

RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE GRAVES ARGILEUSES TRAITÉES A LA CHAUX

SHEAR STRENGTH OF LIME TREATED CLAYEY GRAVELS

Sylvie Nicaise¹, Stéphanie Lemaire², Jérôme Varillon², Faustine Byron¹, Yves Grémeaux¹

¹ INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France

² Vinci Construction Terrassement, Morangis, France

RÉSUMÉ – Des résultats d'essais de cisaillement d'une grave calcaire à matrice argileuse traitée à la chaux sont présentés. Les tests à la grande boîte montrent que la cohésion est améliorée par le traitement, l'angle de frottement reste identique à celui de la grave non traitée. Des essais in-situ sur planche expérimentale à différents stades de cure confirment le gain de performances mécaniques des graves traitées.

ABSTRACT – Shear strength of a limestone gravel with clayey fines, treated with lime, was determined, using a large shear box apparatus. Results show that cohesion increases thanks to the treatment, friction angle is unchanged. Field tests on an experimental site, at several stages of maturation, confirm the improvement in mechanical performance.

1 Introduction

Pour la réalisation de remblais d'assises de murs de soutènement sur le chantier d'élargissement de l'Autoroute A52, l'entreprise a proposé d'utiliser des graves argileuses traitées à la chaux, provenant de stocks de stériles de carrière. Cette fourniture vient en variante de la solution du projet qui prévoyait l'emploi de graves traitées au liant hydraulique.

Le traitement à la chaux de stériles de carrière est couramment utilisé pour séparer les granulats des argiles et permettre leur valorisation (Guide valorisation des matériaux par traitement à la chaux, 2018). En revanche, les effets du traitement sont rarement intégrés dans le dimensionnement des ouvrages. Cela peut s'expliquer par le manque de connaissance de ces performances : la recherche bibliographique menée n'a pas permis de trouver des références d'études en laboratoire.

De nombreuses études sur sols fins montrent le gain de cohésion acquis par le traitement (De Bel et al., 2009), mais le transfert vers un matériau à granulométrie plus grossière n'est pas possible en l'état actuel des connaissances.

La documentation technique propose de retenir des hypothèses sécuritaires pour le dimensionnement des ouvrages en sols traités : la note d'information Sétra n°34 suggère de retenir une cohésion nulle et un angle de frottement de 35°. Ces hypothèses de dimensionnement peuvent être un frein à la valorisation de matériaux, c'est pourquoi le référentiel en vigueur ouvre la possibilité à l'utilisation de matériaux traités ou matériaux alternatifs, sous réserve d'études appropriées.

Dans une volonté d'utiliser les matériaux locaux, l'entreprise a donc réalisé une étude complète sur des graves argileuses disponibles à proximité du chantier ; cette étude s'est déroulée en deux phases. La première phase, en laboratoire, a consisté en préliminaire à la caractérisation du matériau et une étude de traitement par les essais conventionnels. Les caractéristiques de cisaillement de la grave traitée ont ensuite été mesurées au moyen d'une boîte de cisaillement de grandes dimensions. Le même appareillage a permis de mesurer les paramètres de cisaillement de la grave non traitée, afin d'évaluer les effets du traitement. Dans une deuxième phase, une planche d'essais a été mise en œuvre. Des

essais in-situ ont permis de valider les hypothèses retenues pour le dimensionnement de l'ouvrage.

2 Matériau et étude de traitement préalable

L'étude porte sur un matériau stérile de carrière issu d'un gisement calcaire du Valanginien supérieur, situé près de Marseille.

Il s'agit d'une grave concassée, à matrice limoneuse et argileuse de couleur ocre, dont les caractéristiques de nature sont données au tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques de nature de la grave argileuse

D _{max} (mm)		D ₅₀ (mm)	Passant à 2 mm (%)	Passant à 80 µm (%)	Passant à 2 µm (%)	V _{BS} (g/100g de sol)
25		5	37	19,6	4,8	0,39
W _L (%)	W _P (%)	I _P (°)	C _{LA} * (fraction 10/14 mm) (°)	C _{MDE} * (fraction 10/14 mm) (°)	Classe GTR	Groupe selon NF EN 16907-2
28,7	19,8	8,9	33	33	B51	G3

*C_{LA}, C_{MDE} : coefficients Los Angeles et micro-Deval

L'étude de traitement menée sur la fraction 0/20 mm a permis de retenir un dosage en chaux de 1 %. La chaux est une Proviacal ST CL90, très réactive. Les caractéristiques de comportement au compactage de la grave traitée et résultats des essais de poinçonnement IPI et I. CBRi sont donnés dans le tableau 2 : les performances recherchées pour un usage du matériau traité en remblai sont vérifiées par ces essais.

Des essais de cisaillement rectiligne selon la norme ISO 17892-10, sur le matériau écrêté à 6 mm, traité à 1% de chaux, et après 28 jours de cure ont également été menés. Les éprouvettes ont été compactées à la teneur en eau de l'optimum Proctor et à une masse volumique sèche correspondant à 98,5% de la masse volumique sèche de l'optimum Proctor ; dans ces conditions, et pour des contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa, les caractéristiques de résistance au cisaillement de la fraction 0/6 mm sont de :

- Pic : $c' = 109$ kPa ; $\varphi' = 37^\circ$;
- Final : $c' = 26$ kPa ; $\varphi' = 40^\circ$.

Tableau 2. Résultats des essais Proctor Normal, IPI et I. CBRi de la grave traitée à 1% de chaux

Masse volumique sèche OPN (Mg/m ³)	Teneur en eau OPN (%)	IPI à l'OPN (°)	IPI (wOPN ; 98,5% pdOPN) (°)	I.CBRi (wOPN ; 98,5% pdOPN) (°)
2,10	8,9	35	32	40

3 Résistance au cisaillement de la grave traitée et non traitée : essais à la grande boîte de Casagrande

3.1 Matériel

La grande boîte de Casagrande d'Inrae (ex Irstea) est constituée de deux demi-boîtes, la partie supérieure glissant sur la partie inférieure. Des vérins hydrauliques asservis transmettent les sollicitations horizontales et verticales, pilotées au choix en force ou déplacement. Des servovalves permettent la régulation et la stabilisation des efforts. Un

automate relié à un logiciel développé en interne assure le pilotage du banc et l'acquisition des données.

Pour une description complète du banc et de certaines applications, on se reportera à (Bernard et al., 2016).

Dans le cadre de l'étude, le protocole suivi respecte les préconisations de la norme NF EN ISO 17892-10, partie cisaillement rectiligne. Les dimensions du boîtier utilisé sont de longueur 300 x largeur 300 x hauteur 400 mm ; ainsi, le facteur d'échelle (longueur du boîtier/ D_{max}) est de 12. La vitesse de déplacement retenue est de 1 mm/min, pour un déplacement horizontal total de 55 mm.

3.2 Méthodes expérimentales

L'objectif de compactage des éprouvettes reproduit l'objectif fixé pour le chantier : wOPN, 98,5% pdOPN.

Compte-tenu de la quantité de matériau nécessaire pour l'étude (environ 60 kg par éprouvette), les opérations de préparation des échantillons sont réalisées manuellement :

- Homogénéisation du volume total par brassage ;
- Fractionnement en 12 parts égales : 1 part correspond à une couche de compactage (4 éprouvettes de 3 couches chacune) ;
- Humidification de chaque part suivie d'une conservation pendant 24 h en sac hermétique ;
- Traitement à la chaux suivi d'un délai d'attente d'1 heure avant compactage ; le dosage de 1 % de chaux s'entend comme masse de chaux rapportée à la masse des produits secs en présence.

Les éprouvettes sont confectionnées par compactage dynamique au moyen d'un compacteur vibrant de laboratoire, en trois couches, à l'intérieur d'un étui en géomembrane directement placé dans le boîtier. On s'assure ainsi que les dimensions finales de l'éprouvette permettront après la cure, de l'insérer dans le boîtier. Par ailleurs, le bâti du boîtier constitue un massif de réaction permettant le compactage aux objectifs voulus. Après confection, l'éprouvette dans son étui est retirée du boîtier, enveloppée dans un film plastique, puis conservée 28 jours dans le laboratoire dont la température est maintenue à 23°C.

Au terme de la cure, chaque éprouvette est placée dans le boîtier, l'étui est retiré, puis on procède au cisaillement.

Les essais de cisaillement ont été réalisés après 28 jours de cure pour les matériaux traités, aux contraintes normales suivantes : 50, 100 et 200 kPa et en conditions non saturées. Un essai de répétabilité à la contrainte de 100 kPa, permet d'apprécier la dispersion des résultats, notamment la dispersion due à la confection des éprouvettes. Avant cisaillement, la contrainte verticale a été maintenue pendant 1 heure, pendant laquelle le déplacement vertical enregistré est inférieur à 1 mm pour toutes les contraintes normales.

Le même protocole est respecté pour les essais sur la grave non traitée, à l'exception du délai de cure, le test de cisaillement étant réalisé directement après le compactage. Après essai, la teneur en eau des éprouvettes cisillées est mesurée : dans le cas de sols traités, la conservation de la teneur en eau durant la cure est ainsi vérifiée.

La figure 1 montre une vue d'une éprouvette traitée, avant et après essai. Après essai, le plan de cisaillement est nettement marqué, le reste de l'éprouvette conserve un aspect massif et cohésif.



Figure 1. Vues de l'éprouvette traitée avant essai (à gauche) et après cisaillement (à droite).

3.3 Résultats de l'essai de cisaillement sur la grave traitée et comparaison avec la grave non traitée

Les courbes de résistance au cisaillement présentent un pic et une résistance finale dans les deux cas, grave traitée et non traitée (figure 2). La résistance de la grave traitée est supérieure à celle de la grave non traitée, au pic et au final. Les déplacements verticaux enregistrés montrent une première phase de contractance, rapidement suivie de dilatance, dans les deux cas, ce qui est cohérent avec un matériau dense. Sur le matériau traité, la dilatance intervient plus rapidement, et est de plus grande ampleur que sur le matériau non traité.

La répétabilité est remarquable sur la grave traitée, satisfaisante sur la grave non traitée. La différence pourrait s'expliquer par l'homogénéité de l'éprouvette elle-même, améliorée dans le cas de la grave traitée par l'opération de malaxage supplémentaire lors de l'incorporation de la chaux.

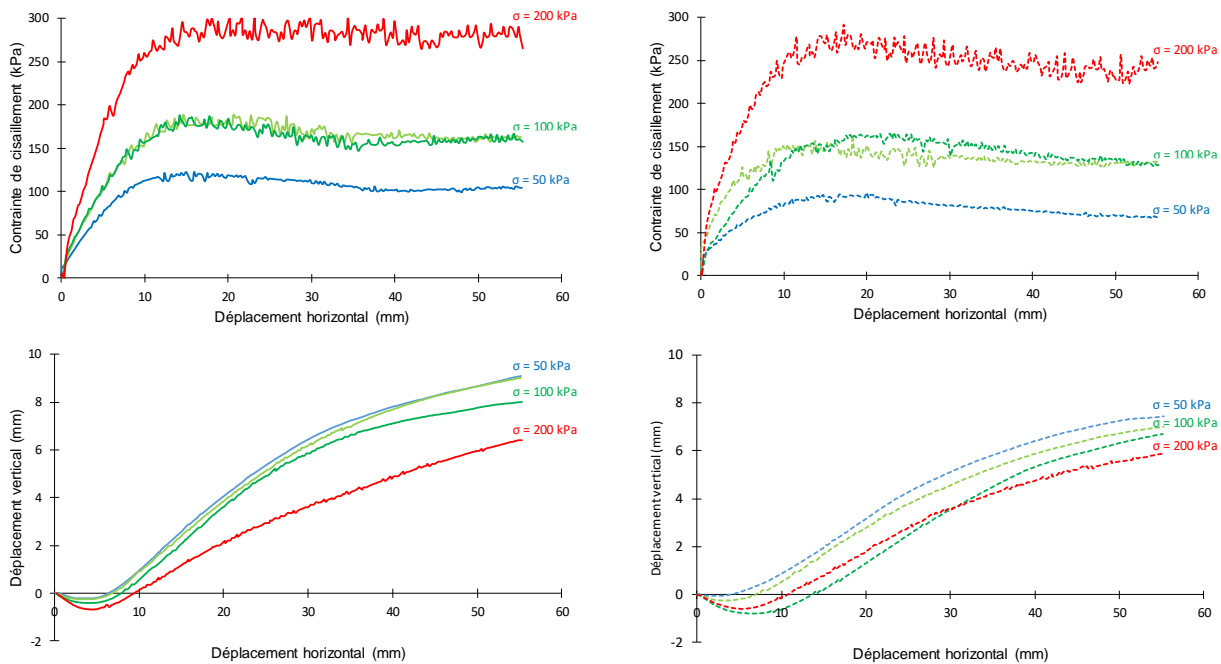


Figure 2. Contraintes de cisaillement et déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal de la grave traitée (à gauche) et de la grave non traitée (à droite)

La figure 3 présente l'interprétation selon le critère de rupture de Mohr-Coulomb : au pic et au final, la cohésion apparente du matériau traité est supérieure d'environ 40 kPa à celle du

matériau non traité. L'angle de frottement est du même ordre de grandeur. La résistance au cisaillement après rupture de la grave traitée est proche de celle de la grave non traitée au pic. Le tableau 3 donne les valeurs détaillées des paramètres de cisaillement. La figure 4 rappelle les caractéristiques de résistance de la fraction 0/6 mm, traitée à 1% de chaux.

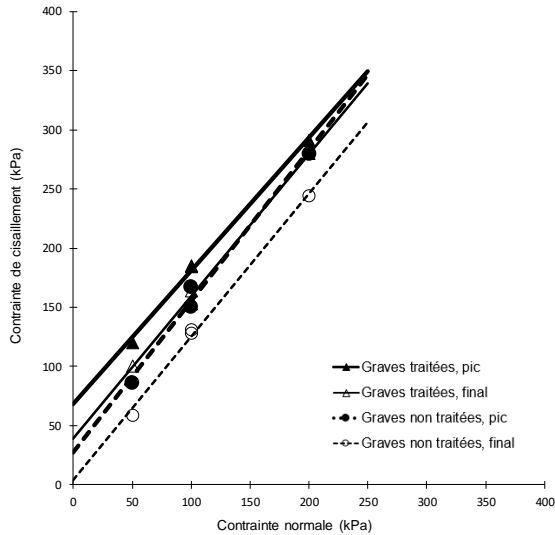


Figure 3. Interprétation par le critère de Mohr-Coulomb, au pic et au final, pour le 0/25 mm traité et non-traité

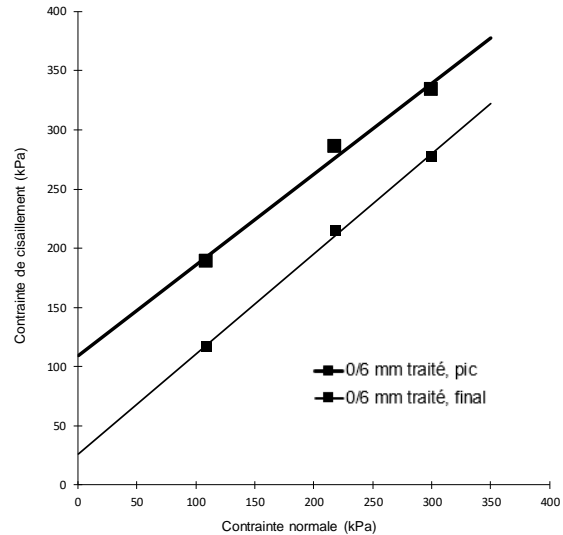


Figure 4. Interprétation par le critère de Mohr-Coulomb, au pic et au final, pour la grave écrêtée à 6mm, traitée

Tableau 3. Caractéristiques de résistance au cisaillement du 0/25 mm traité et non traité

	Critère de pic		Critère final	
	Cohésion apparente (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Cohésion apparente (kPa)	Angle de frottement φ (°)
0/25 mm traité 1% chaux	68	48	39	50
0/25 mm non traité	27	52	4	51

3.4 Discussion

Comparée au matériau écrêté à 6 mm, la résistance de pic de la grave traitée est moins grande. Ces expérimentations confirment qu'il n'est pas pertinent de retenir des caractéristiques de résistance d'un matériau écrêté pour évaluer la fraction totale. En revanche, dans le cas du traitement, il s'avère que l'écrêtement conduit à une surestimation de la cohésion, à l'inverse de ce qui a été constaté sur un matériau naturel (Pedro, 2004).

Comme pour un sol fin, le traitement améliore la résistance mécanique de la grave. Dans le cadre d'une étude pour une application en chaussées, (Hornych et al., 2005) avancent les hypothèses suivantes pour expliquer les effets du traitement à la chaux constatés sur une grave calcaire :

- modification de la fraction argileuse, identique au phénomène connu dans le domaine du traitement des sols ;
- précipitation de carbonate de calcium (effet de syntaxie) qui a tendance à combler les vides entre les grains grossiers ;
- carbonatation de la chaux hydratée en surface des granulats, avec un effet de cimentation des grains grossiers.

Des investigations supplémentaires, notamment à l'échelle microscopique, permettraient de vérifier ces hypothèses.

4 Planche d'essais in situ

Les objectifs de la planche d'essais sont les suivants :

- valider le procédé de fabrication de la grave traitée ;
- définir les modalités de mise en œuvre permettant d'obtenir les objectifs fixés, à savoir : densification de type q3 et portance supérieure ou égale à 60 MPa au sommet du massif ;
- établir un plan de contrôle adapté permettant de garantir les performances recherchées ;
- vérifier l'obtention d'une pression limite $PI \geq 2$ MPa et d'un module pressiométrique de 30 MPa, critères retenus par le bureau d'études « structure » dans le cadre du dimensionnement des murs en L.

La planche d'essais a été réalisée en carrière ; ainsi, de multiples essais ont pu être déployés sans perturber l'activité du chantier. La planche est constituée d'un massif de 30 m de longueur par 3 m de largeur en crête et 2 m de hauteur, soit une géométrie représentative des ouvrages à construire.



Figure 4. Massif constituant la planche d'essais

La grave argileuse a été traitée à 1 % de chaux vive en centrale afin de maîtriser l'homogénéité de la mouture et porter le matériau à une teneur en eau proche de la teneur en eau OPN.

L'évolution de la densité du matériau au cours du compactage a été suivie, dans le but de définir l'énergie de compactage nécessaire à l'obtention d'une densification de type q3. Deux classes de compacteurs vibrants à cylindre lisse ont été testées (V3 et V5) afin de répondre aux contraintes de vibrations des avoisinants du chantier.

A l'issue de la constitution du massif, des contrôles au pénétromètre dynamique lourd et léger, attestent de l'obtention de la densification q3.

Les conclusions de cette planche d'essais sont les suivantes :

- Plage de teneur en eau visée à l'issue de la mise en œuvre comprise entre 0,9 et $1,1 \times W_{OPN}$;
- Densification de type q3 obtenue avec :
 - o 10 passes de compacteur vibrant de classe V3 à 2 km/h pour une couche de 30 cm d'épaisseur compactée

ou

- 10 passes de compacteur vibrant de classe V5 à 2 km/h pour une couche de 50 cm.

Les contrôles de portances à la Dynaplaque menés à différents âges livrent les résultats suivants :

- à J+1 : modules compris entre 27 et 56 MPa pour une moyenne à 38 MPa ;
- à J+5 : modules compris entre 69 et 100 MPa pour une moyenne à 87 MPa ;
- à J+20 : modules compris entre 90 et 148 MPa pour une moyenne à 115 MPa.

Des essais pressiométriques ont été réalisés après 3, 4 et 6 mois de cure. Les résultats présentés en figure 5 montrent une dispersion qui a été attribuée aux nombreux prélèvements réalisés lors de la construction de la planche et mal re-compactés. En moyenne, les caractéristiques mécaniques augmentent dans le temps ; la pérennité des effets du traitement à 6 mois est confirmée et les hypothèses de calcul validées.

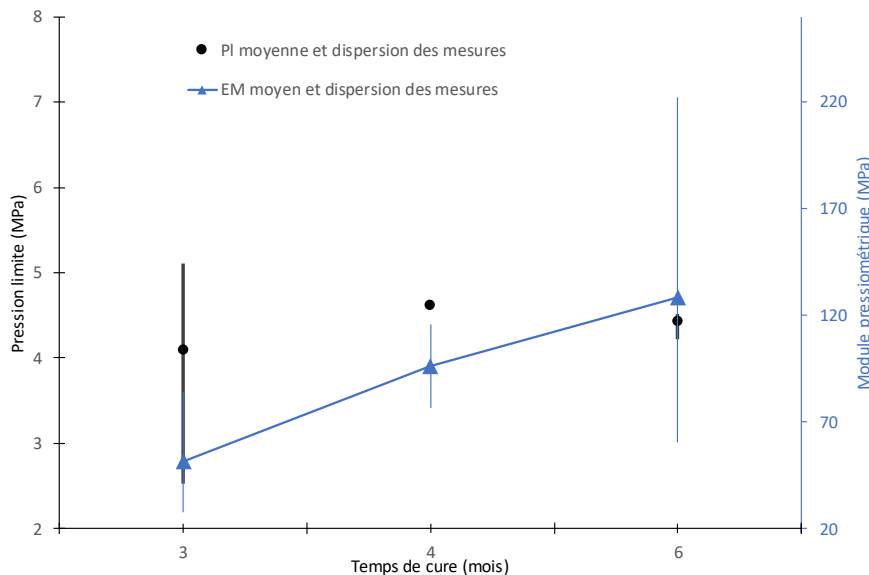


Figure 5. Evolution des caractéristiques pressiométriques de la grave traitée à la chaux en fonction du temps de cure

5 Conclusion

La résistance au cisaillement d'une grave calcaire argileuse traitée à la chaux a été mesurée en laboratoire. L'ajout de 1% de chaux permet d'augmenter la cohésion à 28 jours de 40 kPa par rapport à la grave non traitée. La mesure des paramètres de cisaillement sur le matériau écrêté, au moyen des appareils usuels de laboratoire, ne permet pas d'estimer les caractéristiques de la grave totale. Dans le contexte d'un traitement, la cohésion est alors surestimée.

Le gain en performance mécanique a été confirmé in-situ par des essais pressiométriques à différents stades de la cure, jusqu'à 6 mois. La pérennité des effets du traitement à 6 mois est démontrée.

Ces résultats d'essais permettent d'intégrer les effets du traitement dans les calculs de dimensionnement, et de valoriser des matériaux locaux. Ils sont valables sur le matériau testé et dans les conditions du test.

Remerciements : les auteurs remercient l'équipe du laboratoire de Morangis (VINCI Construction Terrassement), l'équipe du laboratoire de chantier de l'A52 (VINCI Construction Terrassement / EUROVIA), et le bureau d'études WSP qui ont contribué par leurs travaux à cette communication.

6 Références bibliographiques

Bernard A., Peyras L., Royet P. (2016). L'essai de cisaillement à la grande boîte de Casagrande : un banc expérimental pour évaluer les propriétés des sols grossiers et pour d'autres applications en géomécanique. *Revue Française de Géotechnique*, 146, 4. <https://doi.org/10.1051/geotech/2016004>

De Bel R., Gomes Correia A., Duvigneaud P-H., Francois B., Herrier G., Verbrugge J-C. Evolution mécanique et physico-chimique à long terme d'un sol limoneux traité à la chaux. *Colloque TerDOUEST 2013*

EN ISO 17892-10. Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 10: Essai de cisaillement direct

Hornych P., Hameury O., Kergoët M., Puiatti D. (2005). Etude en laboratoire et sur chantier du comportement de graves calcaires traitées à la chaux. *Symposium Tremti, communication C061*

NF EN 16907-2. Terrassement - Partie 2 : classification des matériaux

Pedro, L.S. (2004). De l'étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels. *Sciences de l'ingénieur. Ecole des ponts ParisTech.*, 195 p.

SEDDRe, ADEME, CEREMA (2018). Guide technique Valorisation des matériaux par traitement à la chaux sur les installations de recyclage.

Sétra, LCPC (2000). Guide des terrassements routiers (GTR)

Sétra, (2012). Note d'information n°34. Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art