



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground Works Engineering

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

TRAITEMENT D'UN SOL A LA CHAUX

Proposé et Dirigé par :

-Pr. MITICHE-KETTAB

Présenté par :

-M^r TEMINA Abdelmadjid

Promotion 2015

♣ REMERCIEMENT

Toute ma gratitude et mes remerciements vont à ALLAH le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Un grand remerciement à mon encadreur : Pr MITICHE-KETTAB Ratiba, Chef de Département Génie Civil à l'École Nationale Polytechnique pour tous les efforts et patience qu'elle a fournis pour me faciliter et m'aider à accomplir ce travail, car sans elle, ce travail n'aurait pu être mené à bien.

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Sans oublier Le directeur général de laboratoire central des matériaux COSIDER et tous ceux qui ont contribué de près et de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Et tous les enseignants de l'ENSTP.



DÉDICACE

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté
Durant tout mon cursus des études et d'avoir réalisé mon travail, que je dédie :

A ma famille en premier, ma Mère *Setti*, mon Père *Mohamed*,
Ma Sœur *Aïcha* et mes Frères *Abdelaziz* et *Abdelkrim*, et mes
grands-parents que j'aime beaucoup, sans eux je n'aurai pas abouti à ce stade
d'étude, que dieu m'aide à les honorer, les servir et les combler.

A ma future dame *Hadjer*.

A Tous mes enseignants de l'ENSTP.

A Tous mes amis, sans exception.

A.TEMINA



ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء تجارب عملية لدراسة تأثير معالجة التربة مع روابط الهيدروليكية. وسوف نقدم في هذا العمل، إجراءات معالجة مختلفة، ونعرض تحليل عينة من التربة لدراستها (تحديد البنية الفيزيائية والميكانيكية). في الفصل الأخير، فإننا نقدم نتائج العلاج مع الجير (مع وجود محتوى الجير 3٪)، ونناقش النتائج المتوصل إليها بعد عملية العلاج. الكلمات المفتاحية: التربة، الموثق الهيدروليكي والجير والأسمت، والعلاج، وتحقيق الاستقرار، تعزيز.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement l'influence du traitement des sols aux liants hydrauliques.

On va présenter dans ce travail, les différentes procédures des traitements, et on présente l'identification et l'analyse de l'échantillon du sol à étudier (identification physique et mécanique).

Dans le dernier chapitre, on présente les résultats du traitement à la chaux (avec une teneur en chaux de 3%), et on cite les constatations après le traitement.

Mots clés : Sols, liant hydraulique, chaux, ciment, traitement, stabilisation, Renforcement.

Abstract

The objective of this work is to experimentally investigate the influence of soil treatment with hydraulic binders.

We will present in this work, the various processing procedures, and presents the identification and analysis of soil sample to be studied (physical identification and mechanical).

In the last chapter, we present the results of treatment with lime (with a 3% lime content), and cites the findings after treatment.

Keywords: Soils, hydraulic binder, lime, cement, treatment, stabilization, strengthening.

Table des matières

Remerciement	i
Dédicace.....	ii
Liste des symboles	iii
Liste des Figure	iv
Liste des tableaux	v
Introduction Générale.....	1
<i>Chapitre I : Notions Fondamentales</i>	
I.1 Introduction.....	3
I.1 Les sols.....	3
I.2 L'origine des sols	3
I.3 La composition d'un sol.....	4
I.4 Classification des matériaux en technique routière	4
I.4.1 Différents paramètres de classification	5
I.4.2 Critères d'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée.....	6
<i>Chapitre II : Synthèse Bibliographique</i>	
II.1 Les différents procédés de traitement des sols	9
II.1.1 Traitement des sols à la chaux	9
II.1.2 Traitement des sols aux liants hydrauliques	14
II.2 Les grandes étapes du traitement de sol	18
II.2.1 Identification du sol	18
II.2.2 Etude de formulation	19
II.2.3 Mise en œuvre (les opérations courantes principales).....	20
II.2.4 Contrôle	21
<i>Chapitre III: Rappel sur les paramètres géotechniques des sols et le compactage</i>	
III.1 Classification: GTR 92 et norme NF P 11-300	22
III.1.1 Les paramètres de nature	22
III.1.2 Les paramètres de comportement mécanique	25
III.1.3 Les paramètres d'état	26
III.2 Compactage.....	27
III.3 Portance	29
III.3.1 L'indice CBR	29
<i>Chapitre IV : Présentation de l'échantillon</i>	
IV.1 Introduction	30

IV.2 Analyse granulométrique	30
IV.2.1 But de l'essai.....	30
IV.2.2 Résultat de l'essai.....	30
IV.2.3 Interprétation.....	31
IV.3 Limites d'Atterberg.....	31
IV.3.1 But de l'essai.....	31
IV.3.2 Résultat de l'essai.....	31
IV.3.3 Interprétation.....	32
IV.4 Essai Proctor	33
IV.4.1 But de l'essai.....	33
IV.4.2 Résultat de l'essai.....	33
IV.4.3 Interprétation.....	33
IV.5 Essai Indice Portant Immédiat (IPI).....	34
IV.5.1 But de l'essai.....	34
IV.5.2 Résultat de l'essai.....	34
IV.6 Essai VBS	35
IV.6.1 But de l'essai.....	35
IV.6.2 Résultat de l'essai.....	35
IV.6.3 Interprétation.....	35
IV.7 Essais chimiques	35
IV.7.1 But des essais	35
IV.7.2 Résultat des essais.....	36
IV.7.3 Interprétation	36
 <i>Chapitre V : Traitement à la chaux</i>	
V.1 Introduction	37
V.2 Procédure du traitement à la chaux	37
V.3 Résultats du traitement	38
V.4 Conclusion	39
CONCLUSION GENERALE	40
Bibliographie	

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, le secteur des travaux publics a observé un développement important dans les superstructures. Les architectes et les ingénieurs de génie civil dans le monde font des défis avec la nature pour construire les plus grandes tours du monde, des ouvrages d'art de plus en plus importants, de leur emplacement ou leur portée, et les plus grandes constructions.

Or, toutes ces superstructures sont fondées sur le sol. Qui perçoit les charges par les fondations qui sont ancrées (superficielles ou profondes). Ce dernier joue un rôle important dans la stabilité des ouvrages, et permet aux challenges visés par les ingénieurs et les architectes de voir le jour, et d'être réels.

Avec l'étalement des zones urbaines, et la condensation des villes, l'emplacement de certains projets devient de plus en plus précis; les entreprises de réalisation sont menées à construire sur le sol trouvé dans le même endroit prévu d'avance, quel que soit leur nature et leur qualité. Il est parfois hors de question de changer l'emplacement.

De tout ce qui précède, on constate clairement que l'étude des sols approfondie est indispensable avant de réaliser chaque projet, afin de savoir si le sol est capable de reprendre les charges et les surcharge transmises par l'ouvrage. Dans le cas où le sol rencontré est de mauvaise qualité par rapport aux exigences du projet, on peut proposer un traitement et sa stabilisation (après avoir vérifié leur aptitude au traitement). Cette technique est parfois indispensable dans plusieurs cas rencontrés dans la réalité (on peut citer à titre d'exemple le traitement à la chaux réalisé au niveau de l'autoroute est-ouest, et aussi au niveau de Baba-Hssan, wilaya d'Alger).

Dans ce travail, on va développer cette technique sur un sol prélevé du déblai de la région de Djabahia, dont l'objectif final de le réutiliser soit dans le remblai ou bien pour la couche de forme, afin de minimiser les transports des matériaux et éviter les zones d'emprunt.

Dans ce cadre, on a divisé le travail en trois parties. Dans la première partie, on va citer les notions fondamentales qui vont nous aider à comprendre le contexte du travail et avoir une idée générale sur les sols et leurs comportements. La synthèse bibliographique en deuxième partie, a pour objet de suivre l'actualité des travaux effectués dans le domaine du traitement des sols, et prendre en compte les

résultats obtenus. Dans la troisième partie, on présente nos travaux, en commençant par l'identification du sol à traiter (les essais d'identification sont effectués au laboratoire central des matériaux de COSIDER), et à la fin on va interpréter les résultats obtenus, pour savoir l'aptitude de ce sol au traitement, et par quelle méthode on va réagir, on présente après les étapes de traitement.

CHAPITRE I :

NOTIONS FONDAMENTALES

I.1 Introduction

Pour bien comprendre et analyser le comportement des sols utilisés comme matériaux de construction ou fondations d'ouvrages, il faut d'abord étudier leur nature, leur comportement et l'organisation de leurs particules.

Cette première partie porte, sur la description des caractéristiques physiques des sols, notions indispensables pour les classer, et prévoir leur comportement.

I.1 Les sols

Contrairement à la plupart des matériaux de construction utilisés, qui sont des produits manufacturés, le sol est un matériau naturel imposé au constructeur. Un massif de sol se présente généralement sous la forme d'une série de couches plus ou moins horizontales, aux propriétés distinctes. Bien souvent d'ailleurs, certaines couches peuvent être étendues, constituant des hétérogénéités locales. La plupart du temps, une couche n'est pas complètement homogène ; elle présente plusieurs types de propriétés différentes soit mécaniques, structurelles ou chimiques.

Cette variété de propriétés influence directement sur la stabilisation des sols¹.

I.2 Origine des sols

Les sols ont deux origines principales :

1. **la désagrégation des roches** par altération mécanique et physicochimique sous l'effet des agents naturels :
 - Fissuration consécutive à la décompression, aux effets des chocs thermiques ou du gel.
 - Attaque mécanique (chocs et frottements) dans un processus naturel de transport gravitaire glaciaire, fluvial, marin, éolien.
 - Attaque chimique sous l'effet des circulations d'eaux agressives (acides ou basiques).
2. **la décomposition d'organismes vivants** : végétaux (tourbes) ou animaux (craies).

On distingue également :

- ✓ les **sols résiduels** résultant de l'altération sur place des roches ;
- ✓ les **sols transportés** provenant du dépôt des produits d'altération préalablement repris par un agent physique de transport. Ce sont les sols transportés qui posent au concepteur d'ouvrages les problèmes les plus délicats.

Enfin, suivant leurs conditions de formation et de dépôt, les sols peuvent contenir des matières organiques en proportion plus ou moins élevée.

¹ (SREKMA, 2009)

On soulignera que les processus mécaniques ou physiques d'évolution des roches ne permettent pas de réduire la dimension des grains en dessous de 10 à 20 μm , car les effets mécaniques, dus aux chocs ou au frottement lié à la masse des grains diminuent rapidement avec leur volume. Au-dessous de cette dimension, la fragmentation des grains se poursuit principalement par altération chimique qui entraîne la destruction de certaines des liaisons chimiques des minéraux. Elle s'accompagne d'une augmentation rapide de la surface des grains offerte à l'attaque chimique.

I.3 Composition d'un sol

Nous schématiserons les sols comme étant composé de trois phases en proportions variables. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelé : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse.

- La **phase solide** (notée s) ou squelette solide est constituée par les grains minéraux de l'agrégat.
- La **phase liquide** (w), constituée par l'eau occupe les vides de l'agrégat. Si tous les vides sont remplis par l'eau, le sol est dit saturé, sinon, il est partiellement saturé.
- La **phase gazeuse** (a) : dans un sol partiellement saturé une partie des vides de l'agrégat est remplie par du gaz, essentiellement de l'air.

La phase solide est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes.²

I.4 Classification des matériaux en technique routière

Pour utiliser un matériau en technique routière, il est nécessaire de bien connaître ses propriétés physiques, afin de le classer parmi les différents matériaux-types déjà répertoriés et de connaître le protocole d'utilisation de ce matériau.

La norme NF P 11-300 [23] propose une classification des matériaux utilisable dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière.

Elle permet ainsi de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais. On distingue trois catégories d'essais :

- Les essais d'identification ou de nature.
- Les essais d'état.

² (wikipedia, 2015)

- Les essais de comportement mécanique.

Ces essais seront choisis en fonction de la classe du matériau.

I.4.1 Différents paramètres de classification

I.4.1.1 Paramètres de nature

Ce sont des paramètres qui ne varient pas ou peu ni dans le temps, ni au cours des manipulations. Ce sont :

- La granularité.
- L'indice de plasticité.
- La valeur au bleu de méthylène.

La granularité

- D_{max}

Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

- Tamisat à 80 mm (ou pourcentage de fines)

Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines des sols sableux et graveleux.

- Tamisat à 2 mm

Permet la distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

L'indice de plasticité

Ce paramètre caractérise l'argilosité des sols.

La valeur de bleu de méthylène

Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité (ou la propreté) du sol.

I.4.1.2 Paramètres d'état

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la classification est l'état hydrique ; son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de sol support de la chaussée.

I.4.1.3 Paramètres de comportement mécanique

Les paramètres de comportement mécanique à prendre en compte dans la classification des sols sont la valeur LOS ANGELES (LA), et la valeur MICRO

DEVAL en présence d'eau (MDE), ou la valeur de FRIABILITE DES SABLES (FS) pour les sols sableux.

En fonction de ces paramètres, des procédures d'utilisation sont proposées. Si le matériau ne remplit pas certains de ces critères, il peut être envisagé une étude spécifique permettant d'établir des protocoles de mise en place [24].

La Figure I.1, extrait du GTR, donne la classification des sols répartie entre quatre classes :

- Classe A : sols fins.
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines.
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments.
- Classe D : sols insensibles à l'eau.

I.4.2 Critères d'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée

Pour être valorisés en technique routière, les matériaux à valoriser doivent satisfaire plusieurs critères. Sur le plan mécanique, la résistance en traction (R_t), l'Indice Portant Immédiat (IPI) et le module d'élasticité (E_s) sont les principaux paramètres qui permettent de déterminer l'adéquation du matériau pour une utilisation en assise de chaussée pour des matériaux traités au liant.

I.4.2.1 critère de résistance en traction

Les performances mécaniques à long terme peuvent être appréciées par l'essai de traction. Les mesures sont faites à 90 jours ou 180 jours suivant le liant utilisé (90 jours pour les sables traités au ciment et 180 jours pour les sables traités au laitier). Les performances recommandées pour les sables traités aux liants hydrauliques en couche de fondation et en couche de base sont présentées dans le tableau I-1.

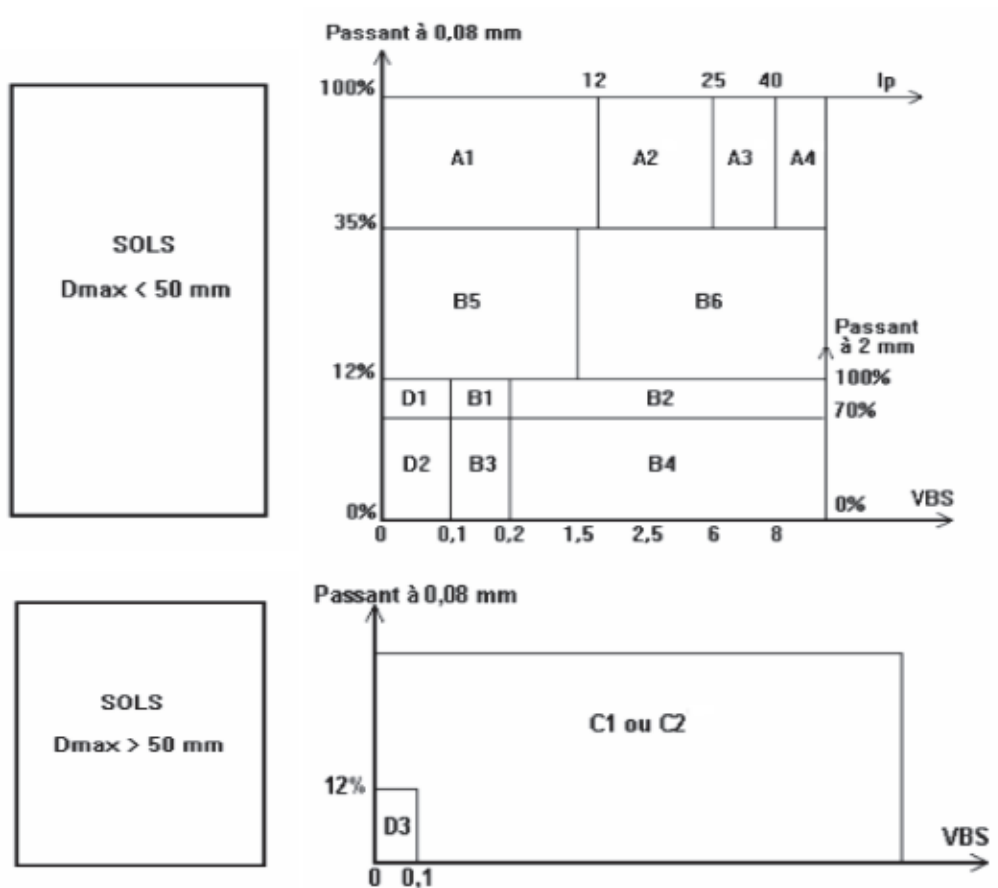


Figure I.1-classification des matériaux selon le GTR

Tableau I. 1-Performances recommandées en couche de fondation et en couche de base.

	Couche de		Couche de base	
	T < 3000 Véhicules/j	T > 3000 Véhicules/j	100 < T < 1000 Véhicules/j	1000 < T < 6000 Véhicules/j
Minimum de résistance en traction par fendage à 90 jours en (MPa)	0,25		0,50	

1.4.2.2 Critère de l'IPI

La stabilité immédiate est nécessaire pour permettre de réaliser, dans de bonnes conditions, les opérations de mise en œuvre et pour limiter les

déformations au jeune âge sous le trafic de chantier et sous la circulation. Elle est appréciée par l'Indice Portant Immédiat (IPI).

Selon les recommandations de la norme française NF P 98 115, afin d'assurer la circulation normale des machines sur le chantier, les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 35% pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base. Toutefois, cette norme définit également des valeurs limites inférieures de 25% et 35% respectivement pour les mêmes couches.

1.4.2.3 Performances mécaniques à long terme

Pour les couches d'assise (couche de fondation et couche de base), il est nécessaire de connaître le comportement du matériau sous les sollicitations du trafic. Ainsi, les résistances à la compression diamétrale (essai de traction par fendage) (R_t) et les modules d'élasticité (E_t) sont mesurés sur des éprouvettes de matériau dont la dimension est fonction de la dimension du plus gros granulats.

En effet, le passage d'un véhicule sur les couches de matériaux entraînent une sollicitation de type charge - décharge. Le matériau doit donc avoir une résistance minimale en traction, et être capable de se déformer sans se casser.

Traditionnellement, les essais en laboratoire sont réalisés à des échéances réduites de 28, 60 et 90 jours selon le type de liant utilisé. On affecte alors aux résultats, un coefficient d'estimation permettant d'estimer les résistances mécaniques à 360 jours. Le tableau I.2 donne les différents coefficients d'estimation en fonction de la nature du liant utilisé.

Tableau I. 2-Coefficients empiriques en fonction de la nature de liant utilisé.

Liant utilisé	Age (jour)	Coefficients d'estimation	
		R_t/R_{t360}	E/E_{360}
Laitier vitrifié brut ou pré broyé	90	$R_{t90}/R_{t360} = 0,70$	$E_{90}/E_{360} = 0,75$
Ciment normalisé (seul)	28	$R_{t28}/R_{t360} = 0,60$	$E_{28}/E_{360} = 0,65$
Liant spécial routier (seul)	60	$R_{t60}/R_{t360} = 0,65$	$E_{60}/E_{360} = 0,70$
Cendres volantes-chaux (seules)	90	$R_{t90}/R_{t360} = 0,65$	$E_{90}/E_{360} = 0,75$
Mélange de liants	90	$R_{t90}/R_{t360} = 0,70$	$E_{90}/E_{360} = 0,75$

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le module d'élasticité et la résistance en traction sont mesurés grâce respectivement à l'essai de compression et celui à la traction par fendage. Ces valeurs sont ensuite reportées sur le diagramme de classification afin d'évaluer leur portance.

Chapitre II :
Synthèse Bibliographique

II.1 Les différents procédés de traitement des sols

Le traitement de sol est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas.

La technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du Développement Durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Pas de transport de matériaux, ni de dépôt, donc diminution du coût! En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres.

Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux.

La technique est d'abord utilisée pour des remblais de sol sensible à l'eau et humides, puis elle est étendue à la CDF, et pour finir aux couches d'assise (GTS 2007).

Son application a concerné d'abord les sols fins, notamment le traitement mixte des limons, puis les graves argileuses ou propres et enfin les mélanges sols fins et éléments blocailleux.

Le GTR est un premier document relatif à la géotechnique routière, en proposant une démarche empirique de la prise en compte des CDF en sols traités dans la structure de chaussée, ainsi que les matériaux devant subir un traitement pour être employés en CDF.

Le GTS vient ensuite préciser l'application de la technique : l'étude, la réalisation et l'assurance qualité de ces CDF en matériaux traités; le guide fut élaboré à partir d'une compilation des expériences de divers praticiens dont l'analyse aboutit à une méthodologie bien définie.

II.1.1 Traitement des sols à la chaux

La stabilisation des sols à la chaux est une technique ancienne. Elle a été utilisée dans les voies romaines, dans la construction de la muraille de Chine (argile traitée à la chaux) et dans l'habitat (chaux + sable + terre argileuse). Elle continue à se présenter comme une des meilleures solutions pour les problèmes de portance

posés par le sol. Il reste néanmoins que sa plus large utilisation est dans la stabilisation des assises de chaussées (sols supports, couches de base, de fondation, surfaces, canaux de drainage, remblais).

A partir des années 1990, la stabilisation à la chaux a connu un regain d'importance fulgurant qui a fait suite au désintérêt qu'elle a connu durant les années 1970. De nos jours, de nombreux comités, des centres de recherche et des associations scientifiques encouragent et financent la recherche sur l'utilisation de la chaux en tant que matériau de construction et encadrent la vulgarisation des nouvelles procédures de stabilisation à la chaux pour assurer une efficacité optimale de durabilité des structures.

En 1996, le département des routes de l'état du Queensland a procédé à la stabilisation de Killarney Road et Freestone Creek en suivant ces nouvelles recommandations (Evans et al., 1997) Les résultats obtenus étaient impressionnants. En 2003, plus de 1,6 millions de tonnes de chaux ont été utilisés dans la stabilisation des sols aux Etats Unis (Miller, 2004).

La stabilisation des sols à la chaux permet l'amélioration immédiate et dans le temps, des performances des sols traités. Ces performances sont obtenues parfois à de très faibles taux de chaux ce qui représente un grand intérêt économique. Les performances se traduisent de manière remarquable sur toutes les caractéristiques du sol traité, à savoir la réduction de la plasticité, du potentiel et de la pression de gonflement, de la densité sèche maximale et de la déformabilité.

Elle permet également l'augmentation de la teneur en eau optimale et de la résistance au cisaillement, de l'indice CBR, de la cohésion et de la perméabilité des argiles.

II.1.1.1 Principe Et méthodologie de traitement

L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante. Cette propriété est mise à profit pour l'assèchement des sols fins argileux et humides.



Cette réaction exothermique entraîne une évaporation.

Par ailleurs, l'adjonction de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na⁺, K⁺...) par des cations Ca⁺⁺ apportés par la chaux, ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables.

II.1.1.2 Evaluation de l'aptitude du sol au traitement à la chaux

Dans l'application du traitement pour la réalisation de couche de forme, l'aptitude du sol au traitement est évaluée suivant les critères présentés au Tableau II.1³

Tableau II. 1-Critères retenus pour l'adaptation d'un sol au traitement [LCPC2000]

Type de traitement	Paramètre considéré		Aptitude du sol au traitement
	Gonflement Volumique G _v (%)	Résistance en compression diamétrale	
Traitement avec la chaux	< 5	> 0.2	Adapté
	5 ≤ G _v ≤	0.1 ≤ R _{tb} ≤ 0.2	Douteux
	> 10	< 0.1	Inadapté

II.1.2.3 Les différentes phases de traitement

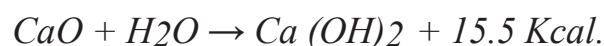
L'objectif visé par ce traitement est la neutralisation des fines argileuses afin de rendre le matériau insensible à l'eau.

L'action de la chaux hydraulique sur un sol humide (plus particulièrement un sol argileux) se décompose en trois phases, deux sont immédiates et la troisième à plus long terme :

II.1.2.3.1 Phase de déshydratation

La déshydratation du tuf d'après (Venuat, 1980) est le résultat de :

- La réaction d'hydratation de la chaux libre vive CaO, fixe une quantité d'eau suivant la réaction :



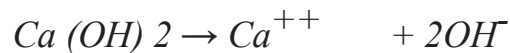
- L'évaporation due à l'échauffement par la réaction exothermique;

³ (SETRA, LCPC, 2000)

- Le malaxage diminue de 1.5 % la teneur en eau moyenne. Cette diminution est plus grande dans le cas des conditions climatiques extrêmes.

II.1.2.3.2 Phase de réaction avec l'argile

- La chaux basique ionisée dans l'eau donne les ions:



- La silice SiO₂ et l'alumine Al₂O₃ ont une solubilité élevée en milieu fortement basique (PH > 12), cette solubilité conduit à la destruction des argiles par la chaux;
- Les cations Ca⁺⁺ vont se substituer aux ions Na⁺ et K⁺ de l'argile provoquant une floculation abondante des particules argileuses. Les ions Ca⁺⁺ réalisent des ponts (ponts de calcium) entre les particules d'argile endommagées (figure II.2).
- Ensuite, la chaux attaque les particules d'argile liées pour former un ciment d'aluminates et de silicates de calcium hydratés. Le tuf va subir une granulation due à la floculation qui va changer, même après immersion, dans l'eau.
- Visuellement, le tuf change ; il perd sa cohésion, sa plasticité, et sa densité et devient pulvérulent, poudreux et friable.

II.1.2.3.3 Phase à plus long terme

D'après **Leroux** (1969) (cité par Taibi, 1985), les PH mesurés au moment du mélange sol-chaux, quel que soit le pourcentage de chaux utilisé, sont compris entre 12.5 et 13. Après 48 heures de contact, ils sont encore supérieurs à 11 pour les sols traités à 5 % de chaux et plus. Ils se stabilisent à 9.5 pour les échantillons après un mois de traitement.

- A PH supérieur à 12, la silice SiO₂ et l'alumine Al₂O₃ passent en solution. Une fois libérées, elles se combinent avec la chaux libre éteinte Ca(OH)₂ pour former des silicates et des aluminates de calcium hydratés (CSH et CAH).
 - Au début du traitement, les composés hydratés se développent énergiquement en se transformant d'abord en gels amorphes, ensuite et au bout d'une durée de 90 jours de contact argiles-chaux, les composés hydratés se cristallisent lentement.

Perret (1979) (cité par Taibi, 1985), a constaté que la température ne change pas la nature chimique dans la réaction sol-chaux, elle ne fait qu'accélérer la réaction. Dans ses études de la stabilisation des sols fins à la chaux, il a observé que la stabilisation s'effectue en trois phases (citées précédemment) et en variant la température de conservation, il a constaté que :

- A 20 °C, les deux premières phases sont observées. Quant à la troisième, elle n'est pas observée (lenteur du phénomène) ;
- A 40 °C, toutes les phases sont observées ;
- A 60 °C, la première phase n'est pas observée (très rapide). Quant aux deux dernières elles sont observées.

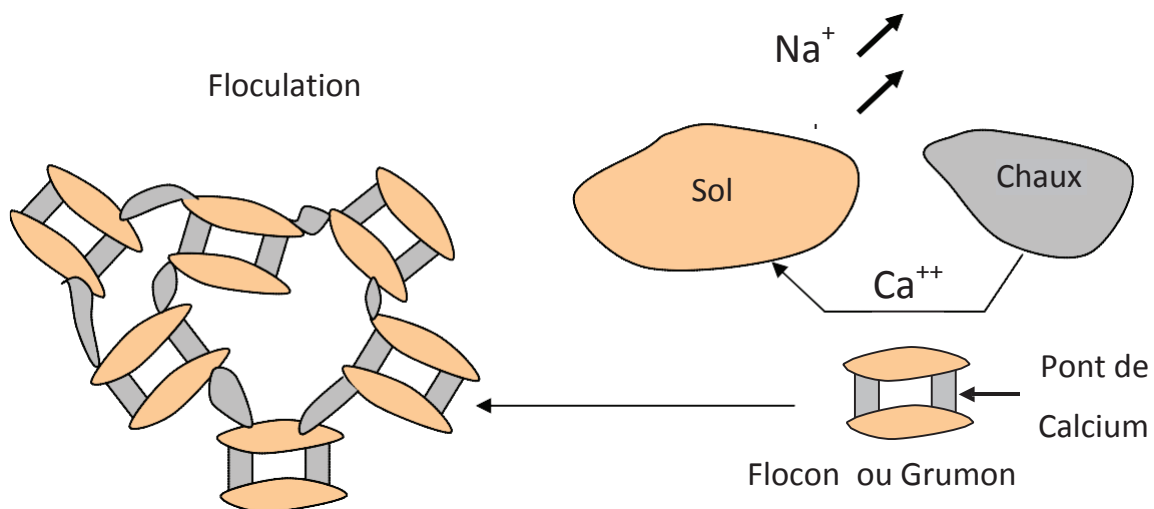


Figure II. 1-Schéma du mécanisme observé lors du traitement (Kouidri, 2000).

II.1.2.4 Méthodes de traitement et précautions d'emploi

Les sols relèvent essentiellement du traitement "en place". On incorpore la chaux avec des engins agricoles ou mieux avec du matériel de travaux publics :

- Rotovator (profondeur de travail 12 à 15 cm)
- En cas de présence d'éléments grossiers : charrue à disques (profondeur 20 à 25 cm)
- Pulvimixer (30 à 35 cm)

On procède à un compactage, fondamental pour diminuer les vides et augmenter la durée de vie du matériau. Le traitement peut se faire en plusieurs couches si nécessaire.

Le traitement doit être précédé d'une étude en laboratoire pour définir si le sol a une bonne réactivité et déterminer les dosages de liant (après mesure de l'indice CBR immédiat et au bout de quatre jours qui donne des informations sur l'amélioration de la "portance").

II.1.2 Traitement des sols aux liants hydrauliques

Un liant hydraulique est un produit qui durcit par hydratation et conserve ensuite sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Ce phénomène d'agglomération des éléments granulaires du sol est appelé "prise hydraulique" et confère au sol une cohésion permanente.

La qualité de la réaction dépend de la nature du matériau, du type et de la quantité de liant, de la compacité à la mise en oeuvre, de la température du milieu et de l'âge du mélange.

Il y a d'une part les ciments classiques et d'autre part les liants spéciaux routiers (LSR).

II.1.2.1 Les ciments

Les ciments sont normalisés dans leur constitution et leur utilisation (norme NF P 15-301).

Le ciment est constitué en majeure partie de clinker (produit de la cuisson du mélange nommé "cru" : 80% calcaire + 20% argile).

Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon, des fumées de silice, ainsi qu'une proportion de l'ordre de 3 % de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique.

Le produit final entre en réaction quasi instantanément avec l'eau et forme un gel qui, en s'hydratant progressivement, se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les

éléments grenus du sol.

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition :

- CEM I : ciment Portland ;
- CEM II : ciment Portland composé ;
- CEM III : ciment de haut-fourneau ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique ;
- CEM V : ciment composé.⁴

Les constituants des ciments sont codés comme suit :

- clinker Portland: K
- laitier granulé de haut-fourneau: S
- laitier d'aciérie à l'oxygène: Sb
- pouzzolane naturelle: P
- pouzzolane naturelle calcinée: Q
- cendres volantes siliceuses : V
- cendres volantes siliceuses de lit fluidisé: Va à durcissement normal.
- cendres volantes calciques : W
- cendres volantes calciques non éteintes : Wa
- schiste calciné: T
- calcaire: avec teneur en carbone organique < 0,5 %: L avec teneur en carbone organique < 0,2 %: LL
- chaux aérienne calcique vive: CL-Q
- chaux aérienne calcique éteinte: CL-S
- chaux hydraulique naturelle: NHL
- sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) : Cs.⁴

II.1.2.2. Les LSR

Les liants spéciaux routiers sont des liants hydrauliques routiers (LHR) spécialement formulés pour certaines opérations de terrassement ou de construction d'assises, tant en terme de facilité d'usage que de performances. Les LHR sont utilisés pour traitement de sols fins, travaux en arrière saison,

⁴ (GUERIDI,2009)

matériaux argileux, craies, calcaires sablonneux, portance rapide.

Ils sont classés en fonction de leur utilisation (norme NF P15-108).

II.2 Les différentes phases de traitement

II.2.1 Actions immédiates

Les actions immédiates du traitement aux liants hydrauliques sont :

- Modification de l'état hydrique : assèchement par apport de matière sèche.
- Modification fraction argileuse : floculation des minéraux argileux.

II. 2.2 .Actions à long terme

La prise hydraulique confère au matériau traité une résistance en traction prédominante dans son comportement. En effet le matériau traité au liant hydraulique (MTLH) est assimilable au béton de ciment, employé dans la construction des bâtiments ; ce dernier a une forte résistance en compression et une faible résistance en traction. Les effets de sollicitation du MTLH au sein de la structure de chaussée sont considérés vis-à-vis du fluage, or c'est précisément la résistance en traction qui va clairement limiter cet allongement de la couche.

La prise hydraulique se déroule en 3 étapes :

1) démarrage de la prise (phase dormante*) : mise en solution puis gel

* c'est le temps du délai de maniabilité pour la mise en oeuvre (de 2h à 24h voir 48h)

2) développement de la cristallisation du gel (rigidification)

3) durcissement (poursuite de la croissance de la résistance)

"En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d'une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier) et, d'autre part, les délais d'étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue." (GTS)

Les liants hydrauliques permettent de fabriquer des matériaux dont le niveau de performances (défini généralement par une résistance en traction et un

module) peut varier en jouant sur le type de liant et le dosage.

Tableau II. 2Récapitulatif des actions des liants .

	CHAUX	LH
Actions immédiates	abaissement teneur en eau rigidité par flocuation (résistance au cisaillement)	assèchement par apport matière sèche - flocuation
Actions à long terme	prise pouzzolanique (cimentation) - syntaxie (pralinage)	- prise hydraulique (résistance en traction)

Il faut noter que les effets de la prise pouzzolanique et de la prise hydraulique s'interrompent dès que la température du mélange descend en dessous de 5 ° C. La température est un facteur important de la cinétique de prise.

Le risque de gel est significatif au regard de la résistance du sol traité à l'âge correspondant à son apparition probable.

La prise en compte de cet aspect est très importante dans le cas du traitement appliqué à la réalisation de couche de forme qui n'est pas recommandé dans les régions pouvant être soumises à une période de gel significative.

Globalement, l'incorporation de 1 % de chaux vive provoque un abaissement de la teneur en eau de 1 point (1 %).

La figureII.3 représente l'action de la chaux sur les caractéristiques de compactage, déterminées par l'essai Proctor et modifiées après traitement. On peut constater une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité maximale Proctor.

La figure II.2 comporte des valeurs qui permettent de mesurer la réduction effective de la teneur en eau pour un dosage de chaux.

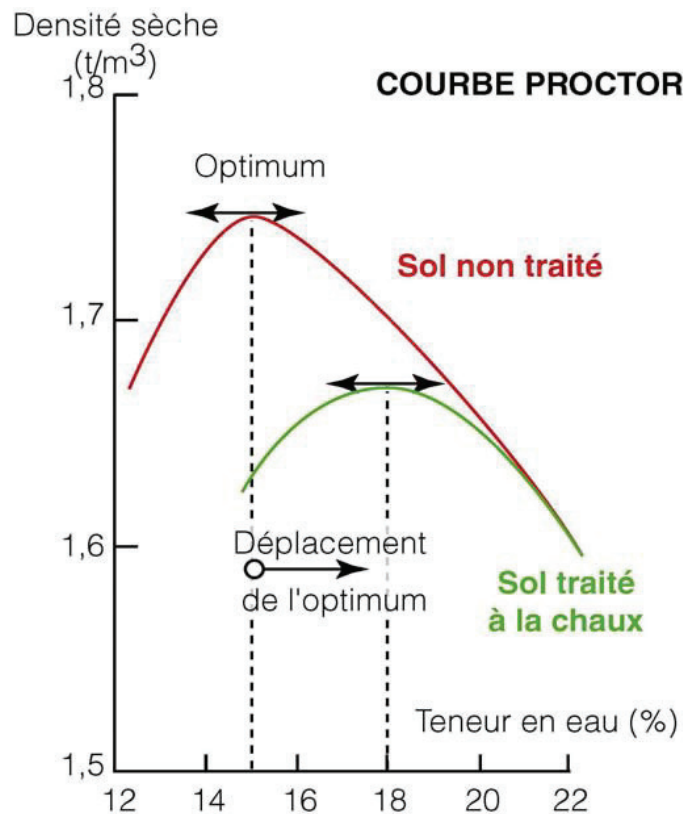


Figure II. 2-Influence du traitement à la chaux sur un sol. SREKMA, M. (2009)

L'augmentation de la teneur en eau optimale et l'aplatissement de la courbe Proctor indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité et rendu moins sensible aux variations de teneur en eau. Ceci contrebalance largement la relative perte de densité du mélange.

II.2 Les grandes étapes du traitement de sol

II.2.1 Identification du sol

Les études géotechniques permettant la classification des matériaux et leur réutilisation s'appuient sur une reconnaissance générale des sols destinés à être traités et sur la formulation des mélanges.

L'étude de qualification des matériaux comprend l'identification à partir des paramètres de sol (décrits précédemment dans le paragraphe I.2. Rappel sur les paramètres de sol et le compactage), leur localisation dans le profil géotechnique, et l'estimation de leur quantité.

Les éléments considérés pour définir le contenu d'une étude de traitement pour la CDF sont : la collecte des données (cartes géologiques, sondages de reconnaissance..), le recueil d'expertise locale (notamment la présence d'éléments perturbateurs), la caractérisation du gisement et la constitution d'échantillons représentatifs (mélanges), l'identification du produit de traitement, et enfin, le cas échéant, l'organisation et la conduite d'un chantier expérimental.

La caractérisation du gisement a pour objectif de fournir un échantillon représentatif du matériau. Un zonage (repérage) de chaque formation est défini sur le profil géotechnique ainsi que les plages de variation des paramètres de nature et d'état des sols.

La dispersion des caractéristiques du matériau de chaque zone donne une indication de l'hétérogénéité des sols de la zone. Des valeurs limites de dispersion de la masse volumique sèche ρ_{dOPN} sont fixées par le GTS : utilisations possibles des sols traités en CDF en fonction de leur homogénéité. L'homogénéité du matériau est ainsi définie par son pourcentage de dispersion (%). La plage de dispersion de la ρ_{dOPN} observée doit être inférieure à ces valeurs pour considérer l'homogénéité du gisement comme satisfaisante. Le mélange des prélèvements réalisés sur l'ensemble du gisement constitue alors un échantillon représentatif.

II.2.2 Etude de formulation

Ce sont les études qui déterminent la nature du produit de traitement et son dosage. Le dosage se calcule notamment en fonction des performances visées.

- Dosage (en %) :

Q : masse produit de traitement
M_{sol} : masse sol à traité

$$d = [Q / (M_{sol} + Q + mcg)] \times 100$$

mcg : masse correcteur granulométrique (éventuellement)

- Calcul du besoin en liant (en tonnes de liant) :

épaisseur traitée x surface x ρ_d x (d/100-d) (d est le dosage en liant exprimé en pourcentage)

Les études comprennent l'essai d'aptitude du sol au traitement, exposé ci-après (I.4.4.2) :

- Gonflement volumique GV
- Résistance en compression diamétrale Rtb

Selon le résultat et les valeurs de référence, le produit est dit : adapté, douteux, inadapté.

Dans le cas de grands chantiers, lorsqu'il subsiste des incertitudes quant au choix de la solution, des planches d'essai et chantiers expérimentaux sont réalisés pour confirmer les performances mécaniques, étudier la faisabilité du malaxage, définir les conditions de mise en oeuvre, moyens et autres. Cependant, un chantier expérimental reste une charge financière importante.

II.2.3 Mise en œuvre (les opérations courantes principales)

Les opérations courantes et principales concernent la préparation du sol (scarification, humidification), l'épandage du produit, le malaxage, l'ajustement de l'état hydrique (arrosage), le réglage, et enfin le compactage.

Préparation du sol :

- décohésion du matériau par foisonnement
- élimination de la fraction grossière : scarification, criblage, concassage
- homogénéisation du matériau par tri (chargement et dépôt)
- humidification (changement état hydrique)

Epandage produit (épandeur pondéral ou volumétrique)

Malaxage : mélange sol et produit.

Ajustement de l'état hydrique : arrosage si après malaxage le mélange est trop sec pour être compacté de manière conforme. En effet, cet état a une incidence sur les exigences de compacité.

Notons que le traitement de la CDF nécessite un arrosage presque systématique du fait de l'apport important de matières sèches issu de dosage élevé conféré par les exigences de performances.

L'augmentation de teneur en eau doit cependant rester limitée, en général à 1 à 2 %.

Réglage : il s'agit du nivellement du matériau traité à l'épaisseur conforme.

- ✚ Compactage : opération visant à atteindre l'objectif de densification exprimé par la masse volumique sèche à obtenir pour une teneur en eau à l'optimum OPN. La qualité de la CDF est liée à son compactage, notamment pour sa résistance à la fatigue qui varie selon la densité en fond de couche.

II.2.4 Contrôle

La mesure du module EV2 n'est pas appropriée aux sols traités au liant hydraulique du fait de leur rigidité, cette mesure ponctuelle de l'enfoncement d'une plaque de diamètre 60 cm n'est pas représentative pour une couche dont le comportement se rapproche d'une dalle. Il peut toutefois suffire pour avoir une idée de la portance de la couche traitée de petits chantiers.

En revanche pour s'assurer de la portance et compacité d'une CDF traitée, il faut faire la mesure de sa déflexion, soit avec un déflectographe qui enregistre les mesures de manière continue, soit avec une poutre de Benkelman qui enregistre les mesures de manière ponctuelle.

La vérification de l'état hydrique de la mouture est importante avant le compactage, pour éviter la fissuration du support. Pour un sol en matériaux argileux ou limoneux, un simple test de consistance à la main permet de vérifier l'état de plasticité du mélange et donc la teneur en eau.

La mesure de l'épandage du liant à la bêche ou au bac permet de vérifier ponctuellement la masse épandue et de contrôler la régularité de l'épandage par rapport au dosage prévu.

Un plan de contrôle, s'inscrivant dans le cadre de l'assurance qualité, définit le programme des actions de vérifications au cours de l'exécution.

*Chapitre III:
Rappel sur les paramètres
géotechniques des sols et le
compactage*

III.1 Classification: GTR 92 et norme NF P 11-300

La classification géotechnique des matériaux identifie les sols en 6 classes : A, B, C, D, R et F.

Tableau III.1, fascicule 1 du GTR (Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature)

Tableau III 1-Classes principales du GTR .

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A ₁ à A ₄ selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	B ₁ à B ₆ selon VBS ou IP et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS ou IP et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D ₁ à D ₃
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NF P 11-300)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimiques (Norme NF P 11-300)	

Les caractéristiques permettant la classification sont regroupées selon trois catégories : les paramètres de nature, les paramètres de comportement mécanique, et les paramètres d'état.

III.1.1 Les paramètres de nature

Ils ne varient pas ou peu dans le temps, ce sont des caractéristiques intrinsèques.

 **La granulométrie** (normes NF P 94-056 et NF P 94-057)

La granularité est un paramètre qui permet de distinguer les sols grâce à la dimension de leurs grains.

Une première analyse consiste à mesurer la répartition des quantités selon la dimension des grains. Les deux méthodes complémentaires sont le tamisage pour les sols grossiers (ou grenus) et la sédimentométrie pour les sols fins. Il s'agit de mesurer le pourcentage des grains de sol passant au travers d'un tamis donné (passant ou tamisat).

L'expression classique de cette analyse est la courbe granulométrique caractérisée par les indices suivants (d_{60} est le diamètre correspondant à un passant de 60%) :

- le coefficient d'uniformité (de Hazen) : $CU = d_{60} / d_{10}$ ($CU < 2$ uniforme, $CU > 2$ étalée)
- le coefficient de courbure : $CC = d_{30}^2 / d_{60} \times d_{10}$ (bien gradué si CC entre 1 et 3)

🚧 **D_{max}** : Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

Il détermine l'atelier de terrassement (c'est-à-dire le matériel employé), l'épaisseur des couches et les conditions de malaxage.

Le seuil retenu est **50mm**, car cela permet de distinguer les sols fins, sableux ou graveleux des sols blocailleux. C'est aussi la valeur limite courante pour le malaxage des sols avec un liant pour une CDF de qualité.

🚧 **Tamisat 80µm** : Pourcentage en fines du sol.

Les fines sont sensibles à l'eau, selon leur proportion elles vont donc influencer le comportement du sol.

Seuils retenus (par le GTR):

> **35%** : comportement du sol totalement régi par la fraction fine

< **12%** : seuil conventionnel pour dire si un sol est pauvre ou riche en fines

🚧 **Tamisat 2mm** : distinction entre sols sableux et sols graveleux Seuil retenu (par le GTR): **70%**

> 70% : sol tendance sableuse

< 70 % : sol tendance graveleuse

🚧 **L'argilosité**

Etats de consistance - Limites d'Atterberg (norme NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (<400µm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et à en observer la consistance.

Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide.

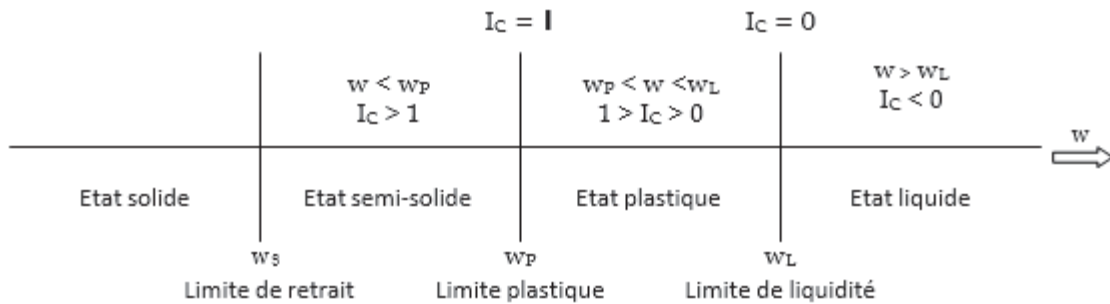


Figure III. 1 Etats de consistance d'un sol – Limites d'Atterberg - d'après le cours de mécanique des sols de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement -

🚧 L'indice de plasticité IP

Caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$IP = w_L - w_P$$

w_P → teneur en eau à limite de plasticité du sol (%) w_L → teneur eau à limite de liquidité du sol (%) Seuil retenus (par le GTR):

- 12 : Limite supérieure des sols faiblement argileux
- 25 : Limite supérieure des sols moyennement argileux
- 40 : Limite supérieure entre sols argileux et très argileux

🚧 **La valeur au bleu de méthylène VBS** (norme P 94-068) : paramètre représentant l'absorption de la surface spécifique du sol. La VBS s'exprime en g de bleu absorbé pour 100 g de sol. La surface spécifique du sol est déterminée par la surface des particules de la fraction argileuse, une évaluation indirecte de la quantité et de la nature de l'argile contenue dans le sol

Seuil retenus (par le GTR):

- 0,1 : sol insensible à l'eau
- 0,2 : apparition d'une légère sensibilité à l'eau (sols sableux)
- 1,5 : distinction sols sablo-limoneux et sols sablo-argileux
- 2,5 : distinction sols limoneux peu plastique à plasticité moyenne
- 6 : distinction sols limoneux et sols argileux
- 8 : distinction sols argileux et sols très argileux

🚧 **L'équivalent de sable ES** : ancien paramètre de la RTR de 1976 conservé pour référence.

Cet essai caractérise la pollution d'un sable par de l'argile ou du limon en mesurant la quantité des particules colloïdales que l'on fait flocculer. L'essai permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu.

L'équivalent de sable s'exprime en pourcentage, cela correspond à la proportion du

floculat de sol fin (h2) par rapport au dépôt solide (h1), les deux étant mesurés sur éprouvette contenant l'échantillon de sol et une solution normalisée pour disperser les particules de sol.

$$Es = [h1 / (h1 + h2)] \times 100$$

- ES = 0 Argile pure
- ES = 20 Sol plastique
- ES = 40 Sol non plastique
- ES = 100 Sable pur et propre

✚ Certains minéraux ont une influence particulière sur le traitement de sol car, comme les argiles, ils sont sensibles à la présence d'eau.

Des constituants chimiques particuliers (matières organiques, phosphates et nitrates, chlorures, sulfates et sulfures) interfèrent également sur la prise hydraulique.

Dans sa Thèse (voir bibliographie), Tangi Le Borgne, explique que la technique du traitement de sol est limitée par la réaction du sol au liant à cause d'éléments perturbateurs de prise. Il souligne l'influence de la chimie du sol et de sa composition minéralogique qui peuvent modifier considérablement la suite de réactions attendues, et, par conséquent, la performance finale du sol traité. Il établit une revue exhaustive des éléments chimiques susceptibles de perturber le traitement, détermine un seuil d'action selon la concentration d'un élément chimique dans un sol. La thèse de Nicolas Cabane est un travail de recherche sur la perturbation de la stabilisation lors du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques, afin de proposer des essais simples et fiables de caractérisation démontrant rapidement la présence de ces agents perturbateurs au sein des sols.

III.1.2 Les paramètres de comportement mécanique

Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et sont donc utilisables en CDF, et les matériaux qui risquent de se fragmenter et nécessiteront des dispositions particulières de traitement.

Les paramètres suivants sont retenus pour la classification des matériaux rocheux.

- Coefficient de **Los Angeles LA** (norme P 18-573)
- Coefficient **micro Deval en présence d'eau MDE** (norme P 18-572)

LA et MDE concernent les roches dures comme le granit, le gneiss, le calcaire et le grès et leur possibilité de réemploi en CDF ou couche de chaussée.

- Coefficient de **friabilité des sables FS** (norme P 18-576)

Seuils retenus par le GTR pour la classification géotechnique des sols :

- 45 pour LA et MDE
- 60 pour FS

Par ailleurs les paramètres suivants sont utiles pour le traitement de sol car ils

permettent de définir les conditions de malaxage :

- ✚ Coefficient de **fragmentabilité FR** (éléments grossiers >50mm) (norme NF P 94-066)
- ✚ Coefficient de **dégradabilité DG** (abrasivité fraction grenu >0,08mm) (norme XP P 18-579) DG concerne surtout les remblais en matériaux issus de roches argileuses (marnes, schistes..).

III.1.3 Les paramètres d'état

Ils sont fonction de l'environnement.

- ✚ **L'état hydrique** est particulièrement important pour les sols meubles sensibles à l'eau. On distingue 5 états hydriques différents :

- très humide **th**
- humide **h**
- humidité moyenne **hm** (optimum)
- sec **s**
- très sec **ts**

L'état hydrique d'un matériau permet de définir son classement de PST, car la portance du sol est fortement liée cet état. Le tableau relative aux différents cas possibles de PST¹, établit un classement des sols selon la sensibilité des matériaux à l'eau ; dans chaque cas il s'agit des mêmes matériaux mais l'état hydrique est différent (sauf PST 5 et PST 6).

Il y a des paramètres pour caractériser l'état hydrique.

- ✚ La teneur en eau naturelle w_{nat} (norme NF P 94-050) par rapport à l'Optimum Proctor Normal w_{OPN} , w_{nat} , w_{OPN}
- ✚ **L'indice de consistance I_c** : comparaison de la teneur en eau naturelle w d'un sol et des limites d'Atterberg; cela permet de se faire une idée de l'état d'une argile. Cet indice renseigne sur la traficabilité du matériau et permet de définir les moyens de transport et d'extraction.

$$I_c = (W_L - W_{nat}) / (W_L - W_p)$$

- ✚ **Masse volumique sèche ρ_d** et **Poids volumique sec γ_d** ($\gamma_d = \rho_d \times g$)

L'état de compacité en place se détermine par la mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol déshydraté. Elle constitue une des caractéristiques du compactage, l'autre étant la teneur en eau. Sa valeur est un paramètre de vérification de la qualité du compactage et du traitement de sol.

La masse volumique sèche des craies et calcaires est étroitement liée à leur fragmentabilité, elle informe donc sur les conditions de malaxage. En effet, dans ce

¹ (GTR,F1,P65)

cas, moins le matériau est dense plus il se désagrège facilement. Le malaxage peut engendrer un phénomène d'attrition pour les craies et calcaires, car lors du mélange, le matériau se frotte et s'effrite.

III.2 Compactage

Le compactage est une réduction de volume du sol presque instantanée due à la réduction des vides remplis d'air. Plus les grains seront resserrés les uns contre les autres, meilleure sera la résistance du sol au cisaillement et meilleur sera le comportement des remblais et couches de chaussées; on recherche donc l'indice des vides le plus petit possible (correspondant au pic de la courbe Proctor).

Le compactage améliore les propriétés mécaniques du sol remanié.

Il complète l'effet de stabilisation par remplissage des vides par le liant. Le liant augmente la rigidité (répartition des charges) et diminue l'attrition des gros éléments.

Le compactage se distingue de la consolidation car il s'agit de tassement du matériau sous un effet dynamique, alors que la consolidation s'effectue sous poids propre du matériau. Pour le compactage, il n'y a pas de variation de la teneur en eau lors du phénomène de tassement.

La teneur en eau a un effet notoire sur le compactage des sols fins. En effet il existe une valeur maximale du poids volumique sec γ_d pour une teneur en eau dite à l'optimum w_{OPN} , **Optimum Proctor Normal** déterminée par l'essai Proctor (norme NF P 94- 093).

Cet essai consiste à compacter le sol dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame, à énergie constante, et à déterminer la densité sèche ρ_d selon la teneur en eau w . L'optimum représente le sommet de la courbe γ_d / w obtenue par l'essai.

Pour les terrassements, on utilise en général l'essai Proctor Normal ; le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs. Pour une couche de chaussée on utilise l'essai Proctor Modifié, le compactage effectué avec une énergie supérieure de celle Proctor normale vise une augmentation de la résistance mécanique de la couche.

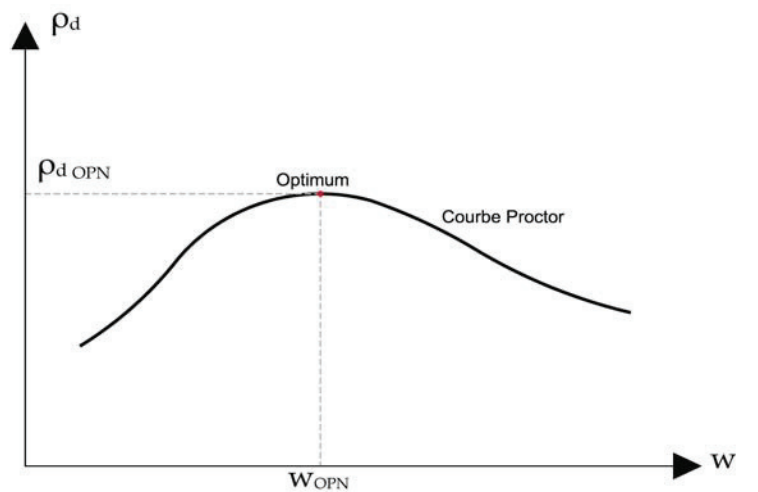


Figure III. 2-Exemple d'une Courbe Proctor.

La résistance des remblais et couches de chaussée aux déformations est fonction de la bonne portance en surface du sol et de l'absence de tassement ultérieur.

Les objectifs de densification pour le compactage prescrits par le GTR sont : q4 pour les remblais (tassement et stabilité) et q3 pour la CDF (raideur et résistance).

Les objectifs de densification q1 pour une couche de fondation et q2 pour une couche de base, ne sont pas considérés par le GTR, parce qu'ils concernent les couches d'assise de chaussée. Ils sont définis dans la norme NF P 98-115. (q signifiant qualité du compactage)

Pour déterminer le taux de compactage moyen permettant de qualifier la densification de la couche, on calcule le rapport de la masse volumique sèche mesurée ρ_d et la masse volumique sèche de référence ρ_d OPN. Le résultat est en pourcentage.

$$(\rho_d / \rho_d \text{ OPN}) \times 100$$

Si l'on appelle ρ_{dm} la valeur moyenne, et ρ_{dfc} la valeur en fond de couche, on doit avoir :

- le taux de compactage permettant de qualifier la densification du matériau des CDF :
 $\rho_{dm} \geq 98,5 \% \rho_d \text{ OPN}$ et $\rho_{dfc} \geq 96 \% \rho_d \text{ OPN}$
- le taux de compactage permettant de qualifier la densification du matériau des remblais:

$$\rho_{dm} \geq 95 \% \rho_d \text{ OPN} \text{ et } \rho_{dfc} \geq 92 \% \rho_d$$

OPN Ces valeurs sont des repères donnés par le GTR.

Les modalités de compactage (dont l'énergie à mettre en œuvre) sont définies dans les tableaux de compactage du GTR, fascicule 2 annexe 4 selon les paramètres suivants : classe du terrain, Q/S, type de compacteur, e l'épaisseur de la couche, V la vitesse de translation du véhicule.

(Q est le volume de sol compacté et S la surface compactée)

III.3 Portance

Dans le cadre de travaux routiers, de faibles déformations du sol sont admises. Par exemple, le critère de réception d'une PF4 d'autoroute est de 20/100e de mm.

La portance est plus représentative pour les CDF traitée par une mesure faite in-situ à l'aide d'un défléctographe pour une mesure en continue et avec la poutre Benkelman pour une mesure ponctuelle, car la couche est assimilable à une structure semi-rigide.

Cependant la portance d'une PF est couramment déterminée par l'indice CBR ou IPI, ou par le module à la plaque EV2.

III.3.1 L'indice CBR

La portance du sol est sa résistance à la rupture déterminée par l'essai CBR, le Californien Bearing Ratio (norme NF P 94-078). Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport à un sol type de référence. Il permet d'observer le comportement du matériau vis-à-vis sa densification ainsi qu'une idée de sa résistance à l'eau.

L'indice de portance CBR immergé (= I_{CBR} après 4 jours d'immersion), **et indice portant immédiat IPI**, se calculent ainsi par le rapport entre la pression d'enfoncement du sol et celle d'un matériau type référencé (en %) :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\text{Pression à 2,5 mm d'enfoncement}}{70} \\ \frac{\text{Pression à 5 mm d'enfoncement}}{1,05} \end{array} \right\} \text{C'est la plus grande des 2 valeurs qui est retenue}$$

Chapitre IV :
Présentation de l'échantillon

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'identifier l'échantillon du sol qu'on va traiter afin d'analyser son comportement après le traitement à la chaux.

IV.2 Analyse granulométrique

IV.2.1 But de l'essai

Déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon.

Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Termes à retenir :

- **d** : dimension nominale d'ouverture d'un tamis
- **tamisat** : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.
- **classe granulométrique** : ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures de tamis définissant un intervalle (ex: 0 /50mm)
- **courbe granulométrique** : représentation graphique du pourcentage massique

IV.2.2 Résultat de l'essai

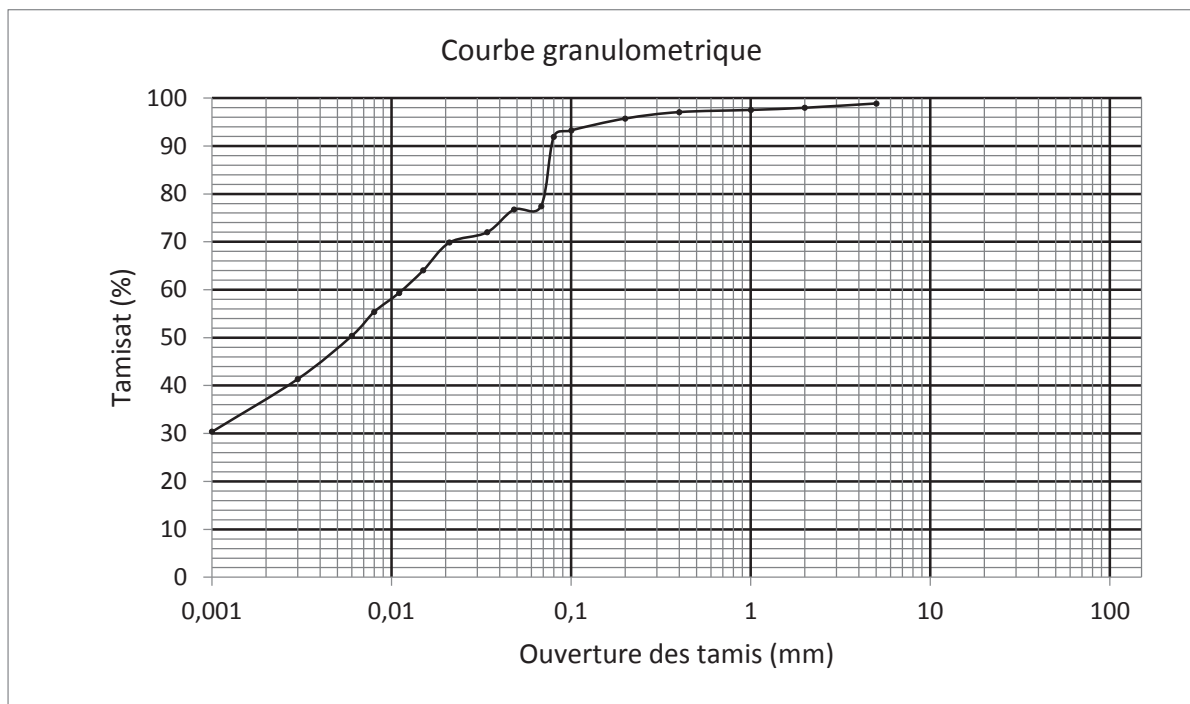


Figure IV. 1 Courbe granulométrique

La répartition pondérale des éléments est représentée par une courbe granulométrique dans un repère semi logarithmique (figure IV.1).

IV.2.3 Interprétation

- 50mm : séparation entre les sols grossiers (blocaillieux) et sols fins, sableux, graveleux.
 - 2mm : Séparation entre les sols graveleux et sableux.
 - Passant à 80 μ m : ce seuil donne le pourcentage de fins et contribue à évaluer leur sensibilité à l'eau.
 - 20mm : seuil maximal permettant de réaliser un essai Proctor.
 - 0/50mm : fraction de référence des essais d'identification permettant le classement selon GTR.
 - D_{max} : Ce paramètre est déterminant pour évaluer l'épaisseur des couches à compacter, les conditions de réglage et de malaxage.
-
- 37% Argile
 - 39,5% Limon
 - 22,5% Sable
 - D_{max} : 5mm

Classification GTR :

Sables fins argileux, limon, Argiles et marnes peu plastiques.

IV.3 Limites d'Atterberg

IV.3.1 But de l'essai

Cet essai a pour but de Déterminer les états de consistance d'un sol. La limite de plasticité, la limite de liquidité et limite de retrait.

IV.3.2 Résultat de l'essai

Le graphe suivant (Enfoncement en fonction de la teneur en eau) nous a permis de tirer la limite de liquidité par lecteur directe.

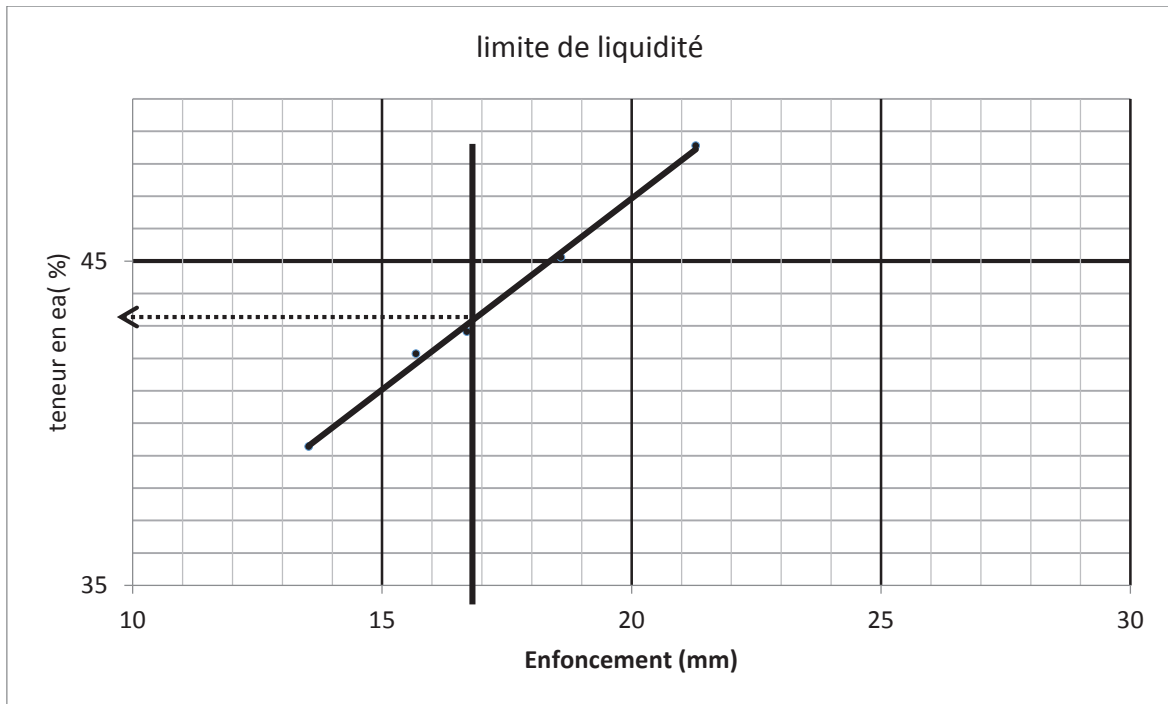


Figure IV. 2 Courbe de la teneur en eau en fonction d'Enfoncement

Les résultats obtenus par cet essai, sont récapitulé dans le Tableau suivant :

Th	t	Ts	md	mw	mw/md	WL	WP
20,975	8,611	17,487	8,876	3,488	39,30	43,59	19,88
19,954	8,56	16,576	8,016	3,378	42,14		
22,513	8,505	18,313	9,808	4,2	42,82		
24,239	8,388	19,311	10,923	4,928	45,12		
15,411	6,869	12,619	5,75	2,792	48,56		

Tableau. IV. 1 Résultats d'essai des limites d'Atterberg

IV.3.3 Interprétation

Pour interpréter les résultats, on a besoin de l'indice de plasticité.

Indice de plasticité :

$$I_p = W_L - W_P = 43,59 - 19,88 = 23,71$$

Indice de plasticité	Degré de plasticité	Exemple de sol
$0 < I_p < 5$	Non plastique	Sable limoneux ou argileux, sable
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique	Limon sableux, limon
$15 < I_p < 40$	Plastique	Limon argileux, limon
$I_p > 40$	Très plastique	Argile

Tableau.IV. 2 Classification des sols selon l'IP

$I_p = 23,71 \rightarrow$ Le sol est Plastique et a une teneur en argile moyenne.

IV.4 Essai Proctor

IV.4.1 But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée " teneur en eau **optimum Proctor** ".

IV.4.2 Résultat de l'essai

Cet essai nous permet de tracer la courbe de la masse volumique du sol sec, en fonction de la teneur en eau suivante :

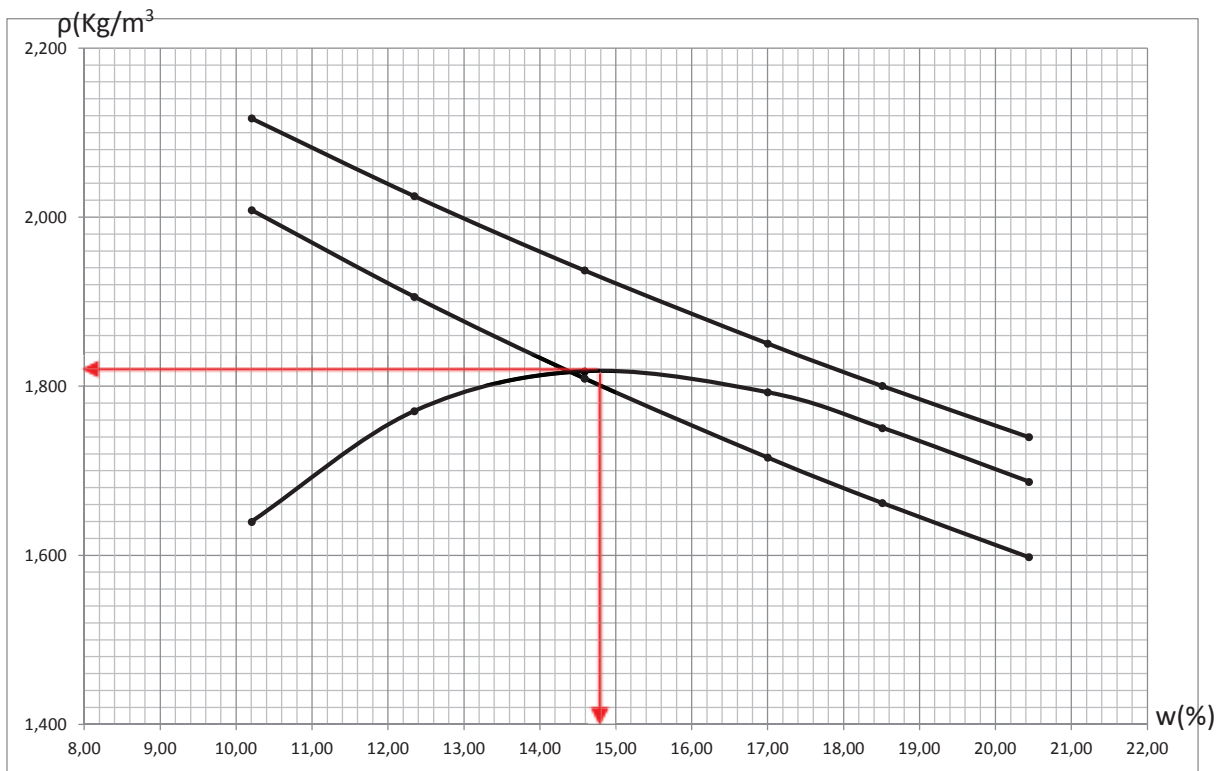


Figure IV. 3 Courbe Proctor.

IV.4.3 Interprétation

De la courbe Proctor, on tire l'optimum Proctor, qui est :

- $\rho_d = 18,2 \text{ KN/m}^3$
- $W = 14,8 \%$

Pour un compactage le plus efficace possible, il faut rendre compte ces valeurs (optimum Proctor) lors de la mise en œuvre sur chantier.

IV.5 Essai Indice Portant Immédiat (IPI)

IV.5.1 But de l'essai

Evaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins.

Pour les sols sensibles à l'eau, il permet également de définir les états hydriques du sol (h et th).

IV.5.2 Résultat de l'essai

L'IPI est réalisé après l'essai PROCTOR à l'aide du moule CBR.

- Placer l'ensemble, embase plus moule sous la presse en position centrale.
- Amener le piston en contact avec l'échantillon.
- Mettre les appareils de mesure à zéro. Exécuter le poinçonnement à la vitesse de 1.27 mm/min
- Etablir la courbe effort, déformation au moins aux valeurs d'enfoncement 1.25; 2; 2.5; 5; 7.5; 10 mm.
- Les deux valeurs retenues sont : l'effort de pénétration à 2.5 mm et à 5 mm.
- Pour calculer l'IPI, on calcule au préalable les indices pour les deux valeurs d'effort retenues à l'aide les 2 formules qu'on a vues précédemment.
- IPI est la plus grande des deux valeurs. Il est calculé à la W (teneur en eau) du matériau à son utilisation.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le graphe suivant :

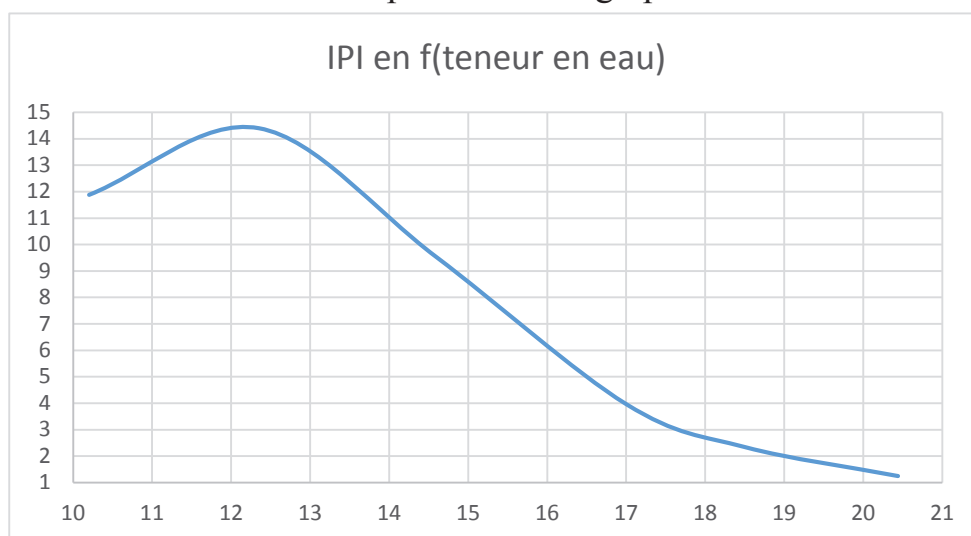


Figure IV. 4 IPI en fonction de la teneur en eau.

IV.6 Essai VBS

L'essai consiste à doser la quantité de bleu de méthylène adsorbé par la fraction 0/5mm du matériau mise en suspension dans l'eau.

IV.6.1 But de l'essai

Le but de cet essai est de connaître la teneur en argile de ce sol.

IV.6.2 Résultat de l'essai

La valeur de bleu du sol est donné par : $VBS = B/Ms * C_{\mu}100$ (exprimé en g de bleu pour 100g de matériau sec).

B : masse de bleu introduite.

Ms : masse sèche de la prise d'essai.

C : proportion du 0/5 mm (soumis à l'essai) dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

$$\rightarrow VBS = 4.24 \text{ g}/100\text{g}$$

IV.6.3 Interprétation

La VBS est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans le matériau étudié.

Le GTR a retenu 6 seuils :

- 0,1 : seuil d'insensibilité à l'eau
- 0,2 : seuil au-dessus duquel apparait à coup sûr la sensibilité à l'eau.
- 1,5 : seuil entre les sols sablo-limoneux et sablo-argileux.
- 2,5 : seuil entre les sols limoneux peu plastiques et les sols limoneux de plasticité moyenne.
- 6 : seuil entre les sols limoneux et argileux.
- 8 : seuil entre les sols argileux et très argileux.

$$\rightarrow 2,5 < VBS = 4,24 < 6 \rightarrow \text{sol limoneux argileux.}$$

IV.7 Essais chimiques

IV.7.1 But des essais

Ces essais ont pour but d'indiquer le pourcentage de chaque composante chimique dans le sol à étudier (NaCl, Na^+ , Cl^- , %MO, %Insolubles, %fer et alumines, PAF)

IV.7.2 Résultat des essais

Les résultats des essais chimiques sont récapitulés dans le tableau suivant :

% chlorures			Sulfates Mg/kg	%MO	% Insolubles	%fer et alumine	PAF
NaCl	Na ⁺	Cl ⁻					
Méthode d'Essai-Mohr			NF ISO11048	XP-P94- 047	NF EN 196-2	Méthode d'Essai LCPC	NF EN 196-2
0.28	0.113	0.17	Traces	5.65	68	2.96	17.15

Tableau.IV. 3 Résultats des essais chimiques.

IV.7.3 Interprétation

Selon la norme XP P94-011(Aout 1999). Les sols analysés sont classés comme suit :

Teneur en matières organique(%)	Classification
3 à 10	Faiblement organique

Tableau.IV. 4 Classification selon la matière organique

Teneur en carbonate (%)	Classification
10 – 30	Faiblement marneux

Tableau.IV. 5 Classification selon la teneur en carbonate.

Les résultats obtenus montrent que les composantes chimiques dans ce sol ne va pas perturber la procédure de traitement à la chaux.

Chapitre V :
Traitement à la chaux

V.1 Introduction

Le traitement à la chaux des sols trop humides et/ou trop plastiques, tels les sols argileux ou limoneux, est une solution souvent préconisée pour rendre les terrassements réalisables et stabiliser les sols.

Lors du traitement de ceux-ci à la chaux, deux réactions différentes se produisent :

- une réaction directe et rapide responsable des effets immédiats produits par la chaux (amélioration du sol).

La réaction d'hydratation de la chaux vive avec l'eau présente dans les sols diminue la teneur en eau de ceux-ci.

Les raisons en sont multiples : la réaction chimique d'hydratation fixe un volume d'eau ;

cette réaction exothermique dégage de la chaleur, ce qui réchauffe le sol et entraîne l'évaporation de l'eau et enfin l'aération du sol qui se produit lors du malaxage facilite l'évaporation et contribue à réduire le taux d'humidité.

La chaux hydratée peut alors réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation des argiles. Cette floculation augmente l'aptitude au compactage du sol.

- une réaction lente, qui durcit progressivement le mélange sol-chaux compacté, responsable des effets à long terme (stabilisation du sol).

L'alcalinité de la chaux augmente le pH du sol, ce qui libère les aluminates et les silicates. Ces derniers peuvent alors réagir avec le calcium apporté par la chaux et l'eau présente dans le sol. Dès ce moment débute le durcissement du sol, sa stabilisation.

Le résultat final, principalement la portance du sol, dépend de la nature et de la réactivité des minéraux argileux présents dans le sol ainsi que de la quantité de chaux ajoutée.

V.2 Procédure du traitement à la chaux

Pour le traitement du sol à la chaux, on suit les étapes suivantes :

1. On prépare cinq échantillons identiques de sept Kg environ.
2. On donne pour chaque échantillon une teneur en eau différente, de sorte qu'on obtienne une courbe Proctor à la fin.
3. On pèse les échantillons, et on les mélange avec 3% de la chaux.
4. On laisse les échantillons jusqu'à une heure et demi de temps.
5. On exécute l'essai Proctor.

6. On mesure l'indice de portance immédiat IPI.

V.3 Résultats du traitement

Après avoir mélangé 3% de la chaux avec le sol, on trace la courbe Proctor et on mesure l'IPI, afin d'analyser la progression de la portance de ce dernier.

La courbe Proctor obtenue ainsi, est la suivante :

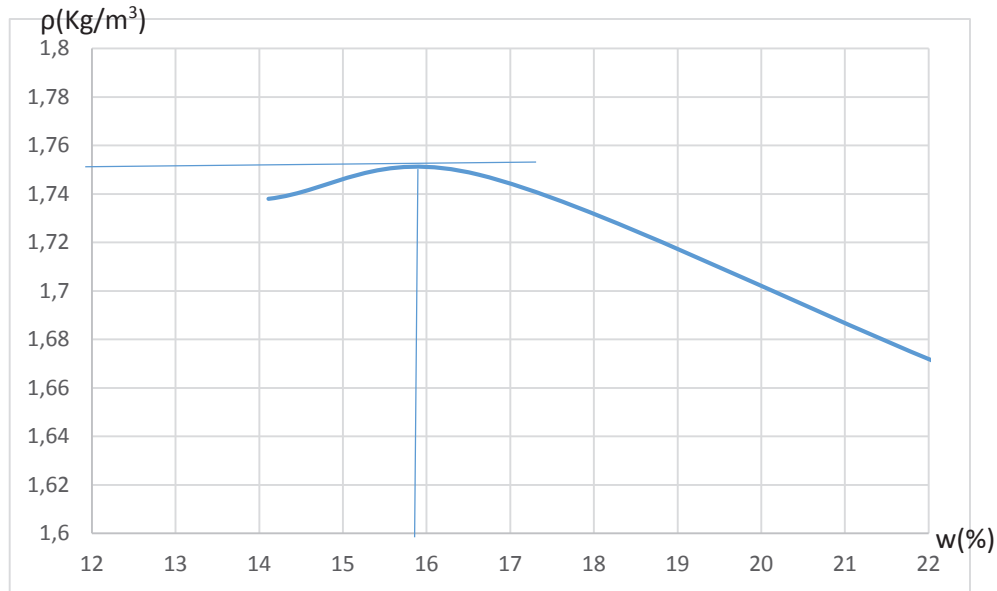


Figure V. 1 Courbe Proctor avec 3% de la chaux.

L'optimum Proctor correspondant à cette courbe est :

- $\rho_d = 17,5 \text{ KN/m}^3$
- $W = 15,8 \%$

Sur les mêmes éprouvettes, on mesure l'IPI, on obtient la courbe suivante :

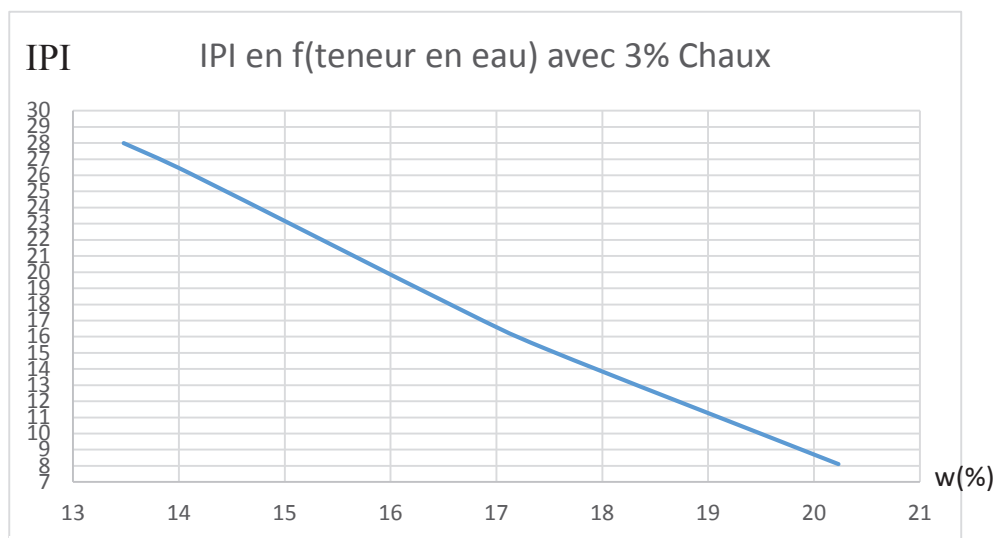


Figure V. 2 IPI en fonction de la teneur en eau

V.4 Conclusion

Les résultats de traitement du sol avec 3% de la chaux, nous a permis de constater que :

- L'indice portant immédiat est multiplié par deux, et plus.
- La portance du sol est devenue de plus en plus importante.
- L'augmentation de la teneur en eau optimale et l'aplatissement de la courbe Proctor indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité et rendu moins sensible aux variations de teneur en eau.

*CONCLUSION
GENERALE*

CONCLUSION GENERALE

Le traitement à la chaux (vive) permet de diminuer très rapidement la teneur en eau et ainsi de rendre « portant » des sols non circulables à l'état naturel.

Lorsque le sol est argileux, le traitement à la chaux (vive, éteinte ou lait de chaux) augmente à long terme ses caractéristiques mécaniques. Les dosages moyens en chaux sont de l'ordre de 1 à 4 %. Le traitement au liant hydraulique procure au mélange des caractéristiques mécaniques pérennes et permet ainsi de l'utiliser en couche de forme ou en assises de chaussées.

Liste des symboles

GTR : guide des terrassements routiers

IPI : indice de portance immédiat

ICBR : Indice Portant Californien (Californian Bearing Ratio)

Ip : Indice de plasticité

L.A : Coefficient Los Angeles

M.D.E : Coefficient Micro - Deval en présence de l'eau

OPM : Optimum Proctor modifié

E : Module de Young

ES : Equivalent de sable

V.B : Valeur au bleu de méthylène

w : Teneur en eau exprimée en %

Wl : Limite de liquidité

Wopm : Teneur en eau optimale Proctor modifié

Wp : Limite de plasticité

γ_{dmax} : Densité sèche optimale de l'essai Proctor

GTS : guide des traitements des sols.

CDF : Couche de forme.

MTLH : matériau traité au liant hydraulique.

IPI : Indice portant immédiat.

CBR : California Bearing Ratio.

Liste des figures

<i>Figure I.1 Classification des matériaux selon le GTR.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure II. 2-Schéma du mécanisme observé lors du traitement (Kouidri, 2000).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure II. 3-Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure III. 1 Etats de consistance d'un sol – Limites d'Atterberg - d'après le cours de mécanique des sols de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure III. 2 Exemple d'une Courbe Proctor.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure IV. 1 Courbe granulométrique.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure IV. 2 Courbe de la teneur en eau en fonction de l'Enfoncement.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure IV. 3 Courbe Proctor.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure IV. 4 IPI en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure V. 1 Courbe Proctor avec 3% de chaux.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure V. 2 IPI en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>38</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I. 1-Performances recommandées en couche de fondation et en couche de base...</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I. 2-Coefficients empiriques en fonction de la nature de liant utilisé.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau II. 1-Critères retenus pour l'adaptation d'un sol au traitement [LCPC2000].....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau II. 2-Récapitulatif des actions des liants</i>	<i>17</i>
<i>Tableau III 1-Classes principales du GTR.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau. IV. 1Résultats d'essai Limites d'Atterberg</i>	<i>32</i>
<i>Tableau.IV. 2 Classification des sols selon l'IP.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau.IV. 3 Résultats des essais chimiques.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau.IV. 4Classification selon la matière organique.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau.IV. 5 Classification selon la teneur en carbonate.....</i>	<i>36</i>

Bibliographie

Bibliographie

Gueridi.F (08/12/2009). Stabilisation des sols à la chaux:Détaremination du taux optimal,Ecole nationale supérieure des Travaux publics-Kouba-Alger-Algérie.

SERTIER, N. (2006). Amélioration des sols. Université de la réunion, France.

SETRA, LCPC. (2000, Juillet). GTR. Réalisation des remblais et des couches de forme. Ministère de l'équipement, du logement et des transport.

SREKMA, M. (2009). Mémoire de magister . CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA STABILISATION PAR LA CHAUX DES TUFES GYPSEUX ET GYPSO-CALCAIRES. Alger, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie.

Taibi. (1985). Thèse de Doctorat. Stabilisation des sols par des liants hydrauliques : Modélisation du comportement mécanique. Lyon, INSA.

Bull .liaison Labo P et Ch (sept-oct 1984) Etude en laboratoire du traitement à la chaux et au ciment des sols fins.

Syndicat Mixte d'Action pour 'Expansion de la Gâtine (2011) guide de la définition et des bons usages des matériaux de revêtement et du petit mobilier urbain relatif à l'espace publics.