

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ANSD	: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
AR	: Arase de Terrassement
C	: Ciment
CaCO₃	: Carbonate de calcium
CBR	: California Bearing Ratio
C_C	: Coefficient de courbure de Hazen
CEC	: Capacité d'échange cationique
Cu	: Coefficient d'uniformité de Hazen
CRR	: Centre de recherche routière
D_{max}	: Dimension maximale des grains
DRX	: Diffraction des rayons X
EV2	: Module équivalent à la dynaplaque
GTR	: Guide des Terrassements Routiers
GTS	: Guide de Traitement des Sols
G_v	: Gonflement volumique
IP	: Indice de plasticité
IPI	: Indice Portant Immédiat
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LGEA	: Laboratoire de recherche en Géo matériaux, Environnement et Aménagement
M	: Marne
MO	: Matière Organique
MPa	: Méga Pascal
Oc	: Octaèdre

- PST** : Partie Supérieure des Terrassements
- Rc** : Résistance à la compression simple
- Rc_{4j ou 7j}** : Résistance à la compression simple à 4 jours ou 7 jours (Résistance en âge autorisant la circulation sur la couche traitée)
- Rc_{28j}** : Résistance à la compression simple à 28jours
- Rc_i** : Résistance à la compression simple après 28 jours de cure normale suivie de 32 jours d'immersion dans l'eau à 20°C
- Rc_{60j}** : Résistance à la compression simple après 60 jours de cure normale
- Rtb** : Résistance en compression diamétrale
- Rit** : Résistance en traction indirecte
- S** : Sable
- SES** : Situation Economique et Sociale
- SETRA** : Service d'Etude Techniques des Routes et Autoroutes
- Te** : Tétraèdre
- UMMO** : Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou
- W_L** : Limite de liquidité
- W_p** : Limite de Plasticité
- W_{opn}** : Teneur en eau optimale
- Yd_{max}** : poids volumique sec maximal
- Yh** : poids volumique humide

RESUME

Le présent travail porte sur l'identification et la caractérisation géotechnique d'un sol marneux de la ville nouvelle de Diamniadio située à 35 km à l'Est de Dakar. Une marne sableuse composée de 75 % de marne et 25 % de sable a été constituée en laboratoire pour mener à bien l'étude. Le traitement avec différents dosages de liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment) de la marne sableuse permet d'apprécier son aptitude à être utilisée dans les travaux de terrassements routiers pour la réalisation de remblai et de couche de forme.

Le critère d'aptitude au traitement de la marne sableuse est bien vérifié avec la chaux (dosages respectifs de 5 et 6 %) en ce qui concerne le gonflement volumique. Pour le liant (chaux +ciment), c'est le dosage (3 % chaux +5 % ciment) qui convient en considérant la valeur du gonflement volumique. Les résultats de l'essai de compression diamétrale ont montré que les deux dosages (3 % chaux+4 % ciment) et (3 % chaux+5 % ciment) conviennent.

Le traitement à la chaux de la marne sableuse donne des résultats satisfaisants en termes de portance (IPI, CBR). Le gonflement linéaire dans le moule CBR est fortement réduit. Ces résultats prouvent que le traitement à la chaux de ce matériau permet d'envisager son utilisation en remblai et couche de forme, d'après le Guide de Traitement des Sols (GTS, 2000).

Des essais de résistance en compression simple ont été exécuté sur des échantillons de marne sableuse traitée à la (chaux-ciment), pour étudier les conditions de traficabilité et de tenue à l'eau conformément au GTS (2000). Les résultats ont montré que la couche de forme peut être circulée après 7 jours de traitement, pour les deux dosages. Le dosage de (3 % chaux+5 % ciment) convient pour une circulation sur la couche de forme après 4 jours. Le critère de tenue à l'eau est également vérifié.

Mots clés : Diamniadio, marne, géotechnique, chaux, ciment, traitement, terrassements routiers.

1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'emploi des liants hydrauliques (chaux, ciment) en technique routière s'est développé depuis une quarantaine d'années et concerne essentiellement les sols fins (argiles marneuses, argiles, sables argileux, limons...). Le traitement des sols en place évite le recours aux matériaux de substitution en valorisant les matériaux locaux, dans les travaux de terrassements routiers (Melbouchi, 2017).

Le traitement des sols fins aux liants hydrauliques procure deux avantages (Melbouchi, 2017) :

- l'assèchement des sols ;
- l'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable (résistances mécaniques, insensibilité à l'eau et au gel).

Le gonflement à l'eau, l'aggravation par le gel et l'effritement par attrition sont les causes majeures de dégradation des chaussées. Le liant hydraulique, en réduisant l'importance de ces phénomènes, a une grande influence comme agent de stabilisation. En effet, le liant neutralise les fines plastiques d'un sol sensible à l'eau. Celles-ci sont agglomérées en particules beaucoup plus grosses, plus ou moins imperméables en surface. Leur surface spécifique étant réduite, elles sont moins sensibles au gonflement par imbibition et par suite à l'action du gel. L'indice de plasticité d'un sol traité est très sensiblement abaissé ((Melbouchi, 2017).

Grace au traitement aux liants hydrauliques, les sols marneux deviennent aptes à la réalisation des couches de forme tout en évitant les opérations onéreuses et de substitution (Melbouchi, 2017).

La présente étude porte sur le traitement des sols marneux à la chaux ainsi qu'à la chaux-ciment. Ce procédé est largement utilisé en construction routière. L'influence du traitement est appréciée en considérant les paramètres géotechniques suivants : les limites d'Atterberg, les valeurs optimales de compactage Proctor Normal, l'indice portant CBR, la résistance à la compression simple, la résistance à la traction indirecte.

Le sujet du mémoire s'intitule : *Caractérisation géotechnique des sols marneux de Diamniadio traités aux liants hydrauliques pour leur utilisation en remblai et couche de forme de chaussées routières.*

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui donne tout d'abord un aperçu géographique et géologique de la zone d'étude. Ce chapitre présente également des généralités sur la minéralogie des argiles, les différents types d'argiles ainsi que les problèmes rencontrés en construction routière sur ces types de sols.
- ❖ Le deuxième chapitre décrit la Partie Supérieure des Terrassements (PST) et la couche de forme qui constituent la plateforme. Ce chapitre présente les liants hydrauliques et les techniques de traitement des sols fins aux liants hydrauliques ainsi que les effets du traitement.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie utilisée pour l'étude expérimentale et des résultats des essais sur le sol marneux naturel et la marne sableuse traités à la chaux et à la chaux-ciment.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des recommandations.



CHAPITRE 1 : APERÇU GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE ET GÉNÉRALITÉS SUR LES SOLS ARGILEUX

CHAPITRE 1 : APERÇU GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE ET GÉNÉRALITÉS SUR LES SOLS ARGILEUX

INTRODUCTION

Les principales données se rapportant à la géographie et la géologie de la zone d'étude sont présentées dans ce chapitre. Il s'agit, d'une part, de la localisation géographique du site de prélèvement des échantillons, des données du climat, de la végétation, du relief et, d'autre part, du contexte géologique régional.

1.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE

1.1.1 Localisation et statut administratif

Diamniadio se situe à 35 kilomètres à l'Est de Dakar (capitale régionale), dans le Département de Rufisque. C'était un village de l'ex-communauté rurale de Sébikhotane. C'est le 12 février 2002, par décret présidentiel n° 2002-171, qu'il a été érigé en commune structurée en dix-neuf (19) quartiers (figure 1).



Figure 1 : Localisation de Diamniadio (AGEROUTE, in Diagne, 2019)

1.1.2 Données climatiques

➤ **Pluviométrie**

La pluviométrie est caractérisée par une durée relativement courte de l'hivernage, variant entre trois et quatre mois de juin à octobre. Elle est marquée, d'une part, par une inégale répartition dans le temps et dans l'espace et, d'autre part, par une faiblesse des quantités d'eau enregistrées (ANSD, 2019).

➤ **Température et humidité**

La température varie entre 17 et 25° C de décembre à avril, et de 27 à 30 ° C de mai à novembre. Le régime des vents est marqué par l'influence prédominante de l'alizé. Ce dernier est issu de l'anticyclone des Açores. Sa direction principale varie du Nord-Nord-ouest au Nord-Nord-est (ANSD, 2019).

➤ **Vents**

Diamniadio est caractérisée, pendant une bonne période de l'année, par un microclimat marqué par l'influence de l'alizé maritime, d'où l'existence d'une fraîcheur et d'une humidité quasi permanente et relativement forte de l'ordre de 25%. Toutefois, l'harmattan, qui est un alizé continental saharien, se fait sentir faiblement en saison sèche et au fur et à mesure que l'on s'éloigne des côtes (ANSD, 2019).

➤ **Insolation**

L'insolation est un paramètre qui peut servir, entre autres, dans la quantification des phénomènes de l'évapotranspiration. L'insolation est exprimée en heures et minutes. Les fortes valeurs d'insolation correspondent à des températures très élevées et les faibles valeurs à des températures basses. En général l'insolation moyenne varie de 7,1 h/j pendant la saison pluvieuse où le ciel est toujours nuageux à 8,8 h/j pendant la saison sèche où le ciel est bien dégagé (ANSD, 2019).

1.1.3 Végétation et Faune

La végétation de la commune de Diamniadio est celle du domaine soudano-sahélien constituée par une savane arborée et arbustive. La composition floristique est dominée par *Adansonia digitata* et *Euphorbia sp.* Elle est aujourd'hui très dégradée et peu diversifiée en raison du recul de la pluviométrie et des agressions anthropiques.

Les ressources fauniques sont quasi-inexistantes du fait de la dégradation du couvert végétal suite à l'accroissement considérable de la population et de l'urbanisation. Les quelques spécimens que l'on rencontre sont confinés dans les reliques de végétation et autour des points d'eau existants. La faune répertoriée, se résume à de rares espèces constituées essentiellement de lézards, de gibier à poils (singes, chacals communs) de gibier à plumes (canards à plumes et de gibier d'eau, les pigeons maillés et verts et les francolins) (ANSD, 2019).

1.1.4 Relief

Il comprend un ensemble de collines et de plateaux d'altitudes inférieures à 50 m. Sa couverture géologique comprend une alternance de marnes et de calcaires dont les plus perméables, les calcaires paléocènes de Sébikotane, les sables et les grès du maastrichtien, renferment des nappes aquifères importantes. On y observe le prolongement des bas-fonds fertiles et des sols aptes au maraîchage et à l'arboriculture particulièrement dans la zone rurale (ANSD, 2019).

1.2 CADRE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

1.2.1 Cadre géologique régional

La géologie de Diamniadio ne peut être appréhendée que dans le contexte d'ensemble de toute la presqu'île du Cap Vert. Cette dernière correspond à la partie la plus occidentale du Bassin sédimentaire sénégalais. La presqu'île du Cap-Vert est caractérisée par trois grandes unités géologiques d'âges différentes (figure 2) (Roger et al. 2009) :

- calcaires et marnes du Tertiaire (Paléocène et Eocène) du centre vers l'Est de la région ;
- produits volcaniques du Tertiaire et du Quartaire sur la pointe occidentale ;
- dépôts sableux du Quaternaire sur la côte Nord caractérisée par des formations littorales, deltaïques et lacustres.

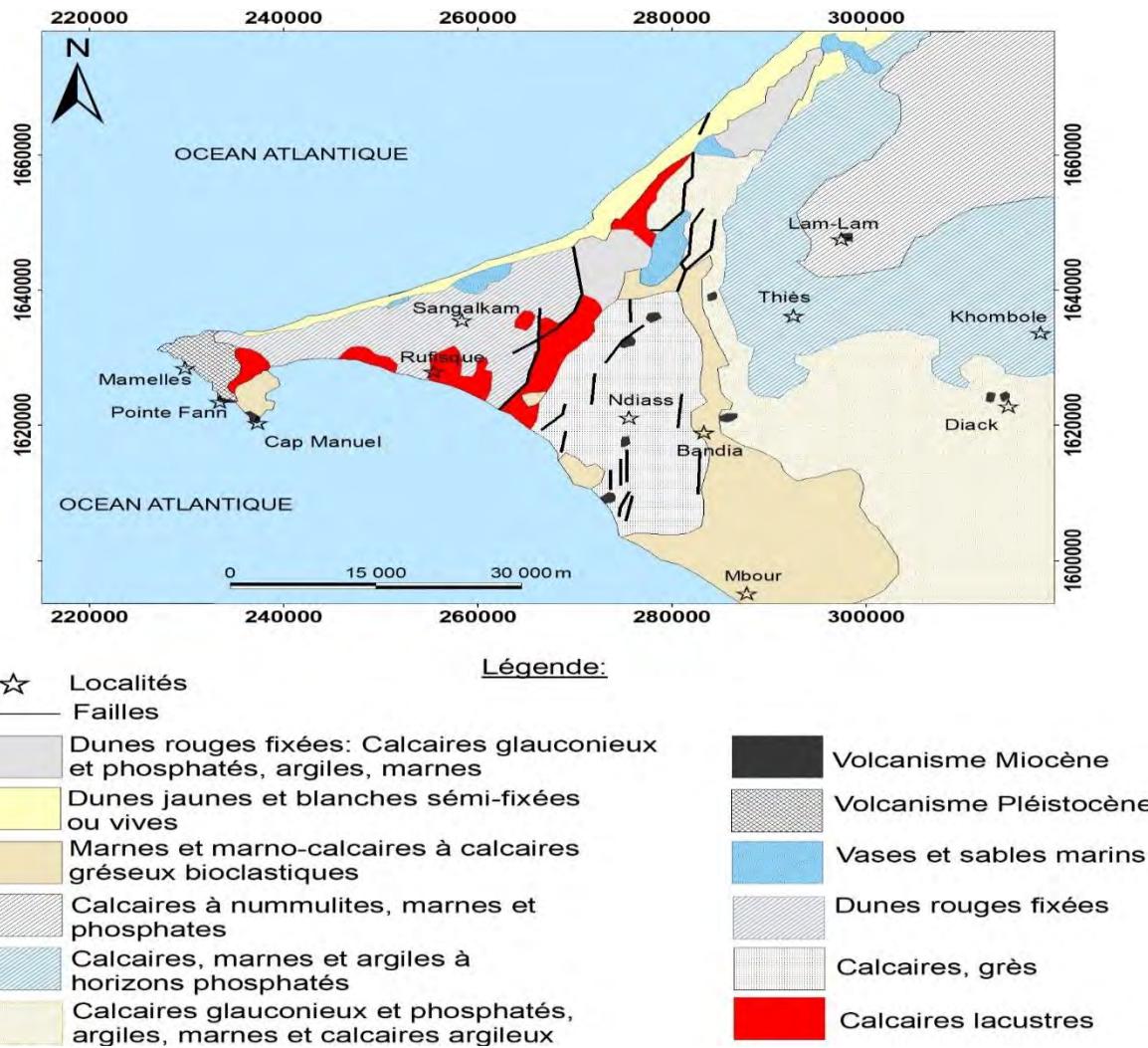


Figure 2 : Carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert et du plateau de Thiès (Roger et al. 2009, modifiée)

1.2.2 Cadre géologique local

Cette partie du Bassin sédimentaire sénégalais est caractérisée par une tectonique cassante avec la présence de failles NE-SW à N-S qui délimitent une succession de horst et grabens correspondant respectivement à la présence de caps rocheux et de plages sableuses (Martin, 1970). La ville de Diamniadio se situe entre le horst de Diass et le graben de Rufisque (figure 3).

En se référant à la notice explicative de la carte de Bargny à l'échelle 1/20 000, la zone d'étude se caractérise par des formations du Lutétien d'une puissance d'environ 25 m et composées de marno-calcaires reposant sur des calcaires. Ces formations calcaires, appelées les calcaires de Bargny, peuvent atteindre 15 à 30 m d'épaisseur en alternance avec des lits de marnes. Ils sont de couleur grisâtre à jaunâtre (Ndiaye, 2019).

Les formations du Lutétien reposent sur celles du Maastrichtien. Elles sont surmontées par des argiles noirâtres d'une puissance maximale de 3 m. La surface de ces sols argileux est bosselée et craquelée. Sur les cartes pédologiques du Cap Vert et du Sénégal, ces argiles noirâtres sont de la famille des vertisols. A l'état humide, les vertisols sont plastiques et collants. Ces derniers sont le résultat de la décarbonatation plus ou moins rapide de la marne par les eaux de ruissellement occasionnant la formation de sillons creusés sur celle-ci appelés ravinements. Les vertisols sont des sols caractéristiques des climats de type tropical, généralement fertiles, où la smectite comprenant le type montmorillonite est habituellement abondante (Ndiaye, 2019).

Du point de vue hydrogéologique, la nappe phréatique est renfermée dans les sables et argiles du continental terminal appelé localement la formation du saloum et les calcaires du Paléocène. Le relief et la nature imperméable des sols favorisent un ruissellement intense des eaux de pluies (Ndiaye, 2019).

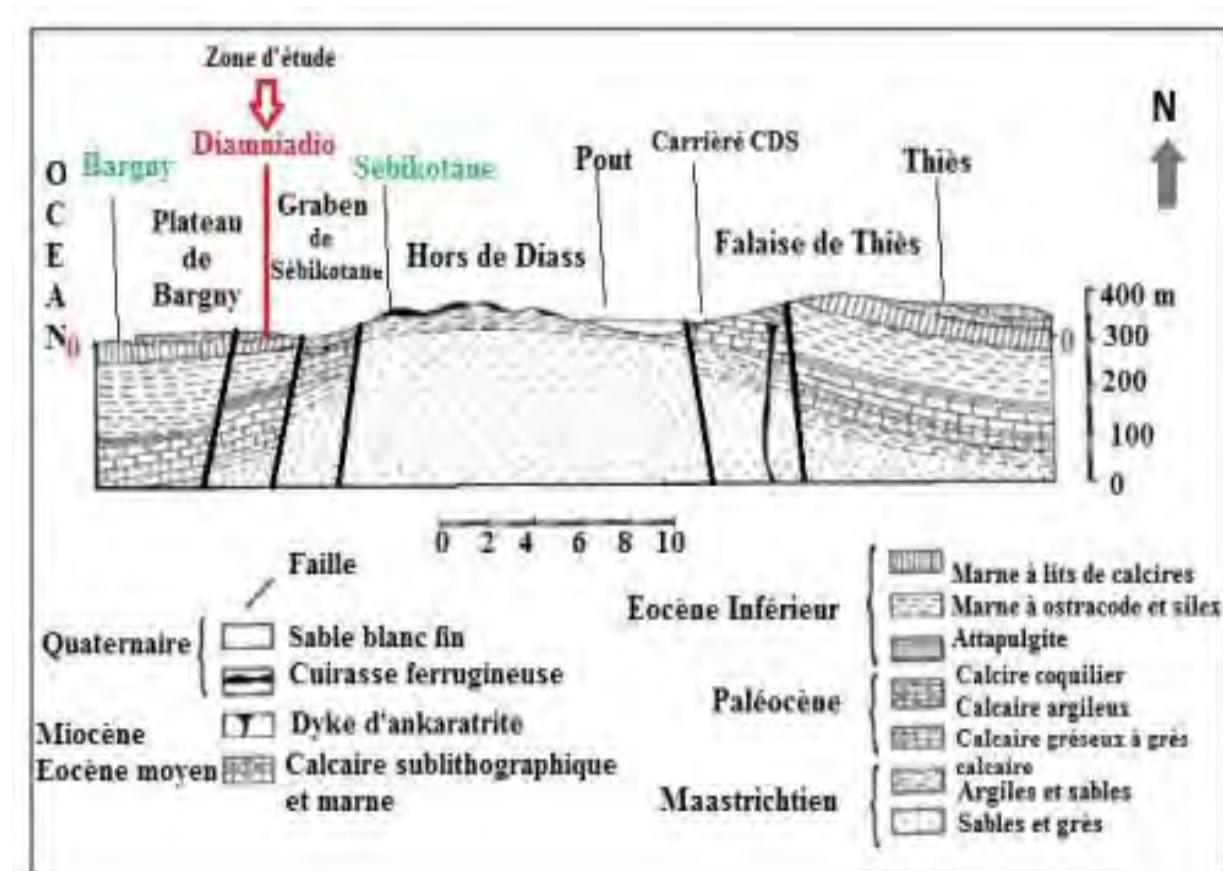


Figure 3 : Coupe géologique des régions de Bargny et Thiès (Martin, 1970, modifiée)

1.3 LES SOLS ARGILEUX

1.3.1 Généralités sur les sols argileux

Le terme "sol" est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies.

Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autres la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les illites et les smectites, etc. Quand ils sont humidifiés à partir d'un état sec, ils subissent des gonflements dus d'une part, à l'absorption des molécules d'eau sur la surface extérieure des particules et, d'autre part, à la pénétration des molécules d'eau entre les feuillets dont l'empilement constitue les particules d'argile. Ce gonflement des argiles dépend des conditions de l'état de compacité du sol et des conditions hydriques. Inversement, si la quantité d'eau diminue dans le sol, il subit une diminution de volume relativement importante. Ceci provoque en particulier le développement d'un réseau de fissures dû au retrait/gonflement en surface (Koussaila et Tarek, 2020).

Les argiles sont des sols très sensibles à l'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories (Koussaila et Tarek, 2020) :

- argiles plastiques : indurées et très déformables ;
- argiles raides : indurées et présentant un comportement plus fragile que la limite d'élasticité. Ceci à cause de la présence des carbonates et du quartz microscopique.

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 µm chargées négativement comme la smectite, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement et/ou le retrait du sol. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. La variation du volume des argiles est fortement influencée par les facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant. A l'échelle macroscopique, ils dépendent des liaisons électriques entre les particules (Koussaila et Tarek, 2020).

1.3.2 Structure élémentaire des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, en réseau cristallin, d'eau (H_2O), de silice sous forme de silicates (SiO_3), et d'aluminium sous forme d'alumine (Al_2O_3). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicate et alumine. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types (Koussaila et Tarek, 2020) :

- le tétraèdre de silice SiO_4 (Te) : 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrent un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (figure 4) ;
- l'octaèdre d'alumine $Al_2(OH)_6$ et éventuellement de magnésium $Mg_3(OH)_6$ (Oc) : 6 ions hydroxydes enserrent un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (figure 5).

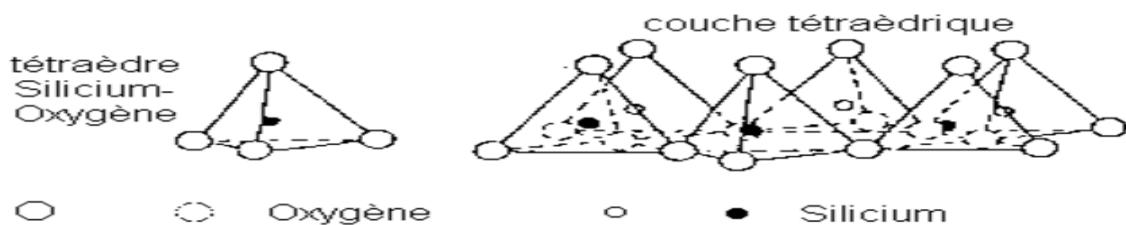


Figure 4 : Structure élémentaire tétraédrique (Koussaila et Tarek, 2020)

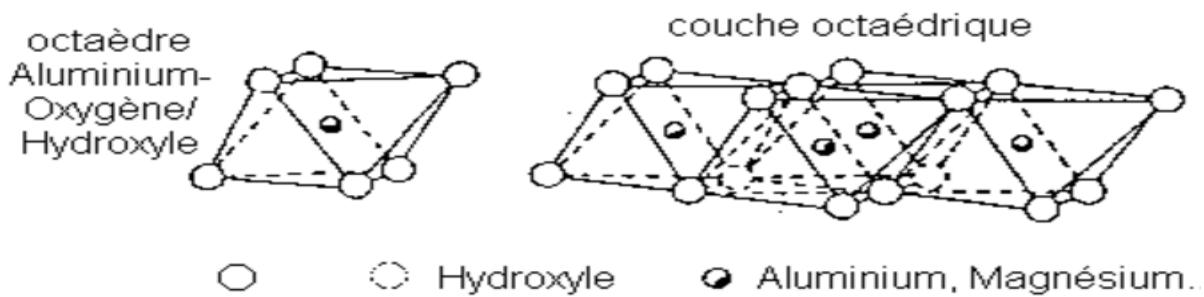


Figure 5 : Structure élémentaire octaédrique (Koussaila et Tarek, 2020)

1.3.3 Structure moléculaire microscopique des argiles

Le feuillet élémentaire se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liaisons covalentes et les liaisons ioniques assurent l'assemblage des feuillets élémentaires. Les forces de liaison entre feuillets sont principalement (Koussaila et Tarek, 2020) :

- les forces d'attraction moléculaires qui sont des liaisons faibles ;

- les liaisons hydrogènes qui apparaissent avec des atomes fortement électronégatifs, comme l'oxygène.

- les substitutions isomorphes qui consistent à remplacer certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence. Ce dernier phénomène crée des déficits de charge qui affaiblissent les forces ioniques de liaison entre les feuillets (remplacement d'un ion Si_4^+ par un ion Al_3^+ dans la couche octaédrique d'aluminium). Les particules sont donc soumises à un ensemble de forces d'attraction et de répulsion qui varient avec la teneur en eau et dépendent des substitutions isomorphes. Malgré la simplicité apparente de la structure des argiles, on en compte un grand nombre d'espèces, qui se distinguent par les défauts liés aux substitutions isomorphes au moment de la formation. Trois types d'argile sont couramment rencontrés : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

✓ La kaolinite

Le feuillet élémentaire est constitué d'une couche de silice et d'une couche d'alumine (figure 6). Entre différents feuillets de kaolinite, le contact se fait entre un plan contenant les ions hydroxyles OH^- de l'octaèdre, et celui contenant les ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre. Dans ce cas, les liaisons inter foliaires résultent de l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van Der Waals, ce qui se traduit par un lien assez fort. Ainsi une particule de kaolinite sera constituée, par exemple, de quelques centaines de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques dizaines de micromètres. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau.

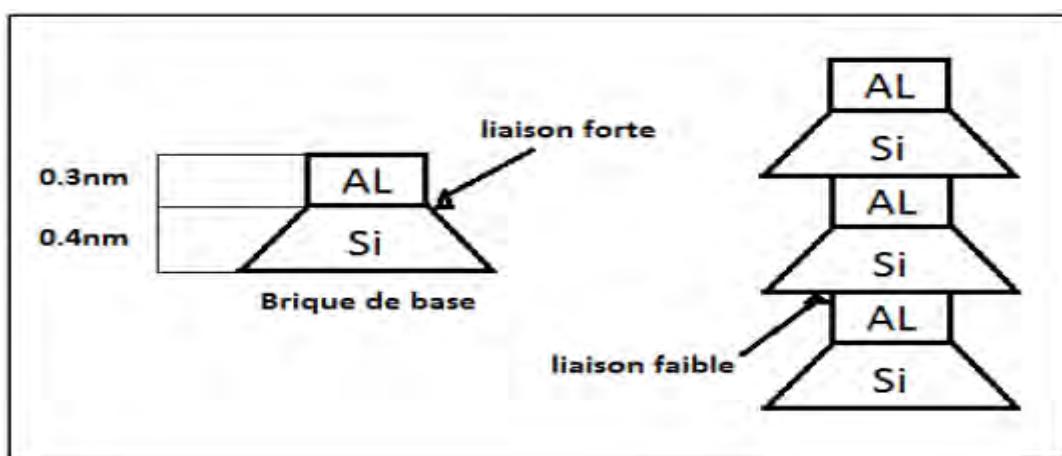


Figure 6 : Structure particulière de la kaolinite (Zeinab et Nehla, 2017)

✓ L illite

Les illites appartiennent à la famille des phyllo silicates. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche octaédrique d'alumine comprise entre deux couches tétraédriques de silice. Dans les couches tétraédriques de silice, un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé dans l'espace inter foliaire par des ions potassium K^+ qui assurent des liaisons fortes entre les feuillets (figure 7). Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter-couche et l'illite n'est pas une argile très gonflante. Les illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de 0,3 μm , et d'une épaisseur de 100 Å.

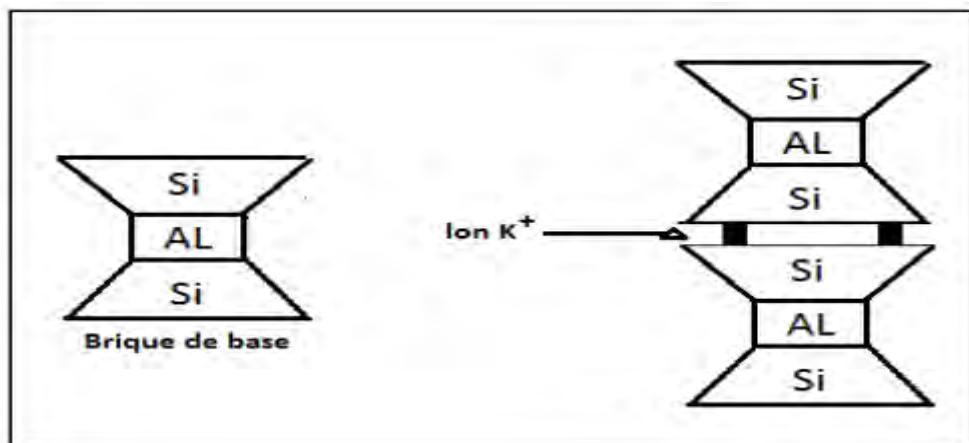


Figure 7 : Structure particulière de l'illite (Zeinab et Nehla, 2017)

✓ La montmorillonite

Le feuillet élémentaire est composé, comme pour l'illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Un ion Al^{3+} est remplacé par un ion Mg^{2+} dans les couches d'alumine (figure 8). Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou par des ions Na^+ (montmorillonite sodique), la valence des ions sodium étant plus faible que celle des ions calcium. C'est la montmorillonite sodique qui aura la plus grande surface spécifique et la plus grande C.E.C. Les liaisons entre feuillets étant très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut être très faible puisque, contrairement aux

autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire. La montmorillonite fait partie de la famille plus générale des smectites définies comme argiles gonflantes.

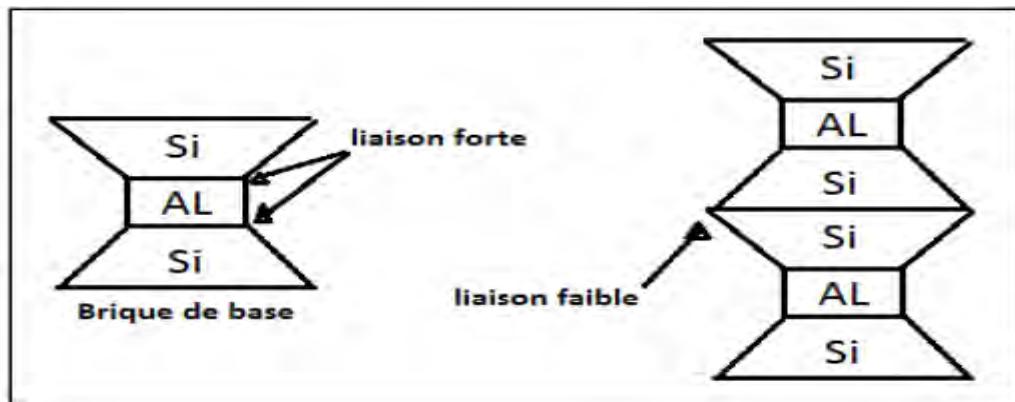


Figure 8 : Structure particulière de la montmorillonite (Zeinab et Nehla, 2017)

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des argiles (Koussaila et Tarek, 2020)

Nom	Nombre de feuillets par particules	Diamètre d'une particule (μm)	Epaisseurs d'une particule (μm)	Surface spécifique en m^2/g	C.E.C en meq/100g
Kaolinite	100-200	0,1-4	1-10	10-20	3-15
Illite	1-10	0,1-1	0,003-0,01	65-100	oct-40
Montmorillonite (smectite)	1	0,1	0,001	700-840	80-150

La figure 9 présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage.

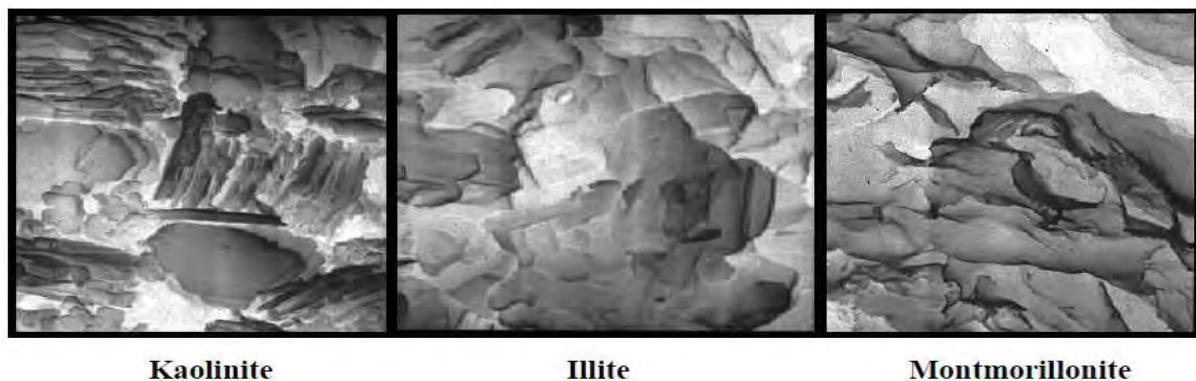


Figure 9 : Photographies au microscope électronique à balayage de différents types d'argile (Koussaila et Tarek, 2020)

1.4 LES MARNES

La marne est une roche sédimentaire contenant du carbonate de calcium (Ca CO_3) et de l'argile. On la définit comme étant un matériau de transition entre le calcaire et l'argile ; c'est une roche carbonatée contenant 30 à 70 % d'argile. Ainsi, elle tient de la fraction carbonatée une structure plus ou moins résistante et de la fraction argileuse une possibilité d'évolution par destruction de la structure par suite de l'action de l'eau sur l'argile conduisant en un matériau plastique. Cette définition purement pétrographique a été sensiblement élargie sur le plan du pourcentage d'argile. En pratique, en génie civil, le nom marne peut être attribué pour toutes roches carbonatées contenant 10 à 90% d'argile (Boudlal et al. 2014).

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plus ou moins plastiques lorsqu'elles sont humides. Mais, à la différence des argiles, elles font effervescence avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des éléments constitutifs (minéraux argileux, carbonates et, parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans le groupe des lutites ou pélites (Zeinab et Nehla, 2017).

La teneur en carbonate (CaCO_3) ou en argile (tableau 2) sont des paramètres essentiels permettant la classification de certaines roches.

Tableau 2 : Classification selon la teneur en carbonate et argile (Boudlal et al. 2014)

Classification de Jung		Classification LCPC	
Roches	% d'argile	% de CaCO_3	Roches
Calcaire	00 à 005	00 à 010	Argile ou Silt
Calcaire-Argileux	05 à 035	10 à 030	Argile ou Silt-Marneux
Marne	35 à 065	30 à 070	Marne
Argile-Calcaire	65 à 095	70 à 090	Calcaire-Marneux
Argile	95 à 100	90 à 100	Calcaire

Les marnes apparaissent constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et phase argileuse. Elles sont réputées pour avoir souvent un comportement particulièrement gênant et dangereux parce qu'elles peuvent être à la fois très dures à l'extraction et très altérables. Les blocs extraits perdent spontanément toute résistance au bout de quelques temps d'exposition aux intempéries. Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argile montmorillonitique ou encore d'argile fibreuse induit des caractéristiques mécaniques mauvaises. Cependant cette influence particulière des argiles peut

être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de texture. Si les liaisons entre les carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement de sol (Zeinab et Nehla, 2017).

1.5 PROBLÈMES LIÉS AUX SOLS ARGILEUX EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE

Il a été constaté que les évaporations de l'eau contenue dans le sol d'assise gonflant sont beaucoup plus importantes au niveau des pieds ou bords de talus et des accotements qu'au niveau de la partie centrale de la chaussée (Diop, 2002).

En effet, le revêtement constitue un obstacle à l'évaporation de cette eau et cela entraîne que le sol support dans l'axe de la chaussée ne subit que de très faibles variations de teneurs en eau alors que latéralement les fluctuations sont d'amplitudes plus fortes.

Durant cette situation, des processus différentiels de gonflement entre l'axe central et les accotements sont inévitables et des désordres prévisibles. Ces désordres commencent souvent à se manifester par des fissurations longitudinales et des orniérages qui s'accentuent vers le bord de chaussée et qui correspondent à un étirement latéral du corps de chaussée, depuis l'axe vers les accotements.

Maintenant sous l'effet du trafic, ces fissures vont se généraliser sur l'ensemble de la chaussée. En effet, les premières fissurations qui s'observent sur le bord de chaussée vont constituer des voies d'infiltration de l'eau de pluie. Il s'ensuit une réduction progressive de la zone d'équilibre. En période de sécheresse, les retraits latéraux font que les butées latérales se dérobent gravement bien que le terrain durcisse et lorsque la saison pluvieuse arrive, ces mêmes bandes s'abreuvent d'eau et perdent leur portance par ramollissement (Diop, 2002).

Ainsi, par le phénomène de retrait-gonflement qui se propage de plus en plus vers l'axe de la chaussée, la dégradation finit par affecter l'ensemble de la chaussée sous le trafic des poids lourds. Il faut toutefois noter que, les chaussées construites sur sols gonflants sont beaucoup plus fragiles durant les saisons humides. Par conséquent, une réglementation de la circulation routière qui mettrait hors d'usage ces types de chaussées durant les saisons pluvieuses pourrait allonger considérablement la durée de vie de celles-ci (figures 10, 11 et 12).

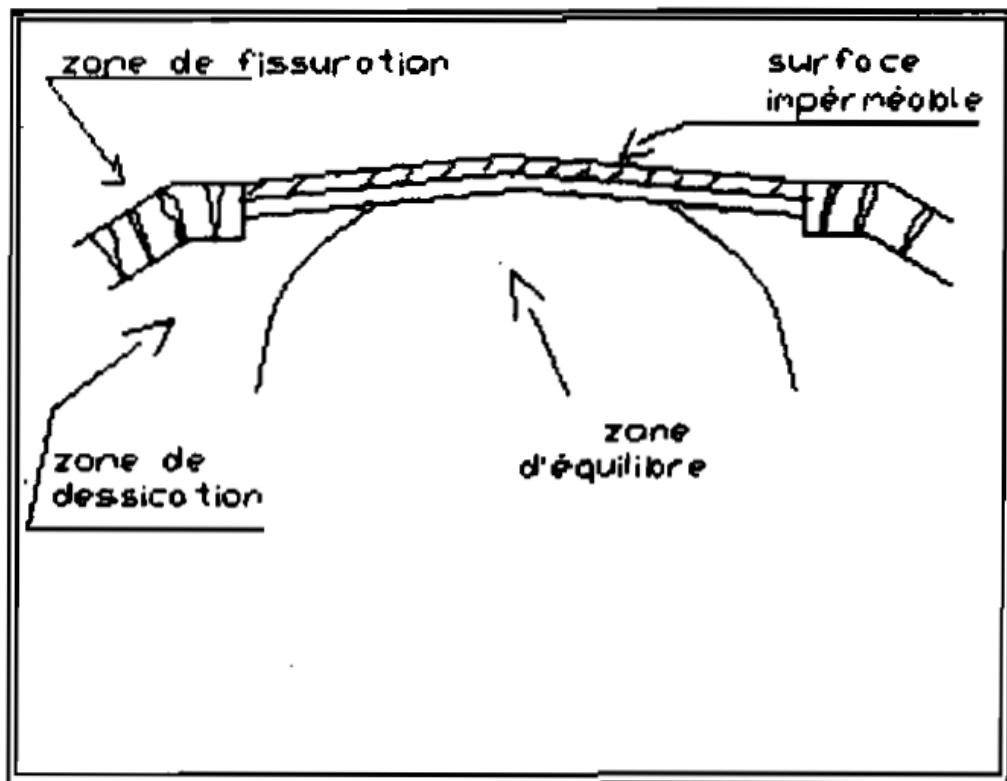


Figure 10 : Schéma d'une chaussée gonflant en fin de saison sèche après une première pluie (Diop, 2002)

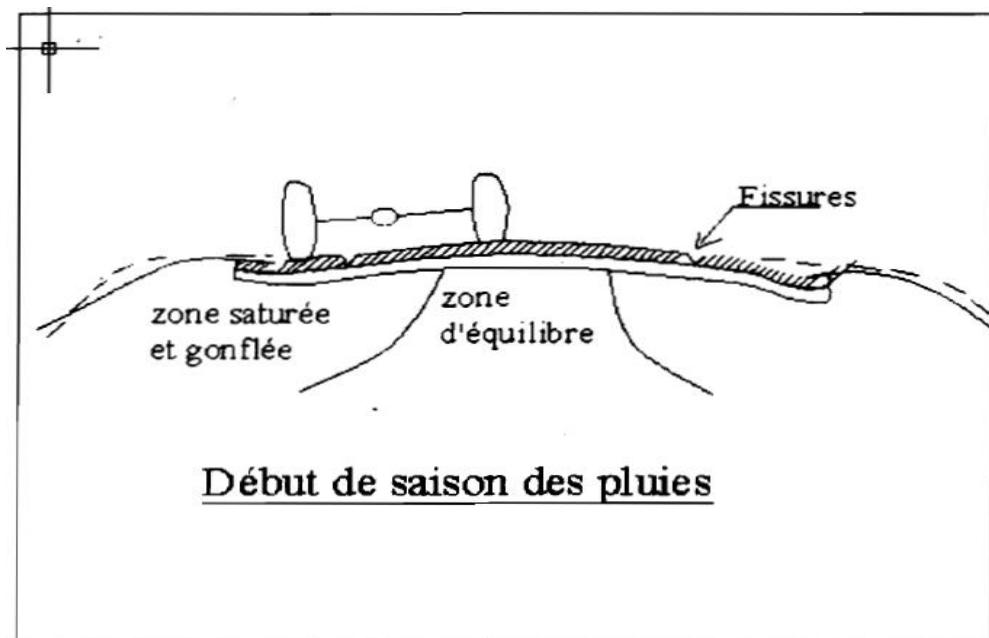


Figure 11 : Schéma d'une chaussée sur sols gonflants en début de saison pluvieuse (Diop, 2002)

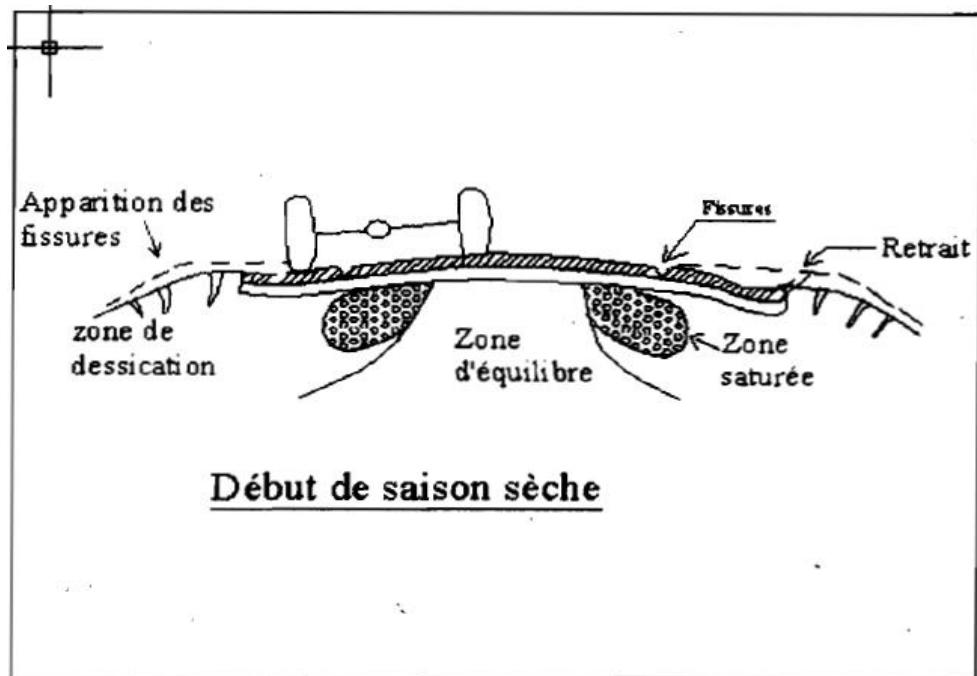


Figure 12 : Schéma d'une chaussée sur sols gonflants à la saison sèche de l'année suivante
(Diop, 2002)



CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME ET GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT DES SOLS FINS

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME ET GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT DES SOLS FINS

INTRODUCTION

Ce chapitre décrit la plateforme ainsi que les couches constitutives d'une structure de chaussée routière. Le traitement des sols fins aux liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment) et les effets du traitement sur les caractéristiques géotechniques des sols fins sont également présentés.

2.1 PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME

➤ Sol support ou partie supérieure des terrassements (PST)

Le sol support peut être en remblai, qui est un sol surélevé, ou en déblai, qui est un sol enfoncé. La déformation du sol est exprimée en MPa, tandis que la portance est définie par l'indice CBR, à 95 % de l'OPM. Le sol support est désigné dans sa partie supérieure par le terme « Partie Supérieur des Terrassements » ou PST. Sa surface constitue l'arase de terrassement (AR).

➤ Classes de l'arase de terrassement

Il y a six classes d'arase ARi définies par la portance à long terme de la PST (tableau 3). Les valeurs de l'indice CBR sont données à titre indicatif et ne sont pas retenues comme critère de réception (AGEROUTE, 2015)

Tableau 3 : Classe d'arase de terrassement (AGEROUTE, 2015)

Classe	AR0	AR1	AR2	AR2qs	AR3	AR4
E min (Mpa) Long terme	< 20	20	50	80	120	200
CBR min (%)	< 5	5	10	15	25 (peu significatifs pour les arases traitées)	40 (peu significatifs pour les arases traitées)

En pratique, la majorité des sols rencontrés au Sénégal est sensible à l'eau : il s'agit le plus souvent de sables ou de latérites, classés B1/B2/B5/B6 selon la norme NF P11-300, avec des indices CBR compris entre 10 et 50 %. Cette sensibilité rend leur portance immédiate variable selon leur teneur en eau. En fonction des conditions atmosphériques lors de l'exécution des travaux, le niveau de portance immédiate de ces sols en place peut donc varier d'une AR0

(état hydrique très humide) à AR1 (état hydrique humide ou moyen), voire AR2 (avec dispositions constructives de drainage) (AGEROUTE, 2015). En l'absence de facteurs pouvant influencer de façon favorable (remblai, drainage) ou défavorable (nappe) la teneur en eau d'équilibre du sol, la classe d'arase à retenir est le plus souvent AR1. La classe AR2 peut être atteinte pour les sables et graves propres et insensibles à l'eau, ou après traitement de l'arase à la chaux et/ou au liant hydraulique (AGEROUTE, 2015).

La classe d'arase dépend des matériaux constitutifs de la PST. A titre indicatif, le tableau 3 fournit des valeurs de CBR que ces matériaux de PST doivent atteindre pour chacune des classes ARi. Pour retenir la classe d'arase ARi, l'épaisseur minimale de ce matériau doit être de : 25 cm (CBR 30). Par exemple, si le sol support a en surface un CBR de 20, il faut que son épaisseur soit au moins de 55 cm pour retenir la classe AR2qs correspondant à un CBR de 15 à 25. Si cette épaisseur n'est pas respectée, alors il est nécessaire d'analyser le CBR et l'épaisseur de la couche inférieure. La pratique sera de retenir la plus faible de ces deux valeurs de CBR sous réserve que le critère d'épaisseur ci-dessus soit respecté (AGEROUTE, 2015).

Certains sols ont des propriétés insuffisantes pour constituer une arase de portance suffisante. Les sols à éliminer (purge, substitution sur une épaisseur pouvant aller jusqu'à un mètre) sont : les sols hétérogènes, les sols gonflants (gonflement linéaire dans le moule $CBR > 2\%$ après 4 jours d'immersion), les sols organiques (teneur en matières organiques MO $> 10\%$, les sols très compressibles tels que les vases et tourbes (coefficient de compressibilité à l'œdomètre $Cc/(1+e0)>0.2$ selon XP P94-090-1) , les sols très argileux ou à faible portance (Indice de plasticité IP ≥ 40 et/ou limite de liquidité $W_L \geq 70$ et/ou CBR < 5) (AGEROUTE, 2015).

Pour réaliser le chantier, il est indispensable d'avoir une arase AR1 d'au moins 15- 20 MPa avant mise en œuvre d'une couche de matériaux granulaires (couche de forme ou couche d'assise), et si possible 30-35 MPa avant mise en œuvre d'une couche de forme ou d'une couche d'assise traitée. Les techniques d'amélioration, autres que la substitution ou la purge sont : l'ajout de matériaux granulaires correcteurs ou la mise en place d'un géotextile, le traitement à la chaux et/ou au ciment (AGEROUTE, 2015).

➤ Couche de forme

La couche de forme est une couche particulière de la chaussée située entre la Partie supérieure des terrassements (PST) et la couche d'assise. Elle permet notamment d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux qui constituent la PST (en remblai ou en terrain en place) aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la structure de chaussée.

Selon les cas de chantier (nature des sols, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier...) la couche de forme se présentera sous des formes différentes. Elle peut être, d'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000) :

- inexistante car inutile lorsque les matériaux constituants le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises ;
- limitée à l'apport d'une couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires ; c'est le concept traditionnel de la couche de forme ;
- constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions, incluant par exemple un géotextile, des matériaux grossiers, une couche de fin réglage, un enduit gravillonné... Cette association conçue rationnellement permet de former une structure d'adaptation dont la surface présente les caractéristiques requises pour une plateforme support de chaussée.

La couche de forme répond à la fois à des objectifs de court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée) et de long terme (lorsque l'ouvrage est en service). Selon le cas de chantier, on cherche à assurer avec la couche de forme, l'ensemble des fonctions suivantes (GTR, 2000) :

❖ À court terme :

- un nivellement de la plateforme support de chaussée permettant de réaliser la couche de fondation dans les tolérances d'épaisseurs fixées ;
- une portance suffisante, compte tenu en particulier des aléas météorologiques, pour une exécution correcte du compactage des couches de chaussée et de l'obtention d'un bon uni ;
- une protection du sol support vis-à-vis des intempéries ;
- une traficabilité permettant la circulation dans de bonnes conditions, des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation ;
- éventuellement supporter le trafic de chantier pour d'autres besoins.

❖ À long terme :

- l'homogénéisation de la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante ;
- le maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau, d'une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure de chaussée ;
- une amélioration de la portance de plateforme pour optimiser le cout de l'ensemble couche de forme-structure de chaussée ;
- la protection thermique des sols supports gélifs ;
- une contribution au drainage de la chaussée.

Dans un certain nombre de situations correspondant à de petits ou moyens chantiers, l'épaisseur de la couche de forme est fixée avec le seul objectif de permettre la réalisation de la chaussée, dans des conditions météorologiques favorables, en assurant les fonctions.

➤ **Critères associés à la construction de la plateforme**

En premier lieu, pour que la couche de forme puisse être exécutée de manière satisfaisante, il est nécessaire que l'orniérage de l'arase de terrassement soit limité, ce qui amène à rechercher à ce niveau une portance minimale à court terme. L'expérience montre qu'une valeur de module EV2 à la plaque (ou module équivalent à la dynaplaque) de l'ordre de 35 MPa est généralement nécessaire pour mettre en œuvre une couche de forme de matériaux traités, tandis qu'une couche de forme en matériaux granulaires peut être exécutée sur une arase de 15 à 20 MPa seulement (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015).

Pour la réalisation des couches de chaussée, les exigences minimales préconisées sont les suivantes (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015) :

- la plateforme support de chausse doit être nivélée avec une tolérance de + ou - 3 cm ;
- la déformabilité de la plateforme, au moment de la mise en œuvre des couches de chaussée doit être telle que : le module EV2 déterminé à la plaque ou le module équivalent à la dynaplaque soit supérieur à 50 MPa ; la déflexion relevée au deflectographe Lacroix ou à la poutre de Benkelman sous essieu de 13 tonnes soit inférieure à 2 mm.

➤ Matériaux de couche forme

Un matériau pour être utilisé en couche de forme doit respecter certains critères. Les critères à prendre en considération concernent (GTR, 2000) :

- l'insensibilité à l'eau ;
- la dimension des plus gros éléments ;
- la résistance sous circulation des engins de chantier ;
- l'insensibilité au gel le cas échéant.

Le matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques indépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel, soit par une modification appropriée (traitement avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques, élimination de la fraction fine 0/d...). La dimension des plus gros éléments doit permettre d'assurer un nivelingement de la plateforme dans les tolérances requises, en général + ou - 3 cm, et le cas échéant, un malaxage intime avec les produits de traitement (GTR, 2000 ; AGEREROUTE, 2015).

➤ Couche de forme non traitée

La réalisation d'une couche de forme permet d'améliorer le niveau de portance de la plateforme. Elle permet d'atteindre les niveaux de portance PF1 à PF4. Elle est indispensable sur les sols pour lesquels il est impossible d'atteindre une qualité de compactage, et/ou un nivelingement, et/ou une traficabilité, et/ou une portance suffisante.

Selon le GTR (2000), l'épaisseur de la couche de forme non traitée varie de 20 à 80 cm selon l'objectif de portance (PF2 ou PF3), la classe d'arase (AR1 ou AR2) et la nature des matériaux de couche de forme, avec ou sans géotextile. Les matériaux de classes B4, B5 ou B6, auxquelles sont assimilées les latérites, doivent, selon le GTR (2000), nécessairement être traités pour un emploi en couche de forme. Cette spécification du GTR (2000) ne semble pas pertinente pour le Sénégal, où les latérites non traitées sont utilisées comme matériaux de couche de forme éventuelle. Le dimensionnement de la couche de forme non traitée se basera donc sur les recommandations du CEBTP adoptées par l'AGERROUTE (tableau 4).

Tableau 4 : Dimensionnement de la couche de forme non traitée (AGEROUTE, 2015)

Classe de l'arase	Couche de forme	Classe de plateforme
AR0	45* cm CBR 5 à 10	PF1 (CBR 5 à 10)
	35 cm CBR 10 à 15	
	30 cm CBR 15 à 30	
	45* cm CBR 10 à 15	PF2 (CBR 10 à 15)
	35 cm CBR 15 à 30	
	50* cm CBR 15 à 40	PF2qs (CBR 15 à 30)

➤ **Couche de forme traitée**

Le tableau 5 précise les épaisseurs de matériaux à mettre en œuvre en fonction de sa classe de résistance et de l'amélioration de portance visée. Selon le Guide de Terrassements Routier (GTR) des Sols, le matériau traité est classé en fonction de ses valeurs moyennes de résistance en traction directe R_t et de module E à 90 jours et de son mode de fabrication (tableau 5). Les zones sont définies à la figure 13. Les tableaux 6 et 7 fournissent les valeurs permettant de tracer le graphique de la figure 13.

Tableau 5 : Dimensionnement de la couche de forme traitée (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015)

Classe d'arase	Classe mécanique des matériaux traités			Classe de plateforme
	Classe 3	Classe 4	Classe 5	
AR1		30 cm	35 cm	PF2
	30 cm	35 cm	50 cm*	PF3
	40 cm*	45 cm*	55 cm*	PF4
AR2	25 cm	30 cm	35 cm	PF3
	30 cm	35 cm	45 cm*	PF4

Tableau 6 : Détermination de la classe mécanique d'un matériau traité en fonction de ses caractéristiques et son mode de fabrication (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015)

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique du matériau
Zone 1		1
Zone2	Zone 1	2
Zone 3	Zone2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zone 4	5

Tableau 7 : Limites inférieures des zones de 1 à 5 (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015)

E (Mpa)	Rt (Mpa)				
	Zone 5	Zone 4	Zone 3	Zone 2	Zone 1
1000	0,112	0,164	0,136	0,22	0,413
1500	0,134	0,211	0,165	0,288	0,655
2000	0,152	0,247	0,188	0,337	0,831
2500	0,166	0,275	0,206	0,376	0,97
3000	0,178	0,298	0,222	0,408	1,085
4000	0,199	0,337	0,246	0,458	1,269
5000	0,216	0,367	0,270	0,498	1,415
8000	0,253	0,434	0,318	0,583	1,727
10000	0,272	0,467	0,342	0,624	1,879
15000	0,309	0,529	0,388	0,700	2,159
20000	0,336	0,574	0,423	0,755	2,362
30000	0,377	0,641	0,475	0,832	2,655
40000	0,407	0,689	0,513	0,889	2,866
50000	0,432	0,728	0,544	0,933	3,032

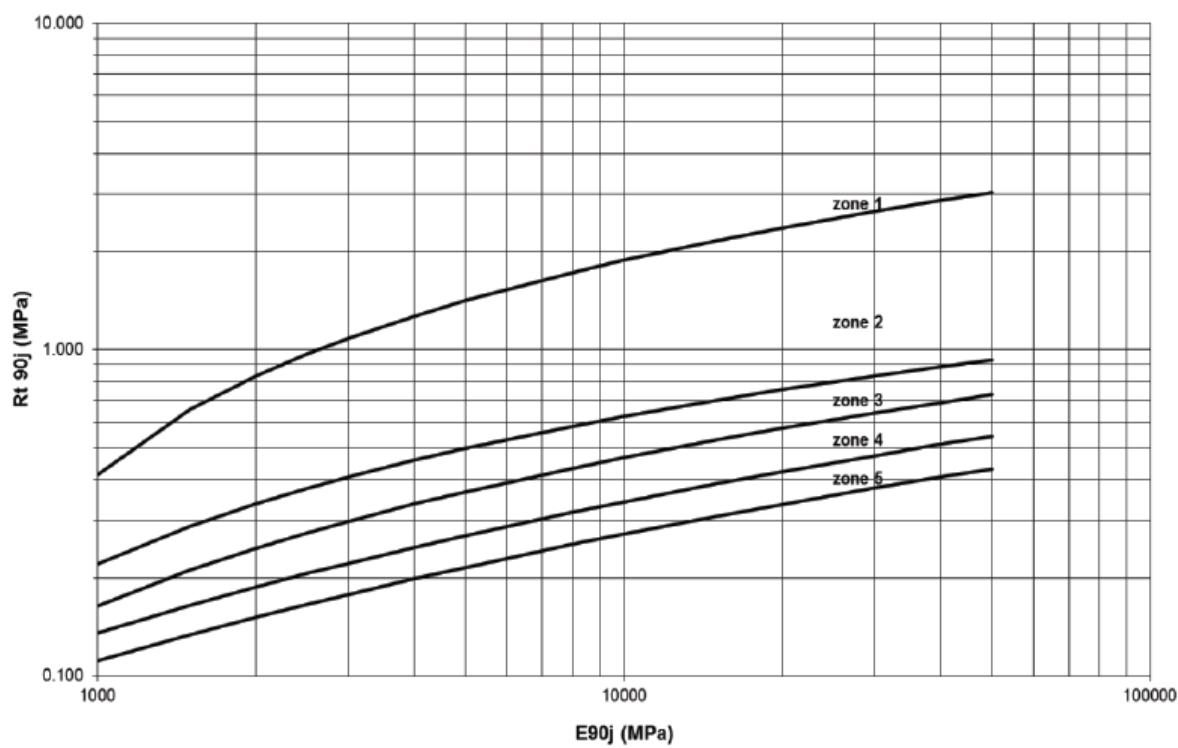


Figure 13 : Zone de classement des sols traités au ciment en couche de forme (GTS, 2000 ; AGEROUTE, 2015)

2.2 STRUCTURE ET CONSTITUTION D'UNE ROUTE

Le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000) présente la coupe type d'une structure de chaussée routière (figure 14).

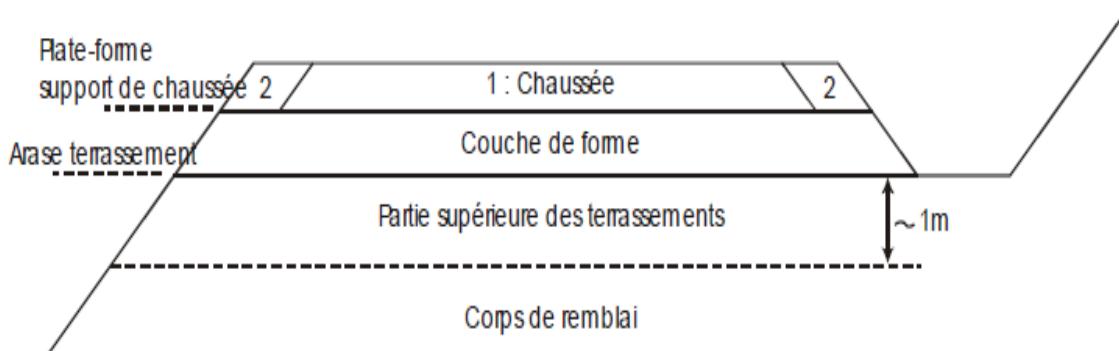


Figure 14 : Coupe type d'une structure de chaussée routière (GTR, 2000)

Pour construire des routes, il est nécessaire de concevoir et de réaliser, au préalable, une plate-forme support de capacité portante minimale, permettant la construction de la structure de chaussée proprement dite.

La réalisation de la plate-forme support, qui fait partie du domaine des terrassements routiers, consiste à effectuer des travaux de nivellement (remblais) et à exécuter une couche structurelle qu'on désigne par « couche de forme ».

Les travaux de remblais et de couche de forme peuvent faire appel à **la technique des emprunts granulaires** et/ou **la technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques**. Ces deux techniques présentent des avantages et des inconvénients, tant sur le plan économique qu'environnemental.

2.2.1 Technique des emprunts granulaires

Elle consiste à utiliser des matériaux granulaires en provenance de ballastières ou de carrières. Faisant appel à des granulats dont l'extraction et la fabrication n'ont que peu d'impact en matière économique et environnementale, elle peut être handicapée par les impacts générés :

- par le transport des granulats (un produit pondéreux), dès que la distance carrière-chantier dépasse un certain seuil ;
- par le transport des sols excédentaires, du chantier jusqu'à la décharge.

2.2.2 Traitement avec un matériau non argileux

Il s'agit de mélanger le matériau argileux gonflant avec un autre d'argilosité presque nulle comme le sable, afin de ramener son degré de gonflement à un niveau acceptable qui le rendrait apte à être utiliser comme sol de plateforme de structure routière. Ce traitement permet également de réduire l'étendue de plasticité du matériau.

Ce procédé a d'autres avantages. L'adjonction d'un matériau non argileux peut permettre d'améliorer la résistance du matériau naturel instable. Ce type de traitement favorise davantage l'utilisation de matériaux locaux parce que le matériau traitant non argileux pourrait être constitué essentiellement par du sable trouvé sur place.

Ce traitement réduit la sensibilité du sol à l'eau. Toutefois il est nécessaire d'effectuer des études géotechniques sérieuses avant de juger ou non de l'aptitude d'un matériau traitant à être utiliser car en dehors du critère de non argilosité à vérifier, il faut que le matériau traitant soit compatible au sol gonflant à traiter (Diop, 2002).

Le contact entre deux matériaux de nature différente peut donner naissance à des réactions chimiques qui pourraient même à long terme accroître le niveau de sensibilité du matériau à l'eau (Diop, 2002).

2.2.3 Traitement des sols à la chaux

Le traitement des sols en place à la chaux est une technique qui offre plusieurs types d'avantages : économiques, écologiques et environnementaux.

La technique du traitement des sols à la chaux est utilisée en France depuis les années 1960. Dans un premier temps, elle a essentiellement intéressé la réutilisation en remblais des sols sensibles et / ou humides. Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de formes, en commençant par la réutilisation des sols fins, puis progressivement une gamme de plus en plus étendue de matériaux. Dès 1972, un premier guide est élaboré par le LCPC et le SETRA : « Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux ». Le Guide de Traitement des Sols (GTS, 2000) du LCPC-SETRA est la référence en la matière. Il complète le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000).

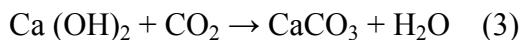
La chaux vive est obtenue par calcination de carbonate de calcium (CaCO_3), à une température supérieure à 900 °C. Celui-ci est dissocié à cette température en oxyde de calcium, ou chaux vive, et en gaz carbonique suivant la réaction (1) (Le Borgne, 2010) :



La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en chaux éteinte. La chaux éteinte est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie, la dépollution, ... La chaux vive est éteinte par immersion ou par aspersion. La réaction d'extinction est la suivante (2) :



La chaux vive CaO peut, après hydratation par l'humidité ambiante ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), se carbonater sous l'action du CO_2 atmosphérique, suivant la réaction (3) :



Les caractéristiques des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols dépendent de la forme sous laquelle elles sont utilisées, diverses formes de chaux étant utilisées dans le traitement des sols (tableau 8). Les formes les plus communes sont la chaux vive et la chaux éteinte. Une chaux est définie par plusieurs paramètres : sa teneur en chaux libre exprimée sous forme de CaO, sa teneur en MgO, sa granulométrie définie par le tamisât à 2, 0,2 et 0,08 mm et enfin sa réactivité déterminée par l'essai de « réactivité à l'eau » définie par la norme NF P 98-102. Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et est essentiellement fonction de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux (Le Borgne, 2010).

Tableau 8 : Principales caractéristiques de la chaux (Le Borgne, 2010)

Type de chaux	Chaux vive	Chaux éteinte
Formule	CaO	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Couleur	blanche	blanche
Structure cristalline	cubique	système pseudo – hexagonal
Densité relative	3,4	2,2
Masse volumique apparente (g.cm^{-3})	0,80 à 1,10	0,40 à 0,64
Masse molaire (g.mol^{-1})	56,08	74,10
Solubilité à 20°C	0,125	0,165
pH de la solution saturée à 25°C	12,45	
Réactivité à l'eau	Mesurée par l'essai NF EN 459-2	-

L'ajout de chaux provoque une augmentation de la quantité d'ions Ca^{2+} et OH^- en solution dans le sol. Ces ions vont réagir avec les constituants du matériau, modifiant ainsi leurs caractéristiques par différents processus physico-chimiques. On distingue classiquement les actions à court terme et à long terme (Le Borgne, 2010).

- Actions à court terme

L'ajout de chaux au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Le choix du type de chaux dépend de la teneur en eau du sol : si le sol est trop humide, la chaux vive (CaO) est utilisée car elle augmente la teneur en solide du sol, d'où une diminution relative de la teneur en eau, elle consomme de l'eau lors de son hydratation (2), et enfin, elle favorise l'évaporation par la chaleur de la réaction d'hydratation exothermique. Il est admis que chaque centième de chaux vive introduite dans les sols permet de réduire d'environ un centième la teneur en eau. Si le sol est à sa teneur en eau Proctor, la chaux éteinte, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pourra être utilisée. L'ajout de matière sèche provoque ici une faible diminution de la teneur en eau. L'ajout de chaux dans un sol, par hydratation, entraîne l'augmentation des ions Ca^{2+} et OH^- dans le sol. Des échanges cationiques se produisent alors entre les ions absorbés à la surface des particules argileuses et les cations apportés. La capacité d'échange cationique (CEC) est donc modifiée. La modification de la CEC et l'augmentation de la concentration en électrolytes ont pour effet de réduire la taille de la double couche des particules argileuses et ainsi de réduire les forces de répulsion entre elles. Celles-ci ont alors tendance à s'agrégner : c'est le processus de flocculation (Le Borgne, 2010).

Cette action entraîne une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité (tableau 9). Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers les teneurs en eau plus importantes. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de la consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage. Différents facteurs influencent cette granulation dont la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux.

Tableau 9 : Évolution de la limite de plasticité, de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité d'une argile en fonction de la teneur en chaux dosée (Le Borgne, 2010)

	CaO en (%)	W _P (%)	W _L (%)	I _P (%)
London clay Illite kaolinite et smectite	0	19	52	33
	1	26	66	40
	2	36	66	30
	3	38	67	29
	7	39	65	26

Par ailleurs, le comportement lors du compactage d'un sol traité à la chaux est modifié, son aptitude à être compacté est généralement plus faible. L'optimum de compactage est décalé vers des teneurs en eau plus fortes et vers des densités de référence plus faibles (figure 15). La diminution de densité est due à la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de flocculation/agrégation. Dans le cas des sols argileux, l'allure générale de la courbe de compactage est aplatie traduisant une diminution de la sensibilité à l'eau du matériau. La modification du sol est importante dès l'ajout de chaux en faible quantité. La portance des sols est améliorée. Ainsi l'indice CBR qui permet de quantifier la portance est de 4 à 10 fois plus élevé que pour un sol non traité. Enfin, l'ampleur des modifications dues à la chaux dépend de la quantité utilisée. Il est ainsi admis que plus la quantité de chaux est importante, plus la teneur en eau optimale sera décalée vers les fortes teneurs en eau, et plus la densité sèche optimale sera faible. Ces actions à court terme de la chaux permettent d'envisager l'utilisation de sols à l'état humide ou très humide, sols possédant une portance trop faible pour réaliser un chantier dans de bonnes conditions.

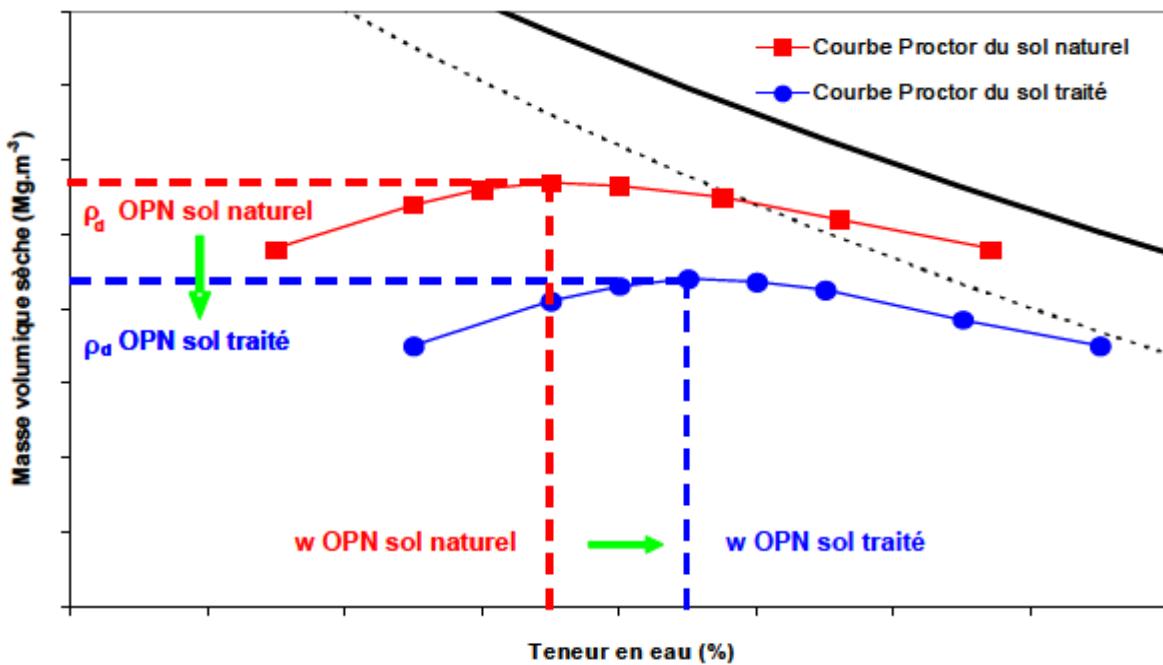


Figure 15 : Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux d'après le GTS (Le Borgne, 2010)

- Actions à long terme

L'apport important d'ions OH⁻ dans le sol entraîne une augmentation du pH du sol jusqu'à une valeur proche du pH d'une solution saturée en portlandite Ca(OH)₂, c'est-à-dire environ 12,4. Ce pH fort favorise la dissolution de la silice et de l'alumine contenues dans les particules de sol. Ces particules en solution réagissent avec le calcium pour former des produits cimentaires : des silicates de calcium hydratés, des alumates de calcium hydratés, ou des aluminosilicates de calcium hydratés. Ces réactions se regroupent sous le terme de réactions pouzzolaniques. Ces réactions peuvent durer plusieurs mois, voire des années. Une des conséquences majeures de l'ajout de chaux est une forte augmentation des caractéristiques mécaniques du matériau traité, notamment de la résistance à la compression simple et à la traction. À titre d'exemple, cet effet peut être visualisé notamment par la résistance à la compression simple notée R_c, de différents minéraux considérés individuellement, constituants essentiels des sols (figure 16). Le Borgne (2010) présente le comportement mécanique caractéristique d'une kaolinite, d'une montmorillonite et de quartz en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure. Sauf dans le cas de la montmorillonite traitée à un dosage supérieur à 4 %, l'ajout de chaux provoque une forte augmentation de R_c. De plus, le résultat dépend du temps de cure, ce qui traduit bien le fait que les réactions pouzzolaniques se poursuivent au cours du temps.

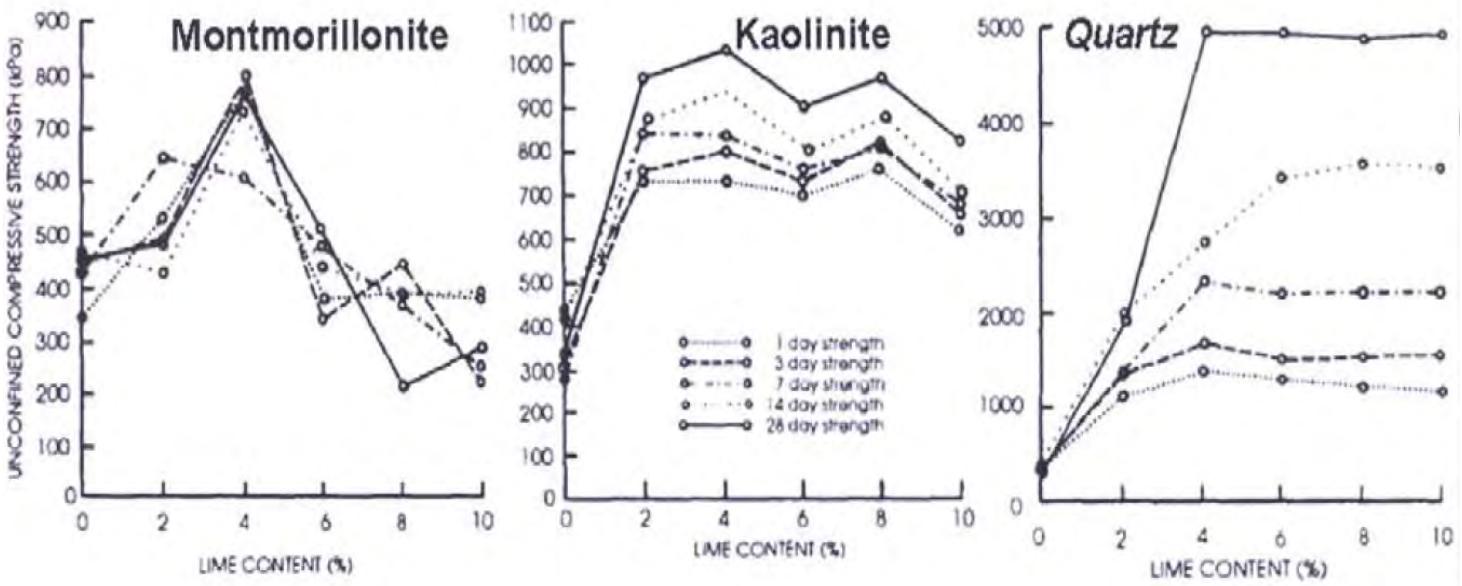


Figure 16 : Influence de la nature du minéral, de la quantité de chaux et du temps de cure sur la résistance à la compression simple (Le Borgne, 2010)

Le traitement à la chaux permet aussi de réduire, voire de supprimer, le gonflement des sols argileux. À titre d'exemple, Le Borgne (2010) a déterminé le potentiel de gonflement d'une argile traitée à deux pourcentages de chaux vive (3 % et 6 %). La figure 17 montre que le traitement à la chaux de l'argile réduit fortement le gonflement. De plus, les auteurs ont montré que plus le pourcentage de chaux introduit dans une argile est important, plus le gonflement final pour un même temps de cure diminue.

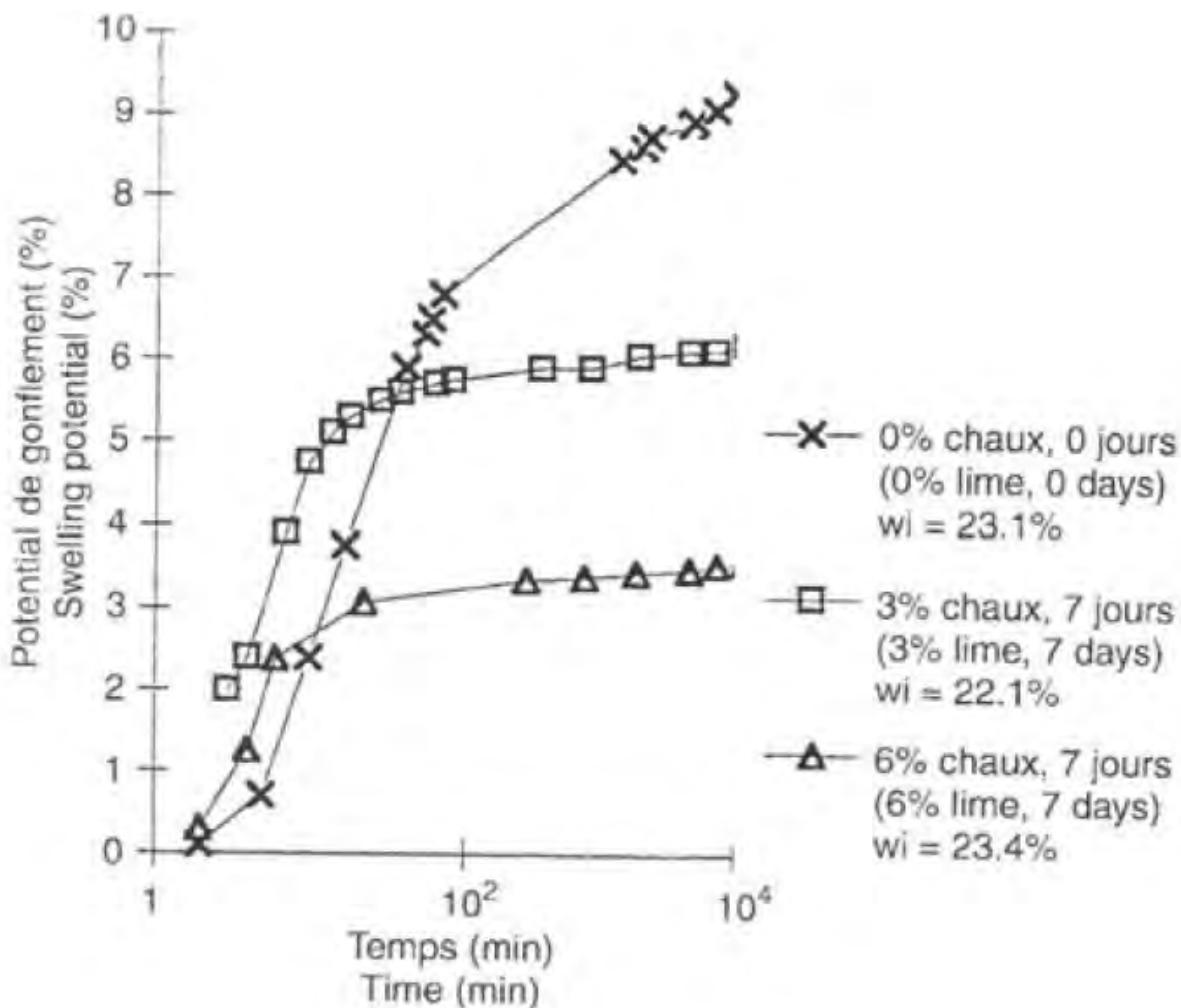


Figure 17 : Potentiel de gonflement en fonction du temps d'une argile traitée à 3 et 6 % de chaux vive (Le Borgne, 2010)

2.2.4 Traitement des sols au ciment

Il a fallu attendre la fin du XVIII^e siècle pour que la science et la technique naissante entrevoient le mécanisme de la prise et jettent les bases de l'industrie cimentière. Dès 1825, le ciment Portland artificiel, ainsi appelé car, après durcissement, son aspect rappelait celui de la pierre calcaire de l'île de Portland, était fabriqué industriellement en Angleterre et vers 1850 en France grâce aux travaux réalisés par Louis Vicat. Par la suite, ce liant a été utilisé pour le traitement des sols, dès les années 1960 en France.

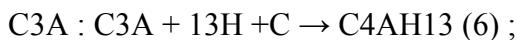
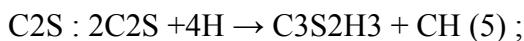
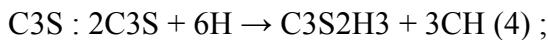
Le ciment est une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il s'agit d'un mélange d'un ou plusieurs constituants qui présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes : des propriétés hydrauliques, ils forment par réaction avec de l'eau des composés hydratés stables très peu

solubles dans l'eau ; des propriétés pouzzolaniques, ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables ; des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...) Après avoir présenté les principales propriétés de ces constituants, nous allons les décrire plus précisément (Le Borgne, 2010).

Le ciment s'obtient en broyant finement du clinker avec 3 à 5% de gypse qui est un régulateur de prise.

Le clinker est un produit constitué principalement de silicates et d'aluminates de calcium anhydres, obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) (1450°C) d'un mélange dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ces constituants anhydres formés lors de la clinkérisation sont une combinaison des éléments suivants : CaO, SiO₂, Fe₂O₃ et Al₂O₃. On distingue : l'alite ou silicate tricalcique C₃S, la bélite ou silicate bi calcique C₂S, et la cérite, mélange d'aluminate tricalcique C₃A et d'alumino-ferrite tétracalcique C₄AF. (Le Borgne, 2010)

L'hydratation du clinker donne des silicates de calcium hydratés de formule générale (CSH), des alumates de calcium hydraté (CAH) et de la portlandite (CH). Les équations d'hydratation des principaux constituants du clinker sont (4, 5 et 6) (Le Borgne, 2010) :



La réaction du C₃A pur avec de l'eau est très violente et conduit à une prise éclair. Pour éviter ce phénomène, on ajoute du gypse (CaSO₄.2H₂O) au clinker. Le gypse va alors permettre de réguler la prise hydraulique. Le produit de l'hydratation du C₃A en présence de gypse est l'ettringite dite primaire, selon la réaction suivante (Le Borgne, 2010) :



De nombreux composés peuvent être présents dans le ciment. On peut ainsi trouver des laitiers hauts- fourneaux, qui sont des éléments résiduels issus de la production de fonte dans les hauts fourneaux. Avant d'être utilisés en cimenterie, ils sont moulus ou broyés. On utilise aussi des cendres volantes, produits de combustion du charbon brûlé sous forme pulvérisée dans les chaudières des centrales thermiques pour la production d'électricité. Certains ciments contiennent également des pouzzolanes naturelles qui sont des matériaux issus des éruptions

volcaniques. Elles sont constituées de tous les matériaux projetés lors d'une éruption volcanique : cendres, lapillis, ponces, et bombes. On peut également trouver des fumées de silice qui sont des particules très fines (environ $1\mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrocillicium.

2.2.4 Traitement mixte

Le traitement mixte consiste en l'utilisation simultanée de deux liants hydrauliques, généralement la chaux et le ciment (Gregoire, 2004) :

- un traitement préalable à la chaux qui flocule les argiles et assèche les matériaux humides, ce qui facilite l'incorporation du liant hydraulique dans des conditions idéales garantissant une bonne homogénéité du mélange ;
- un traitement au ciment qui apporte une rigidification rapide.

Les caractéristiques des sols traités à la chaux et au ciment dépendent :

- de la nature du sol ;
- de la teneur en eau du sol ;
- de la présence de certaines substances ;
- des quantités de chaux et de ciment utilisés.

Le prétraitement à la chaux permet :

- de faciliter la maniabilité du sol ;
- d'améliorer les conditions de circulation des engins de chantier ;
- de réduire la plasticité du sol pour faciliter le malaxage avec le ciment ;
- de préserver l'efficacité du ciment.

Ce type de traitement mixte s'applique sur les sols peu à moyennement argileux.

2.3 CARACTERISTIQUES DES SOLS TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Les liants hydrauliques utilisés pour le traitement des sols de plateforme et des matériaux routiers sont généralement la chaux, le ciment et la chaux –ciment.

Le traitement retenu pour un chantier routier est déterminé par une étude géotechnique qui permet de choisir le liant à mettre en œuvre et la formulation du mélange sol-liant. Plusieurs critères physique et mécanique permettent d'optimiser le traitement en vue d'obtenir les

caractéristiques suffisantes pour un prix acceptable. Ces critères sont issus d'essais normalisés (GTS, 2000) :

- l'indice portant immédiat (IPI) et l'indice CBR après immersion (I_{CBR}) (NF P 94-078) ;
- l'évaluation de l'aptitude d'un matériau après traitement (NF P 94-100) ;
- la résistance en compression simple (R_c) (NF P 98-232-1) ;
- la résistance en compression simple en âge autorisant la circulation sur la couche traitée (R_c à 7 jours et R_c à 28 jours). Une mesure de R_c à 2 ou 4 jours pourrait être avantageuse pour un liant à prise rapide ;
- la résistance à l'immersion au jeune âge (R_c après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion dans de l'eau à 20 °C R_{ci} et R_c après 60 jours de cure normale) ;
- la résistance en traction directe (R_t , E30) (NF P 98-232-2) ;
- la résistance par fendage (R_{tb} , E30) (NF P 98-232-3).

Les résultats de ces essais sont comparés aux abaques établis à partir des expériences de terrain et regroupés dans le GTS (2000). Ces abaques servent à évaluer l'aptitude au traitement du sol.

Un certain nombre de paramètres permettent d'évaluer l'aptitude d'un sol à être traité à la chaux seule (GTS, 2000) :

- l'évaluation de l'aptitude du sol au traitement par la mesure du gonflement volumique et R_{tb} ;
- l'âge autorisant la circulation sur la couche de forme ; il faut que $R_c \geq 1$ MPa, des essais sont réalisés aux échéances de 7 et 28 jours (mais aussi à 2 ou 4 jours si nécessaire) ;
- la résistance à l'immersion au jeune âge (sensibilité à l'eau) mesurée par le rapport de R_{ci} sur R_c à 60 jours ; un sol est déclaré sensible à l'eau si :
 $R_{ci}/R_c \geq 0,8$ quand $VBS \leq 0,5$ ou $R_{ci}/R_c \geq 0,6$ quand $VBS > 0,5$;
- la résistance au gel, mesurée par la résistance en compression simple. Pour que le traitement soit accepté, il faut que $R_{tb} > 0,25$ MPa à la date de l'apparition statistique des premiers gels ;

- les performances attendues à long terme, évaluées par le couple (R_t, E₃₀) déterminé à 90 jours (ou 180 jours si le liant est à prise lente) permettent de déterminer la zone de classement de la couche de forme.

2.4 OBJECTIFS DU TRAITEMENT

Pour caractériser quantitativement, au stade de l'étude d'un projet, les conditions définissant un sol fin humide, on se réfère principalement à l'indice portant immédiat (IPI) du sol mesuré à sa teneur en eau naturelle sur une éprouvette compactée avec l'énergie de l'essai Proctor Normal.

Les valeurs de l'IPI en deçà desquelles le traitement peut s'avérer nécessaire ou doit être interrompu ou poursuivi avec réduction du dosage, sont indiquées dans le tableau 10 (GTS, 2000).

Tableau 10 : Objectifs du traitement des sols appliqués à la réutilisation des sols trop humides en remblai (GTS, 2000)

IPI	Classe de matériau (selon la classification GTR 92)							
	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁ *	A ₂ B ₆ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ * C ₁ B ₆ C ₂ B ₆ R ₃₄	A ₃ C ₁ A ₃ C ₂ A ₃ *	B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄ *	B ₂ B ₅ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ * C ₁ B ₅ C ₂ B ₅ *	R ₁₂ °	R ₁₃ °	F ₂
Valeurs en dessous desquelles un traitement peut être envisagé (cf GTR)	8	5	3	15	12	15	10	15
valeurs à obtenir sur le matériau traité ◊	10 à 20	7 à 15	5 à 10	20 à 40	15 à 30	15 à 30	10 à 20	15 à 20
Valeurs au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)	15 à 25	10 à 20	8 à 15	30 à 50	20 à 40	25 à 35	15 à 25	25 à 30
* Les matériaux de ces classes comportent une fraction importante d'éléments anguleux supérieurs à 20mm. De ce fait, l'estimation de leur portance à partir de la valeur de l'IPI mesuré sur la fraction 0/20mm peut ne pas être suffisamment représentative. Une évaluation plus précise nécessiterait de pratiquer des essais en place (essais à la plaque ou à la dynaplaque, etc.)								
° Pour les classes R, les valeurs proposées ne sont pas issues du GTR, mais seulement indicatives. Pour les classes de matériaux sensibles à l'eau non envisagées dans le tableau, les valeurs de l'IPI à considérer doivent résulter d'une étude spécifique.								
◊ Pour le traitement des PST, des valeurs majorées de 10 à 20% doivent être considérées, étant entendu qu'il est en plus nécessaire de vérifier la condition $I_{CBR}/IPI \geq 1$								



CHAPITRE 3 : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DES MATÉRIAUX

CHAPITRE 3 : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DES MATÉRIAUX

INTRODUCTION

L'étude expérimentale réalisée a pour but d'identifier et de caractériser les sols marneux de Diamniadio à l'état naturel puis traitées avec la chaux d'une part, et la chaux-ciment d'autre part. Une marne sableuse a été reconstituée en laboratoire pour compléter l'étude. L'objectif visé, le protocole opératoire et les résultats des essais de laboratoire sont présentés dans ce chapitre.

3.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Le but de l'étude expérimentale est de déterminer les propriétés géotechniques des sols marneux de Diamniadio, à l'état naturel et après traitement aux liants hydrauliques (chaux et chaux-ciment), et de définir ensuite les conditions de leur utilisation en remblai et couche de forme de chaussées routières. La granularité du sol marneux a été corrigée avec un sable afin de réduire sa plasticité et faciliter son compactage sur le chantier.

3.2 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

La méthodologie du travail expérimental s'articule autour d'un certain nombre d'essais normalisés de laboratoire. Ces essais usuels ont été tous exécutés au Laboratoire des Sols du Département de Génie civil de l'ESP. Les échantillons de sol marneux étudié ont été prélevés sur le site de la ville nouvelle de Diamniadio, dans le département de Rufisque.

Les étapes de l'expérimentation sur les échantillons de sol marneux sont les suivantes :

- détermination de la composition chimique ;
- analyse granulométrique au laser ;
- détermination des limites d'Atterberg ;
- essai Proctor Normal ;
- essai de portance immédiate IPI ;
- essai de portance classique CBR avec surcharge et après 4 jours d'immersion.

L'étude expérimentale comprend également l'exécution des essais suivants :

- analyse granulométrique de l'échantillon de sable correcteur ;
- essai Proctor Normal sur l'échantillon de marne sableuse.

L'expérimentation est parachevée avec les essais suivants exécutés sur les échantillons de sol marneux et de marne sableuse traités aux liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment) :

- détermination des limites d'Atterberg ;
- essai Proctor Normal ;
- essai de portance immédiate IPI ;
- essai de portance immédiate CBR avec surcharge et sans immersion ;
- essai de portance classique CBR avec surcharge et après 4 jours d'immersion ;
- essai de résistance à la compression simple sur des éprouvettes de marne sableuse traitée avec de la chaux-ciment, après différents temps de cure.

3.3 PRÉPARATION ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

3.3.1 Localisation de la zone de prélèvement des sols marneux

Les échantillons de sols marneux ont été prélevés superficiellement avec une pelle mécanique (figure 18), à la gare de péage du TER, à Diamniadio. Les zones de prélèvement sont localisées sur la carte de la figure 19.



Figure 18: Prélèvement des sols marneux à la pelle mécanique

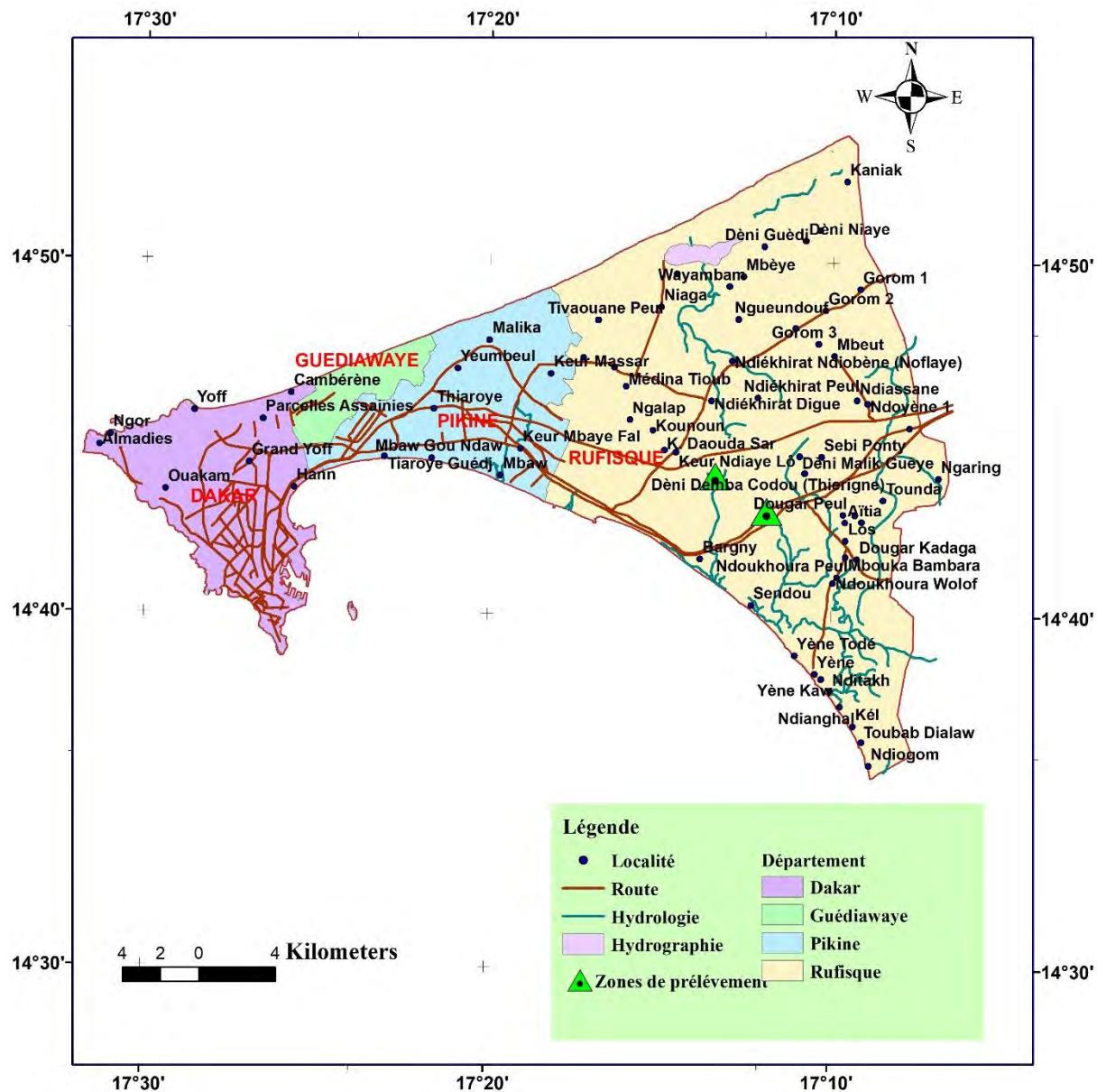


Figure 19 : Localisation des zones de prélèvement des sols marneux

3.3.2 Identification géotechnique et classification du sol marneux

❖ Analyse chimique

L'analyse chimique de l'échantillon de sol marneux a été réalisée par fluorescence. Les résultats de l'analyse chimique (tableau 11) montrent que ce sol est un aluminosilicate avec un rapport silice sur alumine ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) égal à 5,3. Les pourcentages respectifs d'oxyde ferrique (Fe_2O_3) et de chaux (CaO) sont de 2,5 et 23,3 % et confirment ainsi la présence de goethite et de calcite. Par ailleurs, la teneur en oxyde de potassium (K_2O) atteint 0,5 % et montre l'existence d'illite dans ce sol.

Tableau 11 : Résultats de l'analyse chimique

Composés	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Perte au feu 950 °C
Pourcentage (%)	3,8	6,2	32,6	0,2	0,5	23,3	0,3	Traces	Traces	2,5	Traces	Traces	30

❖ Granulométrie au laser sur l'échantillon de sol marneux

La granulométrie ou l'analyse granulométrique permet de déterminer la répartition pondérale des particules minérales d'un échantillon de matériau suivant leurs dimensions.

La granulométrie au laser est une technique qui est apparue dans les années 1970. Elle est décrite par la norme ISO 13320 et s'applique aux particules de dimensions comprises entre 0,05 et 2000 µm, ce qui est bien plus précis qu'avec la technique par tamisage ou par sédimentométrie. Elle convient également aux suspensions de polymères ainsi qu'à tout type de poudre (minérale ou non).

La granulométrie au laser est une technique basée sur la diffraction de la lumière. D'après la théorie de Fraunhofer :

- les particules sont considérées comme sphériques non poreuses et opaques ;
- les particules ont des diamètres supérieurs à la longueur d'onde ;
- les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres ;
- les particules sont animées d'un mouvement aléatoire ;
- les particules diffractent la lumière avec la même efficacité quelle que soit leur taille.

Lorsqu'un faisceau laser éclaire une particule, on peut observer des franges de diffraction. Selon Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction dépendent de la taille des particules. Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand. La théorie de Mie complète et remplace la théorie de Fraunhofer pour les particules inférieures à 10 µm.

La figure 20 montre la courbe granulométrique de l'échantillon de sol marneux et donne les principaux résultats de l'essai. Le pourcentage de fines (dimension inférieure à 80 µm) atteint 45 %.

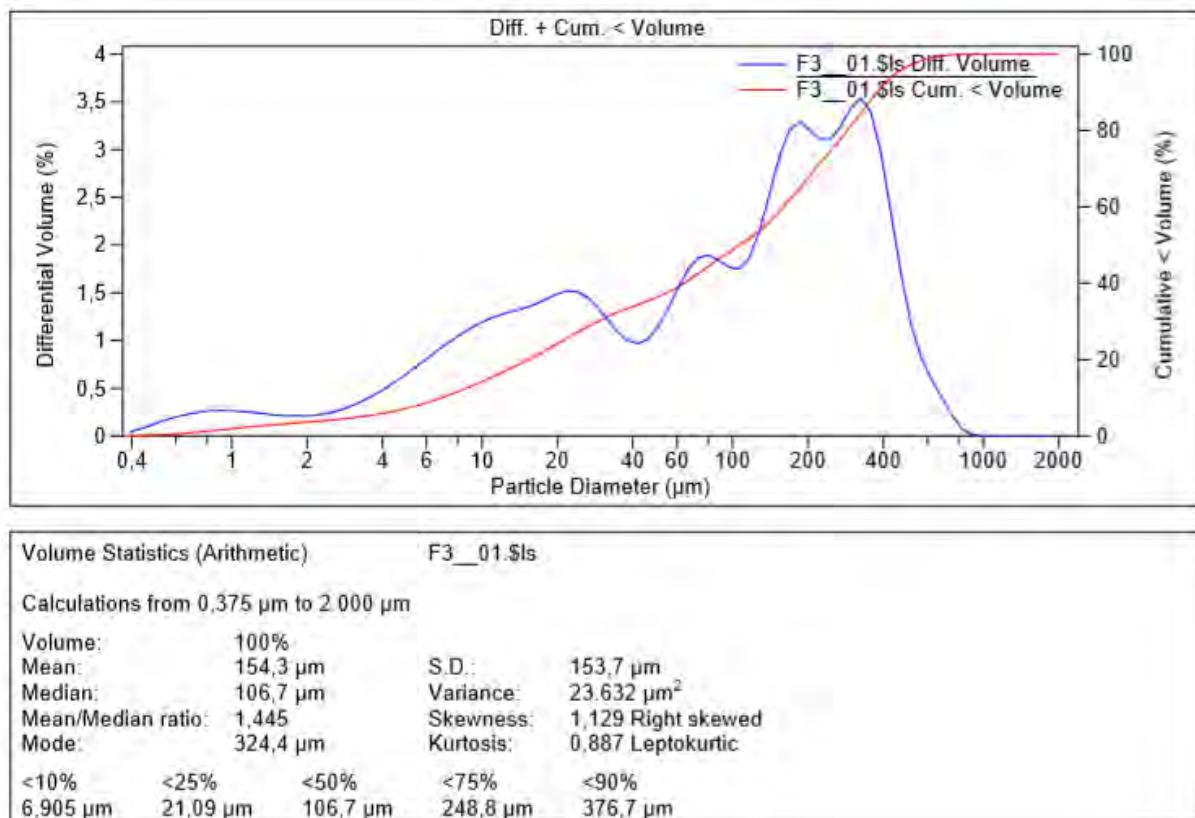


Figure 20 : Analyse granulométrique au laser de l'échantillon de sol marneux

❖ Détermination des limites d Atterberg

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol (figure 21). Ces limites sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 μm.

La limite de liquidité (W_L) est déterminée à l'aide du pénétromètre à cône ou cône suédois (XP CEN ISO 17892-12).

La limite de plasticité (W_p) est déterminée en formant un rouleau de sol de 3 mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm (NF P94-051). La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par son milieu de 1 à 2 cm, se fissure.

La limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau de l'échantillon de sol au point de transition entre les états liquide et plastique. La limite de plasticité (W_p) est la teneur en eau de l'échantillon de sol au point de transition entre les états plastique et solide avec retrait. Les teneurs en eau ont été déterminées par étuvage à 105°C.

L'indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité :

$$I_p = W_L - W_p$$

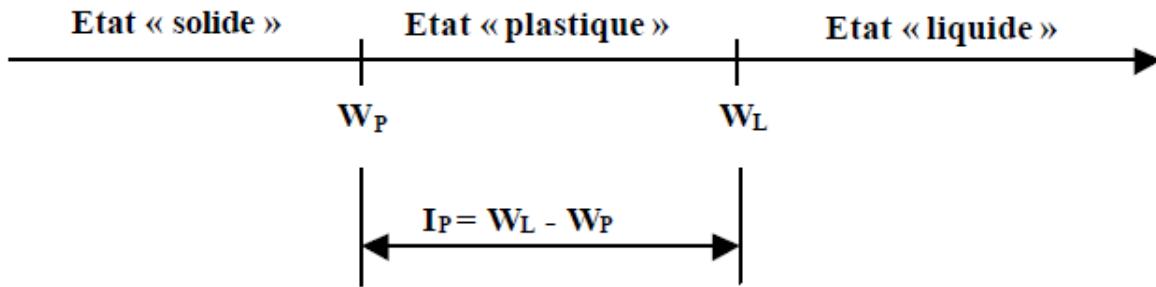


Figure 21 : Différents états de consistance (NF P94-051)

Pour l'échantillon de sol marneux :

$$W_L = 114 ; W_p = 45 ; I_p = W_L - W_p = 69$$

D'après les données du tableau 12, le sol est très argileux.

Tableau 12: Argilosité du sol en fonction de l'indice de plasticité (GTR, 2000)

Indice de plasticité I_p	Argilosité
0 à 12	Sol faiblement argileux
12 à 25	Sol moyennement argileux
25 à 40	Sol argileux à très argileux

❖ Essai Proctor Normal

L'essai Proctor Normal permet de déterminer la teneur en eau optimale (W_{OPN}) c'est-à-dire celle avec laquelle il faut compacter un échantillon de sol pour obtenir le poids volumique sec maximum (γ_{dmax}). Il permet donc de connaître la teneur en eau avec laquelle on peut réduire, par compactage dynamique, le maximum de vides entre les particules composant le sol.

L'essai Proctor Normal est réalisé selon la norme NF P 94-093 sur les matériaux destinés à recevoir des charges moins importantes. Il consiste à placer dans un moule de dimensions déterminées, un échantillon humidifié de manière homogène à une teneur en eau donnée, peu élevée au début et à compacter cet échantillon par couches au moyen d'une dame de poids standardisé tombant d'une hauteur standardisée. Pour chacune des teneurs en eau considérée, il faut déterminer le poids volumique sec du sol et tracer ensuite la courbe de variation du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau.

La courbe Proctor obtenue passe généralement par un maximum qui correspond aux valeurs optimales de compactage OPN (W_{OPN} , γ_{dmax}). La courbe Proctor de l'échantillon de sol marneux a une forme pointue ce qui explique sa grande sensibilité à l'eau (figure 22). Les détails des essais sont consignés en annexe II.

Les valeurs optimales OPN du sol marneux sont : $W_{OPN} = 30,0\%$; $\gamma_{dmax} = 13,5 \text{ kN/m}^3$.

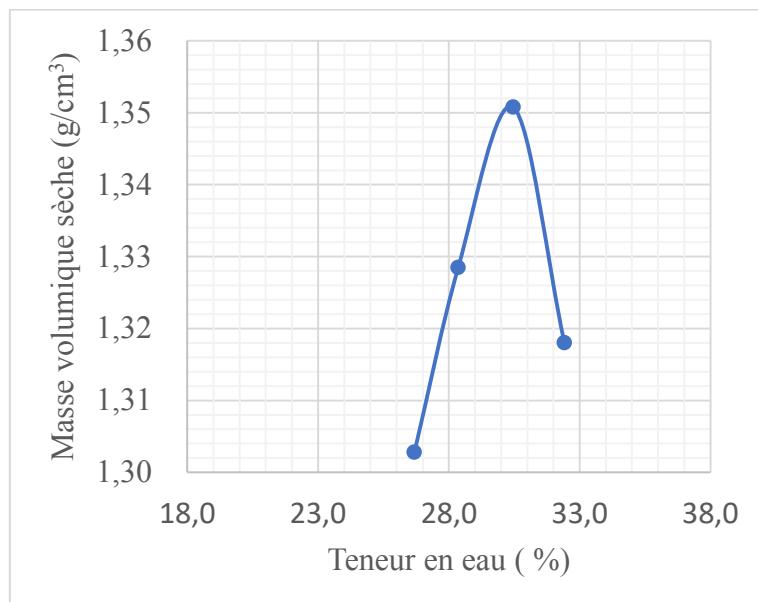


Figure 22 : Courbe Proctor Normal de l'échantillon de sol marneux

❖ Essais de portance immédiate IPI et de portance classique CBR

L'essai CBR est un essai de portance effectué sur des matériaux de remblai, de couche de forme et de couches de chaussées routières. Il est décrit par la norme NF P94-078. L'indice portant immédiat (IPI) permet d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI) tandis que l'indice portant CBR classique permet de dimensionner une structure de chaussée en déterminant l'épaisseur de chaque couche de matériau dans cette structure.

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27mm /mn) dans une éprouvette de matériau compacté. Les forces nécessaires aux enfoncements respectifs de 1,25 mm, 2 mm, 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm, et 10 mm sont déterminées sur la courbe force-déformation.

On définit les valeurs caractéristiques suivantes correspondant aux enfoncements respectifs de 2,5 et 5 mm :

$$I_1 = \frac{\text{effort de pénétration à } 2,5\text{mm}(kN)}{13,35 \text{ kN}} \times 100$$

$$I_2 = \frac{\text{effort de pénétration à } 5 \text{ mm}(kN)}{19,93 \text{ kN}} \times 100$$

L'indice portant est par convention la plus grande des deux valeurs : $\max(I_1, I_2)$.

On distingue trois types d'essais en fonction des buts recherchés :

- L'indice portant immédiat (IPI) : mesure la résistance au poinçonnement d'un échantillon de sol compacté à sa teneur en eau naturelle ou dans la plage de teneur en eau dans lequel il est susceptible d'évoluer. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins en phase de chantier. Le matériau est compacté avec l'énergie de l'essai Proctor Normal dans le cas d'un sol de remblai ou de couche de forme ; et avec l'énergie de l'essai Proctor Modifié dans le cas d'un matériau de couche d'assise de chaussée.
- L'indice CBR immédiat avec surcharge : mesure la résistance au poinçonnement d'un échantillon de sol compacté généralement avec l'énergie de l'essai Proctor Modifié et à sa teneur en eau à l'optimum Proctor (W_{OPM}). Dans la mesure où le matériau est support ou constituant d'une structure de chaussée, l'éprouvette de sol testé sera surchargée en tête par des disques annulaires représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plateforme.
- L'essai CBR classique avec surcharge et immersion : mesure la résistance au poinçonnement d'un échantillon de sol compacté avec différentes énergies de compactage Proctor Modifié (90, 95 et 100 % de l'OPM) puis immergé pendant quatre (4) jours. Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté à différentes énergies.

Dans le cadre de cette étude, l'indice portant immédiat IPI a été déterminé à partir de la teneur en eau optimale W_{OPN} et avec un poids volumique sec correspondant à 95 % de la valeur maximale. Ce qui se traduit par 25 coups répartis sur trois couches de sol dans le moule CBR.

L'indice CBR est déterminé sur trois moules compactés à la teneur en eau optimale W_{OPM} avec différentes énergies de compactage : 90%, 95% ,100% de l'OPM.

Le critère d'insensibilité à l'eau pour la construction routière des remblais et couches de forme selon le GTS, (2000) doit impérativement satisfaire les deux conditions suivantes :
 $IPI > 10$; $CBR4j \text{ immersion} / IPI \geq 1$.

Les valeurs des indices portants CBR et IPI sont données dans le tableau 13 et les détails en annexe IV.

Tableau 13 : Valeurs des indices portants IPI, CBR et du gonflement linéaire de l'échantillon de sol marneux

IPI	4
CBR après 4 jours d'immersion	3
Gonflement linéaire (%)	10,69

Le sol marneux a un indice portant immédiat IPI égal à 4, et ne satisfait pas au critère du GTS (2000) pour la réalisation des remblais, sa valeur étant inférieure à 10. L'indice CBR_{4j} immersion a une valeur très faible de 3, et le rapport entre CBR_{4j} immersion et IPI est bien inférieur à 1. Ce sol ne répond donc pas au critère d'insensibilité à l'eau pour la construction d'une couche de forme, selon le GTS (2000).

Le gonflement linéaire mesuré atteint une forte valeur de 10,69 % qui est largement supérieure à la limite maximale de 2 % préconisée dans le catalogue de l'AGEROUTE (2015).

Ces résultats montrent que le sol marneux ne convient pas comme sol de plateforme ou matériau de couche de forme.

❖ Classification du sol marneux suivant le GTR

Une structure de chaussée est construite sur la plateforme ou support de chaussée constituée :

- du sol support désigné dans sa partie supérieure (sur 1 m d'épaisseur) par le terme « partie supérieure des terrassements (PST) » et dont la surface constitue l'arase des terrassements (AR) ;
- d'une couche de forme éventuelle qui est disposée sur le sol support lorsque la portance de ce dernier est faible ; la couche de forme peut jouer le rôle de couche drainante.

Le GTR (2000) donne la classification des sols de plateforme et des matériaux de couche de forme en fonction des paramètres suivants :

- la dimension maximale du plus gros élément D_{max} ;
- la granularité, notamment le pourcentage de passant à 80 µm ou fines ;

- l'indice de plasticité Ip ;
- la valeur de bleu du sol VBS.

La figure 23 représente la classification des sols dont Dmax est inférieur à 50 mm.

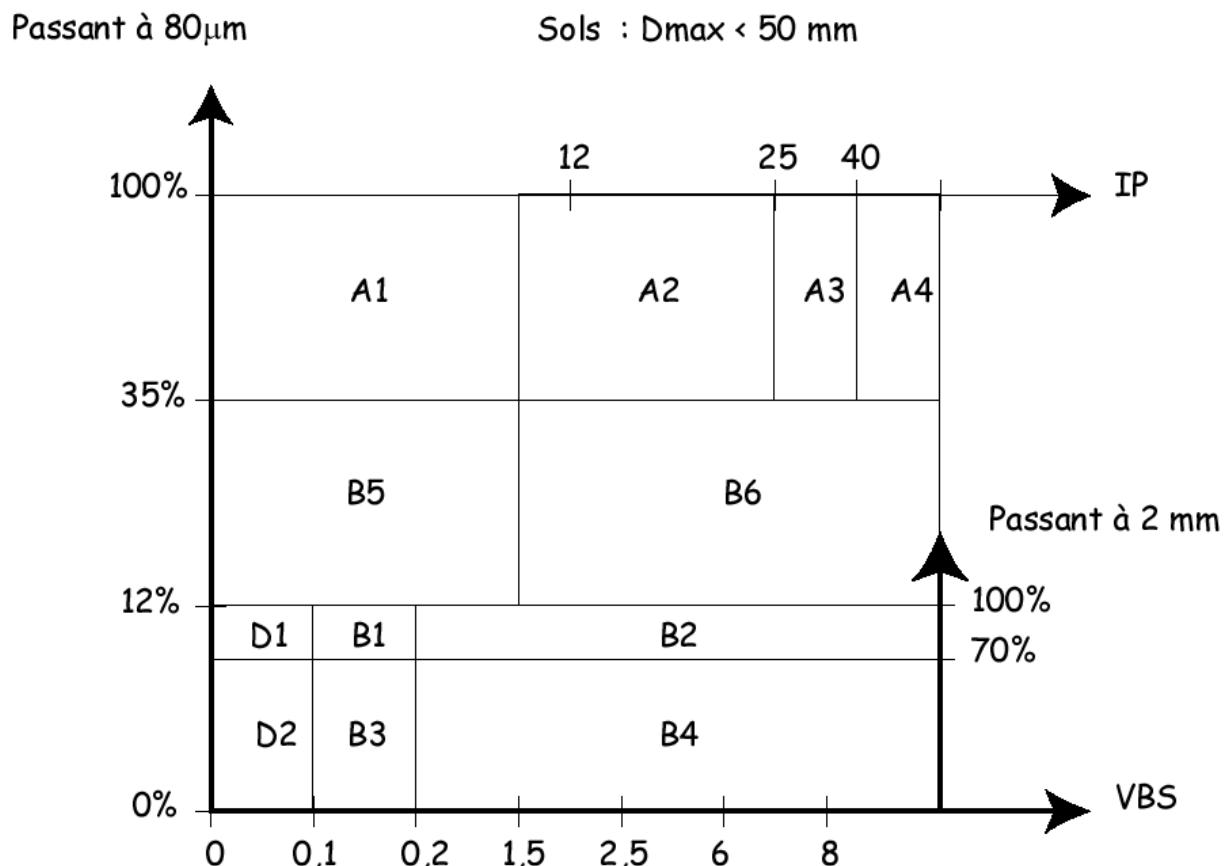


Figure 23 : Classification des sols fins (GTR, 2000)

À partir de ces différents résultats d'essais, le sol marneux se situe dans la classe A4.

$D_{max} \leq 50\text{mm}$; passant à $0,080 \mu\text{m} = 45\%$: correspond à un sol A

$IP = 69 > 40$: sol de classe A4.

Les sols A4 sont très cohérents et presque imperméables, et sujets à d'importants phénomènes de retrait ou de gonflement.

3.3.3 Identification des ajouts

➤ Analyse granulométrique du sable

La granularité, c'est la répartition en poids des particules minérales d'un échantillon de matériau suivant leurs dimensions. La granulométrie ou l'analyse granulométrique (NF P94

056), c'est la mesure de la granularité. L'essai est réalisé sur un échantillon de 500g de sable. Le sable utilisé a été prélevé à Keur Ndiaye Lo. Les détails de l'essai sont présentés en annexe VI et la courbe granulométrique est représentée sur la figure 24.

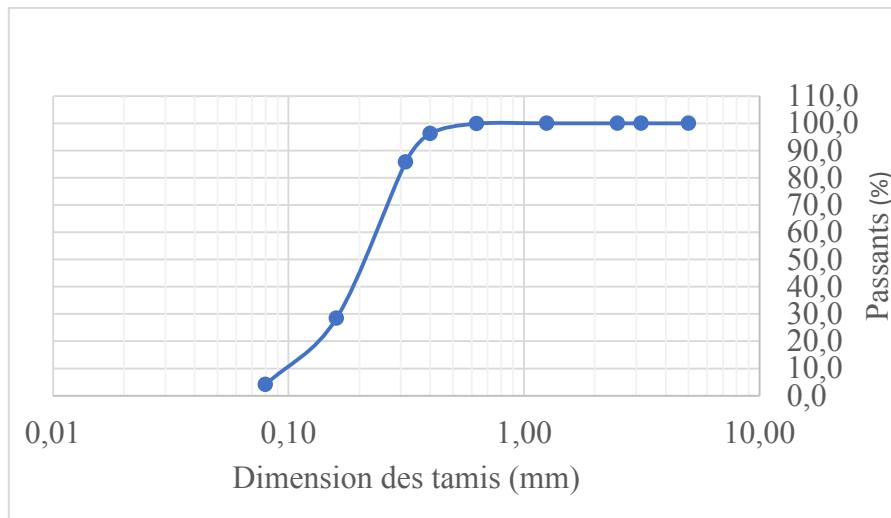


Figure 24 : Courbe granulométrique de l'échantillon de sable

$$D_{10} = 0,10 \text{ mm}$$

$$D_{30} = 0,18 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 0,25 \text{ mm}$$

Le coefficient d'uniformité de Hazen Cu est :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2,5$$

Cu ≥ 2 : la granularité est continue ou étalée

Le coefficient de courbure Cc est :

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = 1,3.$$

Le sable est bien classé si : Cu ≥ 4 et $1 \leq Cc < 3$. Comme Cu < 4 , le sable est mal classé.

➤ Essai Proctor Normal sur la marne sableuse

La granularité de la marne sableuse a été constituée au laboratoire, avec un mélange de 75 % de sol marneux et 25 % de sable.

L'essai Proctor Normal a été réalisé sur l'échantillon de marne sableuse conformément à la norme NF P 94-093. La courbe Proctor Normal est représentée sur la figure 25, tandis que les détails de l'essai sont présentés en annexe II.

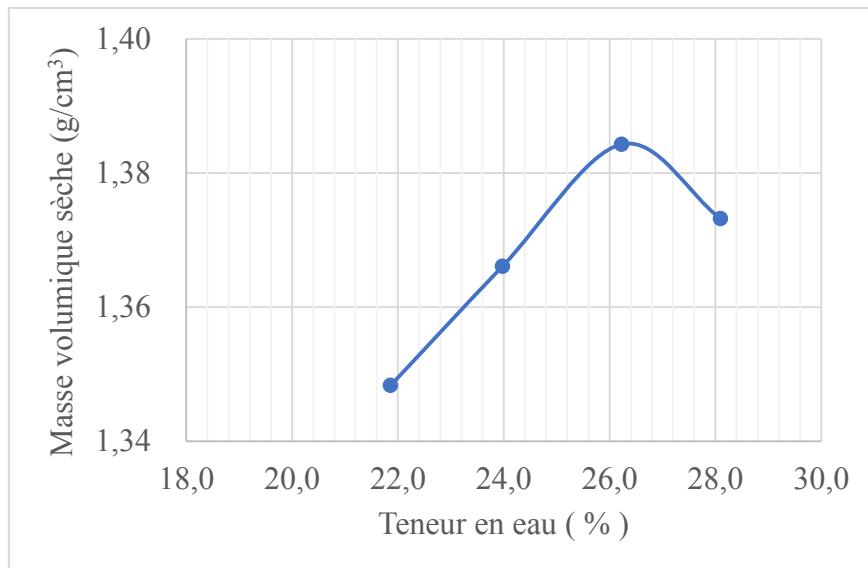


Figure 25 : Courbe Proctor Normal de l'échantillon de marne sableuse

Les valeurs optimales de la marne sableuse sont :

$$W_{OPN} = 26,3 \% ; \gamma_{dmax} = 14,0 \text{ kN/m}^3.$$

Les valeurs optimales du sol marneux (figure 22) sont : $W_{OPN} = 30,0 \% ; \gamma_{dmax} = 13,5 \text{ kN/m}^3$. L'incorporation de 25 % de sable au sol marneux améliore légèrement les caractéristiques optimales. Le poids volumique sec maximum γ_{dmax} reste élevé tandis que la teneur en eau optimale W_{OPN} demeure faible.

❖ Caractéristiques des liants hydrauliques utilisés

Le ciment CEM II/B-LL 42,5 R de la SOCOCIM-Industries de Rufisque a été utilisé pour cette étude.

La chaux utilisée est une chaux aérienne vive en provenance de Tunisie (INTERCHAUX.S.A., cité Mihri-1210 Thala Tunisie). Les principales caractéristiques de la chaux sont données dans le tableau 14. Sa composition chimique indique une grande pureté avec une teneur en chaux active (CaO) de 90,23 %.

Tableau 14 : Caractéristiques de la chaux utilisée

ANALYSE CHIMIQUES		ESSAIS PHYSIQUES	
COMPOSITION CHIMIQUE (% en masse)			
Dioxyde de carbone résiduel : CO ₂ R	4	Granulométrie	98%≤200 µm
Oxyde de calcium total : CaO total	95,33		
Oxyde de calcium actif : CaO actif	90,23		
Silice : SiO ₂	0,38	Réactivité à 60 °C	50 s
Alumine : Al ₂ O ₃	0,12		
Fer : Fe ₂ O ₃	0,09		
Sulfate : SO ₃	0,08	Masse volumique apparente (MVA)	1kg/dm ³
Matière incuite : CaCO ₃	9,08		

3.3.4 Caractérisation de la marne sableuse traitée aux liants hydrauliques

❖ Effets du traitement sur les limites d'Atterberg

La marne sableuse constituée en laboratoire se compose de 75 % de marne et de 25 % de sable (75 % M + 25 % S). Ce matériau artificiel a été soumis à deux types de traitement :

- un traitement à la chaux avec des dosages respectifs de 5 % et 6 % ;
- un traitement mixte avec des dosages respectifs de (3 % de chaux et 4% de ciment) et (3 % de chaux et 5 % de ciment).

Les résultats de la détermination des limites d'Atterberg sont présentés dans les tableaux 15 et 16 et les histogrammes correspondants dans les figures 26 et 27. Les détails de l'essai sont consignés en annexe I.

Tableau 15 : Valeurs des limites d'Atterberg des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux

75 % M + 25 % S	Chaux (%)	0	5	6
	W _L	77	97	99
	W _P	37	73	77
	I _P	40	24	22

Tableau 16 : Valeurs des limites d'Atterberg des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux+ciment

75 % M + 25 % S	Chaux et Ciment (%)	0	3 % chaux et 4 % ciment	3 % chaux et 5 % ciment
	WL	77	67	67
	WP	37	56	57
	IP	40	11	10

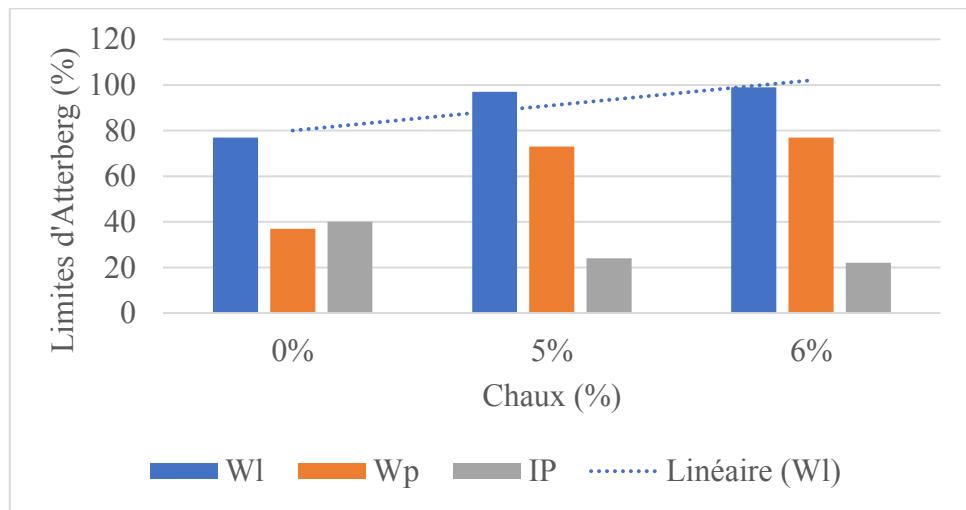


Figure 26 : Variations des limites d'Atterberg en fonction du dosage en chaux

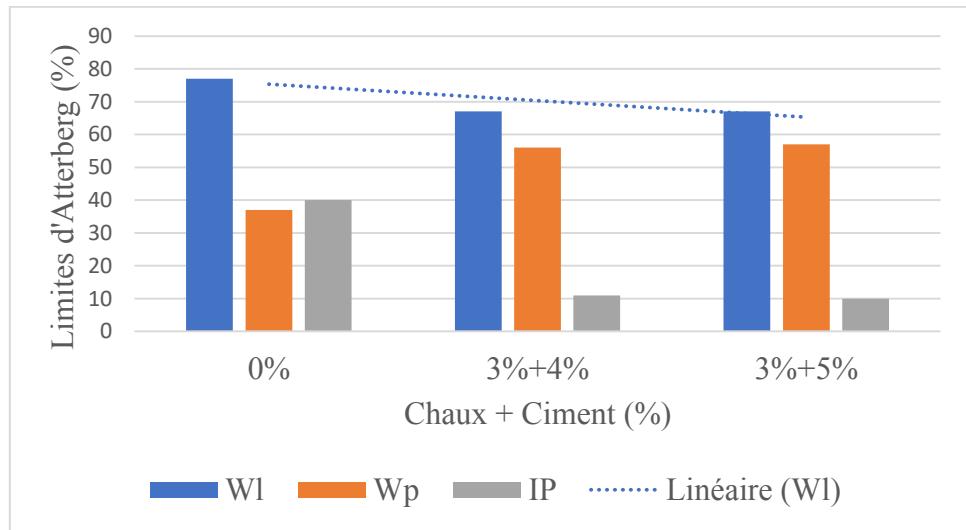


Figure 27 : Variation des limites d'Atterberg en fonction du dosage chaux+ciment

Les résultats obtenus montrent que le traitement aux liants hydrauliques (chaux, chaux+ciment) diminue de façon importante l'indice de plasticité de la marne sableuse :

- avant le traitement, la marne sableuse a un indice de plasticité I_p égal à 40 et est très plastique ($I_p \geq 40$). Après le traitement à la chaux, avec des dosages de 5 et 6 %, les valeurs de I_p deviennent respectivement 24 et 22, ce qui correspond à un matériau plastique ;

- après le traitement à la chaux+ciment, l'indice de plasticité est fortement abaissé avec des valeurs respectives de 11 et 10 pour des dosages de 3 % de chaux et 4 % de ciment, puis 3 % de chaux et 5 % de ciment. Le matériau devient ainsi moyennement plastique ($5 \leq I_p < 15$).

❖ Effets du traitement sur les valeurs optimales de compactage

L'essai Proctor Normal a été exécuté sur des échantillons de la marne sableuse (composée de 75 % de marne et de 25 % de sable) traités à différents dosages de liants hydrauliques (chaux et chaux+ ciment). Ce type d'essai est considéré comme la référence en matière de compactage des matériaux utilisés dans les terrassements routiers (sol support, remblai et couche de forme). Le but est de mettre en évidence l'influence du traitement aux liants hydrauliques sur les valeurs optimales de compactage à savoir la teneur en eau optimale (W_{OPN}) et le poids volumique sec maximal γ_{dmax} . Ces valeurs permettent d'apprécier l'aptitude au traitement de la marne sableuse. Les différentes étapes de préparation des mélanges sont décrites comme suit :

- humidification à 20 % des échantillons 1 et 2 de la marne sableuse ; temps de repos : 24h
- ajout de chaux et malaxage ; temps de repos : 1 h
- ajout de ciment ; temps de repos 30 min
- compactage de l'échantillon conformément à la norme NF P 94 093.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 17 et les courbes Proctor sont donnés sur les figures 28 et 29. Les détails des essais sont consignés en annexe II.

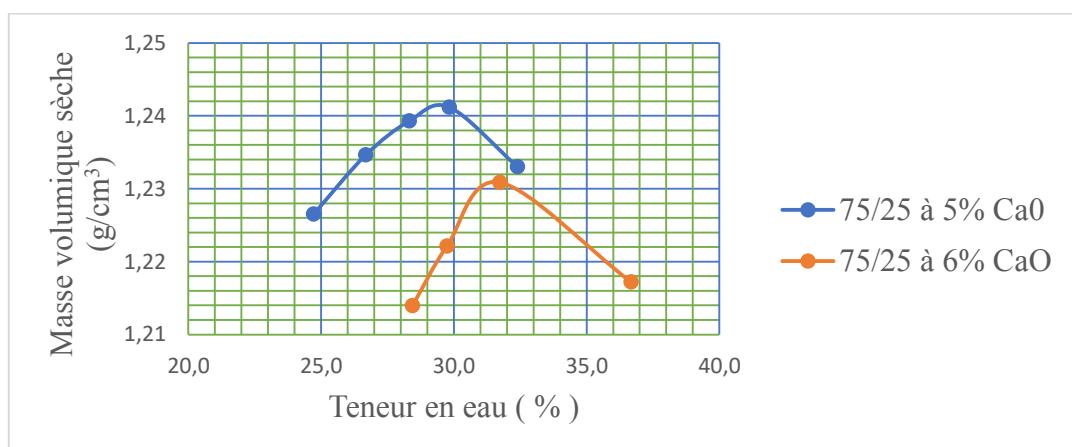


Figure 28 : Courbes Proctor des échantillons de marne sableuse traités à différents dosages en chaux

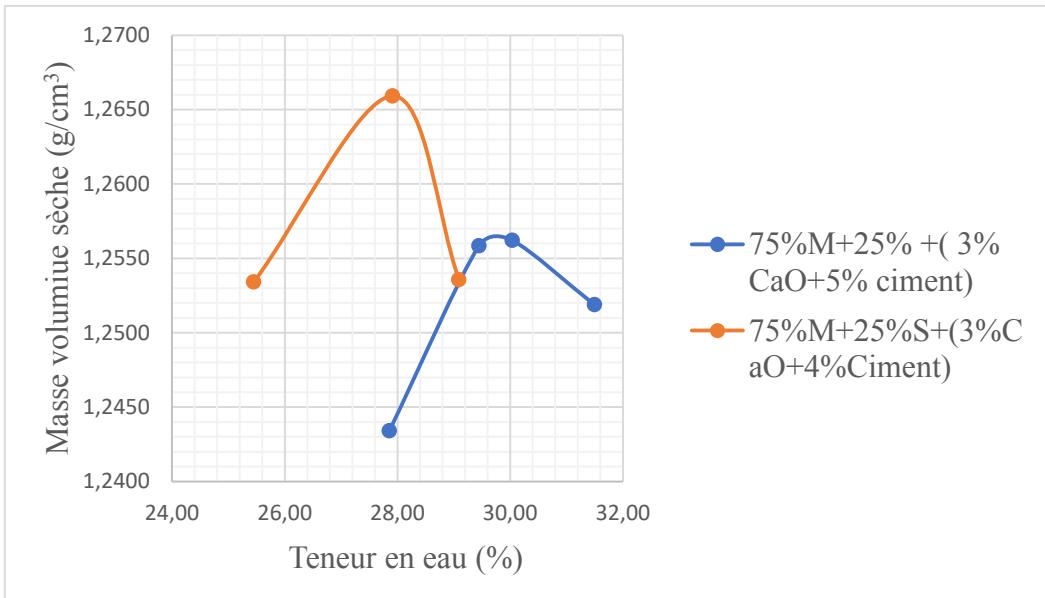


Figure 29 : Courbes Proctor des échantillons de marne sableuse traités à différents dosages en chaux+ ciment

Tableau 17 : Valeurs optimales de compactage des échantillons de la marne sableuse traités aux liants hydrauliques

Dosage	W _{OPN} (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)
0 %	26,3	14,0
5 % chaux	29,4	12,4
6 % chaux	31,5	12,3
3 % chaux+4 % ciment	27,9	12,7
3 % chaux +5 % ciment	29,8	12,6

La teneur en eau optimale W_{OPN} augmente en fonction du dosage en liants hydrauliques (chaux, chaux+ciment). Cette augmentation est due à l'hydratation des liants hydrauliques et à l'extinction de la chaux vive. Par contre le poids volumique sec maximum γ_{dmax} diminue après traitement avec des valeurs qui restent faibles.

❖ Evaluation de l'aptitude au traitement aux liants hydrauliques de la marne sableuse

L'aptitude d'un matériau routier ou d'un sol de plateforme à un traitement peut être définie comme sa capacité à être améliorée par les ajouts utilisés pour atteindre un certain niveau de qualité géotechnique exprimée en termes de portance et de résistances mécaniques.

L'essai d'aptitude au traitement aux liants hydrauliques est réalisé selon la norme NF P94-100. Pour le matériau traité à la chaux seule, on procède à l'évaluation du gonflement volumique, Gv (%) des éprouvettes de matériau conservées pendant 3 jours à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à 90 % de degré hygrométrique, et ensuite immergées 7 jours dans l'eau maintenue à $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Dans le cas du traitement avec le ciment seul ou combiné à la chaux, la durée de conservation des échantillons est de $4\text{ h} \pm 15\text{ min}$ aux mêmes conditions de conservation que les échantillons traités à la chaux seul. Cependant, en plus de la mesure du gonflement volumique Gv, la détermination de la résistance en compression diamétrale Rtb, est préconisée. Le critère d'évaluation de l'aptitude des sols traités à la chaux et/ou ciment est défini dans le GTS (2000).

Les essais ont été effectués sur des échantillons de marne sableuse traités avec la chaux ainsi qu'avec la chaux-ciment. Ils ont été malaxés à la teneur en eau optimale, puis compactés statiquement sous une presse à une vitesse constante de 1,27 mm/min dans un moule de 50 mm de diamètre et 50 mm de hauteur à 96 % du poids volumique sec maximum.

Pour chaque type de traitement, six (6) éprouvettes cylindriques (50x50) mm ont été préparées :

- trois éprouvettes (03) pour l'essai de gonflement volumique (Gv)
- trois éprouvettes (03) pour l'essai de résistance à la compression diamétrale (Rtb).

Les éprouvettes destinées à la mesure du gonflement sont démoulées immédiatement après confection et entourées d'une bande de confinement en textile synthétique souple et perméable maintenues par des élastiques afin d'éviter qu'elles ne se désagrègent lors de l'immersion. Toutefois les éprouvettes destinées à l'essai de compression diamétrale sont moulées dans un étui et maintenues dans cet étui durant la conservation.

La valeur du gonflement volumique G_v est la moyenne des valeurs mesurées sur trois éprouvettes, elle est déterminée à partir de la variation des volumes de V1, V2, V0 suivant la formule suivante :

$$Gv = \frac{(V1 - V2) - V0}{V0} \times 100$$

V0 : volume initial (immédiatement après démolage) de l'éprouvette. Il est déterminé à partir des dimensions (hauteur et diamètre), à l'aide du pied à coulisse :

$$V_o = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \right)^2 \times \frac{h_1 + h_2}{2}$$

d : diamètre des éprouvettes soumises à l'essai (haut, milieu, bas), mm

h : hauteur des éprouvettes soumises à l'essai, mm

Après immersion, il faut retirer les échantillons entourés de bandes en plastique du récipient d'eau thermostatée à 40°C et déterminer ensuite les volumes finaux (V1 et V2) des échantillons par pesée hydrostatique des éprouvettes à l'air libre et dans l'eau.

$$V1 = \frac{Ma - Me}{Gw}$$

Avec :

Ma : masse de l'éprouvette à l'air (g)

Me : masse de l'éprouvette immergée dans l'eau (pesée hydrostatique) (g)

Gw : masse volumique de l'eau (g/cm³)

V2 : volume de la bande de confinement et des bracelets élastiques déterminé par pesée hydrostatique.

La résistance à la compression diamétrale ou résistance à la traction Rtb, est obtenue par l'essai de compression diamétrale, selon la norme française NF P98-232-3, en appliquant une charge linéaire sur 2 génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette ; la résistance est déterminée à partir de la force appliquée par la presse au moment de la rupture de l'échantillon.

❖ Evaluation de l'aptitude au traitement à la chaux de la marne sableuse

Le tableau 18 présente les résultats des mesures de gonflement volumique (G_v) des échantillons de marne sableuse traités à différents pourcentages en chaux (5 % et 6 %). La figure 30 présente les histogrammes des valeurs de gonflement volumique, tandis que les détails de l'essai sont consignés en annexe III.

Tableau 18 : Valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux

Dosage en chaux (%)	Gonflement volumique (%)	Aptitude au traitement
5	1,23	Apte
6	0,97	Apte

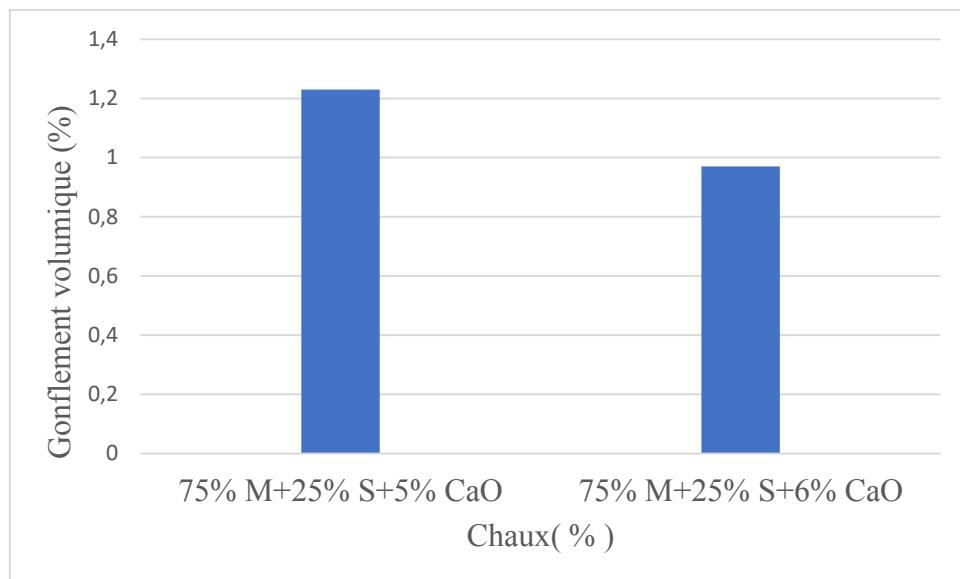


Figure 30 : Représentation des valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux

Pour les échantillons traités à la chaux, seule la mesure du gonflement volumique a été effectuée, conformément au critère d'évaluation de l'aptitude défini dans le GTS (2000). Pour qu'un sol puisse être apte au traitement, il faut que le gonflement volumique soit inférieur à 5. Les échantillons de marne sableuse traités avec 5 % et 6 % de chaux satisfont à cette exigence, avec des valeurs respectives de 1,23 et 0,97 %.

❖ Evaluation de l'aptitude au traitement à la chaux-ciment de la marne sableuse

Les résultats des mesures de gonflement volumique (Gv) des échantillons de la marne sableuse traités aux liants hydrauliques (3 % chaux + 4 % ciment) puis (3 % chaux + 5 % ciment) sont donnés dans le tableau 19. Les histogrammes correspondants sont représentés sur la figure 31. Les détails des mesures sont présentés en annexe III.

Tableau 19 : Valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment

Dosage	Gonflement volumique (%)	Aptitude au traitement
3 % chaux + 4 % ciment	7,17	Douteux
3 % chaux + 5 % ciment	4,59	Apte

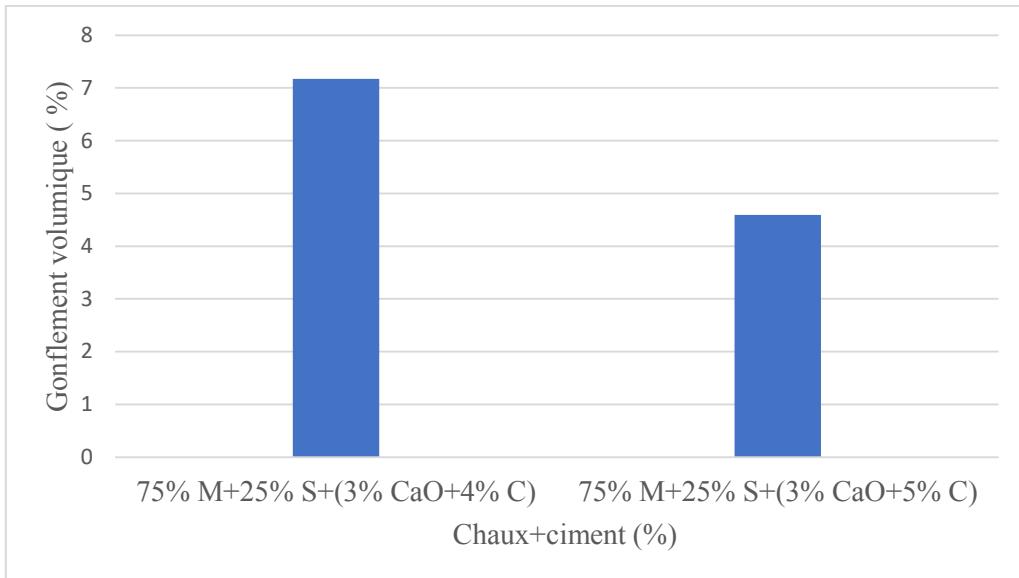


Figure 31 : Représentation des valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment

Le gonflement mesuré pour l'échantillon traité avec (3 % de chaux+4 % de ciment) atteint la valeur de 7,17 %, c'est-à-dire au-dessus du seuil recommandé par le GTS (2000) qui ne doit pas dépasser 5 %, le classant ainsi dans la catégorie des sols douteux. Cependant, l'échantillon traité avec (3 % de chaux+5 % de ciment) présente une valeur de gonflement de 4,59 % inférieure à la limite maximale de 5 %.

Les résultats des mesures de la résistance à la compression diamétrale (Rtb) des échantillons de marne sableuse traités avec (3% chaux + 4% ciment) et (3% chaux + 5% ciment) sont présentés dans le tableau 20 et les histogrammes correspondants sont représentés sur la figure 32. Les détails sont présentés en annexe III.

Tableau 20 : Valeurs de la résistance en compression diamétrale des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment

Dosage	Résistance en compression diamétrale Rtb (MPa)	Aptitude au traitement
3 % chaux+4 % ciment	0,32	Apte
3 % chaux+5 % ciment	0,34	Apte

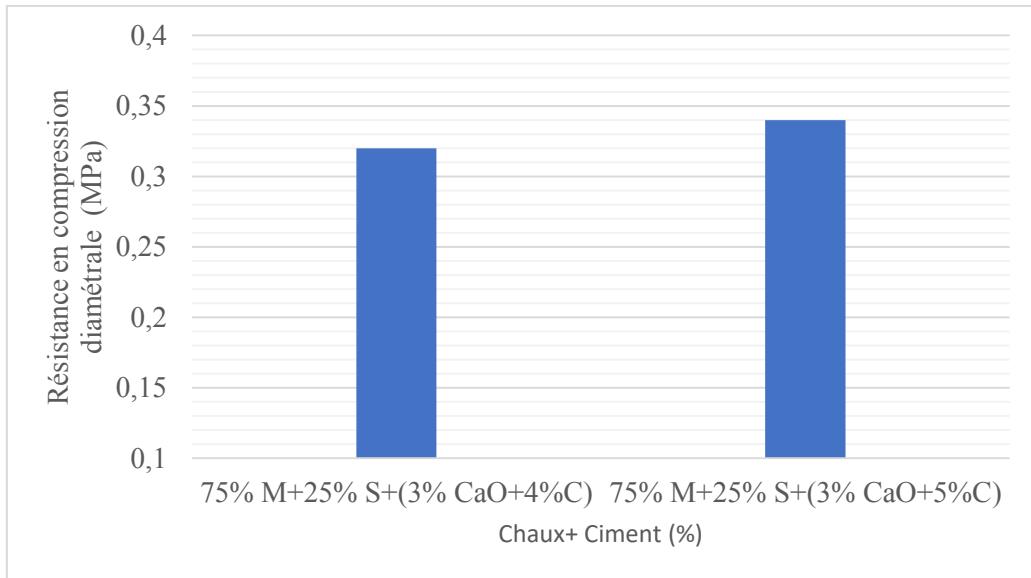


Figure 32 : Représentation de la résistance en compression diamétrale des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment

D'après la figure 32, le critère d'aptitude pour la résistance en compression diamétrale fixé par le GTS ($R_{tb} \geq 0,2$ MPa) a été satisfait pour les échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment. La valeur de R_{tb} est de 0,32 MPa pour l'échantillon traité avec (3 % chaux+4 % ciment) et 0,34 MPa pour l'échantillon traité avec (3 % chaux + 5 % ciment). Au final, seul l'échantillon de marne sableuse traité à (3 % chaux + 4 % de ciment) satisfait les deux critères d'aptitude (Gv et R_{tb}) du GTS (2000).

❖ Effets du traitement à la chaux sur la portance des matériaux

La mesure des valeurs respectives de l'indice portant immédiat (IPI) et de l'indice portant immédiat (CBR immédiat) et après immersion (CBR 4j immersion) est réalisée sur des échantillons de marne non traités puis sur ceux de la marne sableuse traités à différents pourcentages de chaux conformément à la norme NF P946078. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 21 et les détails en annexe IV.

Tableau 21 : Résultats des essais de portance

Désignation	IPI	CBR immédiat	CBR 4j immersion	CBR 4j immersion/IPI ≥ 1
Marne naturelle	4	-	3	0,75
Marne sableuse +5 % chaux	16	25	60	3,75
Marne sableuse +6 % chaux	18	27	69	3,83

D'après les résultats du tableau 21, la portance de la marne sableuse traitée à la chaux augmente avec le dosage en liant hydraulique. L'accroissement de la portance est appréciable après 4 jours d'immersion : l'indice CBR 4j immersion présente des valeurs respectives de 60 et 69 pour des dosages en chaux de 5 et 6 %.

De même, le critère mécanique pour la réalisation des remblais ($IPI > 10$) ainsi que le critère d'insensibilité à l'eau pour la construction de la couche de forme ($CBR_{immédiat} > 20$ et un rapport $CBR_{4j\ immersion} / IPI \geq 1$ selon le GTS) sont satisfait pour les échantillons traités (tableau 21). La marne sableuse traitée à la chaux peut donc être utilisée en construction routière, précisément en remblai et couche de forme.

❖ Essais de résistance à la compression simple

Les essais de résistance à la compression simple (R_c) sont effectués sur des éprouvettes de hauteur 10 cm et de diamètre 5 cm (élançement 2) compactées statiquement à la teneur en eau optimale W_{OPN} et à 98,5 % de la masse volumique sèche maximale, d'après la norme NF P98-232-1. Après conservation, les éprouvettes sont déposées sur les deux plateaux d'une presse et soumises à des charges croissantes jusqu'à la rupture. La mise en charge de l'éprouvette se fait de façon continue, de manière à ce que la rupture se produise entre 30 et 60 secondes après le début de l'application de la charge.

La résistance à la compression simple (N/mm^2 ou MPa) peut être donnée comme suit :

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

F = force maximale à la rupture (N)

A_c = section transversale de l'éprouvette (mm^2)

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de marne sableuse traitée à la chaux-ciment.

Il s'agit d'évaluer l'aptitude du matériau traité à être remis sous circulation. La couche de forme peut être circulée dès que : $R_c > 1$ MPa. L'âge au bout duquel cette condition est réalisée est déduit par interpolation entre les valeurs de la résistance en compression simple R_c mesurées à 7 et 28 j (ou entre 2 ou 4 j et 7j, le cas échéant). Les résultats sont présentés dans le tableau 22 et les histogrammes correspondants sont représentés sur la figure 33. Les détails des essais sont présentés en annexe V.

Tableau 22 : Valeurs de la résistance en compression simple à 4 jours et 7 jours d'âge des échantillons de marne sableuse traités à la chaux-ciment

Résistance en compression simple en âge autorisant la circulation sur la couche traitée				Valeurs admises dans le GTS
Compacité (%)	98,5			
Teneur en eau		W_{OPN}		
Résistance (MPa)		R_c		
Nombre de jours		4 jours	7 jours	
3 % chaux+4 % ciment		1,0	1,23	1MPa
3 % chaux+5 % ciment		1,06	1,38	1MPa

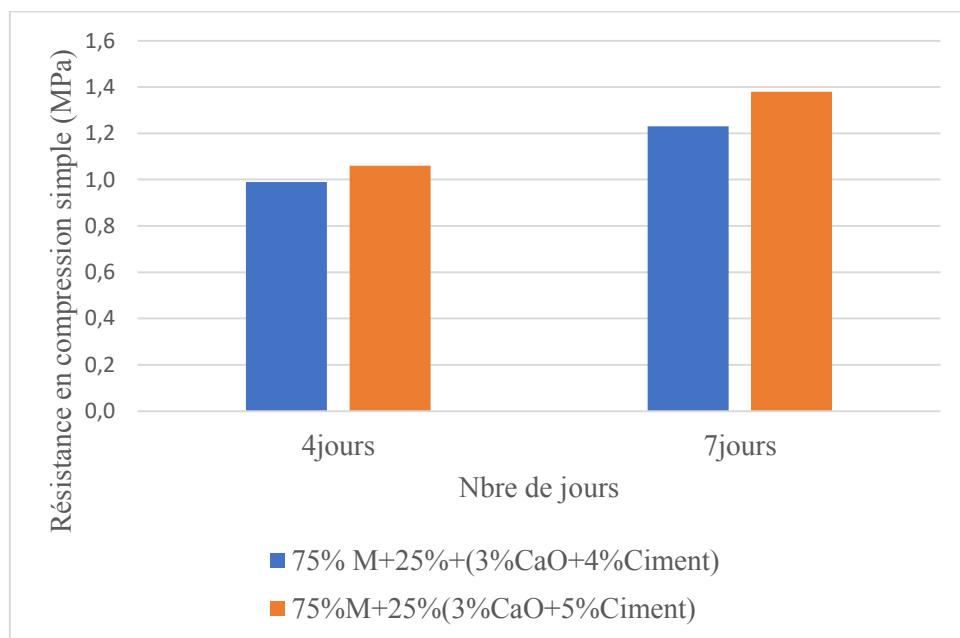


Figure 33 : Représentation des valeurs de la résistance en compression simple à 4 jours et 7 jours d'âge

Tous les échantillons de matériaux traités à la chaux-ciment présentent des valeurs de résistance en compression simple supérieures à 1MPa à 7 jours. Ce qui signifie que la couche de forme peut être circulée à 7 jours d'âge. Cependant l'échantillon de marne sableuse traitée à (3 % chaux+5 % ciment) présente une résistance en compression simple R_c supérieure à 1MPa à 4 jours. Pour ce mélange, la couche de forme peut être exceptionnellement circulée à 4 jours d'âge.

La résistance à la compression simple après immersion peut permettre d'évaluer la sensibilité à l'eau d'un matériau. La résistance en compression après immersion peut être évaluée par le rapport R_{ci}/R_{C60} avec :

- Rci : résistance à la compression à 28 jours de cure normale et 32 jours d'immersion dans de l'eau à 20 °C ;
- Rc60 : résistance à la compression à 60 jours de cure normale.

Remarque : la cure normale est une cure à l'air à une température de 20 °C.

On considère que le matériau a une bonne tenue à l'eau lorsque R_{ci}/R_{c60} est supérieur ou égal 0,80 et la VBS du sol est inférieure ou égale 0,5 g/100 g (ou lorsque : R_{ci}/R_{c60} est supérieur ou égal à 0,60 et VBS du sol > 0,5 g/100 g) d'après le GTS (2000).

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 23 et les détails en annexe V.

Tableau 23 : Résistance à l'immersion au jeune âge des échantillons de marne sableuse traités à la chaux-ciment

Résistance à l'immersion au jeune âge				Valeurs admises dans le GTS	
Compacité (%)	98,5				
Teneur en eau		W_{OPN}			
Résistance (MPa)	Rc				
Nombre de jours	28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion Rci	60 jours de cure normale Rc	Rci/Rc		
3 % chaux+4 % ciment	2,07	2,55	$0,81 \geq 0,60$	0,60	
3 % chaux+5 % ciment	2,34	2,88	$0,81 \geq 0,60$	0,60	

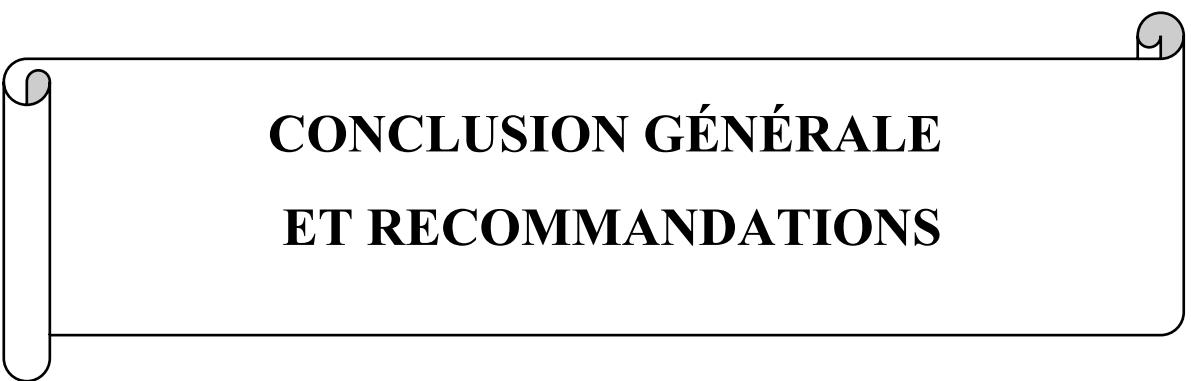
La bonne tenue à l'eau est vérifiée dans les deux dosages avec un rapport Rci/Rc égal à 0,81 et légèrement supérieur à 0,80.

CONCLUSION PARTIELLE

Au terme de l'étude expérimentale, les résultats sont les suivants :

- l'indice de plasticité Ip du sol marneux à l'état naturel est très élevé et atteint la valeur de 69 qui correspond à un sol très plastique ; de même, sa portance est très faible avec un indice CBR égal 3 après 4 jours d'imbibition ;
- la correction de la granularité de la marne naturelle par l'incorporation de 25 % de sable a permis d'obtenir une marne sableuse d'indice de plasticité égal à 40 et correspondant à un sol plastique ;

- le traitement aux liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment) améliore légèrement les valeurs optimales de compactage ;
- le critère d'aptitude au traitement selon le GTS (2000) est bien vérifié avec la marne sableuse traité à 4 et 5 % de chaux ;
- le traitement avec (3 % chaux+5 % ciment) est convenable et donne des valeurs de résistance en compression diamétrale Rtb satisfaisantes ;
- la résistance à la compression à l'âge autorisant la circulation est obtenue à 4 jours pour le traitement avec (3 % chaux et 5 % ciment), la tenue à l'eau est également vérifiée.



CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Le travail expérimental réalisé au Laboratoire des sols du Département de Génie civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar est une contribution aux travaux réalisés pour mieux comprendre le comportement des sols marneux traités aux liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment) en vue de leur utilisation comme matériaux de remblai et de couche de forme des chaussées routières.

Les résultats de l'identification physico-chimique et de la caractérisation géotechnique du sol marneux prélevé à Diamniadio, montrent que ce matériau ne convient pas comme sol de plateforme ou de couche de forme.

Une marne sableuse artificielle composée de 75 % de marne et de 25 % de sable a été constituée en laboratoire, et soumise aux essais usuels de laboratoire, avant et après traitement aux liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment). Les dosages en liants sont les suivants : 5 et 6 % de chaux ; (3 % chaux+4 % ciment) et (3 % chaux+5 % ciment).

Le critère d'aptitude au traitement de la marne sableuse est bien vérifié pour la chaux en ce qui concerne le gonflement volumique. Pour le traitement à la chaux-ciment, la valeur du gonflement volumique est acceptable pour le dosage (3 % chaux +5 % ciment). Les résultats des essais de résistance en compression diamétrale montrent que les deux dosages de (3 % chaux+4 % ciment) et (3 % chaux+5 % ciment) sont bien adaptés à la marne sableuse.

Le traitement à la chaux de la marne sableuse donne des résultats satisfaisants en termes de portance. Le gonflement linéaire dans le moule CBR est fortement réduit. Ces résultats prouvent que le traitement à la chaux de ce matériau est favorable pour son utilisation en remblai et couche de forme, d'après les spécifications du GTS (2000).

L'étude expérimentale se termine par l'exécution des essais de résistance en compression simple sur des éprouvettes de marne sableuse traitée avec la chaux-ciment. Pour la traficabilité et la tenue à l'eau au jeune âge, les résultats obtenus montrent que la couche de forme peut être circulée à 7 jours en considérant les dosages respectifs de (3 % chaux+4 % ciment) et (3 % chaux+ 5 % ciment). Le dernier dosage convient particulièrement pour une circulation sur la couche de forme après 4 jours de mise en œuvre.

Au terme de ce travail, nous formulons les recommandations suivantes :

- faire des planches d'essais sur la marne sableuse traitée aux liants hydrauliques (chaux, chaux-ciment). Les planches d'essais permettent de :

- vérifier *in situ* le bon fonctionnement et l'efficacité des engins de terrassement;
 - définir les modalités de mise en œuvre de ces engins (vitesse, profondeur optimale des outils, nombre de passes, etc.) ;
 - ajuster les dosages déterminés par les études de laboratoire en fonction des conditions de chantier ;
 - tenir compte des éventuels imprévus que l'on peut rencontrer sur chantier.
- respecter le délai de maniabilité du sol traité ;
 - utiliser des compacteurs à pneus ou vibrants ;
 - faire des essais de portance sur le mélange traité avec chaux +ciment pour vérifier d'avantage leur aptitude à être utilisé en construction routière ;
 - étudier en laboratoire le traitement au ciment seul de la marne sableuse pour vérifier son aptitude comme matériau de remblai ou de couche de forme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGEROUTE 2015. Catalogue de structures de chaussées neuves et Guide de dimensionnement des chaussées au Sénégal, 214 p.

ANSD 2019. Situation économique et sociale régionale 2016, 276p

Boudlal O., Khataoul M. et Kichi H. 2014. Caractérisation des marnes de la grande Kabylie, Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'ingénieur JNGG2014, UMMTO-L.G.E.A, Algérie, 10 p.

Diagne A. 2019. Etudes géotechniques de fondations selon l'Eurocode 7 du parc technologique numérique de Diamniadio, Mémoire d'ingénieur-géologue, N°397/IST/2019, UCAD, 95 p.

Diop M. 2002. Conception de structures routières sur marnes et argiles gonflantes, Etude de cas : Bargny -Diamniadio. Projet de fin d'études, ESP, UCAD, 133 p.

Gregoire C. 2004. Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, CRR, Bruxelles, 126 p.

GTR 2000. «Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide technique, Fascicule 1, Principes Généraux, LCPC-SETRA, 211 p.

GTS 2000. Guide technique du traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques », Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule 2, LCPC-SETRA, 246 p.

Koussaila S.-D. et Tarek F.-M. 2020. Essai de gonflement, Recherche dans la mécanique des sols, 02, 3^{eme} année GC, sur le site Académia, consulté le 30 juillet 2020, 17 p., <https://www.academia.edu>.

Le Borgne T. 2010. Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols, Thèse de doctorat, Mécanique génie civil, Institut national Polytechnique de Lorraine, 257 p.

Martin A. 1970. Les nappes de la presqu'île du Cap-Vert, leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar, Notice explicative des cartes hydrogéologiques et hydro chimiques à 1/50 000 et 1/100 000, BRGM, 56 p.

Melbouchi B. 2017. Etude comparative du traitement du sol marneux à la chaux et au ciment dans les couches de formes des chaussées, Article, Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement, Algérie, Communication Science&Technologie, 21 p.

Ndiaye M .2019. Traitement à la chaux et au ciment d'un sol compressible de Diamniadio, Mémoire de fin d'étude de licence professionnelle, IST,0066/LPG2/IST, UCAD, Dakar,92 p.

Roger J., Barusseau J.-P., Duvail C., Noel B.J., Nehlin P., et Serrano O. 2009. Notice explicative commune aux cartes géologiques à 1/50 000 et 1/20 000 du secteur d'activité du Cap-Vert (Sénégal), Projet PASMI, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 245 p.

Zeinab B. et NehlaA. B. 2017. Etude du comportement d'une marne argileuse traitée pour valorisation dans les projets routiers, Mémoire de master, Faculté des Science et de la Technologie, Université du 08 mai 1945 de Guelma, Algérie, 112 p.

SOURCES INTERNET

<https://www.academia.edu>, consulté le 30 juillet 2020 sur l'essai de gonflement.

<https://wikiteritorial.cnfpt.fr>, consulté le 02 juillet 2020 sur la structure de la chaussée.

Listes des normes citées

NF P 94 051 : Limites d'Atterberg

NF P 94 093 : Essai Proctor normal

NF P 94-078 : Essais de portance CBR-IPI

NF P 94-056 : Analyse granulométrique

NF P 94 100 : Aptitude du sol au traitement

NF P 98-232-3 : Résistance en compression diamétrale

NF P 98-232-1 : Résistance en compression simple

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de Diamniadio (AGEROUTE, in Diagne, 2019)	5
Figure 2 : Carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert et du plateau de Thiès (Roger et al. 2009, modifiée)	8
Figure 3 : Coupe géologique des régions de Bargny et Thiès (Martin, 1970, modifiée)	9
Figure 4 : Structure élémentaire tétraédrique (Koussaila et Tarek, 2020)	11
Figure 5 : Structure élémentaire octaédrique (Koussaila et Tarek, 2020)	11
Figure 6 : Structure particulaire de la kaolinite (Zeinab et Nehla, 2017)	12
Figure 7 : Structure particulaire de l'illite (Zeinab et Nehla, 2017)	13
Figure 8 : Structure particulaire de la montmorillonite (Zeinab et Nehla, 2017)	14
Figure 9 : Photographies au microscope électronique à balayage de différents types d'argile (Koussaila et Tarek, 2020)	14
Figure 10 : Schéma d'une chaussée gonflant en fin de saison sèche après une première pluie (Diop, 2002)	17
Figure 11 : Schéma d'une chaussée sur sols gonflants en début de saison pluvieuse (Diop, 2002)	17
Figure 12 : Schéma d'une chaussée sur sols gonflants à la saison sèche de l'année suivante (Diop, 2002)	18
Figure 13 : Zone de classement des sols traités au ciment en couche de forme (GTS, 2000 ; AGEROUTE, 2015)	26
Figure 14 : Coupe type d'une structure de chaussée routière (GTR, 2000)	27
Figure 15 : Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux d'après le GTS (Le Borgne, 2010)	32
Figure 16 : Influence de la nature du minéral, de la quantité de chaux et du temps de cure sur la résistance à la compression simple (Le Borgne, 2010)	33
Figure 17 : Potentiel de gonflement en fonction du temps d'une argile traitée à 3 et 6 % de chaux vive (Le Borgne, 2010)	34
Figure 18 : Prélèvement des sols marneux à la pelle mécanique	41
Figure 19 : Localisation des zones de prélèvement des sols marneux	42
Figure 20 : Analyse granulométrique au laser de l'échantillon de sol marneux	44
Figure 21 : Différents états de consistance (NF P94-051)	45
Figure 22 : Courbe Proctor Normal de l'échantillon de sol marneux	46
Figure 23 : Classification des sols fins (GTR, 2000)	49

Figure 24 : Courbe granulométrique de l'échantillon de sable	50
Figure 25 : Courbe Proctor Normal de l'échantillon de marne sableuse	51
Figure 26 : Variations des limites d'Atterberg en fonction du dosage en chaux	53
Figure 27 : Variation des limites d'Atterberg en fonction du dosage chaux+ciment	53
Figure 28 : Courbes Proctor des échantillons de marne sableuse traités à différents dosages en chaux	54
Figure 29 : Courbes Proctor des échantillons de marne sableuse traités à différents dosages en chaux+ ciment	55
Figure 30 : Représentation des valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux	58
Figure 31 : Représentation des valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment	59
Figure 32 : Représentation de la résistance en compression diamétrale des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment	60
Figure 33 : Représentation des valeurs de la résistance en compression simple à 4 jours et 7 jours d'âge	62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des argiles (Koussaila et Tarek, 2020)	14
Tableau 2 : Classification selon la teneur en carbonate et argile (Boudlal et al. 2014)	15
Tableau 3 : Classe d'arase de terrassement (AGEROUTE, 2015).....	20
Tableau 4 : Dimensionnement de la couche de forme non traitée (AGEROUTE, 2015).....	25
Tableau 5 : Dimensionnement de la couche de forme traitée (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015).....	25
Tableau 6 : Détermination de la classe mécanique d'un matériau traité en fonction de ses caractéristiques et son mode de fabrication (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015)	25
Tableau 7 : Limites inférieures des zones de 1 à 5 (GTR, 2000 ; AGEROUTE, 2015)	26
Tableau 8 : Principales caractéristiques de la chaux (Le Borgne, 2010)	29
Tableau 9 : Évolution de la limite de plasticité, de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité d'une argile en fonction de la teneur en chaux dosée (Le Borgne, 2010)	31
Tableau 10 : Objectifs du traitement des sols appliqués à la réutilisation des sols trop humides en remblai (GTS, 2000)	38
Tableau 11 : Résultats de l'analyse chimique	43
Tableau 12: Argilosité du sol en fonction de l'indice de plasticité (GTR, 2000)	45
Tableau 13 : Valeurs des indices portants IPI, CBR et du gonflement linéaire de l'échantillon de sol marneux	48
Tableau 14 : Caractéristiques de la chaux utilisée	52
Tableau 15 : Valeurs des limites d'Atterberg des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux	52
Tableau 16 : Valeurs des limites d'Atterberg des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux+ciment	52
Tableau 17 : Valeurs optimales de compactage des échantillons de la marne sableuse traités aux liants hydrauliques.....	55
Tableau 18 : Valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux.....	57
Tableau 19 : Valeurs du gonflement volumique des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment	58
Tableau 20 : Valeurs de la résistance en compression diamétrale des échantillons de la marne sableuse traités à la chaux-ciment	59

Tableau 21 : Résultats des essais de portance	60
Tableau 22 : Valeurs de la résistance en compression simple à 4 jours et 7 jours d'âge des échantillons de marne sableuse traités à la chaux-ciment	62
Tableau 23 : Résistance à l'immersion au jeune âge des échantillons de marne sableuse traités à la chaux-ciment.....	63

ANNEXES

ANNEXE I : RAPPORT DES ESSAIS DE LIMITES D'ATTERBERGS

Limite de Liquidité sur la marne crue :NF P 94 051								
Lecture (mm)	13		15,3		17,7		21,5	
Tare N°	88	70	207	39	18	52	43	16
Masse tare (g)	40,07	32,05	39,36	32,83	39,24	32,19	32,66	39,12
Masse humide (g)	45,26	38,82	45,19	39,78	50,17	39,60	42,11	48,24
Masse sèche (g)	42,68	35,45	42,16	36,16	44,24	35,60	36,76	43,10
Ms	2,61	3,40	2,80	3,33	5,00	3,41	4,10	3,98
m. eau	2,58	3,37	3,03	3,62	5,93	4,00	5,35	5,14
W (%)	98,85	99,12	108,21	108,71	118,60	117,30	130,49	129,15
W1	99		108		118		130	

Limite de Liquidité 75% M +25% S :NF P 94 051								
Lecture (mm)	16		18		20,5		23,9	
Tare N°	14	58	89	T	4	26	68	28
Masse tare (g)	33,12	33,30	39,58	33,41	39,10	41,71	32,09	38,75
Masse humide (g)	41,89	46,09	45,92	38,37	48,62	48,55	41,49	48,01
Masse sèche (g)	38,22	40,70	43,07	36,14	44,13	45,35	36,87	43,45
Ms	5,10	7,40	3,49	2,73	5,03	3,64	4,78	4,70
m. eau	3,67	5,39	2,85	2,23	4,49	3,20	4,62	4,56
W (%)	71,96	72,84	81,66	81,68	89,26	87,91	96,65	97,02
W1	72		82		89		97	

Limite de Liquidité 75% M +25% S +5% CaO :NF P 94 051								
Lecture (mm)	13		15,9		18		20,5	
Tare N°	88	70	46	h	42	IV	43	16
Masse tare (g)	40,07	32,05	32,57	32,47	32,30	31,79	32,66	39,12
Masse humide (g)	44,95	38,35	43,14	47,25	44,35	43,09	41,11	47,30
Masse sèche (g)	42,68	35,45	38,02	40,08	38,32	37,45	36,76	43,10
Ms	2,61	3,40	5,45	7,61	6,02	5,66	4,10	3,98
m. eau	2,27	2,90	5,12	7,17	6,03	5,64	4,35	4,20
W (%)	86,97	85,29	93,94	94,22	100,17	99,65	106,10	105,53
W1	86		94		100		106	

Limite de liquidité 75% M +25%S +6% CaO :NF P 94 051								
Lecture (mm)	13,5		17		18,3		20,5	
Tare N°	88	70	II	202	37	68	43	16
Masse tare (g)	40,07	32,05	40,25	40,14	32,35	32,09	32,66	39,12
Masse humide (g)	44,95	38,34	49,30	49,00	39,00	41,50	41,30	47,58
Masse sèche (g)	42,68	35,45	44,82	44,58	35,61	36,68	36,76	43,10
Ms	2,61	3,40	4,57	4,44	3,26	4,59	4,10	3,98
M. eau	2,27	2,89	4,48	4,42	3,39	4,82	4,54	4,48
W (%)	86,97	85,00	98,03	99,55	103,99	105,01	110,73	112,56
W1	86		99		104		112	

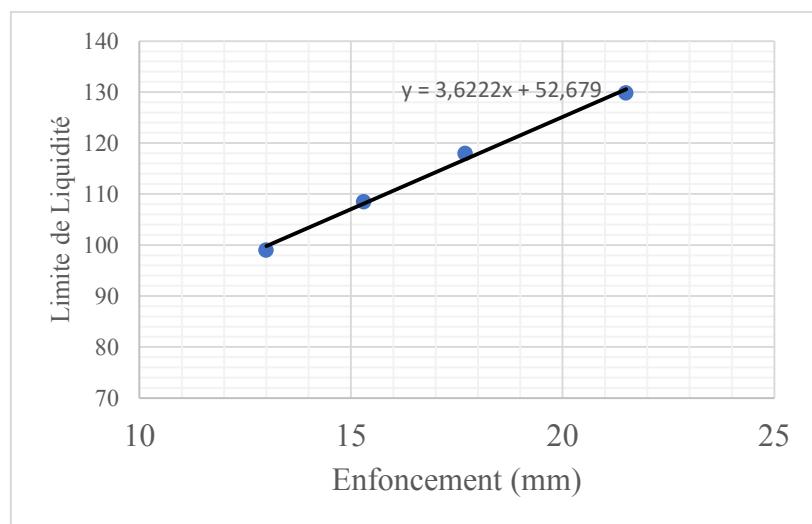
Limite de liquidité 75%M+25%S+(3% CaO + 4% CaO) :NF P 94 051								
Lecture (mm)	13,5		15,7		17,9		22,4	
Tare N°	88	70	55	1	89	70	4	88
Masse tare (g)	40,07	32,05	31,88	32,61	39,57	32,02	39,11	40,09
Masse humide (g)	44,25	37,55	40,76	44,28	48,40	39,69	50,58	50,31
Masse sèche (g)	42,68	35,45	37,26	39,64	44,77	36,58	45,73	46,00
Ms	2,61	3,40	5,38	7,03	5,20	4,56	6,62	5,91
M. eau	1,57	2,10	3,50	4,64	3,63	3,11	4,85	4,31
W (%)	60,15	61,76	65,06	66,00	69,81	68,20	73,26	72,93
W1	61		66		69		73	

Limite de liquidité 75%M+25%S+(3% CaO + 5% CaO) :NF P 94 051								
Lecture (mm)	12		16		21,7		24,9	
Tare N°	90	14	56	i	202	42	16	35
Masse tare (g)	39,36	33,12	34,80	38,99	40,14	32,30	39,16	38,74
Masse humide (g)	47,99	40,35	50,88	49,38	53,58	39,17	50,10	51,44
Masse sèche (g)	44,57	37,53	44,53	45,18	48,04	36,38	45,53	46,16
Ms	5,21	4,41	9,73	6,19	7,90	4,08	6,37	7,42
M. eau	3,42	2,82	6,35	4,20	5,54	2,79	4,57	5,28
W (%)	65,64	63,95	65,26	67,85	70,13	68,38	71,74	71,16
W1	65		67		69		71	

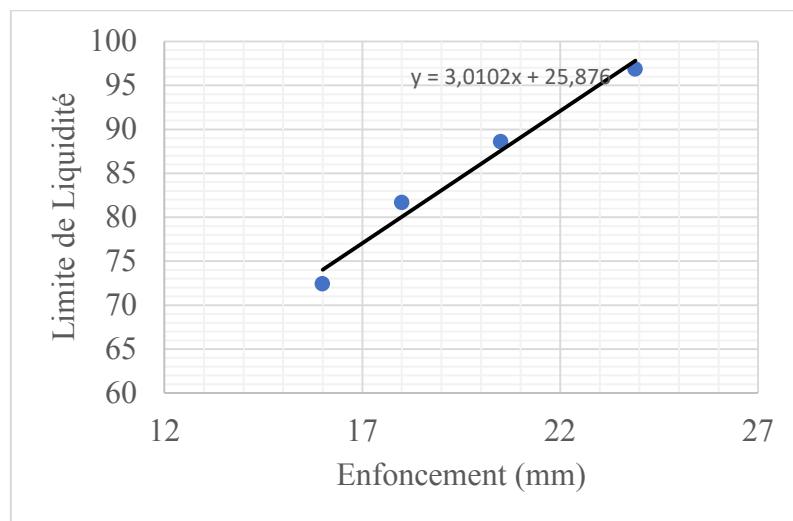
Limite Plasticité sur la marne :NF P 94 051			Limite de plasticité 75% M +25%S :NF P 94 051		
Tare N°	35	91	Tare N°	48	46
Masse tare (g)	38,71	39,02	Masse tare (g)	31,99	32,57
Masse humide(g)	40,20	40,09	Masse humide(g)	34,58	34,93
Masse Seche(g)	39,75	39,75	Masse Seche(g)	33,87	34,30
Ms	1,04	0,73	Ms	1,88	1,73
Me	0,45	0,34	Me	0,71	0,63
W	43,27	46,58	W	37,77	36,42
Wp	44,92		Wp	37,09	

Limite Plasticité 75% M +25%S+5% CaO :NF P 94 051			Limite plastique 75%M+25%S+6% CaO :NF P 94 051		
Tare N°	56	i	Tare N°	1	52
Masse tare (g)	34,92	39,01	Masse tare (g)	41,67	32,20
Masse humide(g)	37,78	42,95	Masse humide(g)	45,21	35,45
Masse Seche(g)	36,58	41,27	Masse Seche(g)	43,66	34,04
Ms	1,66	2,26	Ms	1,99	1,84
Me	1,20	1,68	Me	1,55	1,41
W	72,29	74,34	W	77,89	76,63
Wp	73,31		Wp	77,26	

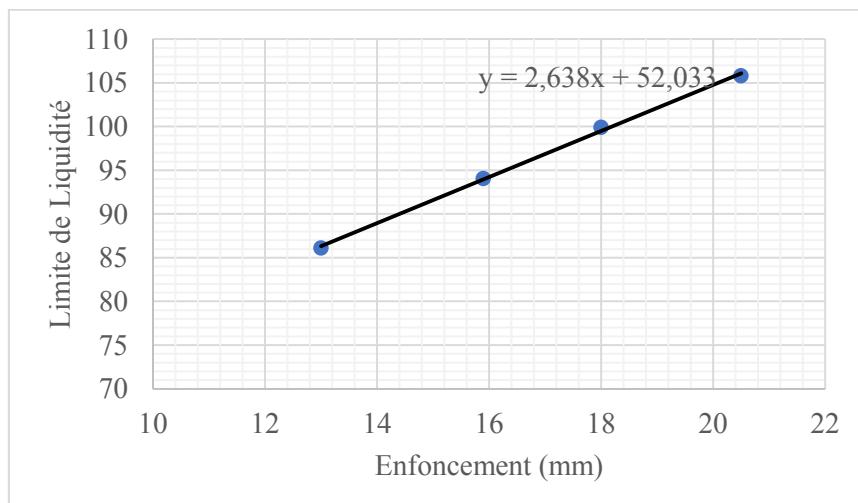
Limite plastique 75%M+25%S+(3% CaO + 4% CaO) :NF P 94 051			Limite plastique 75%M+25%S+(3% CaO + 5% CaO) :NF P 94 051		
Tare N°	6	g	Tare N°	79	58
Masse tare (g)	39,89	33,19	Masse tare (g)	40,11	33,30
Masse humide(g)	42,70	36,58	Masse humide(g)	43,65	37,15
Masse Seche(g)	41,72	35,34	Masse Seche(g)	42,34	35,77
M.s	1,83	2,15	Ms	2,23	2,47
M.e	0,98	1,24	M.e	1,31	1,38
W	53,55	57,67	W	58,74	55,87
Wp	55,61		Wp	57,31	



Courbe de la limite de liquidité de la marne crue

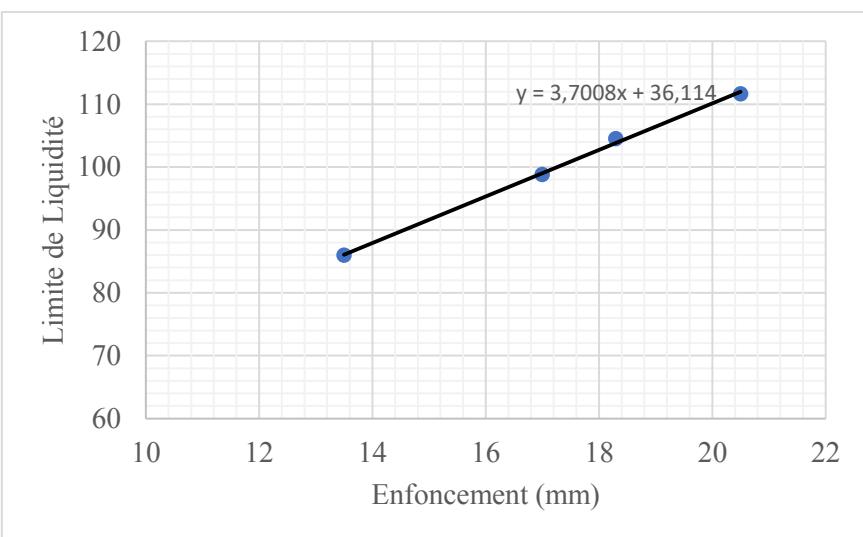


Courbe de la limite de liquidité 75% M+25% S

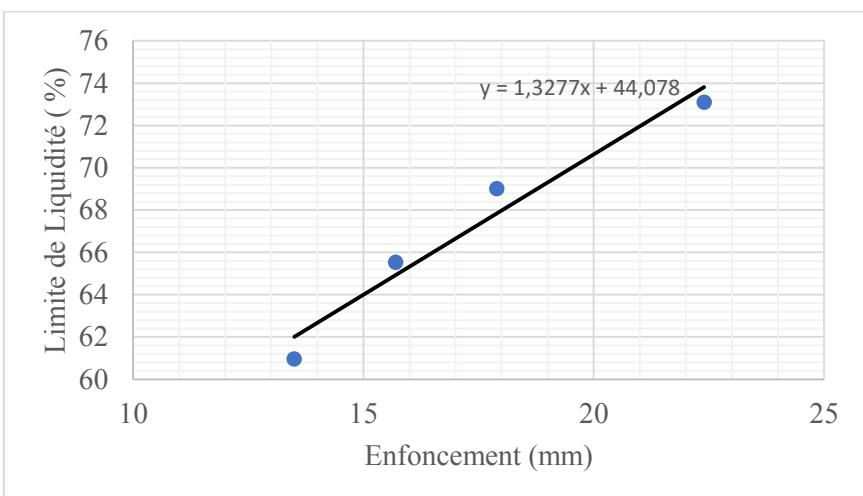


Courbe de la limite de liquidité 75% M +25% S+5% CaO

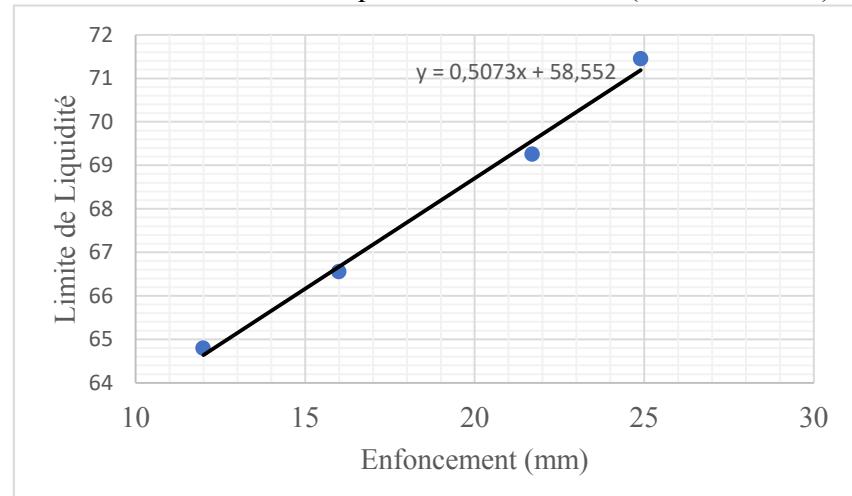
h



Courbe de la limite de liquidité 75%M+25%S +6% CaO



Courbe de la limite de liquidité 75%M+25%+(3%CaO+4%C)



Courbe de la limite de liquidité 75%M+25%S+(3%CaO +5%C)

ANNEXE II : RAPPORT DES ESSAIS DE PROCTOR NORMAL

Essai Proctor Normal NF P 94 093		Marne naturelle			
Densité humide					
Teneur en Eau de gâchage (%)		24	26	28	30
Poids Moule+ Matériau humide(g)		3250	3302	3356	3340
Poids moule (g)		1684,5	1684,5	1684,5	1684,5
Poids Matériau humide (g)		1565,5	1617,5	1671,5	1655,5
Densité humide (g/cm3)		1,650	1,705	1,762	1,745
Teneur en eau et densité sèche					
N° Tare		Plat A	bol AE	bol k	bol 5
Masse tare (g)		62,78	88,75	86,87	81,78
Masse humide+tare (g)		206,78	233,41	241,46	241,46
Masse sèche+tare (g)		176,45	201,45	205,37	202,37
Masse sèche (g)		113,67	112,7	118,5	120,59
Masse humide (g)		144	144,66	154,59	159,68
Teneur en eau w (%)		26,7	28,4	30,5	32,4
Densité sèche (g/cm3)		1,30	1,33	1,35	1,32

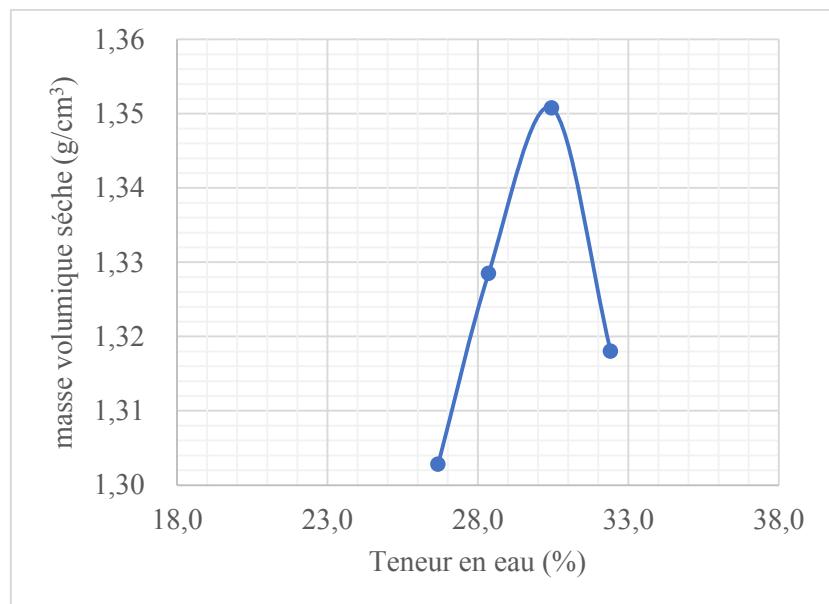
Essai Proctor Normal NF P 94 093		75%M + 25% S			
Densité humide					
Teneur en Eau de gâchage (%)		20	22	24	26
Poids Moule+ Matériau humide(g)		3243	3291	3342	3353
Poids moule (g)		1684,5	1684,5	1684,5	1684,5
Poids Matériau humide (g)		1558,5	1606,5	1657,5	1668,5
volume moule		948,556	948,556	948,556	948,556
densite humide (g/cm3)		1,643	1,694	1,747	1,759
Teneur en eau et densité sèche					
N° Tare	bol 2	JE	E	AK	
Masse tare (g)	81,68	100,35	62,42	114,2	
Masse humide+ tare (g)	263,97	314,21	313,77	288	
Masse sèche+ tare (g)	231,27	272,85	261,54	249,88	
Masse sèche (g)	149,59	172,5	199,12	135,68	
Masse humide (g)	182,29	213,86	251,35	173,8	
Teneur en eau w (%)	21,9	24,0	26,2	28,1	
Densité sèche (g/cm3)	1,35	1,37	1,38	1,37	

Essai Proctor Normal NF P 94 093		75% M 25% S+ 5% CaO				
Densité humide						
Teneur en Eau de gâchage (%)	22	24	26	28	30	
Poids Moule+ Matériau humide(g)	3188	3220,5	3245,5	3265,5	3285,5	
Poids moule (g)	1737	1737	1737	1737	1737	
Poids Matériau humide (g)	1451	1483,5	1508,5	1528,5	1548,5	
Volume	948,556	948,556	948,556	948,556	948,556	
Densité humide (g/cm3)	1,530	1,564	1,590	1,611	1,632	
Teneur en eau et densité sèche						
N° Tare	3	3	4	6	7	
Masse tare (g)	36,37	36,37	33,39	37,03	35,1	
Masse humide+ tare (g)	150,3	170,38	162,83	174,53	166,85	
Masse sèche+ tare (g)	127,72	142,16	134,26	142,94	134,61	
Masse sèche (g)	91,35	105,79	100,87	105,91	99,51	
Masse humide (g)	113,93	134,01	129,44	137,5	131,75	
Teneur en eau w (%)	24,7	26,7	28,3	29,8	32,4	
Densité sèche (g/cm3)	1,2265	1,2346	1,2393	1,2412	1,2330	

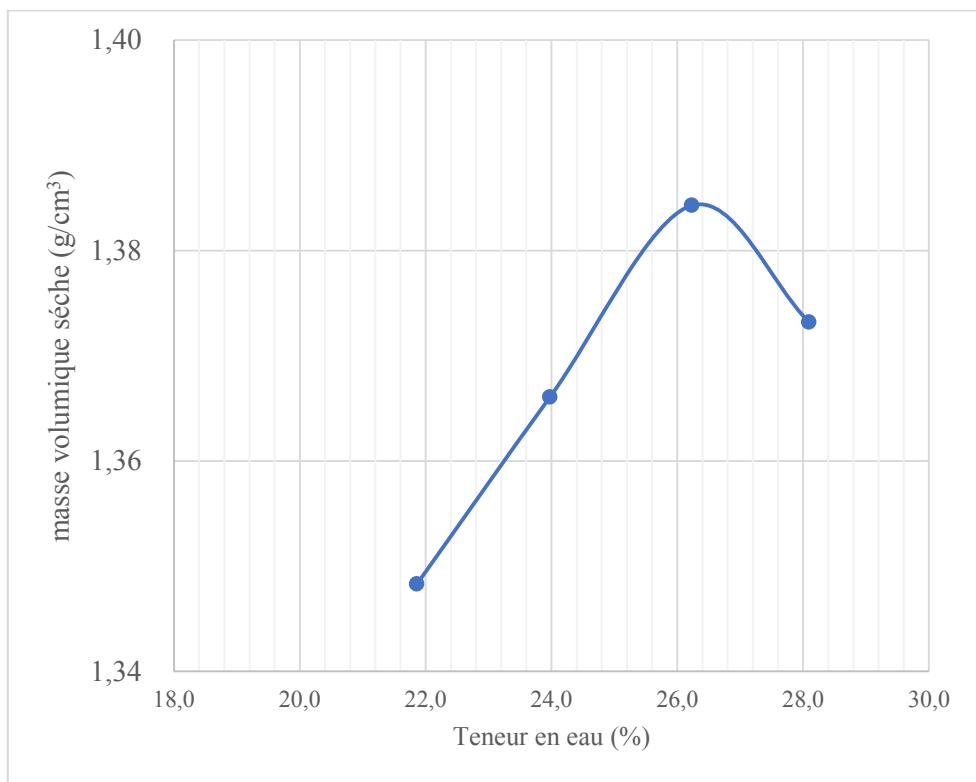
Essai Proctor Normal NF P 94 093		75% M 25% S+ 6% CaO				
Densité humide						
Teneur en Eau de gâchage (%)		26	28	30	32	
Poids Moule+ Matériau humide(g)		3216	3241	3275	3315	
Poids moule (g)		1737	1737	1737	1737	
Poids Matériau humide (g)		1479	1504	1538	1578	
Volume		948,556	948,556	948,556	948,556	
Densité humide (g/cm3)		1,559	1,586	1,621	1,664	
Teneur en eau et densité sèche						
N° Tare		10	8	15	P	
Masse tare (g)		36,57	35,68	55,21	35,39	
Masse humide+ tare (g)		183,39	186,01	183,83	157,07	
Masse sèche+ tare (g)		150,88	151,55	152,85	124,42	
Masse sèche (g)		114,31	115,87	97,64	89,03	
Masse humide (g)		146,82	150,33	128,62	121,68	
Teneur en eau w (%)		28,4	29,7	31,7	36,7	
Densité sèche (g/cm3)		1,2140	1,2221	1,2309	1,2172	

Essai Proctor Normal NF P 94 093		75% M 25% S+(3% CaO+4% Ciment)		
Densité humide				
Teneur en Eau de gâchage (%)	22	24	26	28
Poids Moule+ Matériau humide(g)	3165	3228,5	3220,5	3272
Poids moule (g)	1684,5	1737	1684,5	1737
Poids Matériau humide (g)	1480,5	1491,5	1536	1535
Volume	948,556	948,556	948,556	948,556
Densité humide (g/cm3)	1,561	1,572	1,619	1,618
Teneur en eau et densité sèche				
N° Tare	8	4	6	L2
Masse tare (g)	35,68	33,39	53,6	62,67
Masse humide tare (g)	178,89	190,34	192,99	192,24
Masse sèche tare (g)	150,31	158,5	162,57	163,04
Masse sèche (g)	114,63	125,11	108,97	100,37
Masse humide (g)	143,21	156,95	139,39	129,57
Teneur en eau w (%)	24,93	25,45	27,92	29,09
Densité sèche (g/cm3)	1,2493	1,2534	1,2659	1,2536

Essai Proctor Normal NF P 94 093		75% M 25% S+(3% CaO+5% Ciment)		
Densité humide				
Teneur en Eau de gâchage (%)	24	26	28	30
Poids Moule+ Matériau humide(g)	3245	3226,5	3286,5	3298,5
Poids moule (g)	1737	1684,5	1737	1737
Poids Matériau humide (g)	1508	1542	1549,5	1561,5
Volume	948,556	948,556	948,556	948,556
Densité humide (g/cm3)	1,590	1,626	1,634	1,646
Teneur en eau et densité sèche				
N° Tare	F1	RA	E	10
Masse tare (g)	36,01	61,15	62,42	60,08
Masse humide+ tare (g)	184,72	210,66	238,49	223,11
Masse sèche+ tare (g)	152,32	176,65	197,82	184,06
Masse sèche (g)	116,31	115,5	135,4	123,98
Masse humide (g)	148,71	149,51	176,07	163,03
Teneur en eau w (%)	27,86	29,45	30,04	31,50
Densité sèche (g/cm3)	1,2434	1,2558	1,2562	1,2519

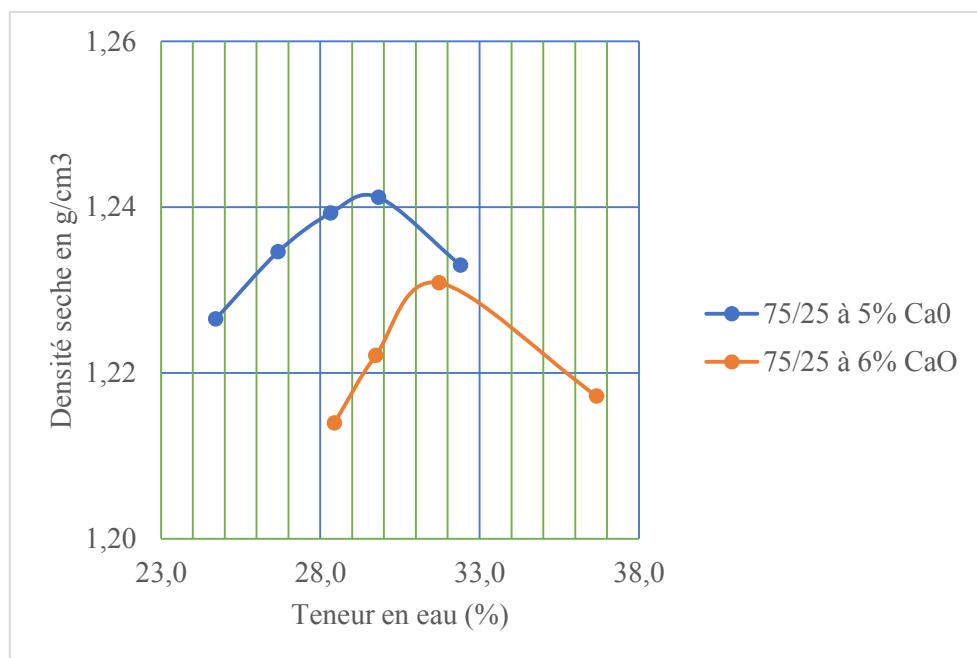


Courbe Proctor Normal de la marne naturelle

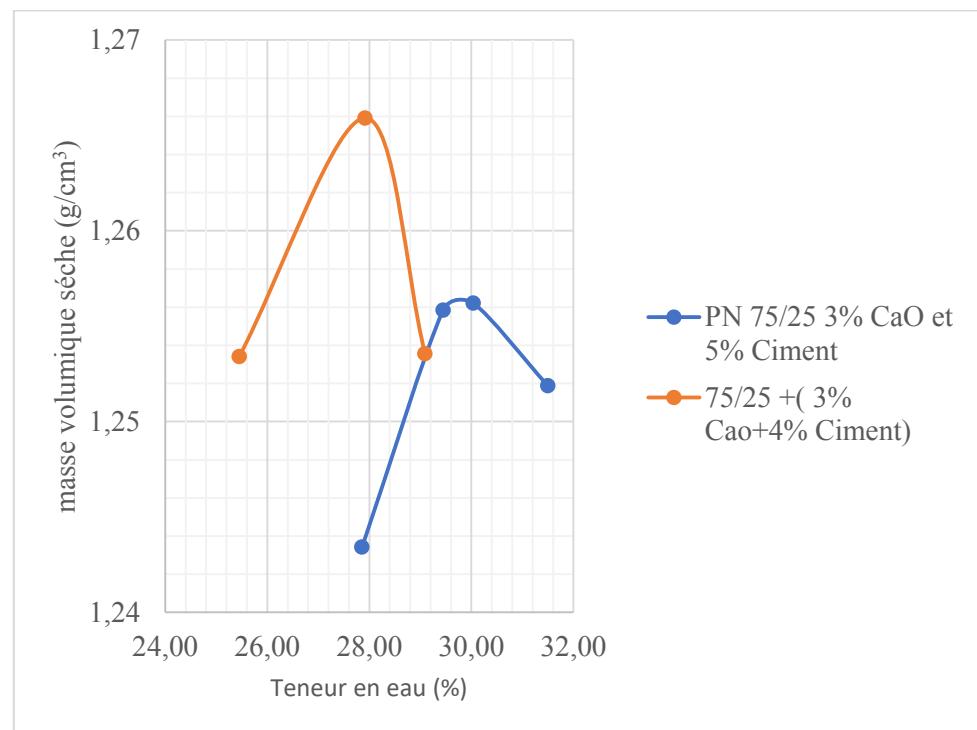


Courbe Proctor Normal 75% Marne +25%Sable

m



Courbe Proctor Normal 75% M+ 25% S + dosage en chaux



Courbe Proctor Normal 75% M+ 25% S + dosage en chaux+ ciment

ANNEXE III : RAPPORT DES ESSAIS D'APTITUDE AU TRAITEMENT

Gonflement Volumique NF P 94 100			
Dosge	75/25 à 5% CaO		
Yh,opm	1,60		
Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	151,98	151,68	151,62
V. éprvtte	98,17		
Yh.éprvette	1,55	1,55	1,54
Compacité	96,48%	96,29%	96,25%
h1	5,10	5,10	5,11
h2	5,12	5,11	5,10
d1	5	5	5
d2	5	5	5
d3	5	5	5
Vo	100,33	100,24	100,24
M1	65,94	65,65	65,8
M2	169,6	169,27	169,38
m1	0,87	0,8	0,8
m2	2,99	2,9	2,92
V1	103,66	103,62	103,58
V2	2,12	2,1	2,12
G %	1,20%	1,28%	1,22%
G % moy	1,23%		
Gonflement Volumique NF P 94 100			
Dosge	75/25 à 6% CaO		
Yh,opm	1,62		
Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	153,03	152,99	152,89
V. éprvtte	98,17		
Yh.éprvette	1,56	1,56	1,56
Compacité	96,38%	96,35%	96,29%
h1	5,11	5,10	5,11
h2	5,11	5,11	5,11
d1	5	5	5
d2	5	5	5
d3	5	5	5
Vo	100,33	100,24	100,33
M1	65,46	65,58	65,7
M2	168,93	169,09	169,25
m1	0,92	0,87	0,78
m2	3,14	3,26	2,89
V1	103,47	103,51	103,55
V2	2,22	2,39	2,11
G %	0,91%	0,88%	1,10%
G % moy	0,97%		

Gonflement Volumique NF P 94 100

Dosge	75/25 à 3% CaO et 4% Ciment		
Yh,opm	0,00		
Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	153,32	153,26	153,45
V. éprvtte	98,17		
Yh.éprvette	1,56	1,56	1,56
Compacité	96,15%	96,11%	96,23%
h1	5,10	5,11	5,11
h2	5,10	5,10	5,10
d1	5	5	5
d2	5	5	5
d3	5	5	5
Vo	100,14	100,24	100,24
M1	68,42	68,49	68,27
M2	177,52	177,92	178,01
m1	0,9	0,98	0,79
m2	2,83	3,21	2,72
V1	109,1	109,43	109,74
V2	1,93	2,23	1,93
G %	7,02%	6,95%	7,56%
G % moy	7,17%		

Gonflement Volumique NF P 94 100

Dosge	75/25 à 3% CaO et 5% Ciment		
Yh,opm	0,00		
Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	154,5	154,47	154,51
V. éprvtte	98,17		
Yh.éprvette	1,57	1,57	1,57
Compacité	96,23%	96,21%	96,23%
h1	5,10	5,10	5,11
h2	5,11	5,10	5,11
d1	5	5	5
d2	5	5	5
d3	5	5	5
Vo	100,24	100,14	100,33
M1	67,85	67,79	68,01
M2	174,95	174,36	174,77
m1	0,74	0,77	0,77
m2	2,76	2,68	2,77
V1	107,1	106,57	106,76
V2	2,02	1,91	2
G %	4,83%	4,52%	4,41%
G % moy	4,59%		

Résistance en compression diamétrale Rtb			
Dosge	75/25 à 3% CaO et 4% Ciment		
Yh,opm	1,62		
Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	153,57	153,62	153,6
V. éprvtte	98,17		
Yh.éprvette	1,56	1,56	1,56
Compacité	96,15%	96,21%	96,30%
Graduation (°)	13	11	11
Rc (Mpa)	0,34	0,32	0,32
Rc moyenne (Mpa)	0,32		

Dosge	75/25 à 3% CaO et 5% Ciment		
Yh,opm	1,64		
Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	154,19	154,47	154,51
V. éprvtte	98,17		
Yh.éprvette	1,57	1,57	1,57
Compacité	96,04%	96,21%	96,23%
Graduation (°)	13	12	13
Rc (Mpa)	0,34	0,33	0,34
Rc moyenne (Mpa)	0,34		

lecture comp (mm)	Force (KN)	Surface (mm ²)	Rc (Mpa)
1,32	7,29		0,34
1,33	7,34		
0,13	1,34	3926,99	

ANNEXE IV : RAPPORT DES ESSAIS IPI-CBR

IPI NF P 94 078				
NATURE	Marne crue			
OPN	Densité séche	1,35		
	Teneur en eau %	30		
Nombre de coup		25		
N° Moule		I		
Poids du moule + sol humide		7750		
Poids du moule		4167,5		
Poids du sol humide		3582,5		
Volume Moule		2085,71		
Densité Humide		1,72		
Densité seche g/cm3		1,28		
Compacité(%)		94,54		
TENEUR EN EAU				
Nombre de coup		25		
N° tare		4		
Poids tare + sol humide		157,5		
Poids tare + sol sec		125,61		
Poids eau		31,89		
Poids tare		33,39		
Poids du sol sec		92,22		
Teneur en eau moyenne		34,58		

IPI NF P 94 078				
Nature	75% MARNE 25% sable+5% CaO			
OPN	Densité séche	1,24		
	Teneur en eau	29,4		
Nombre de coup		25		
N° moule		II		
Poids du moule + sol humide		7451,5		
Poids du moule		4204,5		
Poids du sol humide		3247		
Volume Moule		2085,71		
Densité Humide		1,56		
Densité seche g/cm3		1,18		
Compacité(%)		95		
TENEUR EN EAU				
Nombre de coup		25		
N° tare		10		
Poids tare + sol humide		167,62		
Poids tare + sol sec		135,71		
Poids eau		31,91		
Poids tare		36,58		
Poids du sol sec		99,13		
Teneur en eau moyenne		32,19		

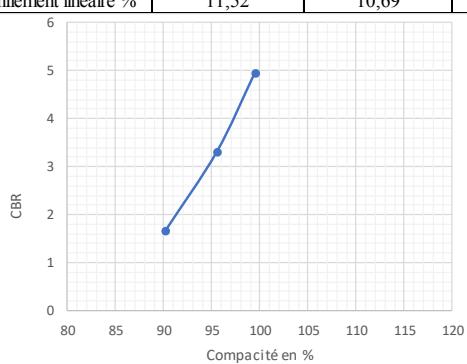
Enfoncement		25 coups	
(mm)	Lectures	Forces en KN	
2,5	2,5	0,14	
5	4	0,89	
IPI à 2,5 mm		1,03	
IPI à 5 mm		4,47	
IPI= (MAX(IPI1,IPI2))		4,47	

IPI NF P 94 078				
NATURE	% MARNE 25% SABLE+6% Ca			
OPN	Densité séche	1,23	Enfoncement	25 coups
	Teneur en eau	31,5	(mm)	Lectures
Nombre de coup	25	2,5	33	2,34
N° Moule	II	5	39	2,64
Poids du moule + sol humide	7451,5	IPI à 2,5 mm	17,53	
Poids du moule	4204,5	IPI à 5 mm	13,25	
Poids du sol humide	3247	IPI= (MAX(IPI1,IPI2))	17,53	
Volume Moule	2085,71			
Densité Humide	1,56			
Densité seche g/cm ³	1,16			
Compacité(%)	94,4%			

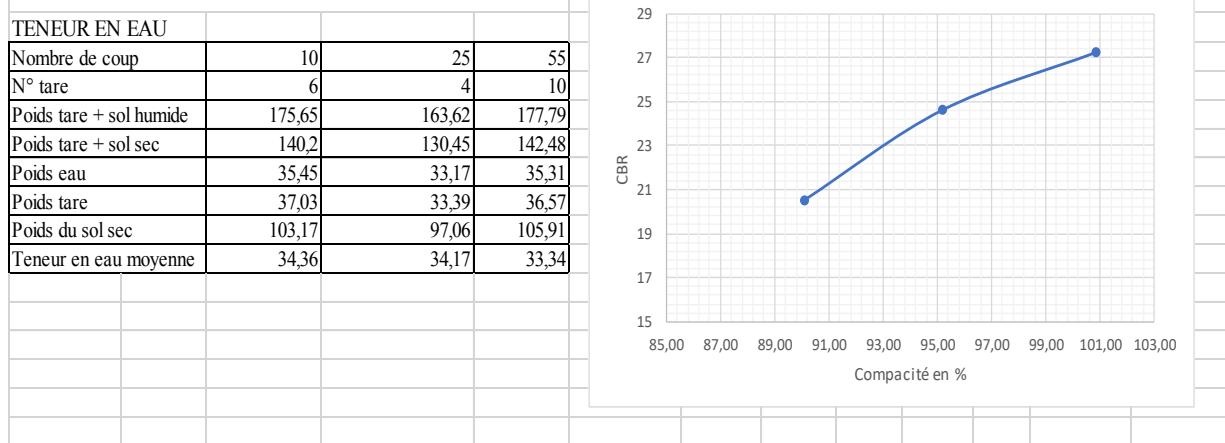
TENEUR EN EAU

Nombre de coup	25					
N° tare	7					
Poids tare + sol humide	155,51					
Poids tare + sol sec	124,87					
Poids eau	30,64					
Poids tare	35,10					
Poids du sol sec	89,77					
Teneur en eau moyenne	34,13					

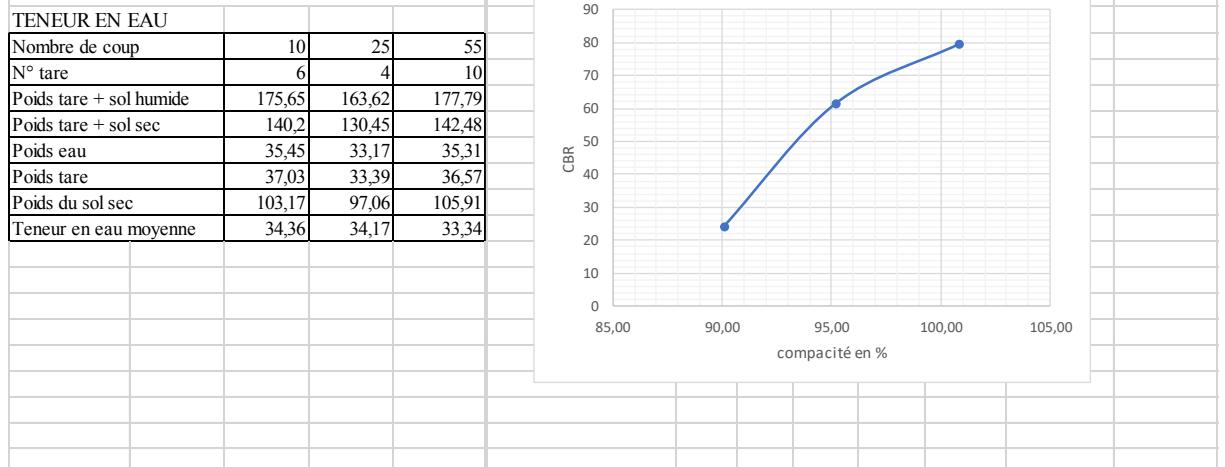
INDICES CBR NF P 94 078						
NATURE	MARNE crue F3					
OPN	Densité séche	1,35	Enfoncement	10coups	25 coups	55 coups
	Teneur en eau %	30	(mm)	Lectures	Forces en KN	Lectures
Nombre de coup	10	25	55			
N° Moule	IV	II	V			
Poids du moule + sol humide	7602	7861	8028	2,5	4	0,22
Poids du moule	4198,5	4204,5	4221,5	5	6	0,33
Poids du sol humide	3403,5	3656,5	3806,5	I CBR à 2,5 mm	1,65	3,31
Volume Moule	2085,71	2085,71	2085,71	I CBR à 5 mm	1,66	3,04
Densité Humide	1,63	1,75	1,83	I CBR= MAX(ICBR1,	1,66	3,31
Densité seche g/cm ³	1,22	1,29	1,34	Gonflement linéaire %	11,52	4,96
compacité	90,20	95,56	99,52		10,69	6,78
TENEUR EN EAU						
Nombre de coup	10	25	55			
N° tare	10	7	6			
Poids tare + sol humide	167,41	181,94	166,31			
Poids tare + sol sec	134,19	143,16	132,20			
Poids eau	33,22	38,78	34,11			
Poids tare	36,5	35,1	37,03			
Poids du sol sec	97,69	108,06	95,17			
Teneur en eau moyenne	34,01	35,89	35,84			



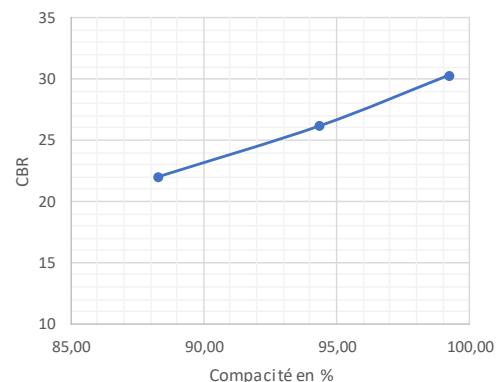
INDICES CBR NF P 94 078			
NATURE	75% Marne 25% Sable +5% CaO		
OPN	Densité sèche	1,24	
	Teneur en eau	29,4	
Nombre de coup	10	25	55
N° Moule	I	III	II
Poids du moule + sol humide	7298	7502	7700
Poids du moule	4167,5	4198,5	4221,5
Poids du sol humide	3130,5	3303,5	3478,5
Volume Moule	2085,71	2085,71	2085,71
Densité Humide	1,50	1,58	1,67
Densité seche g/cm³	1,12	1,18	1,25
Compacité(%)	90,09	95,20	100,87
CBR Immédiat			
Enfoncement (mm)	10 coups Lectures Forces en	25 coups Lecture Forces en	55 coups Lectures Forces (KN)
2,5	41 2,74 52 3,29 59 3,64	53 3,34 81 4,74 91 5,24	
CBR à 2,5 mm	20,52	24,64	27,27
CBR à 5 mm	16,76	23,78	26,29
CBR= MAX(20,52	24,64	27,27



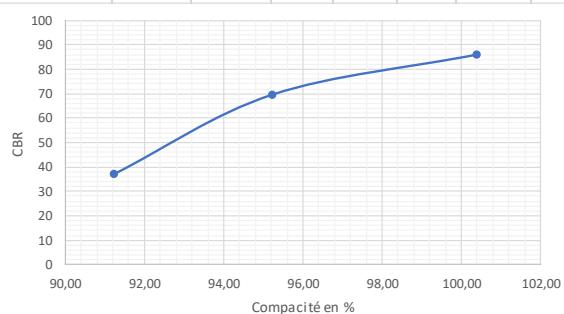
INDICES CBR NF P 94 078			
NATURE	75% Marne 25% Sable +5% CaO		
OPN	Densité sèche	1,24	
	Teneur en eau	29,4	
Nombre de coup	10	25	55
N° Moule	I	III	II
Poids du moule + sol humide	7298	7502	7700
Poids du moule	4167,5	4198,5	4221,5
Poids du sol humide	3130,5	3303,5	3478,5
Volume Moule	2085,71	2085,71	2085,71
Densité Humide	1,50	1,58	1,67
Densité seche g/cm³	1,12	1,18	1,25
Compacité(%)	90,09	95,20	100,87
CBR après 96h d' immersion			
Enfoncement (mm)	10 coups Lectures Forces en	25 coups Lecture Forces en	55 coups Lectures Forces (KN)
2,5	51 3,24 149 8,20 194 10,61	72 4,29 205 11,20 219 11,95	
CBR à 2,5 mm	24,27	61,42	79,48
CBR à 5 mm	21,53	56,20	59,96
CBR= (CBR1,CBR2)	24,27	61,42	79,48
Gonflement linéaire %	1,19	0,43	0,26
Moyenne %		0,63	



INDICES CBR NF P 94 078									
NATURE	75% Marne 25% Sable +6% CaO								
OPN	Densité sèche	1,23							
	Teneur en eau	31,5							
Nombre de coup	10	25	55			CBR Immédiat			
N° Moule	I	II	III			Enfoncement	10coups	25 coups	55 coups
Poids du moule + sol humide	7300	7520	7640	(mm)	Lectures	Forces en	Lectures	Forces en	Lectures
Poids du moule	4167,5	4221,5	4198,5		2,5	45	2,94	56	3,49
Poids du sol humide	3132,5	3298,5	3441,5		5	65	3,94	85	4,94
Volume Moule	2085,71	2085,71	2085,71	I CBR à 2,5 mm		22,02		26,14	30,26
Densité Humide	1,50	1,58	1,65	I CBR à 5 mm		19,77		24,79	27,30
Densité seche g/cm3	1,12	1,17	1,23	I CBR= MAX		22,02		26,14	30,26
Compacité(%)	91,23	95,22	100,39						
TENEUR EN EAU									
Nombre de coup	10	25	55						
N° tare	3	8	6						
Poids tare + sol humide	189,21	211,31	203,06						
Poids tare + sol sec	150,56	165,75	160,61						
Poids eau	38,65	45,56	42,45						
Poids tare	36,37	35,68	34,36						
Poids du sol sec	114,19	130,07	126,25						
Teneur en eau moyenne	33,85	35,03	33,62						



INDICES CBR NF P 94 078									
NATURE	75% Marne 25% Sable +6% CaO								
OPN	Densité sèche	1,23							
	Teneur en eau	31,5							
Nombre de coup	10	25	55	(mm)	Lectures	25 coups	55 coups		
N° Moule	I	II	III		2,5	85	4,94	169	9,27
Poids du moule + sol humide	7300	7520	7640		5	115	6,44	220	12,00
Poids du moule	4167,5	4221,5	4198,5	CBR à 2,5 mm		37,00		69,44	85,84
Poids du sol humide	3132,5	3298,5	3441,5	CBR à 5 mm		32,31		60,21	62,77
Volume Moule	2085,71	2085,71	2085,71	CBR= MAX(ICI)		37,00		69,44	85,84
Densité Humide	1,50	1,58	1,65	Gonflement linéaire		1,03		0,31	0,19
Densité seche g/cm3	1,12	1,17	1,23						
Compacité(%)	91,23	95,22	100,39						
TENEUR EN EAU									
Nombre de coup	10	25	55						
N° tare	3	8	6						
Poids tare + sol humide	189,21	211,31	203,06						
Poids tare + sol sec	150,56	165,75	160,61						
Poids eau	38,65	45,56	42,45						
Poids tare	36,37	35,68	34,36						
Poids du sol sec	114,19	130,07	126,25						
Teneur en eau moyenne	33,85	35,03	33,62						



ANNEXE V : RAPPORT DES ESSAIS DE RESISTANCES EN COMPRESSION SIMPLE

Date	26/10/2020 au 02/11/2020		
Essai	Résistance à la compression 7jrs NF P 98 232-1		
Dosage	75/25 à 3% CaO et 4% Ciment		
Yh,opn (t/m ³)	1,62		
Eprouvettes	1	2	3
Masse de l'éprouvette (g)	314,57	314,97	314,68
Volume moule (cm ³)	196,35		
Yh éprouvette après conféction (t/m ³)	1,60	1,60	1,60
Compacité %	98,63%	98,76%	98,67%
h1 (cm)	10,05	10,03	10,03
h2 (cm)	10,02	10,02	10,01
d1 (cm)	5	5	5
d2 (cm)	5	5	5
d3 (cm)	5	5	5
Masse de l'éprouvette après conservation (g)	313,15	313,63	313,32
Δmasse %	0,45%	0,43%	0,43%
Graduation (°)	36	35	32
Rc (Mpa)	1,2681	1,2	1,2
Rc moyenne (Mpa)	1,2		

Date	26/10/2020 au 02/11/2020		
Essai	Résistance à la compression 7jrs NF P 98 232-1		
Dosage	75/25 à 3% CaO et 5% Ciment		
Yh,opn (t/m ³)	1,64		
Eprouvettes	1	2	3
Masse de l'éprouvette (g)	316,97	317,1	316,81
Volume moule (cm ³)	196,35		
Yh éprouvette après conféction (t/m ³)	1,6143	1,61497	1,61
Compacité %	98,71%	98,75%	98,66%
h1 (cm)	10,05	10,02	10,03
h2 (cm)	10,02	10,01	10,05
d1 (cm)	5	5	5
d2 (cm)	5	5	5
d3 (cm)	5	5	5
Masse de l'éprouvette après conservation (g)	315,22	315,69	315,42
Δmasse %	0,55%	0,44%	0,44%
Graduation (°)	40	42	39
Rc (Mpa)	1,4	1,4	1,3
Rc moyenne (Mpa)	1,38		

Date	03/11/2020 au 07/11/2020		
Essai	Résistance à la compression 4jrs NF P 98 232-1		
Dosage	75/25 à 3% CaO et 4% Ciment		
Yh,opn (t/m ³)	1,62		
Eprouvettes	1	2	3
Masse de l'éprouvette (g)	314,55	314,33	314,21
Volume moule (cm ³)	196,35		
Yh éprouvette après conféction (t/m ³)	1,60	1,60	1,60
Compacité %	98,62%	98,56%	98,52%
h1 (cm)	10,05	10,03	10,02
h2 (cm)	10,02	10,02	10,02
d1 (cm)	5	5	5
d2 (cm)	5	5	5
d3 (cm)	5	5	5
Masse de l'éprouvette après conservation (g)	313,33	313,51	313,08
Δmasse %	0,39%	0,26%	0,36%
Graduation (°)	25	27	23
Rc (Mpa)	0,9880	1,0390	0,9
Rc moyenne (Mpa)	1,0		

Résistance à l'immersion au jeune age NF P 98 232-1				Résistance à l'immersion au jeune age NF P 98 232-1			
Date	22/10/2020			Date	22/10/2020		
Dosge	75/25 à 3% CaO et 4% Ciment			Dosge	75/25 à 3% CaO et 5% Ciment		
Yh,opm	1,62			Yh,opm	1,64		
Eprouvettes	1	2	3	Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	312,75	313,12	312,81	M éprvtte	317,16	317,37	317,09
V. éprvtte	196,35			V. éprvtte	196,35		
Yh.éprvette	1,59	1,59	1,59	Yh.éprvette	1,62	1,62	1,61
Compacité	98,06%	98,18%	98,08%	Compacité	98,76%	98,83%	98,74%
lecture	70	68	65	lecture	77	83	74
Rci	2,1339495	2,0830199	2,0066255	Rci	2,312203	2,4649918	2,2358086
Rci.moy	2,074531632			Rci.moy	2,337667804		
Date	23/10/2020			Date	23/10/2020		
Dosge	75/25 à 3% CaO et 4% Ciment			Dosge	75/25 à 3% CaO et 5% Ciment		
Yh,opm	1,62			Yh,opm	1,64		
Eprouvettes	1	2	3	Eprouvettes	1	2	3
M éprvtte	315,14	315,25	315,11	M éprvtte	317,34	317,29	317,3
V. éprvtte	196,35			V. éprvtte	196,35		
Yh.éprvette	1,6	1,61	1,6	Yh.éprvette	1,62	1,62	1,62
Compacité	98,81%	98,84%	98,80%	Compacité	98,82%	98,81%	98,81%
lecture	91	85	83	lecture	90	107	101
Rc	2,6687101	2,5159213	2,4649918	Rc	2,6432453	3,0761467	2,923358
Rc.moy	2,549874395			Rc.moy	2,880916677		

Ictur comp (mm)	Force (KN)	Surface (mm ²)	Rc (Mpa)
1,32	7,29		2,1339495
1,33	7,34		
0,7	4,19	1963,50	

ANNEXES VI : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE

Sable			Masse initiale (g)	
Diamètre (mm)	refus (g)	refus cum (g)	% refus cum	%tamisat
5,00	0,0	0,0	0,0	100,0
3,15	0,0	0,0	0,0	100,0
2,50	0,0	0,0	0,0	100,0
1,25	0,0	0,0	0,0	100,0
0,63	0,5	0,5	0,1	99,9
0,40	18,3	18,8	3,8	96,2
0,32	52,3	71,1	14,2	85,8
0,16	286,6	357,7	71,5	28,5
0,08	121,9	479,6	95,9	4,1
FOND	18,2	497,8	99,6	0,4

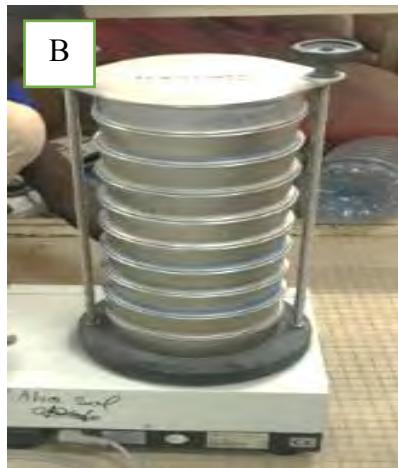
ANNEXES VII : ILLUSTRATION DE L'ETUDE EXPERIMENTALE



Essai de limite de liquidité



Essai de limite plastique



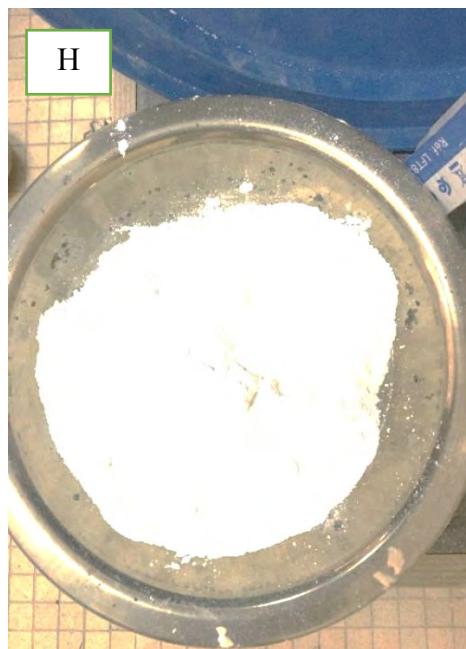
A : Dame et moule proctor normal et B : Tamiseuse pour l'essai d'analyse granulomtrique



C : moule utilisé pour l'essai d'aptitude et D : moule utilisé pour l'essai de compression



E : Confection avec la presse et F : Bloc de marne



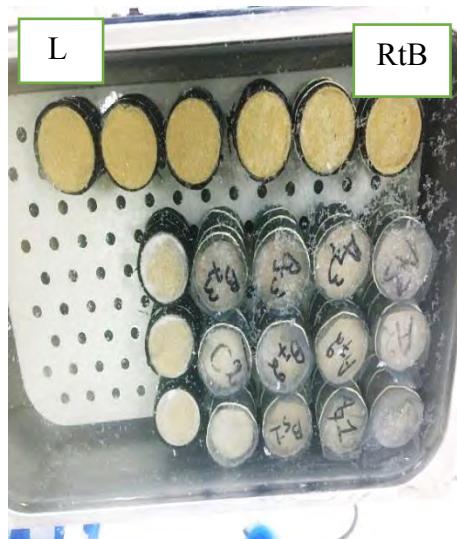
G : Marne apres broyage

et H : chaux

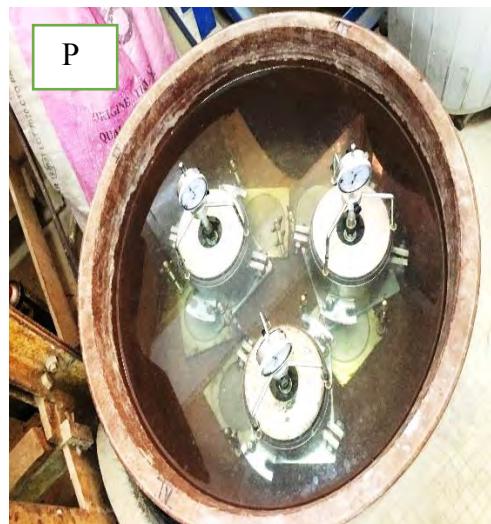


I : Eprouvettes destinées à la mesure du gonflement volumique (bande de confinement + bracelets)

J : Eprouvettes moulées à l'étui destinées à la mesure de la résistance en compression diamétrale



K et L : bac d'immersion pour la conservation des éprouvettes à 7jours et à 40°C



M : Conservation des éprouvettes destinées à la mesure de la résistance en compression Rc

N : Détermination de la résistance en compression simple Rc

O : Détermination de l'indice CBR

P : Immersion des moules CBR



Q : Conservation des éprouvettes de l'essai d'aptitude après 4j et 4h à 20°C et à 90% d'hygrométrie

R : Détermination de la résistance en compression diamétrale

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES.....	iv
RESUME.....	vi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : APERÇU GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE ET GÉNÉRALITÉS SUR LES SOLS ARGILEUX	4
INTRODUCTION.....	5
1.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE	5
1.1.1 Localisation et statut administratif	5
1.1.2 Données climatiques	6
1.1.3 Végétation et Faune.....	6
1.1.4 Relief	7
1.2 CADRE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	7
1.2.1 Cadre géologique régional	7
1.2.2 Cadre géologique local	8
1.3 LES SOLS ARGILEUX	10
1.3.1 Généralités sur les sols argileux	10
1.3.2 Structure élémentaire des minéraux argileux	11
1.3.3 Structure moléculaire microscopique des argiles.....	11
1.4 LES MARNES	15
1.5 PROBLÈMES LIÉS AUX SOLS ARGILEUX EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE ..	16

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME ET GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT DES SOLS FINS	19
INTRODUCTION.....	20
2.1 PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME	20
➤Sol support ou partie supérieure des terrassements (PST).....	20
➤Couche de forme	22
➤Critères associés à la construction de la plateforme	23
➤Couche de forme non traitée	24
➤Couche de forme traitée	25
2.2 STRUCTURE ET CONSTITUTION D'UNE ROUTE.....	27
2.2.1 Technique des emprunts granulaires	27
2.2.2 Traitement avec un matériau non argileux	28
2.2.3 Traitement des sols à la chaux.....	28
2.2.4 Traitement des sols au ciment	34
2.2.4 Traitement mixte	36
2.3CARACTERISTIQUES DES SOLS TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES....	36
2.4 OBJECTIFS DU TRAITEMENT	38
CHAPITRE 3 : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DES MATÉRIAUX.....	39
INTRODUCTION.....	40
3.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	40
3.2 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE.....	40
3.3 PRÉPARATION ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX	41
3.3.1 Localisation de la zone de prélèvement des sols marneux	41
3.3.2 Identification géotechnique et classification du sol marneux	42
❖Analyse chimique	42
❖Granulométrie au laser sur l'échantillon de sol marneux	43

❖ Détermination des limites d Atterberg.....	44
❖ Essai Proctor Normal	45
❖ Essais de portance immédiate IPI et de portance classique CBR	46
3.3.3 Identification des ajouts	49
❖ Caractéristiques des liants hydrauliques utilisés.....	51
3.3.4 Caractérisation de la marne sableuse traitée aux liants hydrauliques	52
❖ Effets du traitement sur les limites d'Atterberg.....	52
❖ Effets du traitement sur les valeurs optimales de compactage	54
❖ Evaluation de l'aptitude au traitement aux liants hydrauliques de la marne sableuse..	55
❖ Evaluation de l'aptitude au traitement à la chaux de la marne sableuse	57
❖ Evaluation de l'aptitude au traitement à la chaux-ciment de la marne sableuse	58
❖ Effets du traitement à la chaux sur la portance des matériaux	60
❖ Essais de résistance à la compression simple	61
Conclusion partielle.....	63
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	68
Listes des normes citées	69
Liste des figures	a
ANNEXES.....	b