la portance des remblais est définie par un module de sous chargement à la plaque EV2 des couches $\geq 40 \text{ MPa}$), ce qui signifie une bonne portance de notre remblai marneux traité.

5. CONCLUSION

L'application du traitement de la marne sur chantier avec 2% de chaux a confirmé les résultats trouvés au laboratoire. A court terme de la réalisation, on a remarqué que la marne est passée d'un état déformable, collant difficilement compactable à un état rigide, frottant, friable plus facile à travailler. Ce changement d'état est dû à l'amélioration du comportement physique du sol traité (diminution de la plasticité et l'aplatissement de la courbe Proctor). Le contrôle de la compacité et de la portance des couches traitées a donné des résultats fiables. Les valeurs de la densité sèche et les teneurs en eau trouvées in situ à l'aide du Troxler sont généralement proches des valeurs trouvées au laboratoire. Les valeurs du module de sous chargement à la plaque EV2 qui représente la portance ont été trouvées supérieures à 40 MPa. L'amélioration de la portance et de la compacité est justifiée par l'amélioration du comportement mécanique observé au laboratoire des mélanges (augmentation de CBR, augmentation de la cohésion et l'angle de frottement interne, diminution du gonflement).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Deneele D., «Processus physico-chimiques et comportement géotechnique des sols traités», communication, laboratoire centrale des ponts et chaussé, 2008.
- Guide Technique., «Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme», LCPC / Setra, 2000.
- Kolias S., Kasselouri-Rigopoulou I V. & Karahalios A., «Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement». Cement & Concrete Composites, vol. 27, 2005, pp.301–313.
- Raymond N., Yong & Vahid O., «Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils», Applied Clay Science, vol.35, 2007, pp. 238–249.
- Yi C., Bin S., Charles W. & Chao-Sheng T., «Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil», Engineering Geology, vol 87, 2006, pp. 230–240.
- Sdhakar, M.R. & Al., «Physico-chemical behaviour of dry silty clays», Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998. pp.451–453.