

L'essai d'aptitude au traitement mixte : effet du délai d'incorporation du ciment et du délai de cure

The mixed treatment suitability test: cement incorporation delay and curing time effect

NdeyeMagatte FALL^{1,2*}, Modou Kara GUEYE³, Khalifa KAMA³

1 Département Génie Civil, École supérieure Polytechnique 1, Dakar, Sénégal

2 Laboratoire Eau-Energie-Environnement-Procédés industriels, ESP 2, Dakar, Sénégal

3 Institut National du Pétrole et du Gaz, Dakar, Sénégal

* *ndeyemaguette.fall@esp.sn*

RESUME : Ville carrefour située à 30 km de la capitale Sénégalaise, Diamniadio doit répondre à la dynamique démographique et d'urbanisation de la région de Dakar. Le sol de fondation argilo-marneuse gonflante pose beaucoup de contraintes en construction. Ainsi, Les terres excavées sont stockées et deviennent des déchets de construction dont aucune solution n'est appliquée. L'étude porte ainsi à l'utilisation de la marne gonflante de Diamniadio en matériau de construction routière. La marne litho stabilisée à 25% est améliorée à la chaux /ciment. Après détermination des caractéristiques géotechniques, des teneurs en éléments chimiques, on a évalué l'aptitude des mélanges au traitement pour ensuite déterminer les classes mécaniques. Au test d'aptitude au traitement, les formulations mixtes 3%CaO4% CemII et 3%CaO5% CemII restent inadaptées après mesure du gonflement volumique. Cette particularité est notée dans la littérature pour les sols traités à la chaux/ciment bien que répondant aux critères de traficabilité avec les performances mécaniques escomptées. Pour justifier l'inaptitude au traitement mixte des sols , l'effet du délai d'incorporation du ciment et de la durée de cure en sac étanche à 20°C sont évalués dans le temps. A l'issue des résultats, on constate que la cure minimale de 24 heures confère une stabilité dimensionnelle avec un gonflement volumique nul, une résistance à la traction par fendage supérieure à 0,2 MPa et une capacité d'absorption à l'eau réduite.

ABSTRACT: A crossroads city located 30 km from the Senegalese capital, Diamniadio must respond to the demographic and urbanization dynamics of the Dakar region. The swelling clay-marl foundation soil poses many constraints in construction. Thus, the excavated land is stored and becomes construction waste for which no solution is applied. The study thus focuses on the use of the Diamniadio inflatable marl made of road construction material. The litho marl stabilized at 25% is improved with lime/cement. After determining the geotechnical characteristics and the chemical element contents, the suitability of the mixtures for treatment was evaluated and then the mechanical classes were determined. In the test of suitability for treatment, the mixed formulations 3% CaO4% CemII and 3% CaO5% CemII remain unsuitable after measurement of the volume swelling. This particularity is noted in the literature for lime/cement treated soils, although they meet the criteria of traceability with the expected mechanical performance. In order to justify the inability to treat the soils in a mixed manner, the effect of the time taken for the cement to be incorporated and of the duration of the cure in a sealed bag at 20° C. are evaluated over time. At the end of the results, it is found that the minimum cure of 24 hours confers dimensional stability with zero volume swelling, a tensile strength by splitting greater than 0.2 MPa and a reduced water absorption capacity.

Mots-clés: Marnes ; Aptitude ; Traitement ; Chaux ; Ciment.

1 INTRODUCTION

Pour la plupart des études de tracés routiers, le choix de constitution des plateformes de chaussées est stratégique dans un contexte de préservation des ressources en matériaux de qualité et de souci économique et environnemental afin de limiter les transports de matériaux (Kergoet, 2001). L'utilisation en matériau de plateforme support de chaussée nécessite pour certains sols, un traitement mixte à la chaux et aux liants hydrauliques afin de répondre aux exigences de traficabilité et de portance. Le premier critère à satisfaire pour le choix du couple sol-liant est l'aptitude au traitement selon la norme AFNOR NF P 94-100. Cet essai traduit la capacité du sol à être amélioré avec de la chaux et/ou un liant hydraulique pour atteindre une performance mécanique et une stabilité dimensionnelle par la mesure du gonflement volumique. Les mélanges mixtes à la chaux et aux liants hydrauliques présentent le plus souvent une aptitude douteuse au traitement après mesure du gonflement volumique accéléré bien qu'ils répondent aux critères de traficabilité avec les performances mécaniques exigées.

Plusieurs études de formulation ont montré la sélectivité de cet essai qui permet d'orienter la suite de l'étude et d'en limiter le volume. (Kergoet 2001). Des études de formulation sur des terres excavées en région parisienne ont montré le choix porté sur un sol amélioré à la chaux en raison des valeurs de gonflement volumique inférieures à 5%. Pas en revanche pour la formulation à traitement mixte dont les résultats du test d'aptitude sont considérés douteux (Kergoet, 2001).

Cette étude consiste d'une part à évaluer l'aptitude au traitement des mélanges chaulés et des mélanges traités à la chaux et au ciment selon la norme AFNOR NF P94-100 sur une marne et d'autre part sur les mélanges mixtes à aptitude douteuse d'évaluer l'effet du délai d'incorporation du ciment et l'effet du délai de cure avant la mise en immersion. On détermine le gonflement volumique et le coefficient d'absorption de chaque mélange dans le temps.

2 CARACTERISTIQUES DES ZONES D'ECHANTILLONNAGE

La marne est prélevée à Diarnniadio, dans la région de Dakar, au Sénégal(fig.1). Très plastique, elle est lithostabilisée au sable issu des carrières d'exploitation des phosphates avant son traitement aux liants hydrauliques et/ou à la chaux

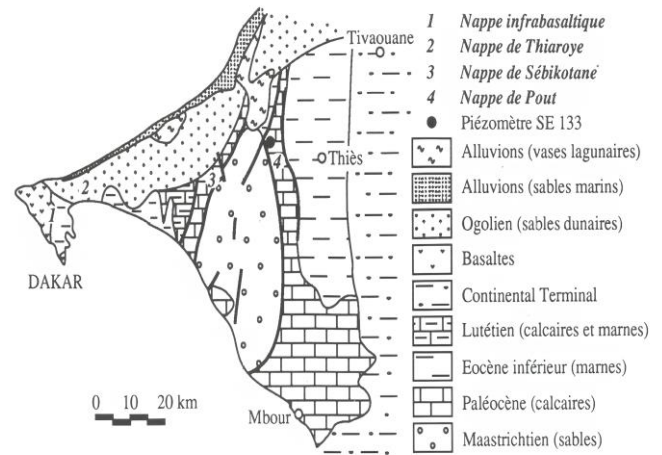


Figure 1. Cadre géologique de la presqu'île du Cap-Vert (Mudry et Travi, 1994)

2.1 Contexte géologique

La ville de Diarnniadio est entre le horst de Diass et le graben de Rufisque. La zone d'étude se caractérise par des formations du Lutétien et composée de marno-calcaires reposant sur des calcaires(fig.2). Les formations du lutétien sont surmontées par des argiles noirâtres appelées des vertisols. Les vertisols sont des sols caractéristiques des climats de type tropical, généralement fertiles et contenant de la smectite.

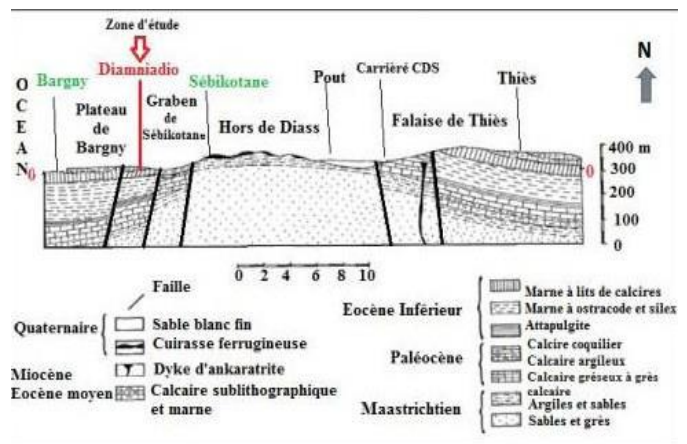


Figure 2. Coupe géologique des régions de Bargny et Thiès. (Martin, 1970)

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 Analyse minéralogique et caractérisation géotechnique

Les prélèvements d'échantillons sont extraits sous forme de blocs entre 3m et 4m de profondeur à l'aide d'une pelle mécanique (extraction frontale) à différents endroits du site puis broyés et tamisés à 400µm.

Le matériau obtenu est soumis à l'analyse minéralogique au Centre d'enseignement, de recherche et d'innovation Matériaux et Procédés d'IMT Nord Europe, au diffractomètre à anticathode en cobalt. L'utilisation du logiciel X'Pert High Score Plus version (2) a permis l'identification qualitative et quantitative des différentes phases minérales. L'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X utilisée selon les modalités de la norme NF P 15-467 au CERI de IMT Nord Europe a servi d'identifier la composition chimique de la marne.

La caractérisation géotechnique de la marne s'est effectuée au laboratoire sol du département Génie civil de l'École Supérieure Polytechnique de Dakar, au granulomètre laser (NF EN ISO 17892-4) pour déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le matériau, au FALL-cône afin d'apprécier l'argilosité (NF EN ISO 17892-12), à l'essai Proctor normal (NF P 94-093) pour déterminer les paramètres de compactage optimaux et l'essai CBR (NF P 94-078) pour définir sa portance.

Le sable de litho stabilisation est caractérisé par sa granularité et son module de finesse. La chaux est évaluée au test de la réactivité (NF P 98-106). Sa composition chimique est fournie par le distributeur Inter-chaux. La composition chimique du ciment CEM II 42,5 est fournie par la société commerciale du ciment au Sénégal (SOCOCIM industries).

L'influence de l'ajout du sable sur l'argilosité de la marne est appréciée par les mesures de limites d'Atterberg pour les mélanges 75% marne et 25% sable (75M25S). L'effet de la chaux et/ou du ciment sur les paramètres géotechniques sont aussi évalués.

3.2 Mesure du gonflement volumique et du coefficient d'absorption

Les mélanges 75% marne et 25% sable notés 75M25S sont chaulés à 5% et 6%, d'autres mélanges 75M25S améliorés à 3% Cao sont traités à 4% et 5% de ciment CEMII 42,5. La préparation des différents mélanges consiste, après humidification, à ajouter de la chaux et attendre une durée d'une heure de repos pour un temps de réaction avant d'ajouter, éventuellement, du ciment et observer 30min et passer le mélange au tamis 2mm. Une fois les mélanges préparés, des éprouvettes cylindriques d'élanement 1, de dimensions 5x5cm ($d \cdot h = 5 \times 5 \text{ cm}$) sont confectionnées à la teneur en eau optimale (W_{opt}) avec une densité de $96\% \pm 0,5$ de la densité optimale et compactées statiquement à double effet.

Pour le traitement à la chaux seule, trois éprouvettes sont confectionnées par mélange pour la mesure du gonflement volumique G_v et conservées pendant une durée de cure de $3j \pm 4h$ à $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

à l'air libre dans des sachets élastiques (à défaut d'avoir les 90% d'hygrométrie recommandées par la norme) avant de les immerger entièrement dans un bain thermostaté réglé à $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une durée de $7j \pm 4h$ (fig.3).



Figure 3. Éprouvettes de mesure du gonflement

Pour le traitement mixte, en plus des trois éprouvettes destinées au gonflement, trois autres sont confectionnées pour la résistance à la traction par fendage R_{tb} (fig.4) et dans les mêmes conditions de cure avec une durée de conservation à l'air libre de $4h \pm 15 \text{ min}$. Ces conditions de cure accélèrent les réactions d'hydratation au sein du matériau traité et permettent d'entrevoir rapidement une perturbation physico-chimique éventuelle. Les éprouvettes de mesure de gonflement et de résistance à la traction par fendage sont toutes immergées entièrement dans un bain thermostaté réglé à $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une durée de $7j \pm 4h$.

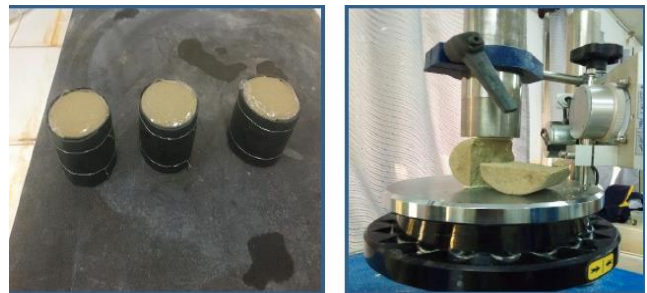


Figure 4. Éprouvettes de test de la résistance à la traction par fendage

A termes, les éprouvettes sont soumises à la mesure du gonflement volumique conformément à l'essai d'aptitude suivant la norme AFNOR NF P 94-100 et à la mesure du coefficient d'absorption exprimé en pourcentage représentant le rapport entre la masse d'eau absorbée au cours des 7 jours d'immersion et la masse de l'éprouvette avant immersion. Les critères d'évaluation de l'aptitude des sols traités à la chaux et/ou ciment ainsi que leurs seuils sont présentés dans le tableau 1

Tableau 1. Critère d'appréciation de l'aptitude d'un sol traité à la chaux et/ou au liant hydraulique (GTR 2023).

Type de traitement	Aptitude du sol	Gonflement volumique GV %	Résistance fendage R _{tb} MPa
Traitement mixte	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq GV \leq 10$	$0,1 \leq R_{tb} \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$
Traitement à la chaux	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré

L'aptitude au traitement des sols est fonction de la valeur du gonflement volumique qui ne doit pas excéder 5%. A plus de 5%, le traitement est défini douteux voire inadapté à plus de 10%. Les traitements à la chaux et aux liants hydrauliques doivent aussi présenter une résistance à la traction brésilienne de plus de 0,2Mpa pour un traitement adapté

Les mélanges chaulés et mélanges à traitement mixte sont évalués à l'aptitude au traitement selon la norme AFNOR NF P94-100. Sur les mélanges mixtes à aptitude douteuse, on évalue l'effet du délai d'incorporation du ciment en conservant les mélanges chaulés pendant une heure, 24 heures, 3jours,7jours et 14 jours avant l'ajout du ciment. Les éprouvettes d'elancement 1 sont ensuite confectionnées, conservées et mise en immersion conformément à la norme d'essai sur l'aptitude au traitement mixte. L'effet du délai de cure est aussi évalué en conservant d'autres éprouvettes d'elancement 1 pendant 4 heures, 24 heures, 7 jours ,14 jours et 60 jours en sacs étanches avant la mise en immersion dans le bain thermostaté.

A termes de l'immersion, les éprouvettes sont essorées puis pesées à l'air et dans l'eau afin de déterminer le gonflement volumique et le coefficient d'absorption. Les éprouvettes sont ensuite portées à l'étuve jusqu'à leur dessiccation complète afin de calculer la densité sèche et la teneur en eau de mise en œuvre.

4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Essais de caractérisation géotechnique et minéralogique

La roche marneuse à l'état bloc est broyé et tamisée à 400 μ m (fig.5).



Figure 5. Matériau en l'état de bloc et après broyage

La composition chimique élémentaire présente une silico-calco-alumineuse de l'échantillon brut, avec une prédominance de la silice Si₂O₂ de 40,55%, de l'oxyde de calcaire CaO de 31,77% et de l'Alumine Al₂O₃ de 13,34%. (tableau 2). La silice et l'alumine représentant à elles seules plus de 50% , elles confèrent au sol sa sensibilité à l'eau. Le Fe₂O₃ (8,84%) et de CaO (31,77%) confirme l'existence de goethite, de la calcite et de l'illite par la teneur en potassium (K₂O).

La nature minéralogique renferme de la montmorillonite, de l'illite, du quartz et de la calcite.

Tableau 2. Caractérisation chimique de la marne

Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
%	%	%	%	%	%
13,3	40,5	31,7	8,8	0,6	1

La roche sédimentaire argileuse classée CL par le GTR2023 est réduite en sol par broyage et classée F4. Le sol marneux ainsi obtenu, présente un fort potentiel de gonflement et de retrait. Matériau très sensible à l'eau et de faible portance (tableau 3), son utilisation routière est proscrite par le catalogue de dimensionnement des structures de chaussée du Sénégal de l'AGEROUTE. Le traitement du sol marneux s'avère nécessaire.

Tableau 3. Caractérisation géotechnique de la marne

Elts< 63 μ m %	W _R %	W _P %	W _L %	IP %	ICBR	Gonfl Axial %
45	23	45	114	69	3	10

Son gonflement axial est de 10% pour une valeur d'indice de CBR apres immersion de 3.

4.2 Lithosyabilisation par ajout de chaux

L'apport d'un sable fin à une proportion de 25% réduit la plasticité. La marne litho stabilisée passe de la classe F4 à F3. Le sable utilisé est un déchet industriel issu des carrières d'exploitation des phosphates dont les propriétés physiques sont consignées dans le tableau suivant.

Tableau 4. Caractéristiques physiques du sable

Elts< 63 μm %	Dmax mm	MF %	Cu	Cc	ρd g/cm ³	VBS
0	0,4	1,2	1,61	0,84	1,41	0,12

Le mélange I (75M25S) est constitué de 75 % de marne et 25% de sable. L'ajout de sable augmente légèrement la densité sèche tout en diminuant la teneur en eau. Pour 25% de sable incorporé, la teneur en eau optimale est réduite de 13%, la densité sèche optimale augmentée de 2%. Les courbes Proctor se sont aplaties traduisant la réduction de la sensibilité à l'eau des mélanges.

4.3 Stabilisation par ajout de chaux et/ou de ciment

La chaux vive aérienne utilisée est d'une grande pureté avec une teneur en CaO de 90,25% et très fine avec plus de 98% de matières qui passent au tamis de 200 μm (tableau 5). Ses caractéristiques physiques donnent une masse volumique apparente ρ_a de 1g/cm³ et une réactivité à 60°C au bout de 50s. Ce qui la place dans la classe des chaux très réactive selon le LCPC-SETRA (2000).

Tableau 5. Composition chimique de la chaux

AL ₂ O ₃ %	CaCO ₃ %	CaO Total %	FE ₂ O ₃ %	CaO Actif %	CO ₂ Résiduel %
13,3	40,5	31,7	8,8	90,25	4

Le CEM II 42,5 est fourni par la SOCOCIM. Son pH 11 et 13,5 en solution aqueuse à 20 °C avec une solubilité de 0,1 à 1,5 g/l (peu soluble). Les données physiques révèlent une masse volumique apparente comprise entre 0,9 et 1,5 g/cm³ et une masse volumique absolue allant de 2,75 à 3,20 g/cm³.

4.3.1 Effet des dosages en chaux sur les paramètres de compactage

Les mélanges 75% marne et 25% de sable sont préhumidifiés 24Heures avant l'incorporation de la chaux. Une durée d'une heure est observée pour la réaction de la chaux avant le démarrage du compactage.

La figure 6 montre l'évolution des densités sèches en fonction des teneurs en eau des mélanges chaulés à 5% et 6%. L'ajout de chaux dans les différents mélanges aboutit à une modification des paramètres de compactage. Un aplatissement de la courbe Proctor du mélange traité observé est due à l'effet de la chaux. Plus la quantité de chaux ajoutée est importante moins la densité sèche optimale est élevée et plus la teneur en eau optimale est élevée. La densité sèche optimale

passse de 1,39 g/cm³ pour la marne à 1,24 et 1,23 g/cm³ pour un traitement respectif de 5% et de 6% de chaux. La diminution de la densité sèche maximale peut s'expliquer par la réorganisation des particules argileuses causées par le phénomène de floculation/agrégations et la faible densité de la chaux par rapport au sol traité.

Parallèlement, la teneur en eau optimale augmente en passant de 26,5% pour la marne crue à 29,4% et 31,5% pour des dosages respectifs de chaux fixés à 5% et 6%. (Djelloul 2008) et (Dris et al. 2018) interprètent ce phénomène comme étant causé par le besoin de plus en plus d'eau nécessaire à la dissociation de la chaux en ions pour fournir les cations de calcium nécessaires à la réaction d'échange cationique, l'augmentation de la capacité de rétention d'eau dans les sols floculés et les besoins d'eau supplémentaires pour la réaction pouzzolanique entre l'argile présente dans le sol et la chaux.

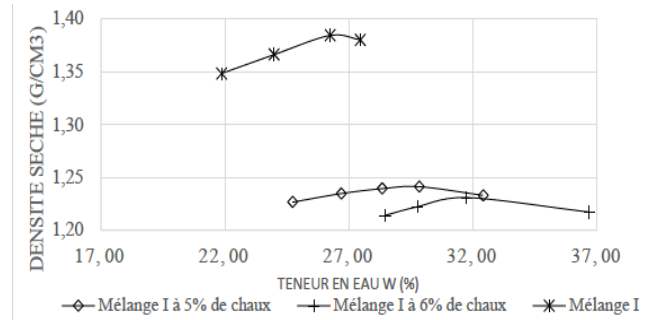


Figure 6. Courbes Proctor normal de la marne et des mélanges traités à la chaux

4.3.2 Effet des dosages chaux et ciment sur les paramètres de compactage

Aux mélanges I (75M25S) sont ajoutés 3% chaux + 4% de ciment et 3% chaux + 5% ciment. Le traitement mixte chaux/ciment réduit la densité sèche optimale en augmentant la teneur en eau.

Le point de fixation de la chaux est obtenu à 3%. L'augmentation du dosage en ciment diminue la densité optimale mais augmente la teneur en eau optimale (fig. 7). Ces constats corroborent les résultats obtenus par différents auteurs à l'instar de (Djelloul, 2008 ; Tuhishime, 2015 ; Kired, 2023).

La réduction de la densité sèche maximale est due essentiellement à la floculation et à l'agglomération des particules d'argile par l'effet de la chaux (Dharmendra 2022), tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est liée en grande partie à l'eau nécessaire pour l'hydratation des ajouts (ciment et chaux), ainsi qu'à la réaction pouzzolanique engendrée par la chaux et à la prise hydraulique due à l'incorporation du ciment (Kavak & Akyar 2007, Khattab et al. 2008, Elkady 2016). Ces liants ont

une action complémentaire. Le traitement préalable à la chaux par son action d'assèchement immédiate amène le sol à un état optimal pour le traitement au ciment (Génie hippique, 2004).

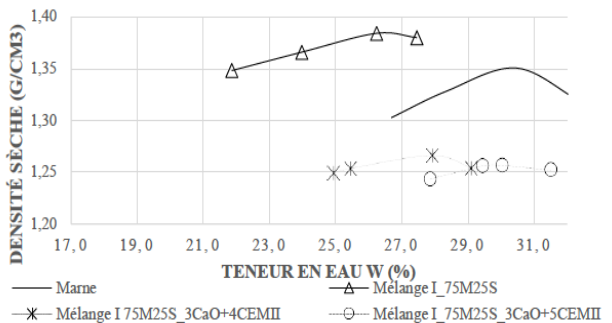


Figure 7. Courbes Proctor normal des mélanges marne+sable traités à la chaux et au ciment

4.4 Gonflement volumique selon la norme NF P94-100

Les essais d'aptitude au traitement sont réalisés conformément à la norme AFNOR NF P94-100. Cet essai traduit la capacité du sol à être amélioré avec de la chaux et/ou un liant hydraulique utilisé pour atteindre un certain niveau de performance géotechnique (la résistance mécanique et une certaine stabilité dimensionnelle).

Les résultats des mesures de gonflement et de résistance à la traction brésilienne des différents mélanges sont mentionnés dans le tableau 6. Le mélange I étant composé de 75% de marne et 25% de sable.

Tableau 6. Synthèse des résultats sur l'aptitude du sol au traitement

Désignation	Gonflement volumique GV %	Résistance fendage Rtb MPa
Mélange I+5% chaux	1,23%	-
Mélange I+6% chaux	0,97%	-
Mélange I+3% chaux+4% ciment	7,17%	0,32
Mélange I+3% chaux+5% ciment	5,59%	0,34

En nous référant au tableau 1 extrait du Guide de traitement des sols qui définit les critères d'évaluation de l'aptitude au traitement d'un sol, on en déduit que, pour un gonflement volumique inférieur à 5%, le traitement est adapté aux mélanges chaulés. En revanche l'aptitude est douteuse pour les mélanges mixtes, puisque le gonflement volumique est compris entre 5% et 10% quand bien même la résistance à la traction reste supérieure à la valeur seuil. De façon

globale, la résistance à la traction brésilienne est d'autant plus importante que le dosage en ciment est élevée. En ce qui concerne le gonflement, plus le dosage en liant (chaux et/ou ciment) est important, mieux sera la stabilité dimensionnelle. L'augmentation de la résistance serait affectée en grande partie par l'action du ciment du fait de sa prise rapide contrairement à la chaux qui a une prise de cinétique assez lente selon le Guide de traitement des sols. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols traités comparativement à la chaux. En effet, l'action du ciment résulte de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement..

La chaux a un effet considérable sur le caractère expansif des matériaux traités. Son action sur le gonflement a été mise en évidence (Influence du traitement sur la portance) par référence aux études menées par Cabane (2004). Cependant, A. Benmessaoud (2017) affirme que de par l'affinité à l'eau de la chaux, une grande part d'eau existante dans le sol peut être absorbée par celle-ci, ce qui contribue largement à la réduction du potentiel de gonflement.

Les mélanges traités à la chaux et au ciment remplissent les critères de résistance à la traction brésilienne, ces dernières sont supérieures à 0,2 MPa. Par contre les valeurs de gonflement volumique sont supérieures 5%. Les tests sont réalisés conformément à la norme sur l'essai d'aptitude au traitement des sols.. Une instabilité dimensionnelle des mélanges traités à la chaux et au ciment alors que le critère de résistance est rempli, a conduit à évaluer l'effet du délai d'incorporation du ciment et de la durée de cure avant immersion dans l'eau des différents mélanges.

4.5 Effet du délai d'incorporation du ciment

Les mélanges 1, 75% de marne et 25% de sable (75M25S) sont traités à la chaux. En principe une heure après, le temps de la réaction de la chaux, le ciment est introduit. Ce délai d'une heure nécessaire à la réaction de la chaux, a été prolongée de 24 heures, 3 jours, 7 jours et 14 jours afin d'évaluer l'effet du délai d'incorporation du ciment sur le gonflement volumique et la capacité d'absorption des mélanges. Les éprouvettes d'élancement sont ensuite confectionnées et conservées 4 heures avant leur mise en immersion conformément à la norme NF P94100.

Les figures 8 et 9 représentent l'évolution du coefficient d'absorption et du gonflement volumique selon le délai d'incorporation du ciment. Les mesures restent importantes, supérieures à 10%. Les mesures de gonflement et de capacité d'absorption dépendent fortement de la densité de mise en oeuvre.

Le coefficient d'absorption évolue très peu dans le temps, il est de 15% en moyenne pour les deux mélanges. Une légère augmentation pour le mélange contenant plus de ciment.

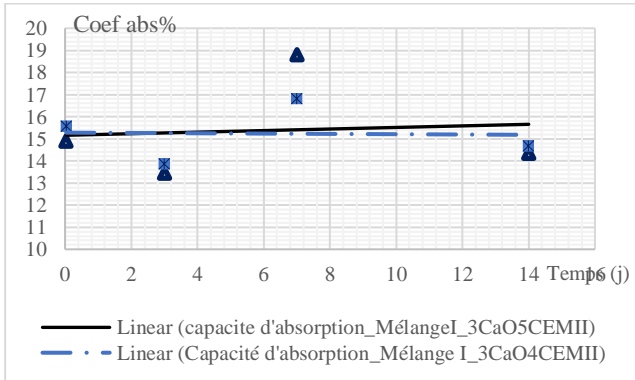


Figure 8. Évolution du coefficient d'absorption selon le délai d'incorporation du ciment

La figure 9 présente les mesures de gonflement volumique. Elles diminuent en moyenne de 1% sur un délai d'incorporation du ciment de 7 jours et restent élevées.

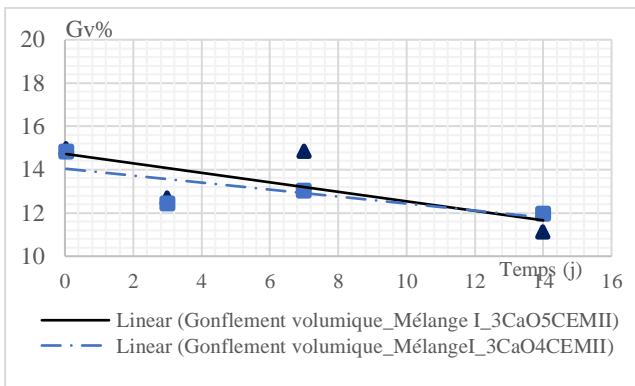


Figure 9. Évolution du gonflement volumique selon le délai d'incorporation du ciment

Les mesures élevées sont dues à une immersion dans l'eau 4 heures après la confection des éprouvettes conformément à la norme NF P 94-100. Malgré l'augmentation du délai de réaction de la chaux et donc d'incorporation du ciment, le gonflement reste toujours supérieure > 5%. Il faut plus de 4 heures de temps de conservation des éprouvettes afin de permettre la formation des ponts d'hydrates qui relient les grains et ainsi rigidifient le sol traité. Un dosage en liant suffisant ainsi qu'une durée de conservation supérieure à 4 heures permettraient de répondre aux exigences de stabilité dimensionnelle. Ainsi, on peut retenir que le délai d'incorporation du ciment n'influe pas sur le gonflement volumique et la capacité d'absorption des mélanges en raison d'une durée de maturation insuffisante de 4 heures.

4.6 Effet du délai de cure

Les éprouvettes d'élongement 1 confectionnées à partir des mélanges 1(75% marne et 25% sable) traités à la chaux et au ciment, selon la norme NF P94-100, sont placés en sacs étanches et conservées à des durées de cure variantes 4 heures, 24 heures, 7 jours, 14 jours et 60 jours avant l'immersion dans l'eau pendant 7Jours à 40°C. Les figures 10 et 11 représentent les mesures de coefficient d'absorption et de gonflement volumique.

Le ciment incorporé au sol se dissout et s'hydrate. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivie par une phase de prise. En s'hydratant, les constituants du liant hydraulique enrobent et relient les grains entre eux: c'est la prise hydraulique. Celle-ci conduit assez rapidement et durablement au durcissement du mélange et à sa stabilité à l'eau. Les mélanges I,75M25S présentent des mesures du coefficient d'absorption d'au moins de 10% pour un délai de cure de moins de 24Heures avant l'immersion des éprouvettes dans l'eau.

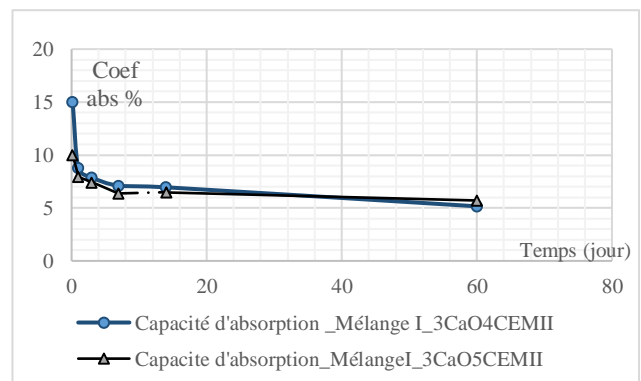


Figure 10. Évolution du coefficient d'absorption selon le délai de cure

A 24 heures de cure, la capacité d'absorption est réduite de 50% pour se stabiliser à 5% à 60 jours.

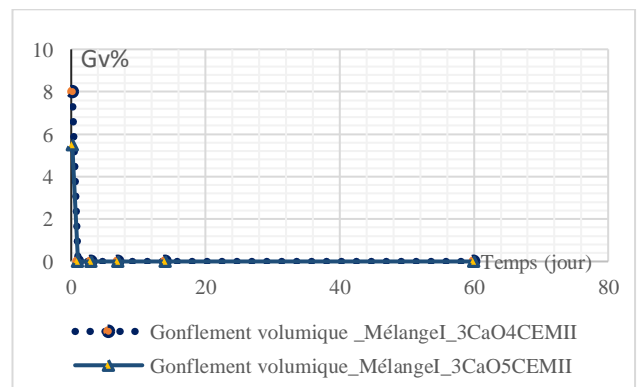


Figure 11. Évolution du gonflement volumique selon le délai de cure

Les mesures de gonflement volumique sont supérieures à 5% pour les deux mélanges à moins de 24 heures de cure. A 24 heures de cure, les mesures de gonflement volumique s'annulent et se maintiennent dans le temps. Le délai de cure contribue à la stabilité dimensionnelle. Au-delà de 24 heures de cure, le mélange rentre dans une phase de durcissement qui assure sa rigidité pour contraindre l'expansion volumétrique. Les ponts d'hydrates reliant les grains réduisent la porosité des éprouvettes et donc la quantité d'eau retenue par absorption.

5 CONCLUSION

L'aptitude au traitement à la chaux et aux liants hydrauliques des sols reste le plus souvent douteuse en raison du gonflement volumique supérieur à 5%. L'essai d'aptitude au traitement des sols consiste à accélérer, par des modalités de conservation particulières, les phénomènes de prise hydraulique qui se déroulent dans un échantillon de sol, et à mesurer les valeurs de gonflement volumique éventuel et de résistance en compression diamétrale.

L'étude de l'évolution du gonflement volumique d'un sol marneux prélevé dans la région de Dakar, très plastique, lithostabilisé à 25% de sable et traité à 3% de chaux + 4% ciment et 3% de chaux + 5% de ciment, montre une instabilité dimensionnelle à moins de 24 heures de cure après le traitement bien que les critères de traficabilité et les performances mécaniques soient remplies. En évaluant l'effet du délai de cure et du délai d'incorporation du ciment, on note que le sol traité et conservé 24 heures avant une mise en immersion dans l'eau, présente un gonflement volumique nul. L'atteinte de la phase de durcissement ou au moins une conservation de 24 heures du sol traité permet de maintenir la stabilité dimensionnelle mais aussi d'optimiser le dosage en liant des sols traités.

Ainsi la détermination du délai de cure permettant de réduire à moins de 5% le gonflement volumique devient indispensable dans l'essai d'évaluation de l'aptitude au traitement des sols. Plus le délai de cure est important plus la stabilité dimensionnelle est assurée.

REFERENCES

- Ageroute. (2015). Catalogue de structures de chaussées neuves et Guide de dimensionnement des chaussées au Sénégal (éd. version 2 provisoire).
- Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines de Saint-Etienne, pp. 150-180.
- Dharmendra, B., Sujit, K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*. Vol. 14, Issue 4, pp1319-1342.
- Djelloul, R. (2008). Influence de l'ajout de chaux et de ciment sur les propriétés physicomécaniques d'une argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en construction routière.
- Driss, A.A.E., Harichane, K. & Ghrici, M. (2018). Effet de la chaux sur la stabilisation des propriétés géotechniques d'un sol argileux. 8^e Symposium international sur la construction en zone sismique, Chlef, 10-11 octobre 2018, pp. 1-10.
- Elkady, T.Y. (2016). The effects of curing conditions on the unconfined compression strength of lime-treated expansive soils. *Road Materials and Pavement Design*. Vol 17, Issue 1, pp52-69
- Génie hippique. (2004). Traitement des sols à la chaux ou au ciment. *Les Haras nationaux*, GEN 31.
- GTR 2023. Guide des Terrassements Routiers. Principes Généraux, Fascicule N°1, Cerema, Edition Mai
- Interchaux. (2018). Bulletin d'analyse : Chaux aérienne vive.
- Kavak, A., & Akyarli, A. (2007). A field application for lime stabilization. *Environnement Geology*, Vol. 51, pp 987-997.
- Khattab, S., Al Juari, K., & Al Kiki, I. (2008). Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime. *Al Rafidain Engineering*, Vol. 16(N°1), pp 102-116.
- Kergoet, M. (2001). Exemple d'étude de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*- 231- Mars-Avril 2001
- Kired, F., Milos, S., (2023). Stabilization of different soil types using a hydraulic binder. *Building*, MDPI. 13(8),2040.
- Mudry J., Travi Y.. (1994). Deux facteurs conjugués de dégradation des ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest - Exemple du Sénégal. *Presses universitaires de Bordeaux*, pp.219- 234,1994
- Tuyishime, H. (2015). Etude comparative des différentes techniques de stabilisation en géotechnique routière.