

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Minier

Laboratoire : LafargeHolcim (CDL)

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

Traitement des sols aux liants hydrauliques : ARDIA 600 et CHAUX

Rami CHAHNA

Sous la direction de : - M. Malek OULD HAMOU PhD

- M. Billel BERKIA Ingénieur .

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2018)

Composition du Jury :

Présidente : Mme MERCHICHI Amira MAA - Ecole Nationale Polytechnique

Rapporteur/ Promoteur : M. Malek OULD HAMMO MCA - Ecole Nationale Polytechnique

Examineur : M. BENKACI Djamel MAB - Ecole Nationale Polytechnique

Invité : M. BERKIA Billel

ENP 2018

Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach 16200 Alger

Alegria

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Minier

Laboratoire : LafargeHolcim (CDL)

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

Traitement des sols aux liants hydrauliques : ARDIA 600 et CHAUX

Rami CHAHNA

Sous la direction de : - M. Malek OULD HAMOU PhD

- M. Billel BERKIA Responsable solution route et infrastructure
(Lafarge Algérie).

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2018)

Composition du Jury :

Présidente : Mme MERCHICHI Amira MAA - Ecole Nationale Polytechnique

Rapporteur/ Promoteur : M. Malek OULD HAMMO MCA - Ecole Nationale Polytechnique

Examineur : M. BENKACI Djamel MAB - Ecole Nationale Polytechnique

Invité : M. BERKIA Billel

ENP 2018

Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach 16200 Alger

Alegria

Remerciements

Dans le cadre de la formation d'ingénieur d'état dans le domaine de génie minier à l'école nationale polytechnique d'Alger, j'ai la chance de réaliser mon projet de fin d'étude au sien de laboratoire de développement de la construction(CDL) durant 4 mois.

En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribués au bon déroulement de mon stage de fin d'étude et à l'élaboration de ce modeste travail. dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire

Je tiens à présenter mes remerciements à dieu le tout puissant, qui a éclairé ma voie par le savoir, et qui m'a armée d'une bonne foi.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à l'ensemble du personnel du laboratoire de **LAFARGE (CDL)** pour leur patience, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont portaient à mes travaux.

À monsieur : **OULD HAMMO Malek**, mon encadreur à l'école **Polytechnique d'Alger** (ENP), **BERKIA Bilal** , Responsable solution route et infrastructure (Lafarge Algérie), mon encadreur au laboratoire de **LAFARGE (CDL)**, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour l'encadrement exemplaire qu'il a porté à mon travail durant la période du projet de fin d'étude.

Je tien a remercier avec plus grande gratitude aux membres du jury monsieur **BENKACI Djamel** et madame **MERCHICHI Amira** .

Je remercie toutes les enseignantes et tous les enseignants de mon établissement spécialité génie minier de l'école polytechnique d'Alger, pour le travail énorme qu'il effectue pour me créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de mes études.

A monsieur :

- Khedim Hichem responsable de réseau académique de vouloir m'accorder ce stage, ainsi qu'aux techniciens :

-**Mr Daoud Samir, Mr Toufik, Mr Rafik, Mr Nabil** à qui j'exprime ma profonde gratitude pour leur encadrement exemplaire et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail durant toute la période du stage.

Vifs remerciements vont également à l'ensemble du personnel de **LAFARGE**, pour leur amabilité, leur disponibilité à répondre à mes questions à chaque fois que je les sollicite.

Je souhaite beaucoup du succès pour le groupe LAFARGE .

ملخص

تم الشروع مؤخرا في إطلاق برنامج كبير جدا في بناء الطرق ، و هذه المشاريع تتطلب استخدام كميات كبيرة من مواد ذات نوعية جيدة ، والتي لا تتوفر دائما في المنطقة المجاورة للمشاريع لإنشاء طبقات الطريق تعتمد التقنية الجديدة على استخدام روابط هيدروليكية لمعالجة التربة في مكانها ، وهذا هو الهدف ، فمن المثير للاهتمام استخدام المواد المحلية مع تقنية العلاج وذلك للتغلب على عدم وجود المواد النبيلة ، من ناحية والاستجابة للجوانب الاقتصادية والبيئية من ناحية أخرى.

كلمات مفتاحية الروابط الهيدروليكية . معالجة التربة . الجبس .

Abstract

Recently, a very consistent program has been launched, in terms of road construction, however, these projects require the use of large quantities of good quality materials, which are not always available in the vicinity of the projects for the used to achieve Pavement layers using hydraulic binders for soil treatment in place. This is the technique of soil treatment with hydraulic binders, this is the main reason why, we have undertaken this study which allows us not only to valorize local materials by this technique of soil treatment and bearing the deficit in materials noble, on the one hand, but also to respond to economic and environmental aspects, on the other.

Key Words : hydraulic binders , soil treatment , lime

Résumé

Récemment, un programme très consistant a été lancé, en matière de réalisation des routes, cependant, ces projets nécessitent l'utilisation de grandes quantités de matériaux de bonne qualité, qui ne sont pas toujours disponibles au voisinage des projets pour les utilisées afin de réaliser des couches de chaussées en utilisant des liants hydrauliques pour le traitement de sols en place. C'est la technique de traitement des sols aux liants hydrauliques , C'est la raison principale pour laquelle, nous avons entrepris cette étude qui nous permet non seulement de valoriser les matériaux locaux par cette technique de traitement des sols et palier au déficit en matériaux nobles, d'une part mais aussi de répondre aux aspects économiques et environnementaux, d'autre part.

Mots clés : Liants Hydrauliques, traitement des sols, Chaux

TABLE DE MATIERE

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des notations

Introduction Generale	12
1 Chapitre 01 : Généralités	15
1.1 Contexte de l'étude.....	15
1.1.1 Introduction	15
1.1.2 Constitution des chaussées.....	15
1.1.3 Classification des matériaux constructifs d'une couche de remblais.....	17
1.2 Recherche Bibliographique	19
1.2.1 Les liants hydrauliques	19
1.2.2 Rappel sur les sols.....	19
1.2.3 Le traitement des sols aux liants hydrauliques	21
1.3 Les produits de traitement	25
1.3.1 Liants utilisés.....	25
1.3.2 Actions des liants.....	28
1.4 Technique de traitement	31
1.4.1 Quel traitement à choisir ?	31
1.4.2 La technique de traitement et le matériel de traitement.....	31
1.5 Conclusion.....	35
2 Chapitre 02 : Description des différents essais	37
2.1 Introduction	37
2.2 Caractérisation des sols	37
2.2.1 Les paramètres de nature :	37
2.2.2 Les paramètres d'état des sols :	38
2.2.3 Les paramètres de comportement	38
2.3 Essai sur laboratoire	39
2.3.1 Essais d'identification du sol	39

2.3.2	Etude de vérification de l'aptitude d'un sol au traitement	39
2.3.3	Etudes de formulation.....	39
2.4	Essais d'identification du sol :	40
2.4.1	Teneur en eau	40
2.4.2	Granulométrie.....	41
2.4.3	Valeur de bleu de méthylène.....	42
2.4.4	Limites d'Atterberg	44
2.5	Essai Proctor.....	47
2.5.1	Mode opératoire.....	48
2.6	Essai CBR	51
2.6.1	Conditions d'essai	51
2.6.2	Principe de l'essai	52
2.6.3	Appareillage	53
2.7	Aptitude au traitement	56
3	Chapitre 3 : Partie expérimentale	58
3.1	Introduction	58
3.1.1	Matériaux réceptionnés.....	58
3.1.2	Programme d'essais	59
3.2	Essais d'identification de sol	59
3.2.1	Essai d'Atterberg	59
3.2.2	L'essai granulométrique	60
3.2.3	Essai de Bleu de méthylène	62
3.2.4	Résultats de l'identification des sols	64
3.3	Essai Proctor normal.....	66
3.3.1	Expression des résultats	66
3.4	L'essai CBR :	70
3.4.1	Traitement de sol B5 : traitement au 1,5 % de liant hydrauliques Routière ARDIA 600. ...	70
3.4.2	Résultats de Traitement de sol B5.....	72
3.4.3	Traitement de sol A3 : traitement au 1,5 % Clinker + 4% ARDIA 600	73
3.4.4	Résultats de Traitement de sol B5.....	75

3.5	Essai Aptitude au traitement (NF P94-100 ; NF EN 13286-42 ; NF EN 13286-49)	76
3.5.1	Détermination du gonflement volumique Gv.....	76
3.6	Le délai de maniabilité	79
3.6.1	Interprétation des résultats	80
3.7	Accumulation des résultats	80
3.7.1	Résultats de Traitement de sol B5.....	80
3.7.2	Résultats de Prétraitement de sol A3	81
3.7.3	Interprétation des résultats	82
	Conclusion Générale	84
	Bibliographie	85
	Annexes	89

Liste des tableaux

Tableau 1 Récapitulatif des actions des liants	30
Tableau 3 Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié	49
Tableau 4 document de Lafarge des sols a traité	58
Tableau 5 classement des sols selon l'indice de plasticite	59
Tableau 6 Analyse granulométrique de premier sol (B5)	61
Tableau 7 Analyse granulométrique de deuxième sol (A3)	61
Tableau 8 Identification des sols traite	64
Tableau 9 Résultats des essais Proctor sur le sol B5.....	68
Tableau 10 Résultats des essais Proctor sur le sol A3	69
Tableau 11 Résultats des essais Proctor Des sols A3 et B5	70
Tableau 12 resultats des essais IPI CBR de traitement au 1,5 % de LHR ARDIA 600.	71
Tableau 13 Résultats IPI et CBR de Traitement de sol B5	72
Tableau 14 Resultats IPI et CBR de traitement de sol A3 avec 1,5 % Clinker + 4% ARDIA 600	74
Tableau 15 Résultats IPI et CBR de Traitement de sol A3	75
Tableau 16 Resultats apttitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia 600.....	77
Tableau 17 Resultats apttitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia B	77
Tableau 18 Calcules des Resultats apttitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia 600	77
Tableau 19 calcules des Resultats apttitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia B	78
Tableau 20 Critères pour l'interprétation de l'apptitude au traitement	78
Tableau 21 calcules des Resultats apttitude au traitement du Sol Avec 1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600 ..	78
Tableau 22 résultats de l'essai délai de maniabilité pour le Dosage sol + 1,5 ARDIA 600	79
Tableau 23 Résultats de Traitement de sol B5.....	81
Tableau 24 Résultats de Traitement de sol A3	82
Tableau 25 Criteres de traitement de sols au liants hydrauliques pour la couche de remblais	82

Figures

Figure 1 Coupe d'une route (d'après le GTR).	16
Figure 2: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature ($D \leq 50$ mm).	18
Figure 3Tétraèdre et couche tétraédrique	20
Figure 4 Octaèdre et couche octaédrique.....	21
Figure 5 Cycle de la chaux	26
Figure 6 Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol	30
Figure 7 Epandeur de liant hydraulique.....	32
Figure 8 Recycleur WR.....	33
Figure 9 Malaxage Liant/sol.....	33
Figure 10 tendame dame a bandage lisse.....	34
Figure 11 niveleuse de réglage	34
Figure 12 un rouleau tendame	34
Figure 13 un rouleau a bandage caoutchouc	34
Figure 14 PROTECTION de la surface	35
<i>Figure 15 analyse granulométrique d'un grave argileux</i>	<i>41</i>
Figure 16 : Matérielles utilisées dans l'essai de bleu de méthylène	42
Figure 17 : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène (d'après CEN test Methods (1) – MAT 1 - CT 93-0040 (1993-1997) DGXII of the European Commission)	43
Figure 18 Appareillage pour essai au bleu de méthylène	
Figure 19 Essai au bleu de méthylène à la tache.....	43
Figure 20 Limites d Atterberg	45
Figure 21 Appareil de Casagrande	46
Figure 22 Réalisation de la rainure dans la pâte de sol	
Figure 23 Fermeture des lèvres sur ± 1 cm apres application	46
<i>Figure 24 : Choix du type de moule</i>	<i>48</i>
Figure 25 Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche	50
Figure 26 moule CBR	53
Figure 27 machine proctor	53
<i>Figure 28 : presse de poinçonnement.....</i>	<i>54</i>

Figure 29 Schéma de principe de l'essai CBR.....	56
Figure 30 Coupe transversale du terrain Alger <sidi Abdellah>.....	58
<i>Figure 31 Analyse granulométrique de sol B5</i>	61
Figure 32 Analyse granulométrique de sol A3	62
Figure 33 Tableau synoptique de classement de premier sol	65
Figure 34 Tableau synoptique de classement de deuxieme sol	65
Figure 35 courbe proctor sol B5 (1,5 % Ardia 600)	67
Figure 36 courbes des essais proctor sur le sol B5	68
Figure 37 courbe proctor sol A3 (1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600).....	68
Figure 38 courbes des essais proctor sur le sol B5	69
Figure 39 courbes des résultats de l'essai IPI sol avec 1,5 ardia 600.....	71
Figure 40 courbes des résultats de l'essai Icbp après immersion sol avec 1,5 ardia 600	71
Figure 41 résultats de l'essais IPI et Icbp après immersion sol B5.....	73
Figure 42 courbe des résultats de l'essai IPI sol avec 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600	74
Figure 43 courbes des résultats de l'essai ICBP sol avec 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600	74
Figure 44 résultats de l'essais IPI et Icbp après immersion sol A3	75
Figure 45 Le délai de maniabilité sol + 1,5 % ARDIA 600.....	80

Liste des notations

Symbole	Désignation	Unité
CBR	California Bearing Ratio	--
Pd	densité sèche	T/m ³
Dmax :	Diamètre du plus gros élément	mm
GTR	guide de terrassements routière	--
IPI	indice portant immédiat	--
Ip :	Indice de plasticité	%
LHR :	Liant Hydraulique Routier	--
WL :	Limite de liquidité	%
WP :	Limite de plasticité	%
T :	Température °C	°C
W :	Teneur en eau	%
Wnat :	Teneur en eau naturelle	%
WOPM :	Teneur en eau optimum Proctor	%
VBS :	Valeur au bleu de méthylène	g de bleu/100g de sol

Introduction Générale

Introduction Générale

La connaissance de la stabilisation du sol en géotechnique a été bien documentée. Des articles et des manuels sur les techniques de stabilisation sont à la disposition des étudiants, ingénieurs praticiens et consultants dans le domaine de géotechnique.

Lors de la stabilisation de sol la formation des poussières due à des liants agressifs n'est pas une obligation pour cela des études de sols a été faites pour trouver le solution à ce problème , l'entreprise a investi en recherche et développement depuis plusieurs années déjà elle est notamment tourner vers les techniques de stabilisation des sols à l'aide du liants hydrauliques , La technique de traitement de sols à la mise en place de la chaux et/ou liants hydrauliques pour améliorer les caractéristiques de sol ,cette technique connaît un grand développement depuis une vingtaine d'années, avant de faire son apparition en Algérie . Le traitement des sols à l'aide des produits tels que la chaux et/ou liants hydrauliques et/ou ciments permet la réalisation des couches de remblais et des couches de forme. Ce type de traitement nécessite de bien connaître le matériau que l'on souhaite traiter.

La construction routière nécessite une grande quantité de matériaux pour réaliser non seulement les couches de chaussées mais surtout les remblais et les couches de formes, pour réaliser le profile en long. Il y a 2 méthodes sont utilisées

- Avec apport de granulats.
- Ou avec le traitement des sols en place.

La technique d'apport de granulat nécessite de faire appel à une grandes quantités des camions pour, d'une part, mettre a la décharge les sols excédentaires et d'autre part , acheminer sur le chantier des granulats en grande quantité .or ,la raréfaction des ressources en granulats et les nuisances générées par les transports ont incite les décideurs à valoriser les sols en place par un traitement aux liants hydrauliques

Récemment, un programme très consistant a été lancé, en matière de réalisation des routes , cependant, ces projets nécessitent l'utilisation de grandes quantités de matériaux de bonne qualité, qui ne sont pas toujours disponibles au voisinage des projets pour les utilisées pour réaliser des couches de chaussées en utilisant des liants hydrauliques pour faire le traitement de sols en place, C'est la raison pour laquelle, il est intéressant de valoriser les matériaux locaux par une technique de traitement et cela pour palier au déficit en matériaux nobles, d'une part et de répondre aux aspects économiques et environnementaux, d'autre part.

Le traitement des sols aux liants hydrauliques et à la chaux est un procédé qui améliore la maniabilité des matériaux, Cette technique de traitement permet d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des sols après compactage. Les avantages de cette technique sont surtout connus dans les terrassements et sont mis à profit pour la construction des remblais routiers, autoroutiers, ferroviaires, plates-formes industrielles, etc. Les applications dans le domaine des ouvrages hydrauliques sont moins répandues, la raison pouvant résider dans le peu

d'éléments disponibles jusqu'à présent sur le comportement des sols traités à la chaux dans un tel contexte.

Le traitement de sols aux liants hydrauliques est devenu une pratique courante dans le domaine de réalisation des chaussées. Cette technique présente des avantages techniques, économiques et environnementaux. Le traitement de sols permet d'épargner les ressources de granulats naturels, de limiter le transport de matériaux et de réutiliser les sols en place, souvent trop humides et peu portants.

Durant cette thèse on va parler sur les généralités de la technique de traitement de sols aux liants hydrauliques et à la chaux au chapitre 1 et au chapitre 2 on va présenter les différents essais effectués à laboratoire puis on va interpréter les résultats obtenus au chapitre 3.

L'étude expérimentale menée montre que les liants hydrauliques et la chaux agissent, d'une façon très significative, sur l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques du matériau traité.

CHAPITRE 01

Généralités

1 Chapitre 01 : Généralités

1.1 Contexte de l'étude

1.1.1 Introduction

La nécessité d'utiliser les sols devient de plus en plus une exigence pour les structures routières. Ce besoin n'a fait que croître au cours de ces dernières décennies. La méthode traditionnelle de réalisation des chaussées qui consiste à effectuer une réhabilitation par apport de matériaux supplémentaires à cause de la qualité du sol de chaussée qui ne présente pas la qualité d'usage souhaitée. Cette méthode nécessite de faire appel à une grande quantité de camions. Et elle a beaucoup d'inconvénients économiques et environnementaux. Pour cela, il y a une nouvelle technique qui permet de faire le traitement de sol en place. Cette technique permet de reconstituer une nouvelle couche de qualité et constitue une alternative intéressante à la méthode traditionnelle.

La stabilisation des sols aux liants hydrauliques (LHR), et plus particulièrement aux ciments est apparue dès le début des années 1950, dans plusieurs pays tropicaux, comme technique économique pour constituer des assises de chaussée dans des zones dépourvues de granulats (et de moyens financiers). Elle a été pratiquée notamment aux U.S.A. puis en Grande-Bretagne et en Allemagne sous le nom de sol ciment, plusieurs années avant de faire son apparition en Algérie. [1]

1.1.2 Constitution des chaussées

1.1.2.1 Les différentes couches

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée du sol terrassé (dit sol support) surmonté généralement d'une couche de forme.

Le classement de sol est une étape obligatoire au traitement de sol pour cela il y a plusieurs systèmes de classification des sols. La classification ASTM (American Society for Testing and Materials) continue d'être utilisée ici et là, mais elle est très sommaire. Le système français du Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme », couramment appelé GTR [2] qui présente une coupe type d'une route (figure 1).

On distingue : à la couche de remblais qui est au fond c'est cette couche qui nous intéresse. Le GTR donne les caractéristiques des matériaux et précise les types de leurs retenus (argileux, rocheux, sableux, limoneux, ...)

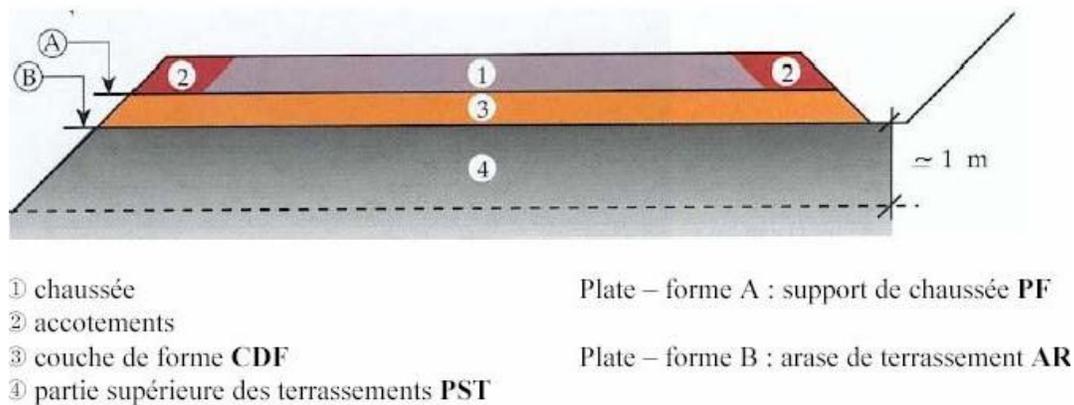


Figure 1 Coupe d'une route (d'après le GTR).

Les méthodes de stabilisation utilisées à l'étranger ont en effet donné lieu à des critiques, intéressant tant la durabilité des réalisations que les prix de revient d'application des sols ciment. Avant de les admettre au rang de technique routière d'intérêt général, les ingénieurs français ont donc multiplié les études théoriques, les essais de laboratoire, les chantiers expérimentaux. Ces recherches ont abouti à la mise au point de techniques mieux adaptées aux conditions économiques et naturelles de notre pays. On s'est orienté en Algérie sur des méthodes utilisant des dosages de liants nettement plus faibles que les méthodes étrangères. Ces méthodes, qu'on peut nommer techniques des sols traités ou améliorés aux liants hydrauliques, connaissent maintenant un essor spectaculaire et il n'est plus permis à quiconque s'intéresse aux problèmes d'équipement routier de les ignorer en raison des services qu'elles peuvent rendre. [1]

1.1.2.2 Types de remblai

a) Remblai d'argile

L'argile prenant beaucoup de temps à se tasser d'elle-même, chacune des couches doit être bien densifiée et ne doit pas dépasser 30 cm d'épaisseur pour faciliter le travail. Comme toujours, chaque couche doit être déposée sur la pleine largeur du remblai. Si l'argile est trop sèche, elle doit être arrosée et parfois scarifier pour faciliter la pénétration de l'eau. Si l'argile est trop humide, elle doit être asséchée par hersage ou par scarification.

On peut aussi l'assécher en la saupoudrant de chaux. Par temps pluvieux, on peut étendre sur une couche d'argile déjà posée une couche de sable de 15 à 30 cm d'épaisseur, ce qui permet l'assèchement et facilite la circulation des engins de construction.

Lorsqu'on dispose de matériaux argileux et de matériaux granulaires pour la préparation d'un remblai, il est préférable de placer les matériaux granulaires à la base, à cause de leur poids plus élevé que celui de l'argile.

Chapitre 01 : Généralités

b) Remblai d'enrochement

Tout remblai fait de blocs de rocher provenant de Carrière doit être érigé avec soin, car il doit tasser une fois la route réalisée. Les blocs ne doivent pas dépasser 1m. Ils sont placés en couches d'un mètre d'épaisseur sur la pleine largeur du remblai (le roc schisteux est placé en couche de 45 cm d'épaisseur). La dernière couche sous la ligne de sous fondation doit avoir 30 cm d'épaisseur et être composée de pierres dont le diamètre ne dépasse pas 15 cm. Chacune des couches doit être bien compactée ou roulée uniformément avec l'outillage de construction.

c) Remblai d'emprunt

Tout remblai est construit avec les matériaux provenant des déblais ou des gites d'emprunt. On appelle ordinairement les emprunts qui sont faits de matériaux quelconques, mais utilisables pour la construction d'une route ; on appelle emprunts granulaires ceux qui sont faits de sable, gravier ou pierre.

On doit évaluer la capacité portante du sol avant de commencer l'approvisionnement en matériaux de remblai et, si c'est nécessaire, le consolider ou le compacter. Tous les matériaux doivent être déposés sur la pleine largeur des remblais, en couches uniformes d'une épaisseur maximale de 30 cm après tassement. Le remblayage dans l'eau doit être exécuté en une seule couche, jusqu'à 60 cm environ au-dessus de la surface de l'eau, avec un emprunt granulaire. Les ornières causées par les engins de construction doivent être éliminées à chaque niveau. Chacune des couches du remblai doit être compactée séparément en fonction de la densité exigée. La surface de chacune des couches doit avoir une pente de 2% vers les fossés ; dans les courbes horizontales la pente est celle du dévers. Cette surface doit être égouttée et libérée de glace ou de neige avant la pose d'une nouvelle couche. [16]

1.1.3 Classification des matériaux constructifs d'une couche de remblais

Les différents systèmes de classifications géotechniques des sols et des matériaux rocheux proposés jusqu'à présent ont été établis avec le souci de servir l'ingénieur dans l'ensemble des différents domaines de la réalisation des chaussées où ces matériaux sont concernés, et L'utilisation des sols en remblai au traitement des sols aux liants hydrauliques est liée directement à leur classification et à leur comportement pour cela il faut toujours passer par le GTR lors de leur mise en place. Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, 1992) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (septembre 1992) fournissent une liste exhaustive des matériaux susceptibles d'être utilisés pour la réalisation d'une couche de remblais proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais pour les infrastructures routières. Pour le remblai Le GTR propose l'étude complémentaire de réutilisation de matériaux à caractère évolutif (roches carbonatées, argileuses, certaines roches...). Il recommande notamment l'application d'une nouvelle rubrique G concernant une action sur la granularité (D max) selon différentes techniques. [14]

On distingue trois catégories d'essais :

Chapitre 01 : Généralités

→ Les essais d'identification ou de nature

→ Les essais d'état

→ Les essais de comportement mécanique.

Ces essais seront choisis en fonction de la classe du matériau. La classification des sols répartis entre 4 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.

NORMES A CONSULTER :

NF P 11 - 300 : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

NF P 94 - 051 et 052 : Détermination des limites d'Atterberg

NF P 94 - 068 : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache.

NF P 94 - 078 : Indice CBR Immédiat, Indice Portant Immédiat, etc...

NF P 94 - 093 : Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié.

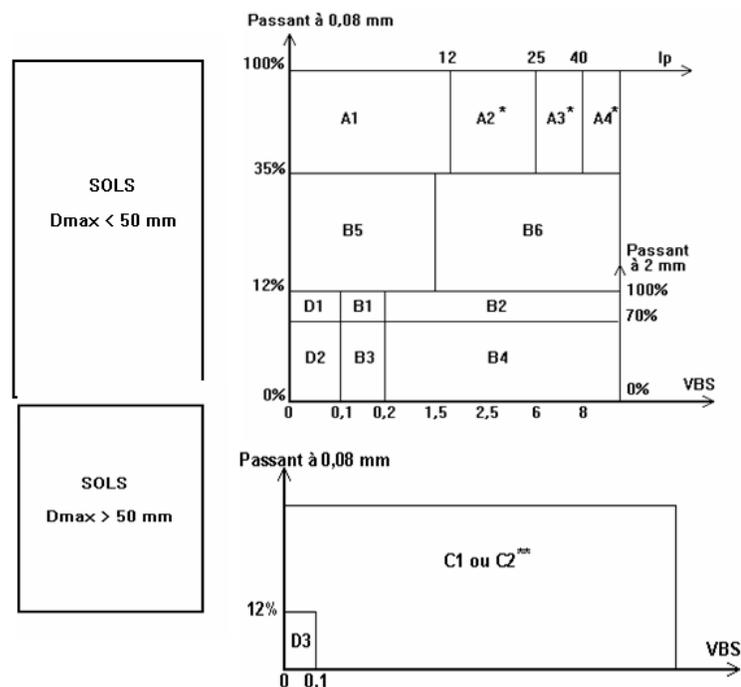


Figure 2: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature .

Chapitre 01 : Généralités

1.2 Recherche Bibliographique

1.2.1 Les liants hydrauliques

Le liant hydraulique est utilisé dans le traitement de sols pour donner des propriétés désirables aux sols (physiques, chimique, mécanique ...), il se forme par réaction chimique avec de l'eau, le liant hydraulique avec de l'eau et les grains de sol il forme des liaisons entre ses grains. Il est utilisé dans la construction et dans l'industrie routière afin de répartir la pression uniformément sur toute la surface des particules. Il y'a trois types de liants hydrauliques connues :

→ La chaux

Les Romains sont arrivés à créer un véritable liant hydraulique à durcissement lent en mélangeant de la chaux grasse à des cendres volcaniques d'origine récente, riches en silice et en alumine, qu'ils trouvaient au pied de Vésuve à Pouzzoles (Pozzuoli à côté de Naples ; d'où le terme Pouzzolane). On avait observé au 17^e et au 18^e siècles, sans pouvoir l'expliquer, que certaines chaux dites "maigres" obtenues à partir de calcaires impurs, résistaient mieux que les chaux grasses provenant de calcaires trop purs (et qu'elles pouvaient même légèrement durcir sous l'eau). Louis Vicat, grâce à des recherches commencées en 1812, montra que pour obtenir des chaux hydrauliques, il fallait que la matière première utilisée contienne une certaine proportion d'argile. [5]

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur, qui porté à une température de plus de 1000 degrés, et suite à une réaction chimique, se décompose en chaux vive et en gaz carbonique.

→ Le ciment et le clinker

Le ciment est une poudre minérale fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très

précis, il est un liant hydraulique obtenu par cuisson (à 1450°C) et broyage d'un mélange de calcaire et d'argile.

Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % d'aluminosilicates

→ Les liants hydrauliques routiers

Ce produit est un liant hydraulique utilisé dans les routes pour le traitement des sols routières il est de forme des poudres finement brayées qui avec le contact d'eau font prise et durcissent sous des processus physico-chimiques complexes.

1.2.2 Rappel sur les sols

Les sols en général, sont constitués principalement des minéraux silicatés (le quartz, les argiles, les feldspaths, les micas), Les sols sont des matériaux complexes qui contiennent à la fois

Chapitre 01 : Généralités

une phase Solide (particules minérales ou organiques), une phase liquide (eau interstitielle chargée en éléments solubles) et une phase gazeuse. Ils sont constitués de particules regroupées en agrégats. Généralement, les minéraux rencontrés sont le quartz, les minéraux argileux, les feldspaths (potassiques et plagioclases), les micas, les carbonates (calcite et dolomite) et hydroxydes métalliques dont l'hématite et la goethite. Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous la forme :

- de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres ;
- de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns.
- d'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux qui les constitue.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques entre elles et avec l'eau.

L'étude des sols argileux intéresse plusieurs disciplines. Pour le domaine du génie civil (constructions et travaux routiers), le sol est valorisé comme un matériau de construction. L'étude géotechnique d'un sol argileux comporte une identification de la minéralogie et une détermination des caractéristiques mécaniques, hydriques et hydromécaniques du sol traité. Dans les travaux du traitement des sols argileux, l'étude de la minéralogie, principalement le minéral argileux, est nécessaire pour comprendre les différentes interactions avec les agents chimiques du traitement.

• Les argiles

Les argiles sont des phyllosilicates hydratés formés par l'association de feuillets élémentaires qui s'accrochent entre eux pour former des éléments. Ces derniers se rassemblent par des dispositions face-face ou/et face-bord pour former des particules argileuses. L'espace entre deux feuillets argileux est appelé espace inter foliaire ou inter lamellaire. Les feuillets (unités) élémentaires des phyllosilicates sont :

- 1) le tétraèdre, de formule générale SiO_4 , composé de quatre atomes d'oxygène enserrant un atome de silicium. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques [15]
- 2)

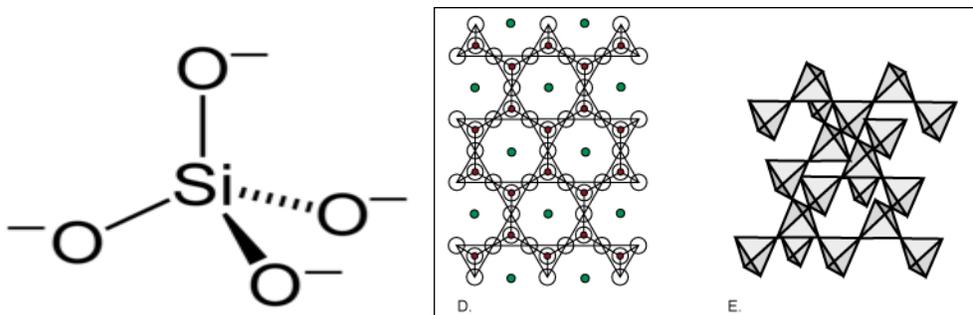


Figure 3Tétraèdre et couche tétraédrique

Chapitre 01 : Généralités

L'octaèdre, de formule générale Al_2O_6 , formé de six groupements hydroxyles enserrant deux atomes d'aluminium. Ces octaèdres se combinent entre eux pour former des couches octaédriques

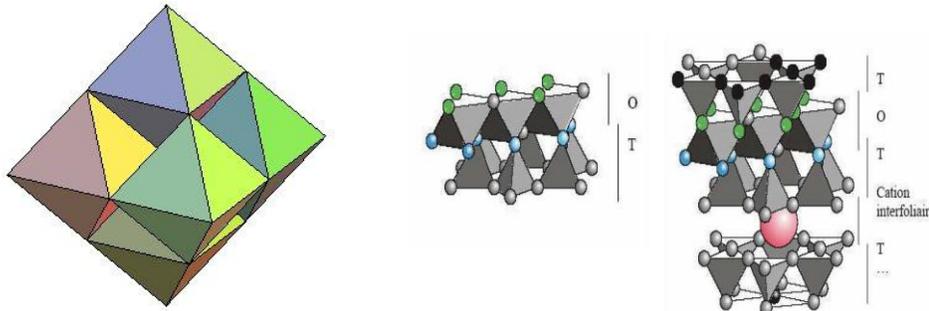


Figure 4 Octaèdre et couche octaédrique

C'est l'association de couches tétraédriques (T) et de couches octaédriques (O) qui constitue le motif du réseau cristallin de chaque argile. Il est possible que des substitutions isomorphes aient lieu au sein des tétraèdres (le silicium Si^{4+} peut être remplacé par l'aluminium Al^{3+} ou du fer Fe^{3+}) et des octaèdres (l'aluminium Al^{3+} peut être remplacé par le magnésium Mg^{2+} ou du fer Fe^{2+}).

En général, en mécanique des sols, trois grands types d'argiles sont identifiés : la kaolinite, la smectite et l'illite. Le feuillet élémentaire de la kaolinite comporte une couche tétraédrique surmontée d'une couche octaédrique. Son épaisseur est de 7\AA . Chaque feuillet est relié à un autre feuillet par l'intermédiaire des liaisons de type hydrogène ce qui peut être qualifié par des liaisons fortes. La propriété de cette liaison est d'induire une cohésion au cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets. Les argiles de cette famille sont nommées argiles T-O.

Le deuxième groupe d'argiles est celui de la smectite. Le feuillet de la smectite est composé de trois couches : une couche octaédrique encadrée par deux couches de tétraèdres. L'épaisseur du feuillet est de 10\AA . Il n'existe pas de liaison hydrogène entre deux feuillets élémentaires ni de cation inter lamellaire capable de maintenir fortement les feuillets entre eux. L'argile de cette famille dites argiles T-O-T. Le troisième groupe est celui de l'illite. Cette argile est de famille T-O-T dont les feuillets formés à trois couches. Les liaisons entre deux feuillets se font par des ions potassium énergiquement fixés. [15]

1.2.3 Le traitement des sols aux liants hydrauliques

Le traitement des sols est une nouvelle technique consiste à mélanger un sol avec de la chaux et/ou un liant hydraulique routière LHR. Cette technique permet d'améliorer les caractéristiques du sol pour qu'il soit solide, et possède des propriétés favorables, le but de cette technique est d'utiliser le sol impropre et inutilisable et le donner avec le liant hydraulique des

Chapitre 01 : Généralités

nouvelles caractéristiques désirable. Par ailleurs, cette technique conduit à préserver l'environnement : en utilisant les matériaux du site, on sauvegarde les ressources naturelles nobles (roches massives) et on réduit les nuisances (pas de circulation de camions de transport sur les voiries publiques). [3]

La réalisation des traitements de sols se fait suivant le cas de chantier et exige un certain nombre d'opérations élémentaires qu'il faut une bonne organisation précise, un savoir-faire et des matériels pacifiques.

Dans tous de traitement à la chaux, aux clinkers ou aux LHR il convient de :

- déterminer les dosages nécessaires pour atteindre les performances mécaniques escomptées par une étude de laboratoire
- déterminer le choix du ou des produits de traitement.
- La teneur en eau du mélange sol-liant dans laquelle il est susceptible atteindre ces résistances (de s'assurer de la constance dans le temps des liaisons conçues grâce au traitement). [16]

1.2.3.1 Domaine des sols traités aux liants hydrauliques

La technique de retraitement en place est destinée à toute structure routière (routes nationales, autoroutes, chaussées urbaines, zones portuaires, . . .). Il est essentiel de ne pas assimiler les sols ciment aux bétons maigres. Les principales différences tiennent moins aux dosages en ciment qui peuvent être du même ordre dans les deux cas puisqu'on réalise des bétons maigres à partir de 8-10 % de ciment alors qu'on peut doser à plus de 10 % certains sols ciment qu'à la nature des matériaux utilisés et au comportement de l'assise sous le trafic. La fabrication du béton maigre exige l'emploi des granulats classiques du béton alors que la préparation d'un sol ciment se fait à partir d'un sol c'est-à-dire d'un mélange d'éléments de toutes dimensions. D'autre part, une assise de béton est une assise rigide dont la résistance mécanique se calcule par les formules de la résistance des matériaux. On dit qu'elle produit « un effet de dalle ». Si elle se fissure, sa résistance mécanique devient sensiblement plus faible ou même nulle. Une assise de sol ciment est au contraire un élément de chaussée souple. Elle ne possède pas d'effet de dalle ou tout au moins n'en tient-on que peu ou pas du tout compte dans" le calcul de la chaussée, mais en contrepartie elle peut se fissurer par suite du retrait. Sans que sa portance et son comportement ultérieurs en soient sensiblement affectés. La fissuration est même presque constante dans les assises de sols ciment, mais elle se produit sous forme de micro fissuration qui donne à l'assise de la souplesse sans altérer sa portance. [1]

Transformer le sol existant en une couche de construction très performante ou recycler sur les chaussées d'asphalte en recyclant la route existante, sont deux exemples parfaits du concept d'économie circulaire. Les matières premières ne sont plus simplement consommées mais recyclé

Chapitre 01 : Généralités

sur place, réduisant au minimum les déchets et empêchant l'extraction des ressources naturelles. Moins de déchets, moins de matériaux et moins de transport signifie que non seulement des avantages environnementaux mais aussi économiques peuvent être obtenus. Applications inclure tous les types de routes, les chaussées portuaires et aéroportuaires et les voies ferrées.

Transformer le sol existant en des couches très performante pour les chaussées c'est un exemple parfait du concept d'économie. Quant à la distinction entre sols ciment et sols améliorés aux ciments ou aux liants hydrauliques, elle est floue et ne présente pas un intérêt majeur. Dans les normes anglaises des sols ciment on exige, pour des éprouvettes normalisées, une résistance à sept jours à la compression simple comprise entre 12,5 et 25 kg/cm². Cette prescription impose des dosages de liants généralement supérieurs à 6 %, souvent de l'ordre de 10 % et plus. Dans les sols simplement « améliorés au ciment », on cherche surtout à obtenir la persistance dans le temps des qualités routières d'une assise. Les résistances à la compression qui sont demandées une couche de chaussée dépendent de son emplacement dans le corps de la chaussée. On est plus exigeant pour une couche de base que pour une couche de fondation ou à fortiori pour une couche de forme. Dans l'ensemble, les dosages sont compris entre 3 % et même 2 % pour d'excellentes graves traitées en centrale et 7 %. De toute façon, le traitement au ciment, même à ces faibles teneurs, améliore sensiblement la résistance à la compression du sol, indépendamment des qualités très importantes, nouvelles et durables, qu'il confère à ce sol. Dans la suite de cet exposé, l'expression sol ciment sera employée dans son sens général le plus large de sol traité aux liants hydrauliques. [1]

1.2.3.2 Pourquoi le traitement de sols aux liants hydrauliques

Le traitement des sols avec aux liants hydrauliques permet de conférer à des matériaux inutilisables en remblai « argiles, limons, ... » des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme. Au sein du sol, le liant hydraulique avec de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant, par opposition au traitement mécanique, comme le compactage, qui peut se superposer au premier.

Le traitement des sols aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation. Cette technique se développe pour trois raisons :

- a-** L'amélioration de la qualité du traitement des sols fins obtenue par des engins plus efficaces pour permettre la progression du chantier ou de sols à réutiliser en remblai.
- b-** La raréfaction des matériaux granulaires et les métiers premières ainsi les élevés couts d'extraction et de transports. Ces raisons incitent à la réutilisation des sols, même s'il faut remédier à leur qualité médiocre par un dosage plus élevé en liants.
- c-** Des raisons économiques. Par exemple, une plate-forme commerciale ou industrielle construite en Algérie avec des matériaux granulaires, coûte 23 % plus cher qu'une plateforme en sols traités. (études de LAFARGE)

1.2.3.3 Les avantages du traitement des sols aux liants hydrauliques

Le traitement des sols aux liants hydrauliques routier (LHR) est une technique qui offre beaucoup d'avantages, on peut les résumés en trois :

a- Avantages économiques

Le traitement des sols aux liants hydrauliques consiste à La réutilisation des matériaux qui donne un facteur économique important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, l'apport de granulats et le coût de leur transport. Aussi cette technique est une technique de traitement à froid, donc on utilise peu d'énergie la mise en décharge. le traitement des sols en place est une technique très économique, et de la durée très courte des travaux.

b- Avantages techniques

Le traitement des sols aux liants hydrauliques permet de donnée une grande portance aux sols et de réaliser en couches de remblais et en couches de forme, une couche qui présente des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'un grave ciment, homogène, solide, durable et stable.

c- Avantages écologiques et environnementaux

Traitement à froid réduit la pollution, d'autre part cette technique utilise peu d'énergie et permet une grande économie d'énergie, par le manque de transport des matériaux, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements couteux des granulats et ressources naturelles non renouvelables. Donc préserver l'environnement. [3]

1.2.3.4 Les différents types de traitement

Il existe plusieurs types de traitements des sols, on utilise presque exclusivement les traitements suivants :

- le traitement à la chaux utilisé pour les sols fins argileux destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme ce type de traitement utilisé pour donne des propriétés géotechniques favorables éliminé le gonflement, augmente la résistance mécanique. [Les normes NF EN 459-1 et NF P 98-101]
- le traitement au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) pour les sols peu argileux utilisé en remblais ou en couches de forme. [La norme NF EN 197-1, les normes NF P 15-108 et ENV 13 282].
- le traitement mixte à la chaux puis au LHR ou au ciment destiné à une utilisation en couches de forme, parfois en couche de remblais.

Chapitre 01 : Généralités

1.2.3.5 Domaines d'utilisation selon le cas de traitement

Dans les cas des sols argileux ou fortement argileux comme les limons et argiles le traitement à la chaux est adapté pour augmenter la portance du sol et de la partie supérieure des terrassements, grâce à ses effets immédiats. Pour l'utilisation en couche de forme, le traitement utilisé est mixte.

Dans le cas des sols peu argileux, on n'utilise pas le traitement à la chaux pour réduire la teneur en eau. Ainsi, pour l'utilisation en remblai ou en couche de forme

Le traitement des sols au ciment ou au LHR convient pour une réutilisation en remblai plus importante de certains matériaux humides, comme les craies.

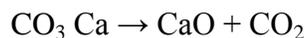
1.3 Les produits de traitement

1.3.1 Liants utilisés

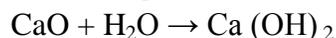
1.3.1.1 La chaux

Pendant des siècles, seuls les mortiers de chaux ou de plâtre étaient employés pour la réalisation des enduits. La chaux est un produit naturel et écologique. Elle se teinte facilement et permet d'obtenir toutes les teintes souhaitées.

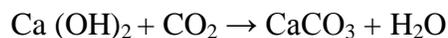
La chaux vive est un produit potentiellement dangereux, principalement employé dans l'industrie, elle est utilisée pour assécher, détruire les matières organiques riches en eau. Elle est obtenue par décarbonatation du calcaire à une température d'environ 900°C.



La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur.



La prise de la chaux dite « aérienne » s'effectue par carbonatation, c'est-à-dire en absorbant le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère : d'où son nom de « chaux aérienne »



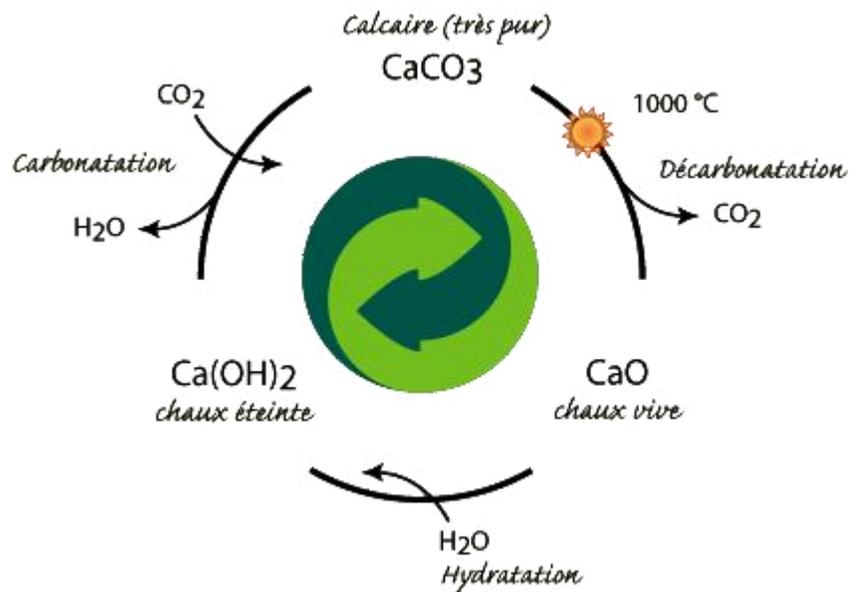


Figure 5 Cycle de la chaux

La chaux est un liant. Elle offre des avantages :

- une absorption de CO_2 lors de sa carbonatation
- un excellent comportement au feu
- écologique et naturel
- une élasticité
- une esthétique que l'on ne peut obtenir avec un autre liant
- une participation à la respiration de l'ouvrage
- un pouvoir assainissant et désinfectant
- une tenue dans le temps encore inégale (regarder les ruines romaines)

La chaux est couramment symbolisée par sa formule chimique : CaO . [6]

1.3.1.2 Les liants hydrauliques

Un liant hydraulique est un liant qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau et conserve ensuite sa résistance et sa stabilité même sous l'eau, ce que l'on nomme hydraulicité ou "prise hydraulique" et confère au sol une cohésion permanente.

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

Le ciment est un élément essentiel dans la construction qui intervient dans la composition du béton. Ce matériau joue le rôle de liant au contact de l'eau. Il est constitué en majeure partie de clinker (produit de la cuisson du mélange nommé "cru" : 80% calcaire + 20% argile).

Chapitre 01 : Généralités

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 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, matériaux argileux, craies, calcaires sablonneux, portance rapide. Ils sont classés en fonction de leur utilisation (norme NF P153108) :

Les constituants des ciments sont codés comme suit :

- clinker Portland : K
- laitier granulé de haut3fourneau : 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 : CL3Q
- chaux aérienne calcique éteinte : CL3S
- chaux hydraulique naturelle : NHL
- sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) : Cs [6]

ARDIA 600 est un liant hydraulique routier de l'entreprise LAFARGE Algérie.

Chapitre 01 : Généralités

1.3.2 Actions des liants

1.3.2.1 La chaux

Les sols argileux ou fins contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, ont des caractéristiques défavorables (le gonflement et une grande plasticité en présence d'eau), se rétractent avec la sécheresse, foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations climatiques. Ils peuvent ainsi se trouver, soit dès l'extraction, soit à la suite d'intempéries, à un degré de consistance tel que la circulation des engins devienne difficile, voire impossible, ce qui par voie de conséquence rend leur utilisation délicate. [16]

La chaux modifie les propriétés des sols fins argileux ou limoneux, grâce à ses actions immédiates et à long terme :

a) Actions immédiates

- Modification de l'état hydrique, la chaux vive et la chaux éteinte abaissent la teneur en eau en raison de :
 - L'apport de matériaux secs.
 - Vaporisation d'une partie de l'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation et par l'aération.
 - Hydratation de la chaux.
 - Modification des propriétés géotechniques des sols et de la fraction argileuse du sol.
 - L'ajoute de chaux dans un sol argileux, provoque une agglomération des fines particules argileuses en éléments plus grossiers et friables : c'est la floculation. L'incidence de ces réactions sur le mélange sol-chaux sont :
 - Réduction de l'indice de plasticité IP.
 - Une augmentation de la résistance au cisaillement (l'indice portant immédiat IPI) ;
 - Modification des caractéristiques de compactage.
 - Un matériau moins dense est plus facile à compacter qu'un matériau qui a une densité plus importante et donc qui va offrir une plus grande résistance au coup asséné par le compacteur.

b) Actions à long terme

Action pouzzolanique Les cinétiques de la prise dépendent de :

- la quantité et la nature de la fraction argileuse.
- la température du milieu
- du degré d'intimité du mélange

Chapitre 01 : Généralités

-de la présence de certains composants chimiques.

-de l'Etat hydrique du sol

1.3.2.2 Les liants hydrauliques

Le traitement des sols au ciment ou aux LHR permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux et s'appliquent à des sols fins prétraités à la chaux ou des sols peu ou pas plastiques, dont les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel. [17] les liants hydrauliques utilisées au traitement des sols a des effets immédiats et des effets à long termes.

a. Actions immédiates

Les liants hydrauliques permettent de Modifier l'état hydrique (assèchement par apport de matière sèche). Et aussi la Modification de la fraction argileuse.

b. Actions à long terme

La prise hydraulique donne au matériau traité une résistance en traction. le matériau traité au liant hydraulique est assimilable au béton de ciment, Les effets de sollicitation du sol traite au liant hydraulique au sein de la structure de chaussée sont considérés vis à vis du fluage.

La prise hydraulique se déroule en 3 étapes :

- 1) démarrage de la prise (phase dormante)
- 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. [17]

Chapitre 01 : Généralités

	CHAUX	LHR
Actions immédiate	3 abaissement teneur en eau 3 rigidités par floculation (résistance au cisaillement)	3 assèchement par apport matière sèche 3 floculation
Actions à long terme	3 prise pouzzolanique (cimentation) 3 syntaxes (pralinage)	3 prise hydraulique (résistance en traction)

Tableau 1 Récapitulatif des actions des liants

Il faut noter que la prise hydraulique de sol traité aux liants hydrauliques s'arrête dès que la température du mélange descend en dessous de 5 ° C. Car La température est un facteur important de la cinétique de prise.

Le figure qui suite 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 comporte des valeurs qui permettent de mesurer la réduction effective de la teneur en eau pour un dosage de chaux.

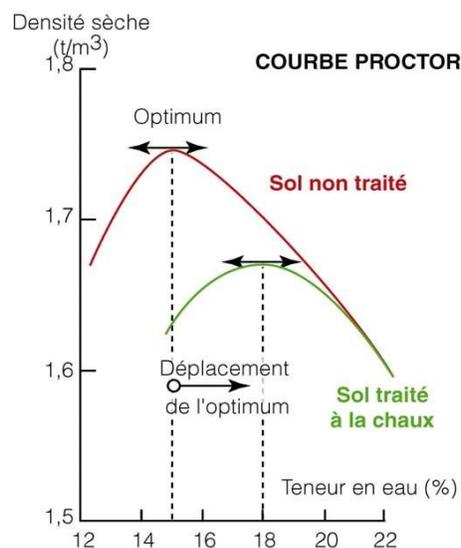


Figure 6 Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol

Chapitre 01 : Généralités

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

1.4 Technique de traitement

1.4.1 Quel traitement à choisir ?

Le traitement de sols est pour le bute d'amélioré les caractéristiques du sol et pour cela Ilya différents solutions utilisés selon le cas, Ces solutions distinctes traduisent le fait qu'il est couramment, impossible, de décider une technique de traitement plus appropriée à une autre, au projet, à partir de la seule donnée de la classe de sol ; il faut également considérer les exigences économiques.

Suivant l'état et la nature des matériaux, le traitement à recommander peut-être :

- un traitement aux liants hydrauliques, est adapté aux sols peu ou pas argileux. L'association de chaux peut être retenue selon l'état hydrique du sol.
- un traitement mixte chaux + (clinker ou LHR) pour les sols moyennement argileux.
- un traitement à la chaux seule, adapté pour les sols argileux et très argileux.

1.4.2 La technique de traitement et le matériel de traitement

1.4.2.1 La technique de traitement

En effet, il est rare qu'un unique produit soit utilisé pour améliorer qualitativement, quantitativement et durablement les performances mécaniques du matériau dont il est question. Ainsi, on a souvent à traiter un sol à la chaux, et au liant hydraulique, et/ou avec des correcteurs granulométriques. Six modalités différentes de traitement sont examinées. Ces solutions distinctes traduisent le fait qu'il est couramment impossible de décider une technique de traitement plus appropriée à une autre au projet, à partir de la seule donnée de la classe de sol ; il faut également considérer les exigences économiques. Le traitement des sols aux liants hydrauliques est une technique consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ , pour l'objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée .cette technique requiert un certain nombre d'opérations élémentaires exigeant une organisation précise , un savoir-faire et des matériels spécifiques.

Chapitre 01 : Généralités

1.4.2.2 Les principales opérations de traitement aux liants

La réalisation des travaux de traitement d'un sol en place suit en générale les opérations élémentaires suivantes :

- la préparation du sol à traiter (élimination des éléments blocaille, homogénéisation, humidification éventuelle).
- l'épandage du liant de traitement.
- le malaxage du liant avec le sol.
- l'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- Le compactage.

Le choix de matériels adaptés est très important pour la réussite et la qualité de l'ouvrage. Dans les années antérieures, les matériels utilisés machinisme agricole sont les machinismes agricoles peu performants pour le retraitement des chaussées, a pu conduire à l'échec. Aujourd'hui, les progrès technologiques des constructeurs de matériels, les spécifications techniques de l'administration et le savoir-faire des entreprises spécialisées dans le retraitement comme (wirtgen), les progrès technologiques des matériels utilisés au réalisation des chaussées , les spécifications techniques de l'administration et le savoir-faire des entreprises ont permis de mettre aux point des matériels de retraitement performants et bien adaptés au travail réaliser.

a- L'épandage

L'épandage du liant avec la précision voulue pour la stabilisation des sols et le recyclage à froid. Bien étudiées, les épandeurs spécialisés pour le traitement de sol sont fait pour mettre ces opérations parfait à travers des entreprises spécialisées dans le retraitement comme (wirtgen),

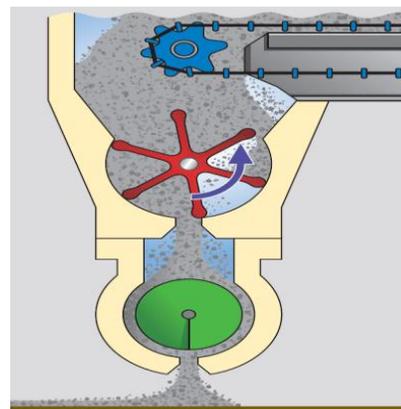


Figure 7 Epandeur de liant hydraulique

Chapitre 01 : Généralités

b- Le malaxage

Le malaxage du sol avec le liant se fait par des recycleurs spécialisés adaptés à toute application de stabilisation de sol et de recyclage à froid, ces machines permettant de bien homogénéiser le mélange (sol + liant) sur des épaisseurs assez importantes variant entre 30 et 40 cm.



Figure 8 Recycleur WR



Figure 9 Malaxage Liant/sol

c- Le compactage

Après le malaxage on passe à l'opération de Le compactage, cette opération doit se faire par un rouleau tendame dame a bandage lisse se charge de compacter le sol parfaitement homogénéiser.



Figure 10 tendame dame a bandage lisse

d- Le réglage

Le réglage définitif doit se faire par une niveleuse sur toute la largeur. Cette opération doit suivre immédiatement le compactage. Elle se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués



Figure 11 niveleuse de réglage

e- Le compactage final

Pour finir le profil un rouleau tendame et un rouleau à bandage caoutchouc assure le compactage final. Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final et, dans tous les cas, avant expiration du “délai de maniabilité” du mélange sol-liant, pour apporter le complément de l’énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée



Figure 12 un rouleau tendame



Figure 13 un rouleau a bandage caoutchouc

Chapitre 01 : Généralités

Protection de surface

Cette protection superficielle (en général, un enduit gravillonné à l'émulsion de bitume) est destinée à imperméabiliser et à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du compactage final



Figure 14 PROTECTION de la surface

1.5 Conclusion

Le traitement des sols avec un liant est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles. Et Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises.

CHAPITRE 02
DES DCRIPTION DES
DIDFFERENTS
ESSAIS

2 Chapitre 02 : Description des différents essais

2.1 Introduction

Le traitement du sol est pour le but de modifier les caractéristiques physico-chimiques et géotechniques d'un matériau. Donc il est nécessaire avant tout démarrage de travaux d'avoir connaître les caractéristiques du sol en présence [7]. Cette connaissance nous permet :

- d'évaluer l'intérêt du traitement de sol.
- de déterminer le type d'agent de traitement à utiliser.
- d'avoir une première idée de la quantité d'agent de traitement à utiliser.

Avant de traiter un sol et de l'utiliser comme matériau de construction, il est indispensable de connaître les principes généraux régissant son comportement.

Pour permettre la compréhension du processus de traitement, nous conseillons au lecteur n'ayant pas/peu de connaissance des différents types de sols, de leurs comportements et de leurs caractéristiques, de se référer à l'annexe A reprenant une description synthétique et didactique des sols. [8].

2.2 Caractérisation des sols

Nous allons analyser leurs différents paramètres qui permettent la classification des sols pour cela On distingue trois grandes familles de paramètres d'après leur nature, leur état et leur comportement :

2.2.1 Les paramètres de nature :

Ce sont des paramètres qui ne varient pas ni dans le temps ni au cours des manipulations, Ils caractérisent ce qui ne varie pas (ou peu) dans le temps ou au cours des manipulations que peut subir le sol :

- **Granularité** : Les essais de granulométrie permettent de classer les sols en différentes catégories selon la dimension de leurs éléments :

- sols fins (sables, argiles, limons).
- sols granulaires.
- sols mixtes.

- **Argilosité** : Elle caractérise à la fois la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. On peut la mesurer à l'aide des paramètres suivants :

- l'indice de plasticité (I_p);
- la valeur de bleu de méthylène (MB).

Chapitre 02 : Description des différents essais

- **Présence de constituants chimiques particuliers** : des éléments perturbateurs peuvent troubler les réactions entre le sol et l'agent de traitement (sulfates et sulfures, matières organiques, chlorures, nitrates...). [2], [8]

2.2.2 Les paramètres d'état des sols :

Ces paramètres ne sont pas propres au sol mais sont fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Pour les sols meubles sensibles à l'eau le paramètre utilisé est « L'état hydrique » qui conditionne :

- Le choix de l'agent de traitement le mieux adapté et des dosages nécessaires à appliquer.
- Le bon déroulement des réactions entre le sol et l'agent de traitement (réactions d'hydratation et de prise).
- La qualité de la mise en œuvre (épandage, malaxage, compactage).

Il y'a 5 états hydriques :

- L'Etat très humide (th)
- L'Etat humide (h)
- L'Etat d'humidité moyenne (m)
- L'Etat sec (s)
- L'Etat très sec (ts)

Pour classer l'Etat hydrique on utilise les paramètres suivants :

- Le rapport entre la teneur en eau naturelle et l'optimum Proctor normal

$$\frac{W_n}{W_{opn}}$$

- L'indice de consistance I_c

$$I_c = \frac{w_l - w_{nat}}{w_l - w_p}$$

- L'indice portant immédiat exprime la valeur de poinçonnement CBR

2.2.3 Les paramètres de comportement

Les paramètres de comportement à prendre en compte dans la classification des sols la valeur Los Angeles LA, la valeur Micro deval MDE, la Friabilité des sables FS, la fragmentation des éléments grossiers et abrasivité de la fraction grenue.

Il s'agit de paramètres permettant d'appréhender les difficultés de malaxage (rapidité d'usure et de détérioration des outils, fatigue des machines, etc.).

Différents essais ont été proposés pour les mesurer, mais on manque encore d'expérience pour en proposer une interprétation rigoureuse. [9]

Chapitre 02 : Description des différents essais

2.3 Essai sur laboratoire

Dans le cadre de traitement de sol on envisage différentes études :

2.3.1 Essais d'identification du sol

Avants tous Pour décider de la pertinence d'un traitement de sol, il faut le reconnaître l'étude préalable des échantillons de sol. Pour cela on fait les essais préalables de sol :

- Granulométrie « simplifiée » (passant à 63 microns et passant à 2 mm) – détermination visuelle du D max.
- Indice de plasticité (limites d'Atterberg).
- Valeur de bleu.
- Teneur en eau naturelle.
- Présence de matières organiques.
- Présence de constituants chimiques particuliers (sulfures, sulfates, chlorures, phosphates et nitrates).

Ces essais préalables comportent deux phases :

- Une étude de reconnaissances géologiques et géotechniques, afin de reconnaître ces matériaux à partir des paramètres significatifs vis-à-vis des phénomènes intervenant dans la technique du traitement des sols, conformément au GTR et à la norme NF P 11-300
- Une étude de formulation du couple sol-liants en laboratoire, fonction des performances recherchées pour la couche considérée. [9]

2.3.2 Etude de vérification de l'aptitude d'un sol au traitement

- « Essai de stabilité des grumeaux »
- « Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/aux liants hydrauliques » (essai de gonflement).
- « Essai de résistance au poinçonnement » (CBR après 4 jours d'immersion). [8]

2.3.3 Etudes de formulation

Pour le traitement des sols trop humides en remblais, l'objectif de l'étude de formulation est de fixer le dosage optimal en agent de traitement en fonction des teneurs en eau rencontrées. Aussi pour déterminer le liant et le dosage minimal en liant permettant de conférer une portance immédiate suffisante pour rendre possible la mise en œuvre, l'aptitude au compactage et à supporter la circulation des engins de chantier en fonction de l'état hydrique des sols prévisible à l'exécution. Ces études permettent également de tester directement l'efficacité d'un traitement. Il s'agit d'essais de compactage, de portance, de résistance et de sensibilité à l'eau et au gel.

L'étude d'identification varie avec la diversité géologique du terrain et l'application visée (remblai, sous-fondation, tranchée, fond de coffre, fondation de bâtiment).

Cette étude permet de regrouper les terrains rencontrés en familles homogènes et représentatives et de déterminer l'utilité ou non d'un recours au traitement en fonction de leur teneur en eau. On peut ainsi :

Chapitre 02 : Description des différents essais

- Eliminer les sols pour lesquels le traitement serait :
- Superflu (le sol non traité est satisfaisant).
- Inopérant (le sol ne réagit pas avec l'agent de traitement).
- Trop onéreux : sols trop humides, trop argileux ou trop pierreux pour le type de traitement envisagé.
- Connaître le (ou les) agent(s) de traitement le(s) mieux adapté(s) à chaque famille de sols pour l'application envisagée.
- Sélectionner les échantillons représentatifs avec lesquels seront faites les études de formulation proprement dites.
- Evaluer, en première approximation les dosages à apporter. [3]

2.4 Essais d'identification du sol :

2.4.1 Teneur en eau

C'est le rapport entre le poids d'eau que le sol contient et le poids de ses éléments secs après dessiccation à l'étuve à 105°.

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

M_h = masse du sol humide.

M_s = masse du sol sec.

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet avec d'autres caractéristiques d'apprécier l'Etat dans lequel se trouve ce sol.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer la teneur en eau d'un sol, parmi lesquelles:

2.4.1.1 Essais effectués en laboratoire

- **Méthode d'étuvage** on pèse l'échantillon de sol avant et après passage à l'étuve (105°C) jusqu'à masse constante (différence de masse entre deux pesées inférieures à 0,1 %).
- **Dessiccation au four à micro-ondes** on pèse l'échantillon de sol avant et après passage au four à micro-ondes jusqu'à masse constante.

2.4.1.2 Essais effectués sur chantier

- **Brûlage à l'alcool** : on pèse l'échantillon de sol avant et après l'avoir fait brûler (en ajoutant de l'alcool à brûler). Cette technique est à proscrire pour les sols riches en matières organiques car elle détruit les composés organiques présents dans le sol. [21]

Chapitre 02 : Description des différents essais

2.4.2 Granulométrie

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau pour cela Pour bien décrire un sol, il faut sa granulométrie, Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols :

- ➔ L'analyse granulométrique par tamisage.
- ➔ L'analyse granulométrique par sédimentation.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains dans un sol c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Elle comprend deux opérations :

- Tamisage (éléments de dimension $\geq 63 \mu\text{m}$)
- Sédimentation (éléments de dimension $< 63 \mu\text{m}$).

Les essais de granulométrie se traduit par la courbe granulométrique, cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certains de ses propriétés. Pour une dimension D donnée, portée en abscisse, le pourcentage des grains de dimension inférieure, en ordonnée (passant) et le pourcentage de grains de dimension supérieure (refus). [22]

Pour identifier un sol à traiter, une analyse granulométrique simplifiée est pratiquée. Elle est caractérisée par :

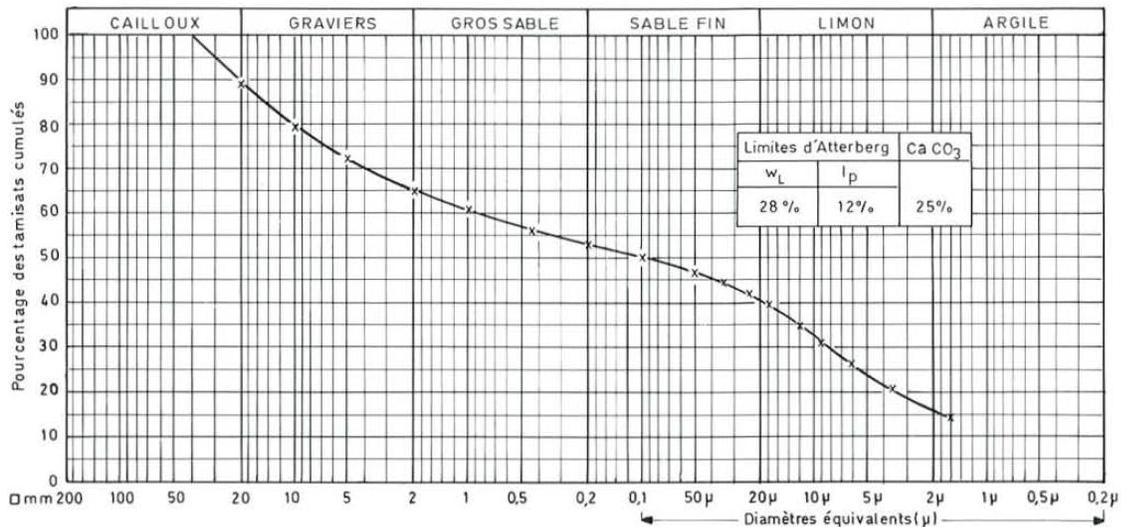


Figure 15 analyse granulométrique d'un grave argileux

- Le tamisât (passant) à $63 \mu\text{m}$: il détermine la teneur en fines et permet, dans une certaine mesure, d'évaluer le degré de sensibilité à l'eau. Cette caractéristique oriente en partie le choix de l'agent de traitement.

Chapitre 02 : Description des différents essais

- Le tamisât à 2 mm : il permet de différencier les sols fins, granulaires et mixtes.

Le D_{max} = dimension du plus gros élément présent à moins de 1 % dans le sol. Il détermine les possibilités pratiques du traitement.

Le D_{max} est déterminé par une inspection visuelle. L'analyse granulométrique complète peut donner d'informations supplémentaires.

La granulométrie se fait par tamisage jusqu'aux grains de 80μ de diamètre et la sédimentation fait sur la fraction inférieure à 80μ par densimétrie elle devait être aux sols fins et posant des problèmes particulières. [9], [10]

2.4.3 Valeur de bleu de méthylène

L'essai de bleu est utilisé en géotechnique pour déterminer la propriété du sol et les différents types d'argiles. La valeur de bleu de méthylène (MB) est une autre mesure de l'argilosité. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer une suspension de sol dans de l'eau, soit, en d'autres termes, la quantité de bleu pouvant s'adsorber sur les particules du sol. Etant donné que ce sont les particules argileuses ($< 2 \mu m$) qui ont la plus grande capacité d'adsorber le bleu de méthylène, on a donc par cet essai une estimation globale de la quantité et de l'activité des argiles contenues dans le sol. La MB s'exprime en g de bleu par kilo de sol sec.

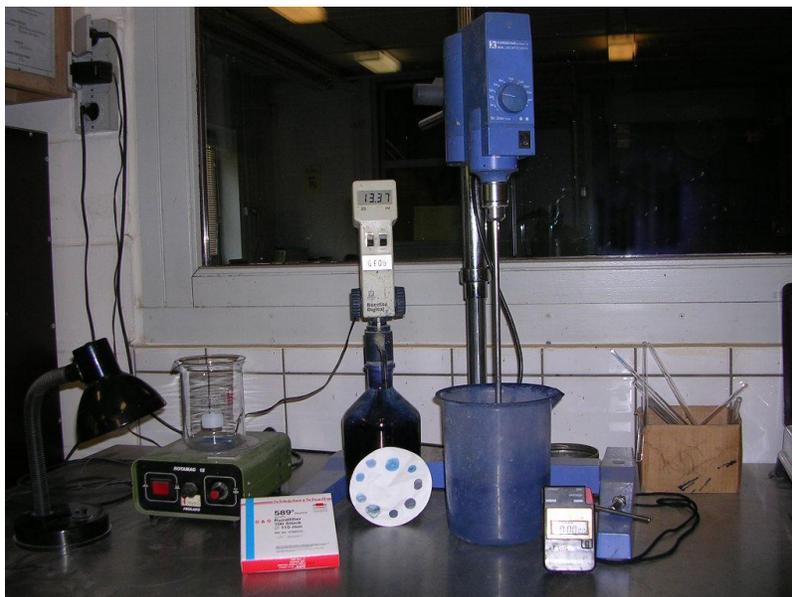


Figure 16 : Matérielles utilisées dans l'essai de bleu de méthylène

Chapitre 02 : Description des différents essais

2.4.3.1 Principe

L'échantillon est séché jusqu'à masse constante et pesé. Il est passé au tamis et mis en suspension dans de l'eau. On ajoute une solution de bleu de méthylène (concentration : 10 g/l) à la suspension sous agitation permanente. On détermine la quantité de solution de bleu de méthylène nécessaire pour saturer la suspension. Le point de saturation est déterminé par un essai à la tache dans lequel une goutte de suspension est posée sur un papier filtre. Si la tache formée sur le papier reste entourée durant cinq minutes par un cercle bleu clair, on considère que le point de saturation est atteint.

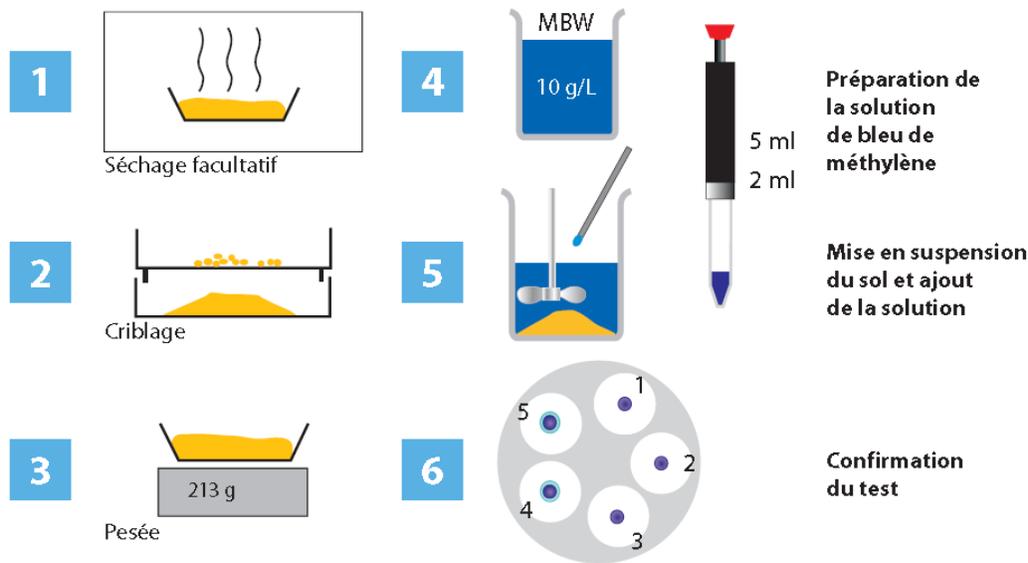


Figure 17 : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène (d'après CEN test Methods (1) – MAT 1 - CT 93-0040 (1993-1997) DGXII of the European Commission)



Figure 18 Appareillage pour essai au bleu de méthylène

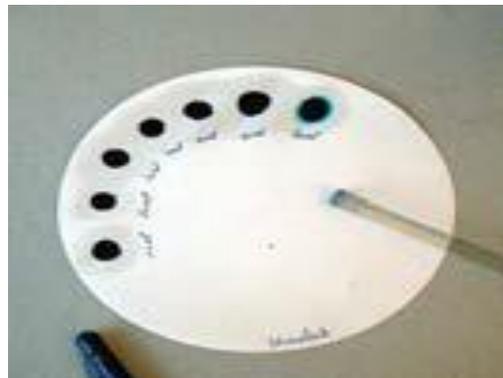


Figure 19 Essai au bleu de méthylène à la tache

Chapitre 02 : Description des différents essais

2.4.3.2 Mode opératoire

A l'aide de la burette, on injecte dans le récipient une dose de 5 cm³ de solution de bleu, après chaque injection de bleu, on prélève à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre, on procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, on laisse s'opérer l'absorption du bleu tout en effectuant des tests de minute en minute, sans rien ajouter.

Si l'auréole bleu-clair disparaît de la tâche avant la cinquième minute, on procède à de nouvelles additions élémentaires de bleu qui sont :

- Soit de 5 cm³ comme précédemment si le volume de la solution de bleu déjà introduit est supérieur ou égal à 30 cm³.

- Soit de 2 cm³ si ce volume est inférieur à 30 cm³.

- Chaque addition est suivie de tests effectués toujours de minute en minute.

- Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives ; le dosage est alors considéré comme terminé.

- On en déduit la Valeur de Bleu du Sol qui s'exprime en gramme de bleu pour 100g de sol.

- si $VBS < 0.1$: sol insensible ou peu sensible à l'eau (si tamisat à $80\mu \leq 12\%$)

- si $0.1 < VBS < 0.2$: apparition de la sensibilité à l'eau,

- si $0.2 < VBS < 1.5$: sols sablo-argileux,

- si $1.5 < VBS < 2.5$: sols sablo-limoneux (moyennement plastiques),

- si $2.5 < VBS < 6$: sols limoneux,

- si $6 < VBS < 8$: sols argileux,

- si $8 < VBS$: sols très argileux_[22]

2.4.4 Limites d'Atterberg

Selon sa teneur en eau un même sol peut se composer comme un liquide visqueux (état liquide) un solide plastique (état plastique) ou un solide non plastique.

L'agronome studios Atterberg a proposé un mode opératoire permettant de définir avec précision les teneurs en eau limite pour chaque état. La connaissance de l'argilosité d'un sol est indispensable pour choisir l'agent de traitement adapté au sol considéré. En première approximation, on considère que lorsque l'argilosité est élevée, le choix de la chaux ou un liant hydraulique contenant de la chaux comme agent de traitement s'impose ; inversement, lorsque

Chapitre 02 : Description des différents essais

l'argilosité est faible, le ciment ou un liant hydraulique riche en clinker convient comme agent de traitement (le choix de l'agent de traitement approprié est bien entendu également guider par les performances/résultats à obtenir). Suivant la quantité d'eau présente dans le sol, on peut définir conventionnellement trois états : liquide, plastique ou solide. Les essais en vue de déterminer les limites d'Atterberg permettent de distinguer ces états en déterminant expérimentalement deux limites caractéristiques :

- **Limite de liquidité** (w_L) : teneur en eau relativement élevée à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état Liquide.

- **Limite de plasticité** (w_P) : teneur en eau relativement faible à laquelle le sol passe de l'état solide à l'état Plastique.

La différence de teneur en eau entre les limites de liquidité et de plasticité représente l'indice de plasticité du sol :

$$I_p = w_L - w_P$$

L'indice de plasticité est couramment utilisé pour mesurer l'argilosité. Il permet d'avoir une indication assez précise sur la nature d'un sol fin, Il représente la plage de teneurs en eau d'un sol donné correspondant à un comportement plastique de ce sol. Ainsi, si l'indice de plasticité du sol est élevé, le sol est dit argileux et ses variations de volume peuvent être importantes en fonction de la modification de la teneur en eau du sol. La relation entre la teneur en eau à l'état naturel et les limites de liquidité et de plasticité traduit le comportement d'un sol. Un Indice de plasticité IP élevé correspond à un sol argileux, dont les propriétés seront très sensibles aux variations en teneur en eau. Un Indice de plasticité IP faible correspond à un sol peu argileux moins sensible aux variations en teneurs en eau.

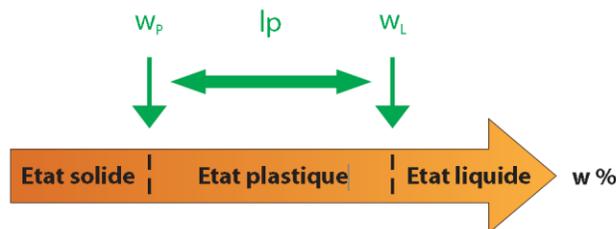


Figure 20 Limites d Atterberg

Principaux seuils indicatifs :

- I_p non mesurable : sol non argileux.
- $I_p < 12$: sol limoneux à teneur en argile faible.
- $I_p = 12 - 25$: sol limoneux à teneur en argile moyenne.
- $I_p = 25 - 40$: sol argileux.
- $I_p > 40$: sol très argileux.

Les essais s'effectuent sur la fraction du sol inférieure à 0,4 mm (en effet, les éléments les plus fins sont les plus sensibles aux variations de la teneur en eau). [10] [6]

2.4.4.1 Détermination de la limite de liquidité

On place une pâte de sol (une épaisseur de 15 à 20 mm) dans la coupelle de l'appareil de Cassagnarde. La pâte de sol est séparée en deux par une rainure axiale au moyen d'un outil spécial et on applique à la coupelle une série de coups jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se rejoignent sur à peu près 1 cm. On note le nombre de chocs nécessaires et on détermine la teneur en eau à l'étuve du sol. Les essais sont effectués avec des teneurs en eau croissantes ou décroissantes.



Figure 21 Appareil de Cassagnarde



Figure 22 Réalisation de la rainure dans la pâte de sol

au moyen d'un outil spécial



Figure 23 Fermeture des lèvres sur ±

1 cm après application

La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle on observe une fermeture des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle peut se déterminer graphiquement grâce à 3 ou 4 essais successifs ou, si le nombre de coups est compris entre 15 et 35, à partir d'un seul essai au moyen de la formule :

$$wL = w (N/25)^{0,121}$$

wL = teneur en eau correspondant à la limite de liquidité ;

w = teneur en eau de la pâte de sol ;

N = nombre de chocs correspondants à w .

Chapitre 02 : Description des différents essais

2.4.4.2 Détermination de la limite de plasticité

Pour déterminer cette limite, le procédé est le suivant :

- Prendre un échantillon séché du sol fin
- Y ajouter un peu d'eau et homogénéiser le mélange
- Former trois fils de 3 [mm] de diamètre et de 10 [cm] de longueur sur le modèle d'une petite barre de fer
- Rouler les fils sur une planche de bois, servant à l'assécher au fur et à mesure, jusqu'à l'apparition des premières fissures. Les rétrécir si nécessaire pour maintenir la même longueur (10 [cm])
- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau.

Remarques :

- Les valeurs d'IP obtenues doivent être interprétées avec une certaine flexibilité. En effet, les résultats des essais de détermination des limites de liquidité/plasticité sont fortement influencés par la manière dont l'opérateur exécute l'essai ainsi que par l'appareillage utilisé (des essais inter laboratoires ont montré des variations de 25 à 30 % sur l'indice de plasticité).
- La détermination de l'argilosité d'un sol peut également être déterminée par un essai de bleu de méthylène La valeur de bleu est à utiliser pour les sols peu argileux. L'indice de plasticité est le critère le mieux adapté pour les sols dont l'IP est ≥ 12 . [11]

2.5 Essai Proctor

Après l'identification des sols B5 et A3 on commence à faire les essais de traitement aux liants hydrauliques et / ou avec la chaux pour des différents teneurs et personnalités aux liants ces essais est pour le but de déterminer des paramètres pour les quelles notre sols soit très dure et déterminer la capacité de portance de ces sols (Proctor, IPI, ICBR,...), donc tous d'abord on commence par l'essai Proctor

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé, avec une énergie de compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes valeurs de teneur en eau pour en déduire :

- La teneur en eau optimale.
- La densité sèche maximale correspondante.

L'énergie de compactage est égale à Hauteur de chute \times poids de la dame \times Nb de coups \times Nb de couches / volume total du moule.

Chapitre 02 : Description des différents essais

L'essai Proctor est réalisé selon la norme NF P 94- 093, il a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

L'optimum Proctor Normal ou Modifié (OPN ou OPM) est la teneur en eau pour laquelle le sol atteint, pour une énergie de compactage donnée, une densité maximale. [19]

2.5.1 Mode opératoire

Il est nécessaire de suivre des règles imposées par la granularité du matériau, comme indiqué sur le diagramme :

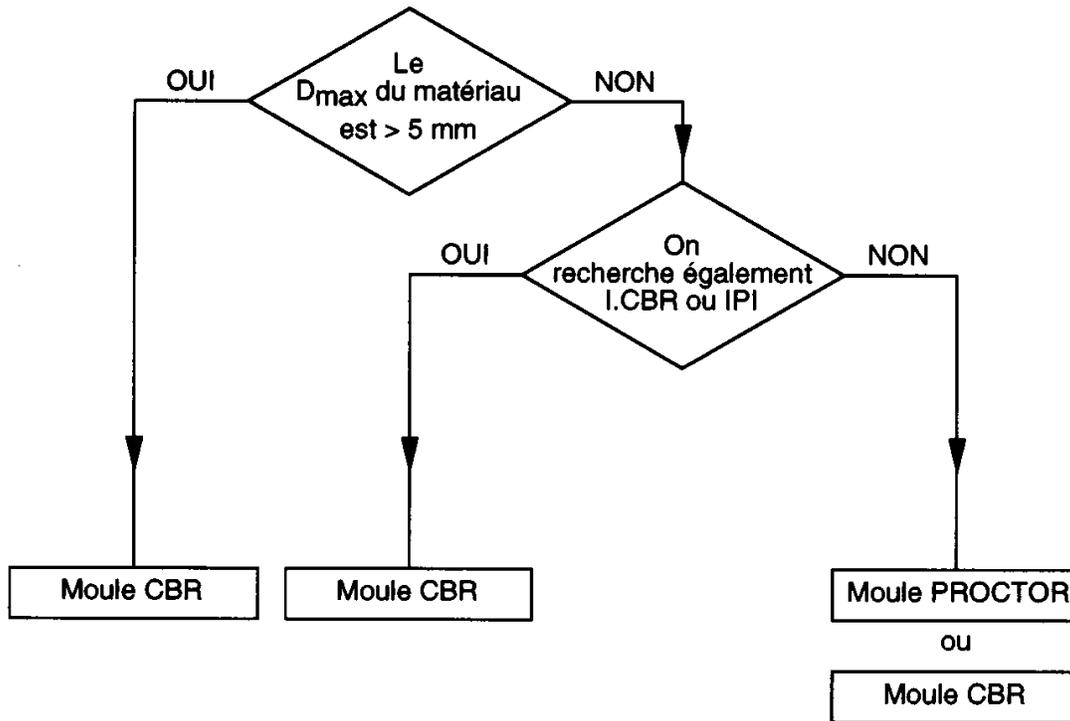


Figure 24 : Choix du type de moule

2.5.1.1 Exécution de l'essai

On fait le choix du type de moule utilisé durant l'essai imposé par les conditions d'essai en respectant les modalités indiquées dans le tableau :

Chapitre 02 : Description des différents essais

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de:</p> <p>Moule Proctor Dame Proctor normal Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	2 490 g	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4535 g	<p>5 couches, à raison de:</p> <p>Moule Proctor Dame Proctor modifié Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

Tableau 2 Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié

Avant introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :

- ➔ Solidariser : moule, embase et rehausse ;
- ➔ Lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
- ➔ Placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
- ➔ Placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage ;
- ➔ Introduire la quantité nécessaire de matériau pour la première couche
- ➔ Compacte cette couche avec la dame en appliquant le nombre de coups nécessaire selon le moule utiliser (moule Proctor 25 coups, moule CBR 56 Coups), suivant le schéma

Chapitre 02 : Description des différents essais

suivant, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser. [18]

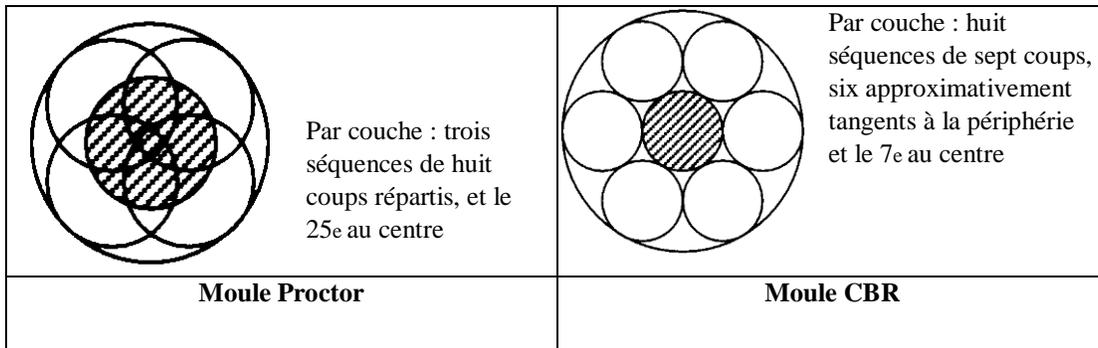


Figure 25 Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche

Après compactage de la dernière couche, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Selon la norme Proctor Un manque un plus de matériaux nécessite la refaire de l'essai, après le compactage on récupère le moule et Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser. [18]

2.5.1.2 Particularités applicables aux matériaux traités avec de la chaux et/ou un liant hydraulique

Pour faire le traitement de sol avec le liant hydraulique et/ou la chaux on doit suivie les opérations suivantes selon le cas :

→ Cas du traitement à la chaux seule

- Introduire la quantité de chaux correspondant au dosage visé et malaxer le mélange manuellement, ou plus avantageusement à l'aide d'un malaxeur-désagrégateur (voir annexe B), jusqu'à constatation visuelle de l'obtention d'une mouture dont la granularité est stabilisée et dont la teinte est homogène ;
- Conserver le mélange ainsi obtenu dans un conteneur (sac ou boîte) hermétique durant 1 h \pm 10 min et à une température comprise entre 5 °C et 30 °C ;
- A l'expiration de ce délai et en fonction de l'énergie de compactage (Proctor normal ou Proctor modifié) considérée, compacter le mélange conformément aux modalités décrites dans le présent paragraphe.

→ Cas du traitement avec un liant hydraulique seul

Chapitre 02 : Description des différents essais

- Exécuter les mêmes opérations que pour le traitement à la chaux seule, à l'exception du délai de conservation qui est ramené à 15 min maximum. [18]

→ Cas d'un traitement mixte chaux plus liant hydraulique

- Procéder tout d'abord à la fabrication et à la conservation du mélange matériau-chaux, comme décrit pour le traitement à la chaux seule, puis reprendre ce mélange pour le traiter avec le liant hydraulique, comme décrit pour le traitement avec un liant hydraulique seul ;

- à l'expiration du délai de conservation avec le liant hydraulique de 15 min maximum et en fonction de l'énergie de compactage (Proctor normal et Proctor modifié) considérée, compacter le mélange conformément aux modalités décrites dans le présent paragraphe. [18]

2.6 Essai CBR

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers.

L'essai CBR permet de mesurer la portance d'un matériau compacté. Il consiste à comparer la résistance au poinçonnement d'un matériau à tester à celle d'un matériau de référence californien (grave naturelle).

Ce matériau est tel que l'on observe :

- Un enfoncement de 2,5 mm pour une force de 13,2 Kn.
- Un enfoncement de 5 mm pour une force de 20 kN.

2.6.1 Conditions d'essai

L'essai est réalisé en enfonçant à vitesse constante un poinçon cylindrique dans l'axe de l'éprouvette à la cadence normalisée de 1,27 mm/min dans des éprouvettes de sol compactées à l'énergie Proctor (normal ou modifié) dans des moules CBR.

On mesure en continu la force appliquée en fonction de l'enfoncement du poinçon (généralement jusqu'à 10 mm). Pendant cet essai, une surcharge est placée à la surface de l'éprouvette afin de simuler la surcharge que la structure de la route exercera.

Après l'essai, on détermine l'effort de pénétration à appliquer au sol pour observer des enfoncements de 2,5 et 5 mm (respectivement P2, 5 et P5). Le poinçonnement est réalisé sur toutes les éprouvettes de l'essai Proctor, on peut ainsi établir un graphique CBR/teneur en eau au compactage

Chapitre 02 : Description des différents essais

L'indice portant Immédiat est Grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantiers. L'essai IPI (Indice de Portance Immédiat) est réalisé sur les échantillons du sol après l'essai PROCTOR à l'aide du moule CBR. L'essai consiste à enfoncer un piston dans le sol encore dans le moule afin d'obtenir l'indice IPI.

L'indice CBR après immersion (ICBR) est un Grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée est réalisé sur les échantillons du sol préparés par l'essai PROCTOR après l'immersion a 4 jours dans l'eau à l'aide du moule CBR. L'essai consiste à enfoncer un piston dans le sol encore dans le moule afin d'obtenir l'indice ICBR.

Ces essais sont réalisés afin de :

- ➔ Connaître la capacité d'un sol ou d'un matériau élaboré, à supporter la circulation du chantier.
- ➔ Réaliser le classement des sols dans le Guide des Terrassements Routiers (GTR).
- ➔ Déterminer les épaisseurs de chaussées.

2.6.2 Principe de l'essai

L'essai CBR consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau compacté avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés.

Les indices CBR et IPI ne constituent pas des caractéristiques intrinsèques d'un sol. En effet, si ces grandeurs dépendent en partie de la nature du sol (granularité, plasticité), elles dépendent davantage de sa teneur en eau, de sa masse volumique sèche et de son degré de saturation, qui sont des caractéristiques d'état, celles-ci étant fonction des conditions de mise en œuvre et d'environnement.

L'indication de toute valeur d'un indice CBR ou IPI d'un matériau n'a donc de sens que si elle est assortie des caractéristiques d'état du sol prises en considération dans la confection de l'éprouvette c'est-à-dire :

- Sa masse volumique à l'état sec P_d exprimée en pourcentage de la valeur de $P_{d_{Opn}}$ ou P_{dop_m} du sol.
- Sa teneur en eau exprimée en pourcentage de la valeur de W_{OPN} ou W_{OPN} du sol.
- Son état de saturation défini qualitativement par le fait que l'éprouvette est poinçonné :

Chapitre 02 : Description des différents essais

- Soit immédiatement, après sa confection, et l'on parle alors d'indice CBR immédiat ou IPI, suivant le processus opératoire suivi.
- Soit après avoir été immergée durant quatre jours et l'on parle alors d'I.CBR après immersion.

2.6.3 Appareillage

2.6.3.1 Matériel de confection des éprouvettes

Le matériel de confection comprend :

- Les dames ou machines de compactage Proctor normal et Proctor modifié ;
- L'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser,...)
- Le moule CBR ;
- Le matériel d'usage courant (balances, étuve, bacs,...).
- L'ensemble du matériel est décrit dans la norme NF P 94-093.



Figure 27 machine proctor

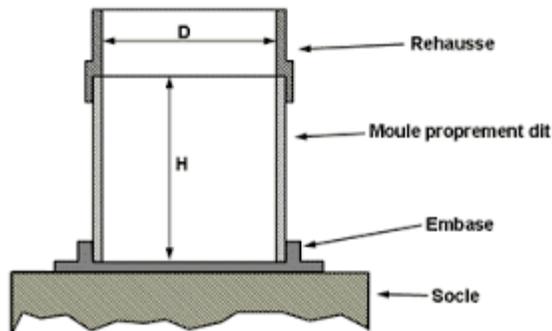


Figure 26 moule CBR

2.6.3.2 Matériel de poinçonnement

Il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 kN et possédant une course d'au moins 10 mm.



Figure 28 : presse de poinçonnement

- Cette presse doit être équipée :
 - D'un poinçon cylindrique en acier de $49,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de diamètre, soit une section circulaire de $19,32 \text{ cm}^2 + 0,08 \text{ cm}^2$, et d'une dizaine de centimètres de longueur minimum.
 - D'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$.
 - D'un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de $0,1 \text{ mm}$.
 - D'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement. La capacité de ce dispositif doit être adaptée à l'effort mesuré. Sa précision doit garantir la mesure avec une incertitude relative maximum de 1% .

2.6.3.3 Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement

- Il est constitué :
 - D'un ou plusieurs bacs de hauteur suffisante pour assurer l'immersion complète des éprouvettes, tout en ménageant au-dessous de chacune d'elle une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur (au moyen d'un caillebotis par exemple) ;
 - D'un disque, dit «de gonflement », métallique ou en matière plastique de 150 mm de diamètre et d'un poids n'excédant pas 300 g environ perforé sur toute sa surface par au moins 25 trous de $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre, uniformément répartis. Ce disque comporte,

Chapitre 02 : Description des différents essais

perpendiculairement en son centre, une tige de hauteur réglable, permettant de réaliser la mise à zéro du dispositif de mesure du gonflement, avant la mise en immersion ;

- D'une série d'au moins trois surcharges constituées chacune d'un disque de $150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre extérieur comportant un évidement central cylindrique de $54 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ permettant le passage aisé du poinçon. La masse de chaque surcharge doit être de $2,3 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ -
- Les surcharges peuvent être réalisées en deux pièces par sectionnement du disque défini précédemment suivant un plan diamétral afin de faciliter leur mise en place sur l'éprouvette et autour du poinçon.
- D'un dispositif permettant la mesure du gonflement avec une incertitude absolue maximum de $0,01 \text{ mm}$; la plage de mesure doit être de 20 mm minimum.

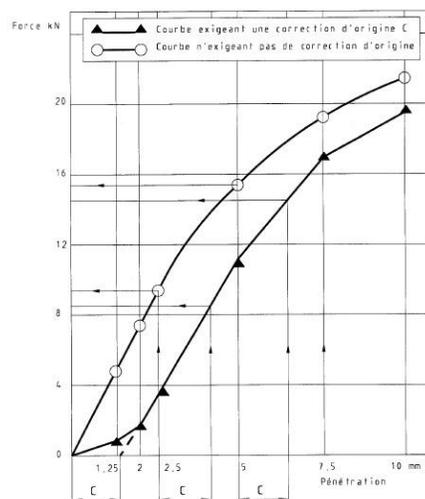
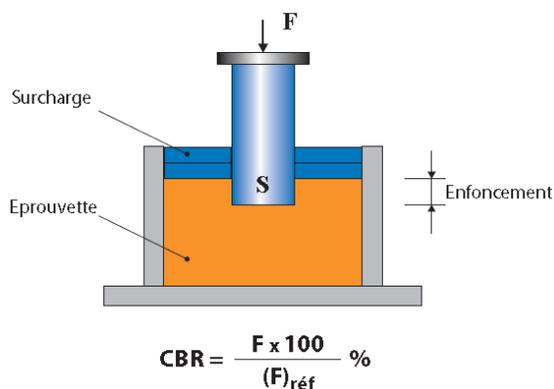
Calculs et résultats :

On calcule les valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à } 2,5 \text{ mm d'enfoncement (en kN)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à } 5 \text{ mm d'enfoncement (en kN)}}{19,93} \times 100$$

- L'indice recherche est par convention la plus grande de ces deux valeurs.
- Si nécessaire, faire une correction d'origine.



Chapitre 02 : Description des différents essais

Figure 29 Schéma de principe de l'essai CBR

Figure 29 Schéma de principe de l'essai CBR

2.7 Aptitude au traitement

L'essai permet de définir l'aptitude d'un sol à une formulation de traitement donnée dans un délai court (7 jours) , les conditions de conservation (immersion à 40°C) conduisent rapidement à une insensibilité à l'eau des sols traités résultant de la floculation des argiles et de la prise du liant hydraulique. L'essai d'aptitude au traitement permet alors de vérifier si des agents chimiques, organiques ou minéraux, peuvent nuire à la solidification. Cependant, ces conditions de cure sont extrêmes en comparaison de ce que peut subir le matériau dans l'environnement.

Détermination du gonflement volumique G_v

Le volume initial V_i des éprouvettes cylindriques de diamètre \varnothing 5cm et de hauteur h 5cm (5×5) est calculé immédiatement après leur confection, à partir de leurs dimensions déterminées au pied à coulisses. V_i s'exprime :

$$V_i = hm \cdot \varnothing^2 / 4$$

avec hm en mm, la moyenne de deux mesures de hauteur espacées de 90 \varnothing m en mm, la moyenne de trois mesures de diamètre, en haut, au milieu et en bas de l'éprouvette Les éprouvettes sont ensuite recouvertes de bandelettes perméables et immergées.

Après 4h dans un environnement à une HR \approx 90% et à \approx 20±2°C et 7 jours d'immersion totale dans l'eau à 40°C, les éprouvettes sont sorties du bain thermostatique, les bandelettes sont retirées et le volume final V_f des échantillons est déterminé par pesée hydrostatique. Après avoir épongé leurs surfaces, elles sont pesées à l'air : masse M_a en g. Elles sont immergées et pesées dans l'eau : masse M_w en g. Soit ρ_w la masse volumique de l'eau ($\rho_w = 1 \text{ g.cm}^{-3}$).

$$\text{Alors : } V_f = (M_a - M_w) / \rho_w$$

Finalement le calcul du gonflement volumique est le suivant :

$$G_v (\%) = (V_f - V_i) / V_i$$

CHAPITRE 03
PARTIE
EXPERIMENTALE

3 Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.1 Introduction

Durant ce chapitre, on commence par classer deux différents sols pour les utilisés dans le traitement de sol aux liants hydrauliques (chaux, clinker, liant hydraulique routière) pour les utilisés dans la couche de remblai d'une route à Alger <sidi Abdellah> selon les normes GTR. Pour cela, il faut déterminer les limites d'élasticité et de plasticité de la partie fine de ce sol, valeur de bleu d'méthylène VBS, et tracer la courbe granulométrique, accompagnée par le calcul de diverses valeurs qui seront définies au fur et à mesure dans ce rapport.

3.1.1 Matériaux réceptionnés

La campagne d'échantillonnage a été faite en compagnie de l'entreprise EVSM Algérie, le tableau ci-après énumère le ou les sols rencontrés et leurs natures selon une analyse visuelle des échantillons :

Échantillon	PK	Réserves actuelles	Nature
SL-OCT17-22	PK 1+300	15000	Limon sableux brunâtre
		35000	Limon sableux peu argileux rougeâtre.
	PK 4+100	150000	Marne grise

Tableau 3 document de Lafarge des sols a traité



Figure 30 Coupe transversale du terrain Alger <sidi Abdellah>

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.1.2 Programme d'essais

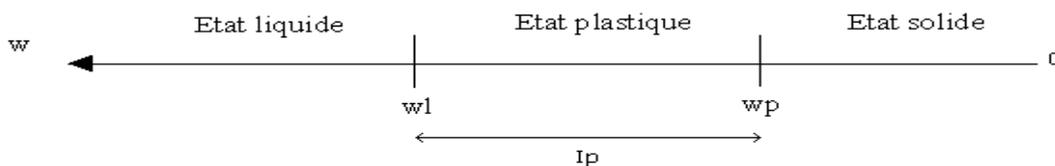
Les essais réalisés dans le cadre de cette étude pour déterminer la faisabilité de l'emploi des matériaux rencontrés sont :

- ➔ L'identification des matériaux pour classification selon GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de formes – Setra – Edition 1992) :
- ➔ Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – méthode par étuvage (NF EN 1097-5)
- ➔ Analyse granulométrie – méthode par tamisage à sec après lavage
- ➔ Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux – Détermination de la Valeur au bleu du sol (VBs) selon la norme (NF P 94-068)
- ➔ Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau (NF P 94-051) [13]

3.2 Essais d'identification de sol

3.2.1 Essai d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques pour l'objectif d'identifier un sol et à caractériser son état, l'essai limite d'Atterberg détermine des indicateurs de plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Le sol fin est testé pour déterminer les limites liquides et plastiques.



Résultats

Pour le 2^{ème} sol

- ➔ La limite de liquidité $Ll = 60,2$.
- ➔ La limite de plasticité $Lp = 25,76$.
- ➔ L'indice de plasticité $Ip = 34,44$.

L'indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Tableau 4 classement des sols selon l'indice de plasticité

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Donc d'après les résultats qu'on a obtenues et la valeur de L'indice de plasticité $I_p = 34,44$ on conclue que le 2^{ème} sol est un sol plastique.

3.2.2 L'essai granulométrique

L'analyse granulométrique est une étape fondamentale pour la classification d'un sol. Cela consiste à mesurer la dispersion des grains d'un sol suivant leurs dimensions, c'est-à-dire leurs diamètres respectifs. Puis, reporter sur une courbe granulométrique les résultats ainsi obtenus. L'essai consiste à classer un granulat en plusieurs classes granulaires au moyen d'une série de tamis.

3.2.2.1 Mode opératoire

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres. Il se fait par des étapes on peut les résumer ici :

- D'abord on commence par le Calcul de la masse sèche : M_s

- Faire une teneur en eau : w
 - Peser l'échantillon humide : M
 - $M_s = M / (1+w)$
- Faire Lavage de l'échantillon au tamis de $80\mu\text{m}$
- Séchage des refus à $80\mu\text{m}$.
- Tamisage à sec des refus à $80\mu\text{m}$
- Pesage des refus secs à la série des tamis.
- Peser les refus et les refus cumulés des tamis
- Tracer la courbe granulométrique.

3.2.2.2 Expression des résultats

L'analyse granulométrique permet de répartir quantitativement (masse). Selon l'analyse faite au laboratoire de LAFARGE, on a obtenu les résultats des passants cumulés et la courbe granulométrique correspondante représentés dans le tableau suivant. Le tableau ci-dessous, traduit les résultats obtenus.

TAMIS (mm)	REFUS CUM. (g)	% PASSANT
12,5	0	100,0
10	4	99,7
8	8	99,3
6,3	20	98,3
5	32	97,3
4	46	96,2

Chapitre 3 : Partie expérimentale

2	108	91,0
1	164	86,3
0,8	178	85,2
0,5	206	82,8
0,4	216	82,0
0.25*	246	79,5
0,1	796	33,7
0,08	834	30,5
FT	834	30,5

Tableau 5 Analyse granulométrique de premier sol (B5)

TAMIS (mm)	REFUS CUM. (g)	% PASSANT
5	0	100,0
4	0,8	99,9
2	5,2	99,5
1	9,4	99,1
0,8	10,8	98,9
0,5	14,1	98,6
0,4	15,7	98,4
0.25*	20,9	97,9
0,1	46,7	95,3
0,08	50	95,0
FT	50	95,0

Tableau 6 Analyse granulométrique de deuxième sol (A3)

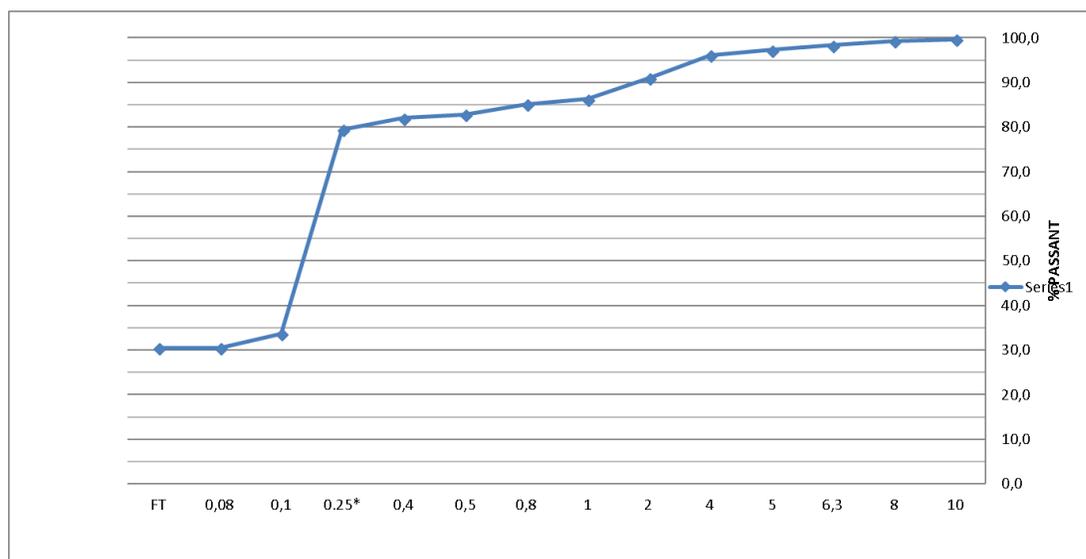


Figure 31 Analyse granulométrique de sol B5

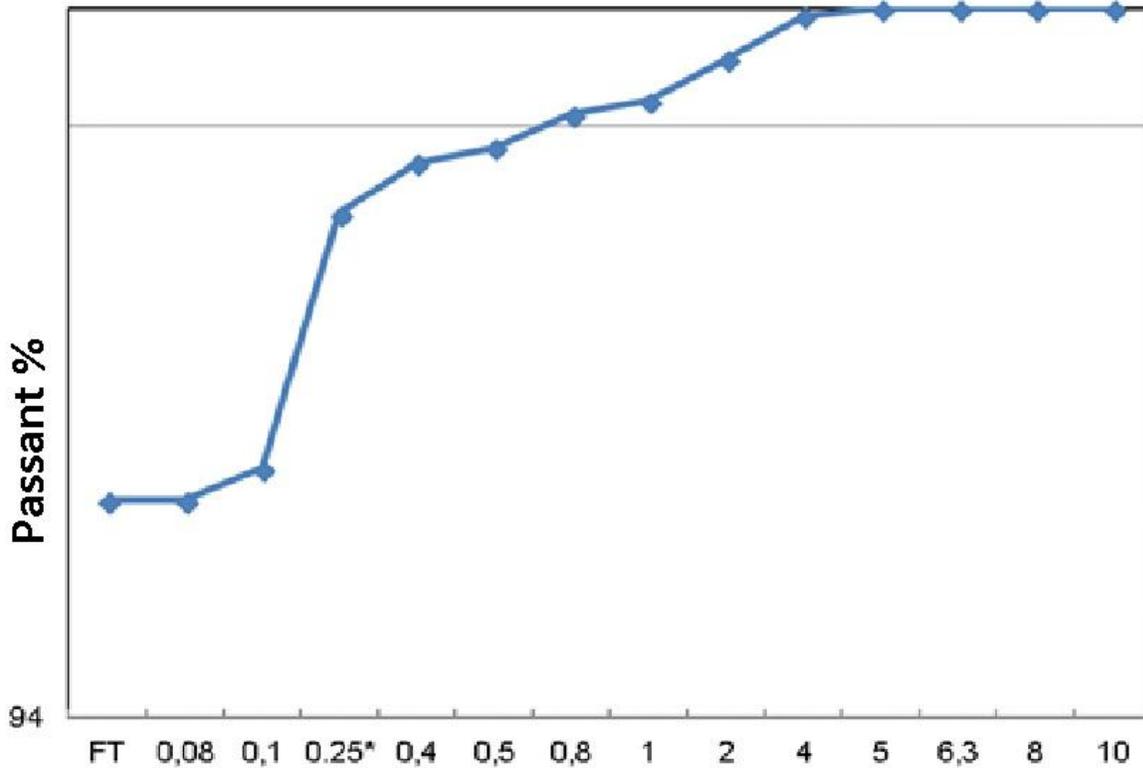


Figure 32 Analyse granulométrique de sol A3

3.2.2.3 Interprétation

Les pourcentages de passants au tamis 80 μm pour les sols B5 et A3 sont respectivement 30% et 97%, on peut conclure que les sols sont des Sols fins selon la classification LCPC et le guide GTR.

3.2.3 Essai de Bleu de méthylène

La valeur de bleu de méthylène (VBS) est un paramètre nécessaire pour l'identification de sol qui mesure globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol. La valeur mesurée au bleu nous permettra de classer le sol selon la classification GTR.

Le diamètre maximum du sol est inférieur à 5 mm. On devrait donc prendre 5 kg de sol. On prend une masse quelconque de sol remanié que l'on tamise à 5 mm. Puis on en prélève 103 g.

Dans un bécher on met les 60 g de sol remanié qui ont été au préalable tamisés, ainsi que 500 ml d'eau. On règle la vitesse de rotation de l'hélice sur environ 400 tours par minutes.

Au bout de 5 minutes on commence à ajouter le bleu de méthylène (5 ml).

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Puis chaque 1 minute on injecte 5 ml de bleu de méthylène et on effectue des prélèvements
On obtient les taches suivantes :

Tâche 1 : Tache de couleur foncée sans auréole apparente

Tâche 2 : Tache de couleur foncée sans auréole apparente

Tâche 3 : Tache de couleur foncée sans auréole apparente

Tâche 4 : Tache de couleur foncée sans auréole apparente

Tâche 5 : Tache de couleur foncée sans auréole apparente

Tâche 27 : Tache de couleur foncée mais une auréole commence à apparaître

Tâche 28 : Tache de couleur foncée mais l'auréole d'un bleu plus clair est bien définie autour de la tache foncée

3.2.3.1 Calcul de la valeur VBS

L'essai a été réalisé suivant la norme suivante : NF P 94-068

→ Pour le premier sol

La 9^{ème} tache correspond à un volume de bleu de méthylène injecté d'environ 140 cm³.

Masse de bleu : $B = \text{Volume de bleu introduit} \times 0.01 = V \times 0.01 = 140 \times 0.01 = 1,4 \text{ g}$

Masse de sol sec : $M_0 = M / (1 + \omega) = 100 \text{ g}$

On a $D_{\max} > 5\text{mm}$, on a donc la relation suivante :

$$M_0 = \frac{Mh_1}{1 + W_0}$$

$$VBS = \frac{B}{M_0} \times 100$$

$$B = V \times 0,01 = 1,4$$

$$VBS = \frac{B}{100} \times 100$$

$$\boxed{VBS_1 = 1,4}$$

→ Pour le deuxième sol

Mon applique le même procédé et les mêmes calculs on obtient :

$$\boxed{VBS_2 = 4,83}$$

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.2.4 Résultats de l'identification des sols

On a les résultats des essais (granulométrie, essai de bleu, limite d'Atterberg ..) des sols 1 et 2 on les utiliser pour identifier ces sols pour commencer nos essais de traitement utilisant les liants hydrauliques a des pourcentages bien définies , Les résultats de l'étude d'identification des sols sont regroupés dans le tableau suivant :

	W _n (%)	Granulométrie		VBS	Limites d'Atterberg			Classe GTR
		<2 mm	<80 mm		W _I (%)	W _p (%)	I _p (%)	
Premier SOL PK1+300	12,05	81,2	29	1,4				B5
Deuxième SOL PK4+100	22,47	99,9	95	4,83	60	25,76	34,44	A3

Tableau 7 Identification des sols traite

Le GTR recommande le recours à un traitement au liant hydraulique pour permettre l'utilisation de ces matériaux en couche de remblai. Les traitements étudiés ici sont envisagés afin de conférer une portance minimale à court terme et assurer la pérennité à long terme de la structure en matériau traité pour une réutilisation en remblai.

Donc d'après les résultats obtenus on peut classer nos sols

3.2.4.1 Classement de Premier sol (B5)

Chapitre 3 : Partie expérimentale

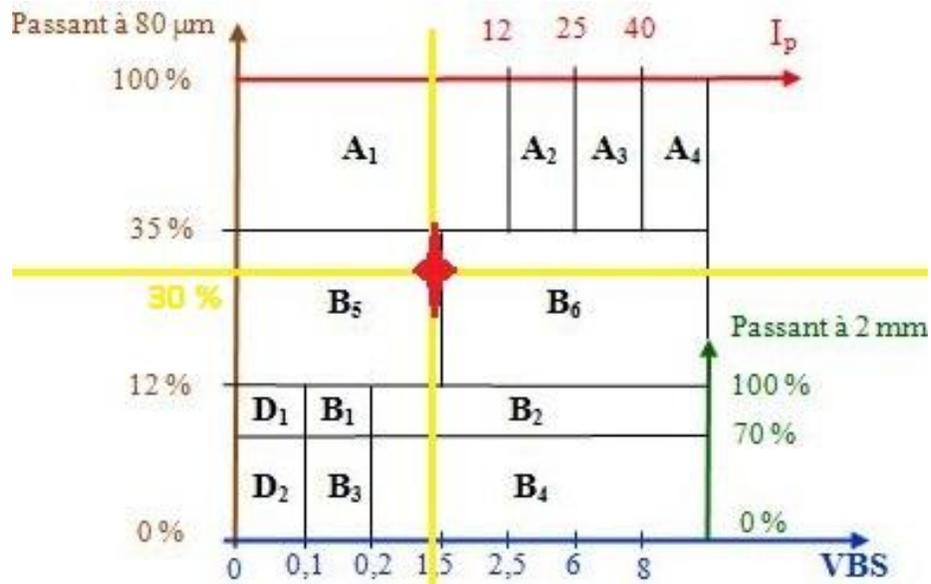


Figure 33 Tableau synoptique de classement de premier sol

On déduit que la classe du premier sol est la classe B5. (Sol lumineux)

3.2.4.2 Classement deuxième sol

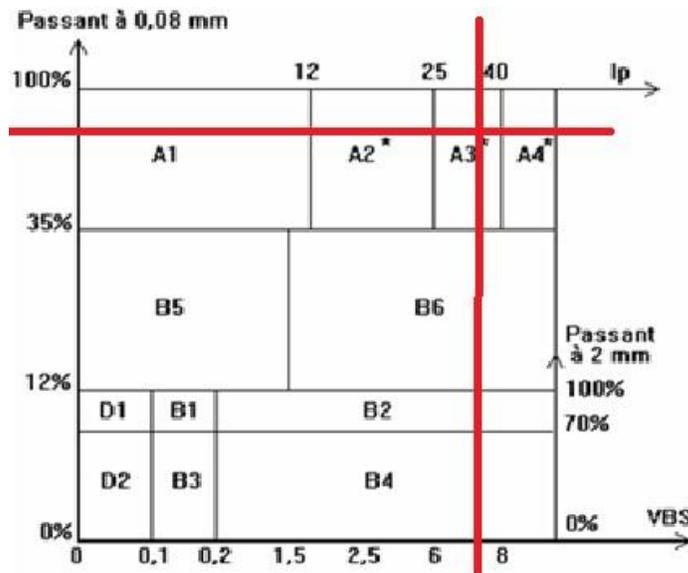


Figure 34 Tableau synoptique de classement de deuxième sol

On déduit que la classe du deuxième sol est la classe A3. (SOL Argileux)

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.3 Essai Proctor normal

L'essai a été réalisé suivant la norme suivante : NF P 94-093

3.3.1 Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- la teneur en eau ;
- la masse de matériau sec contenu dans le moule ;
- la masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé et déterminé à partir des mesures géométriques réalisées à 0,1 mm près.

Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique $P_d = f(w \%)$.

On trace ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux. Sauf dans le cas des matériaux très perméables

Pour notre cas on applique la méthode de Proctor normale d'après les critères de la norme tel que :

$$P_d = \frac{S_r p_s}{S_r + W P_s / P_w} \quad \text{Avec } P_w = 1 \text{ t/m}^3$$

On a 2 sols a traité sol B5 et sol A3 et on a fait les traitements suivants pour ces sol :

a- Développement d'ARDIA :

Traitement de sol type B5 en utilisant :

- 1,5% ARDIA 600
- 1,5% ARDIA A
- 2 % ARDIA A
- 1,5% ARDIA B
- 1,5 % ARDIA B ALGER

b- Prés traitement des sols A3 en utilisant une alternative à la chaux :

- 1 ,5% CHAUX + 4 % ARDIA 600
- 1 ,5% CLINKER + 4 % ARDIA 600
- 2,5 % clinker 4 % ARDIA 600

On a fait les essais de Proctor pour chaque dosage aux liants hydrauliques et/ou chaux et/ou clinker, On obtient les tableaux et les courbes suivants :

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.3.1.1 Traitement de sol B5

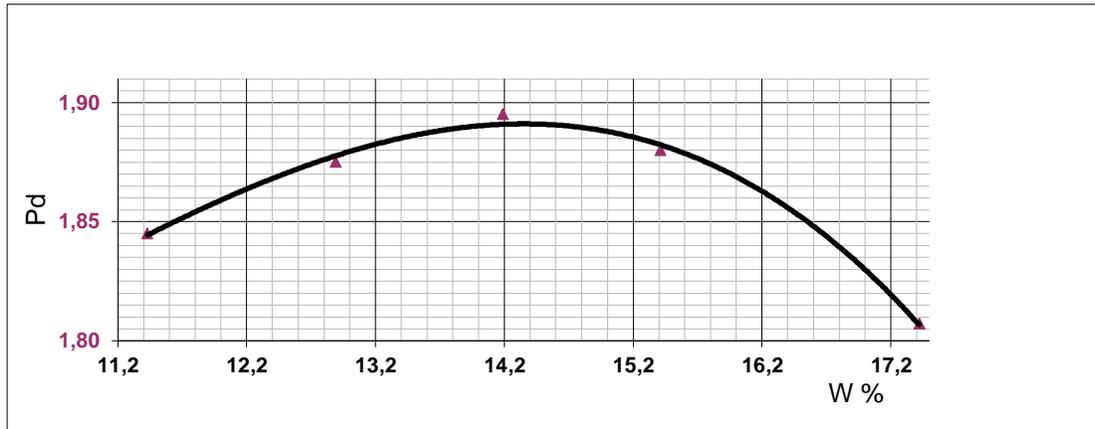


Figure 35 courbe proctor sol B5 (1,5 % Ardia 600)

Interprétation des résultats

On Le tracé de la courbe $\rho_d = f(w)$ permet de déterminer la valeur maximale de la masse volumique sèche ρ_d c'est à dire l'optimum Proctor normal.

D'après la courbe On a la teneur en eau optimale pour lequel la densité sèche du sol B5 traité avec 1,5 de liant hydraulique ARDIA 600 Soit optimal

$W_{opn} = 14,2 \%$

$\rho_d(opn) = 1,88 \text{ kg/m}^3$

Donc pour ce sol et ce traitement si le matériau est trop sec, il faudra l'humidifier (le plus souvent à l'aide d'une sous-soleuse et d'un malaxeur), pour atteindre la densité maximale possible, et sa teneur en eau nécessaire pour avoir la plus grande portance de sol.

On a résumé les courbes Proctor de tous nos dosages des liants hydrauliques dans ces tableaux et ces courbes :

1,5 ardia 600					
Teneur en eau %	11,4	12,9	14,2	15,4	17,4
Densité sèche kg/m³	1,85	1,88	1,90	1,88	1,81
1,5 ardia A					
Teneur en eau %	10,7	12,2	13,4	15	16,4
Densité sèche kg/m³	1,84	1,87	1,91	1,88	1,85
1,5 % Ardia B					
Teneur en eau %	11,47	12,56	14,52	16,1	17,3
Densité sèche kg/m³	1,844	1,877	1,90	1,857	1,793
2 % Ardia A					
Teneur en eau %	11,5	12,2	14,1	15,6	17,1
Densité sèche kg/m³	1,82	1,861	1,89	1,87	1,82

Chapitre 3 : Partie expérimentale

1,5 Ardia B Alger					
Teneur en eau %	10,3	11,7	13,2	14,7	16,1
Densité sèche kg/m ³	1,81	1,86	1,90	1,89	1,84

Tableau 8 Résultats des essais Proctor sur le sol B5

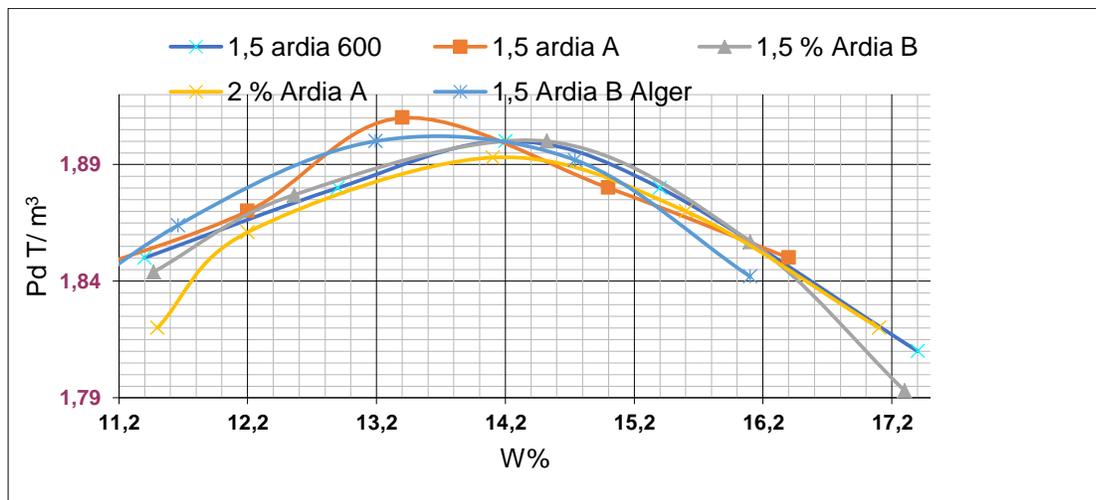


Figure 36 courbes des essais proctor sur le sol B5

3.3.1.2 Traitement de sol A3

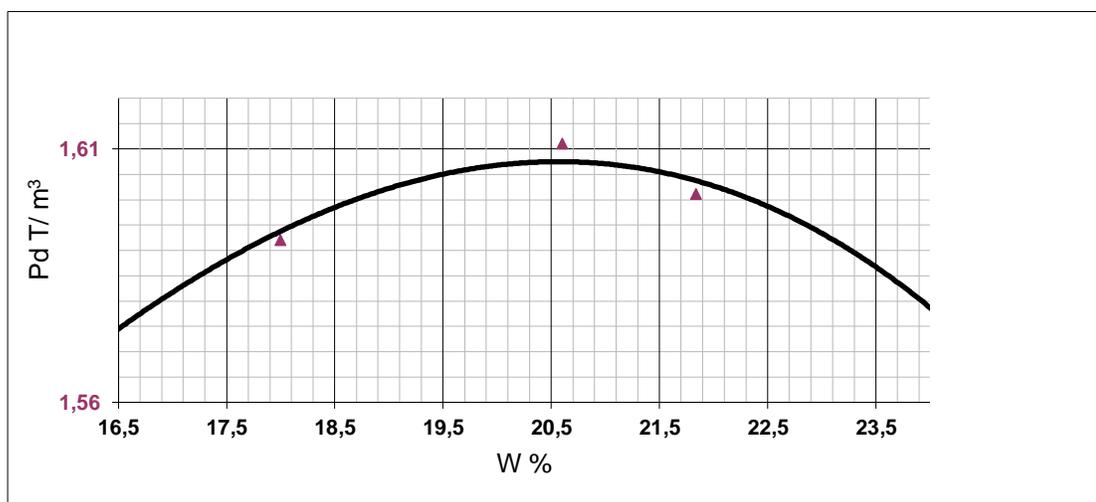


Figure 37 courbe proctor sol A3 (1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600)

Interprétation des résultats

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Le tracé de la courbe $\rho_d = f(w)$ permet de déterminer la valeur maximale de la masse volumique sèche ρ_d c'est à dire l'optimum Proctor normal.

D'après la courbe, On a la teneur en eau optimale pour lequel la densité sèche du sol B5 traité avec 1,5 De la chaux et 4 % de liant hydraulique ARDIA 600 Soit optimal

$W_{opn} = 20,5 \%$

$\rho_d(\text{opn}) = 1,61 \text{ kg/m}^3$

Donc pour ce sol et ce traitement si le matériau est trop sec, il faudra l'humidifier (le plus souvent à l'aide d'une sous-soleuse et d'un malaxeur), pour atteindre la densité maximale possible, et sa teneur en eau nécessaire pour avoir la plus grande portance de sol.

Naturelle (non Traite)					
Teneur en eau %	16,93	18,18	20,54	22,18	24,87
Densité sèche T/m ³	1,551	1,57	1,629	1,628	1,5712
1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600					
Teneur en eau %	16,5	18,0	20,6	21,8	24,2
Densité sèche T/m ³	1,58	1,59	1,61	1,60	1,58
1,5 CLINCKER + 4 ARDIA 600					
Teneur en eau %	18,0	18,3	19,5	20,1	20,8
Densité sèche T/m ³	1,59	1,59	1,61	1,62	1,61
2,5 % clinker 4 % ARDIA 600					
Teneur en eau %	17,7	19,1	20,0	21,1	22,0
Densité sèche T/m ³	1,57	1,58	1,59	1,61	1,60

Tableau 9 Résultats des essais Proctor sur le sol A3

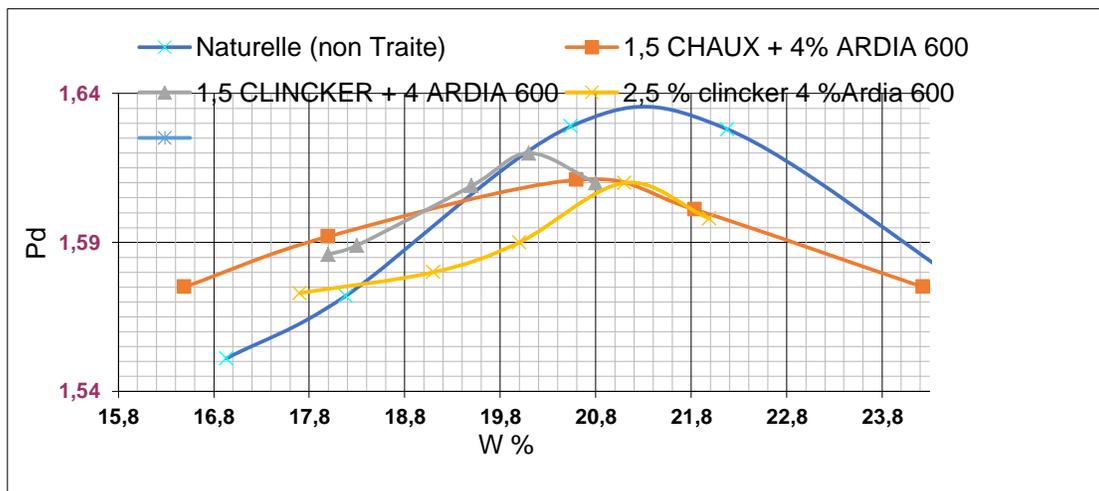


Figure 38 courbes des essais proctor sur le sol B5

Donc on peut résumer tous les résultats obtenus de Proctor des 2 sols A3 et B5 au tableau suivant :

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Le Traitement	Teneur en eau optimal W_{opt} %	Densité sèche optimal kg/m ³
Sol B5		
1,5 ardia 600	14,2	1,88
1,5 ardia A	13,4	1,91
1,5 % Ardia B	14	1,9
2 % Ardia A	14,1	1,89
1,5 Ardia B Alger	13,8	1,905
Sol A3		
Naturelle (non Traite)	22	1,63
1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600	20,5	1,61
1,5 CLINCKER + 4 ARDIA 600	20,5	1,62
2,5 CLINCKER + 4 ARDIA 600	21,1	1,61

Tableau 10 Résultats des essais Proctor Des sols A3 et B5

Les résultats des mesures effectuées sur 2 sols différents. Des courbes Proctor permettent d'apprécier l'impact de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur la succion. Les résultats de l'étude montrent que les courbes sont à la fois influencées par la teneur en eau et l'énergie de compactage.

3.4 L'essai CBR :

L'essai a été réalisé suivant la norme suivante : NF P 94-078

On a fait les essais de CBR pour chaque dosage aux liants hydrauliques et/ou chaux et/ou clinker
On obtient les tableaux et les courbes suivants :

3.4.1 Traitement de sol B5 : traitement au 1,5 % de liant hydrauliques Routière ARDIA 600.

Les résultats de l'essai IPI et ICBR après immersion pour le Dosage sol + 1,5 ARDIA 600 sont exprimés dans le tableau suivant :

Résultats d'IPI		Résultats d'ICBR après immersion	
Effort a 2,5 mm (KN)	4,35	effort à 2,5 mm (KN)	7,13
Indice à 2,5 mm	32,59	Indice à 2,5 mm	53,44
Effort a 5mm (KN)	6,77	effort à 5mm (KN)	10,56
Indice à 5 mm	33,99	Indice à 5 mm	52,99
Correction	0	Correction	0,13
Abscisse 1er point corrige	2,5	Abscisse 1er point corrige	2,63
Effort a 2,5 mm corrige	4,35	Effort a 2,5 mm corrige	7,36
Indice corrige à 2,5 mm	32,59	Indice corrige a 2,5 mm	55,14
Abscisse 2eme point corrige	5	Abscisse 2eme point corrige	5,13

Chapitre 3 : Partie expérimentale

effort à 5 mm corrige	6,77	Effort a 5 mm corrige	10,7
indice corrige à 5 mm	33,99	Indice corrige a 5 mm	53,69
Indice	33,99	Indice	55,14
effort a 1,25 mm (KN)	2,46	effort a 1,25 mm (KN)	4,41
effort a 2 mm (KN)	3,67	effort a 2 mm (KN)	6,19
effort a 2,5 mm (KN)	4,35	effort a 2,5 mm (KN)	7,13
effort a 3 mm (KN)	4,95	effort a 3 mm (KN)	7,95
effort a 4 mm (KN)	5,94	effort a 4 mm (KN)	9,37
effort a 5 mm (KN)	6,77	effort a 5 mm (KN)	10,56
effort a 6 mm (KN)	7,51	effort a 6 mm (KN)	11,57
effort a 7,5 mm (KN)	8,51	effort a 7,5 mm (KN)	12,72

Tableau 11 resultats des essais IPI CBR de traitement au 1,5 % de LHR ARDIA 600.

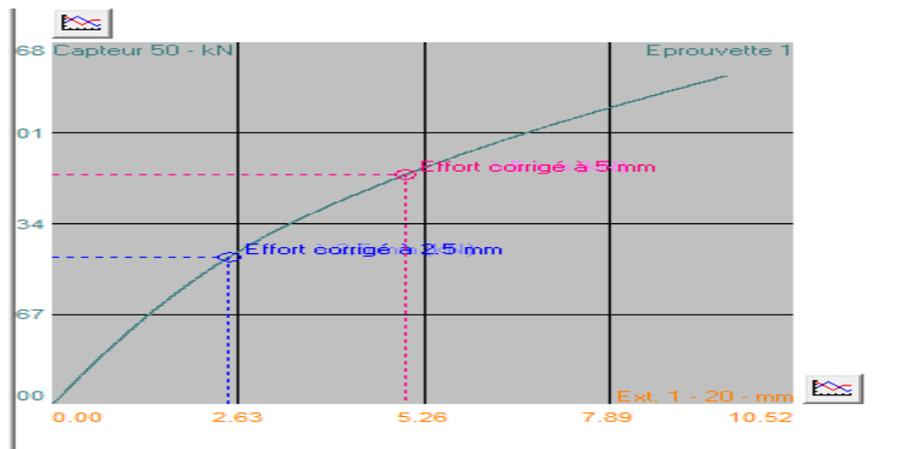


Figure 39 courbes des résultats de l'essai IPI sol avec 1,5 ardia 600

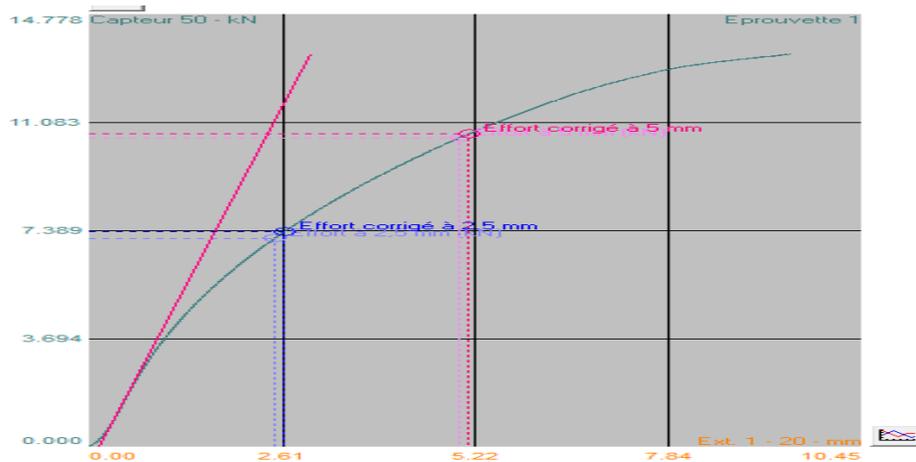


Figure 40 courbes des résultats de l'essai Icb après immersion sol avec 1,5 ardia 600

Interprétation des résultats

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Dans les cas où il est nécessaire de rendre la base des remblais insensible à l'eau, le critère à appliquer est $ICBR_{immersion} > IPI$. On a pour notre cas traitement du sol B5 avec 1,5 ARDIA 600. L'indice ICBR après immersion dans l'eau à 4 jours égale à 55,14 indice IPI immédiat égale à 33,99 donc le Rapport

$$\frac{ICBR_{immersion}}{IPI_{immédiat}} > 1$$

Donc on déduit que notre sol traité par 1,5 de liant hydrauliques ARDIA 600 est insensible à l'eau.

3.4.2 Résultats de Traitement de sol B5

On a fait le Traitement de sol B5 en utilisant :

- Sol naturelle.
- 1,5% ARDIA 600
- 1,5% ARDIA A
- 2 % ARDIA A
- 1,5% ARDIA B
- 1,5 % ARDIA B ALGER

On obtient les résultats suivants :

Le traitement	Sol naturelle.	1,5% ARDIA 600	1,5% ARDIA A	2 % ARDIA A	1,5% ARDIA B	1,5 % ARDIA B ALGER
L'indice IPI	34,83	33,99	34,43	42	30	40,55
L'indice ICBR après immersion	25,32	55,14	48,57	86	64	64,38
Le rapport ICBR après immersion / IPI	0,7	1,62	1,41	2,04	2,13	1,587

Tableau 12 Résultats IPI et CBR de Traitement de sol B5

Chapitre 3 : Partie expérimentale

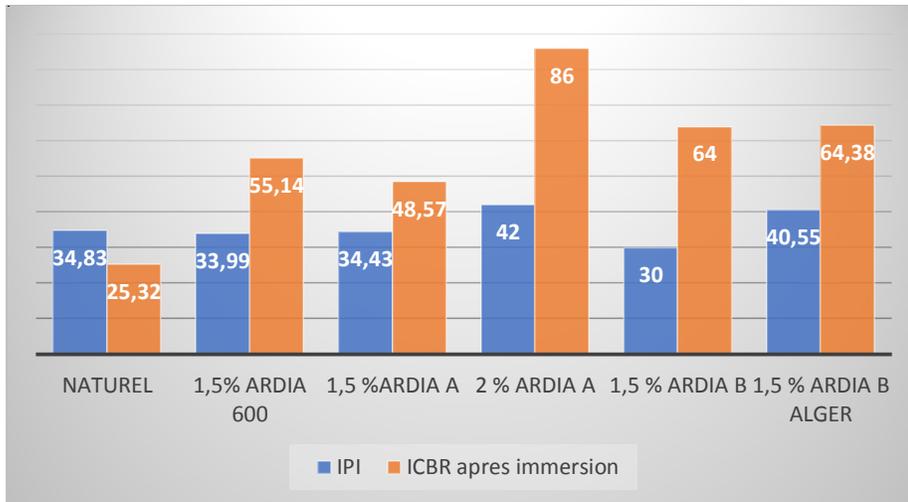


Figure 41 résultats de l'essais IPI et ICBR après immersion sol B5

Interprétation des résultats

On a le seul cas où le rapport (ICBR après immersion / IPI) est inférieur à 1 c'est le cas du sol naturel par contre tous les autres cas sont supérieurs à 1 donc on conclue que le traitement de ce sol B5 aux liants hydrauliques est nécessaire pour rendre la base des remblais insensible à l'eau.

3.4.3 Traitement de sol A3 : traitement au 1,5 % Clinker + 4% ARDIA 600

Les résultats de l'essai IPI et ICBR après immersion pour le Dosage sol + 1,5 % CHAUX + 4% ARDIA 600 sont exprimés dans le tableau suivant :

Résultats d'IPI		Résultats d'ICBR après immersion	
effort à 2,5 mm (KN)	2,82	effort à 2,5 mm (KN)	3,39
Indice à 2,5 mm	21,13	Indice à 2,5 mm	17,87
effort à 5mm (KN)	3,97	effort à 5mm (KN)	3,74
Indice à 5 mm	19,92	Indice à 5 mm	18,75
Correction	0,51	Correction	0
Abscisse 1er point corrige	3,01	Abscisse 1er point corrige	2,5
effort à 2,5 mm corrige	3,1	effort à 2,5 mm corrige	2,39
indice corrige à 2,5 mm	23,19	indice corrige à 2,5 mm	17,87
Abscisse 2eme point corrige	5,51	Abscisse 2eme point corrige	5
effort à 5 mm corrige	4,16	effort à 5 mm corrige	3,74
indice corrige à 5 mm	20,89	indice corrige à 5 mm	18,75
Indice	23,19	indice	18,75
effort à 1,25 mm (KN)	1,95	effort à 1,25 mm (KN)	1,54
effort à 2 mm (KN)	2,52	effort à 2 mm (KN)	2,06
effort à 2,5 mm (KN)	2,82	effort à 2,5 mm (KN)	2,39
effort à 3 mm (KN)	3,09	effort à 3 mm (KN)	2,7
effort à 4 mm (KN)	3,56	effort à 4 mm (KN)	3,28

Chapitre 3 : Partie expérimentale

effort à 5 mm (KN)	3,97	effort à 5 mm (KN)	3,74
effort à 6 mm (KN)	4,33	effort à 6 mm (KN)	4,04
effort à 7,5 mm (KN)	4,79	effort à 7,5 mm (KN)	4,2

Tableau 13 Resultats IPI et CBR de traitement de sol A3 avec 1,5 % Clinker + 4% ARDIA 600

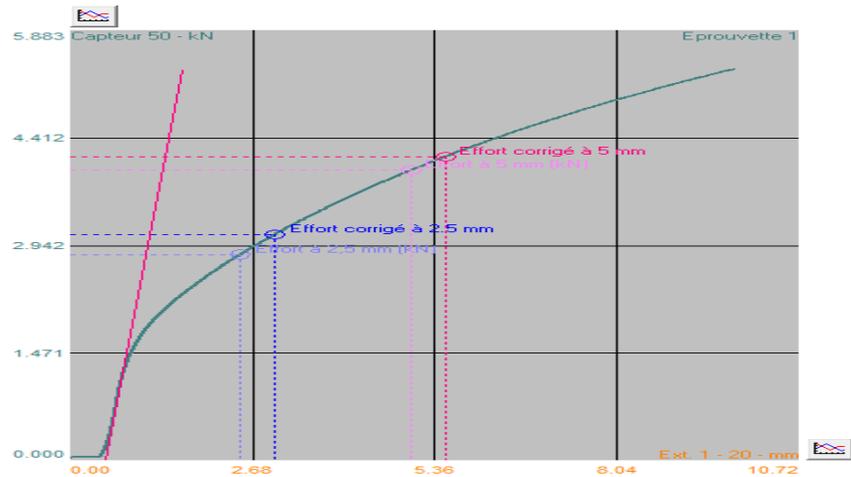


Figure 42 courbe des résultats de l'essai IPI sol avec 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600

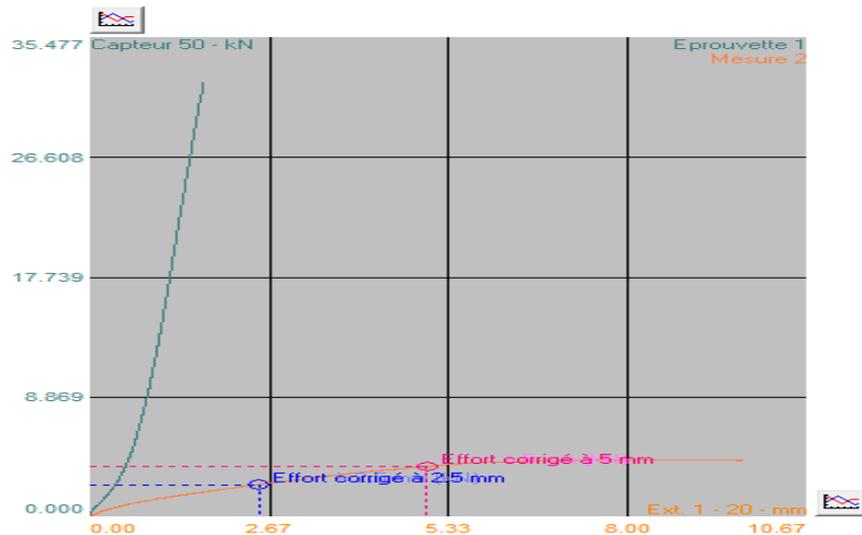


Figure 43 courbes des résultats de l'essai ICBR sol avec 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600

Interprétation des résultats

Le critère à appliquer Pour définir si le sol insensible à l'eau est de vérifier que I.CBR immersion > IPI. On a pour notre cas traitement du sol A3 avec 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600. L'indice ICBR ares immersion dans l'eau a 4 jours égale a 18,75 indice IPI immédiat égale à 23,19 donc le Rapport

Chapitre 3 : Partie expérimentale

$$\frac{ICBR \text{ immersion}}{IPI \text{ immidiat}} < 1$$

Donc on déduit que notre sol traité par 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600 ne présente pas une portance suffisante pour faire notre projet il suffit d'augmenter le dosage du Clinker a 2 % avec 4% de ARDIA 600 et tester si le dosage est suffisant.

3.4.4 Résultats de Traitement de sol B5

On a fait le Traitement de sol B5 en utilisant :

- Sol naturelle.
- 1 ,5% CHAUX + 4 % ARDIA 600
- 1 ,5% CLINKER + 4 % ARDIA 600
- 2 % CLINKER + 4 % ARDIA 600

On obtient les résultats suivants :

Le traitement	Sol naturelle.	1 ,5% CHAUX + 4 % ARDIA 600	1 ,5% CLINKER + 4 % ARDIA 600	2 % CLINKER + 4 % ARDIA 600
L'indice IPI	16,01	19,44	23,19	
L'indice ICBR après immersion	1,74	21,09	18,75	
Le rapport ICBR après immersion / IPI	0,1086	1,084	0,808	

Tableau 14 Résultats IPI et CBR de Traitement de sol A3

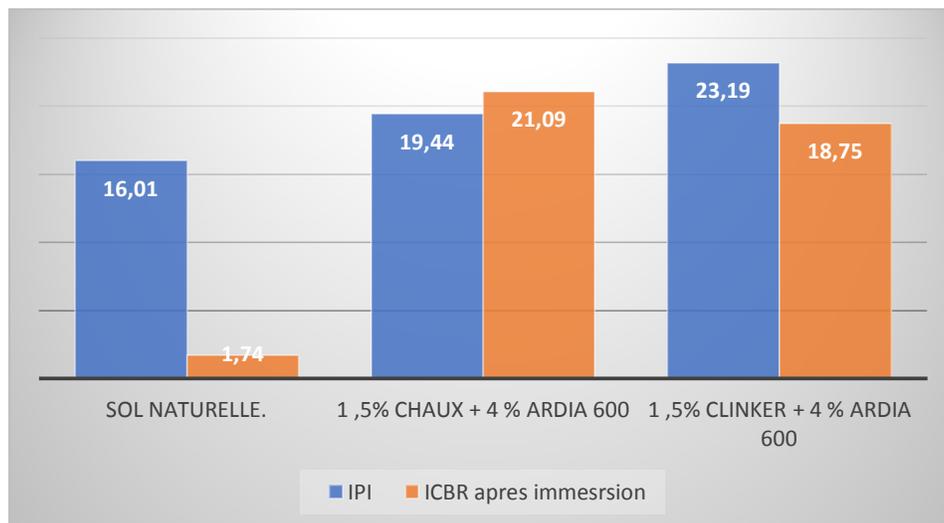


Figure 44 résultats de l'essais IPI et ICBR après immersion sol A3

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Interprétation des résultats

On a des cas où le rapport (ICBR après immersion / IPI) est inférieur à 1 sont (Le cas du sol naturel et le cas de traitement avec 1,5% CLINKER + 4 % ARDIA 600), et le cas de traitement de ce sol A3 est nécessaire pour rendre la base des remblais insensible à l'eau et il faut définir les dosages nécessaires des liants hydrauliques et/ ou la chaux pour avoir la portance nécessaire du sol et rendre le sol insensible à l'eau.

Pour le traitement à la chaux le dosage 1.5% est suffisant pour rendre le sol insensible à l'eau.

Pour le traitement au clincker le dosage 1.5% ne suffit pas pour rendre le sol insensible à l'eau.

3.5 Essai Aptitude au traitement (NF P94-100 ; NF EN 13286-42 ; NF EN 13286-49)

L'essai permet de définir l'aptitude d'un sol à une formulation de traitement donnée dans un délai court (7 jours), les conditions de conservation (immersion à 40°C) conduisent rapidement à une insensibilité à l'eau des sols traités résultant de la floculation des argiles et de la prise du ciment. L'essai d'aptitude au traitement permet alors de vérifier si des agents chimiques, organiques ou minéraux, peuvent nuire à la solidification. Cependant, ces conditions de cure sont extrêmes en comparaison de ce que peut subir le matériau dans l'environnement.

3.5.1 Détermination du gonflement volumique G_v

Le volume initial V_i des éprouvettes cylindriques de diamètre \varnothing 5cm et de hauteur h 5cm (5x5) est calculé immédiatement après leur confection, à partir de leurs dimensions déterminées au pied à coulisses. V_i s'exprime :

$$V_i = h m \cdot \varnothing^2 / 4$$

avec hm en mm, la moyenne de deux mesures de hauteur espacées de 90 \varnothing m en mm, la moyenne de trois mesures de diamètre, en haut, au milieu et en bas de l'éprouvette Les éprouvettes sont ensuite recouvertes de bandelettes perméables et immergées.

Après 4h dans un environnement à une HR \approx 90% et à \approx 20 \pm 2°C et 7 jours d'immersion totale dans l'eau à 40°C, les éprouvettes sont sorties du bain thermostatique, les bandelettes sont retirées et le volume final V_f des échantillons est déterminé par pesée hydrostatique. Après avoir épongé leurs surfaces, elles sont pesées à l'air : masse M_a en g. Elles sont immergées et pesées dans l'eau : masse M_w en g. Soit p_w la masse volumique de l'eau ($p_w = 1 \text{ g.cm}^{-3}$).

Alors :

$$V_f = (M_a - M_w) / p_w$$

Finalement le calcul du gonflement volumique est le suivant :

$$G_v(\%) = (V_f - V_i) / V_i$$

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Résultats et calculs

L'essai a été réalisé suivant la norme suivante : (NF P94-100 ; NF EN 13286-42 ; NF EN 13286-49)

On a fait cet essai pour chaque dosage aux liants hydrauliques et/ou chaux et/ou clinker pour les 2 sols

On obtient les résultats suivants :

3.5.1.1 Traitement de sol B5

Résultats aptitude au traitement du Sol B5 et 1,5 % Ardia 600

Sol B5 et 1,5 % Ardia 600										
N°	M0(g)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	M1(g)	M2(g)	M3(g)
1	197,6	50	50	50	52	52	52	104,9	0,4	214,9
2	200,9	50	50	50	51	51	52	104,9	0,4	214,9
3	200,2	50	50	50	51	51,5	50,5	101,1	0,6	209,5

Tableau 15 Resultats aptitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia 600

1,5 % Ardia B										
N°	M0(g)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	M1(g)	M2(g)	M3(g)
1	211,7	51,5	51	51	50	50	50,5	108,5	0,5	216,3
2	212,4	51	51	51	50	50	50	100,3	0,5	194,2
3	211,6	51	51	51	50	50	50	108,5	0,5	216,3

Tableau 16 Resultats aptitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia B

M₀ masse initiale

M₁ masse de l'éprouvette dans l'eau

M₂ masse de la bande à gaz

M₃ masse de l'éprouvette superficiellement sec

Calculs :

Sol B5 et 1,5 % Ardia 600						
D_MOY ² ENNE	H_MOYENNE	V0	V1	V2	Gv	Moy
5	5,2	102,05	109,6		7,39833415	8,63
5	5,133333333	100,7416667	110,4		9,587228059	
5	5,1	100,0875	109		8,90470838	

Tableau 17 Calculs des Resultats aptitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia 600

Chapitre 3 : Partie expérimentale

1,5 % Ardia B					
D_MOY ² ENNE	H_MOYENNE	v0	V1	Gv	moy
5,116666667	5,016666667	103,1001156	107,3	4,07359817	5,078623
5,1	5	102,08925	107,2	5,006158827	
5,1	5	102,08925	108,3	6,083647397	

Tableau 18 calculs des Resultats aptitude au traitement du Sol B5 et 1,5 %Ardia B

Interprétation des résultats

Les critères d'aptitude au traitement d'un sol sont récapitulés dans le tableau suivant. Un sol est déclaré apte au traitement dès lors que son gonflement volumique Gv est inférieur à 5%

Aptitude au traitement	Gonflement volumique Gv (%)
Adapté	$Gv < 5$
Douteux	$5 \leq Gv \leq 10$
Inadapté	$Gv > 10$

Tableau 19 Critères pour l'interprétation de l'aptitude au traitement

Donc on a pour Le traitement du Sol B5 avec 1,5 %Ardia 600 $Gv = 8,63 \%$ et Le traitement du Sol B5 avec 1,5 %Ardia B le $Gv = 5,07$.

On conclue que notre sol traité au 1,5 de liant hydraulique ardia 600 et Ardia B a une aptitude au traitement DOUTEUX.

3.5.1.2 Traitement de sol A3

1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600								moyenne
	masse	V0	Masse balance	masse hydro	densité eau	Masse dans leau	Gv	
éch 1	183,6	98,17	197,9	92,9	0,9986	105,147206	7,1	7,2
éch 2	183	100,14	200,1	92,9		107,35029	7,2	
éch 3	183,6	99,16	199,6	93,4		106,348888	7,3	

Tableau 20 calculs des Resultats aptitude au traitement du Sol Avec 1,5 CHAUX + 4% ARDIA 600

Interprétation des résultats

On a pour Le traitement du Sol A3 avec 1,5 % de la chaux et le $Gv = 7,2$. On conclue que notre sol traité au 1,5 de la chaux a une aptitude au traitement DOUTEUX.

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.6 Le délai de maniabilité

Le délai de maniabilité est conforme à la norme NF P 98-115.

Le délai de maniabilité nécessaire est défini par l'étude de laboratoire. Dans tous les cas, le délai de maniabilité doit permettre la mise en œuvre, le réglage et le compactage de la couche et l'éventuel pré fissuration.

Les résultats de l'essai délai de maniabilité pour le Dosage sol + 1,5 ARDIA 600 sont exprimés dans le tableau suivant :

heurs	0	2	4	7	16
Weight of mould (WM) g	5380,6	5380,6	5380	5380	5380
Volume of moule (V) cm ³	944,0	944,0	944,0	944,0	944,0
Weight of mould + wet soil (A) g	7394	7380	7374	7359	7332
Water content (Oven method - BS)					
Repere of tare w%					
Weight of tare (t) g	366,3	367,3	804,8	366,4	366,3
Weight of wet sample (W) g (+tare)	1552,5	1666,3	1928,2	1587,6	1552,5
Dry sample (W) g (+tare)	1405,9	1506,6	1789,2	1437,3	1405,9
Density calculation (t / m³)					
Wet density WD=(A-WM)/V	2,133	2,118	2,112	2,096	2,068
Dry density DD=WD/(1+(MC/100))	1,869	1,858	1,851	1,838	1,812

Tableau 21 résultats de l'essai délai de maniabilité pour le Dosage sol + 1,5 ARDIA 600

On a tracé le courbe suivant qui présente la densité sèche du matériau traite en fonction de nombres d'heurs.

Chapitre 3 : Partie expérimentale

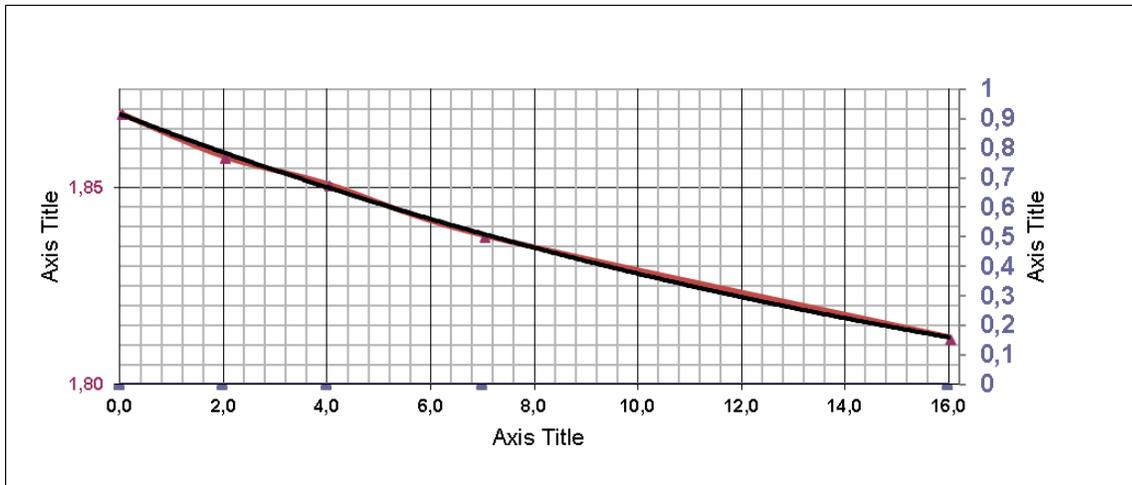


Figure 45 Le délai de maniabilité sol + 1,5 % ARDIA 600

3.6.1 Interprétation des résultats

Le délai de maniabilité est déterminé par compactage Proctor d'une moule du sol traité en cours de la prise correspond au temps pour que la densité sèche ne diminue de plus de 2 %

Donc pour notre cas on a la densité sèche initial (t=0) égale a 1,87 t/m³ donc la densité sèche correspond a le délai de maniabilité égale à : Pd (98%) = 1,87 x 98/100 = 1,8326 t/m³

⇒ Le délai de maniabilité : Dm = 8h et 45 min

3.7 Accumulation des résultats

3.7.1 Résultats de Traitement de sol B5

On a fait le Traitement de sol B5 en utilisant :

- Sol naturelle.
- 1,5% ARDIA 600
- 1,5% ARDIA A
- 2 % ARDIA A
- 1,5% ARDIA B
- 1,5 % ARDIA B ALGER

On obtient les résultats suivants :

Identification							
T Eau nat	Granulo			VBs	Limites		
	Dmax	< 2mm	< 80 μm		L Liquidité	L Plasticité	I Plasticité
%	Mm	%	%	%	%	%	%
	12,5	91	30,5	1,4	/	/	/

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Classe GTR	Formules testées LHR Chaux	Apptitude Gv %	Formulation				
			Proctor		IPI	CBRI	CBRI / IPI
			Wopn	γ_d max			
				%	t/m3	%	%
B5	Naturel		/	/	34,83	25,32	0,73
B5	1,5% ARDIA 600	8,63	14,2	1,88	33,99	55,14	1,62
B5	1,5 % ARDIA A		13,4	1,91	34,43	48,57	1,41
B5	2 % Ardia A		14,1	1,89	42	86	2,05
B5	1,5 % Ardia B	5,07	14	1,90	30	64	2,13
B5	1,5 ARDIA B ALGER		13,8	1,905	40,55	64	1,58

Tableau 22 Résultats de Traitement de sol B5

3.7.2 Résultats de Prétraitement de sol A3

On a fait le prétraitement de sol A3 en utilisant :

- Sol naturelle.
- 1 ,5% CHAUX + 4 % ARDIA 600
- 1 ,5% CLINKER + 4 % ARDIA 600
- 2,5 % clinker 4 % ARDIA 600

On obtient les résultats suivants :

Identification							
T Eau nat	Granulo			VBs	Limites		
	Dmax	< 2mm	< 80 μ m		L Liquidité	L Plasticité	I Plasticité
%	Mm	%	%	%	%	%	
	4	99,5	95	4,83	60,2	25,76	34,44

Classe GTR	Formules testées LHR Chaux	Apptitude Gv %	Formulation				
			Proctor		IPI	CBRI	CBRI / IPI
			Wopn	γ_d max			
				%	t/m3	%	%
A3	Naturel		22	1,63	16,01	1,74	0,11
A3	1 ,5% CHAUX + 4 % ARDIA 600	7,2	20,5	1,61	19,44	21,09	1,08
A3	1 ,5% CLINKER + 4 % ARDIA 600		20,1	1,62	23,19	18,75	0,81

Chapitre 3 : Partie expérimentale

A3	2,5 % clinker 4 %ARDIA 600			21,1	1,61			
----	-------------------------------	--	--	------	------	--	--	--

Tableau 23 Résultats de Traitement de sol A3

3.7.3 Interprétation des résultats

Le traitement de sol aux liants hydraulique et/ ou a la chaux relie directement a des critères a suivie pour atteindre les objectifs souhaité on peut les résume au tableau suivant :

Couche	Objectifs	Performances
Couche de remblai	L'insensibilité a L'eau	CBR ≥ IPI
	Portance	CBR > 15

Tableau 24 Criteres de traitement de sols au liants hydrauliques pour la couche de remblais

Donc on a pour le sol B5 :

Le critère à appliquer Pour définir si le sol insensible à l'eau

$$\frac{ICBR_{immersion}}{IPI_{immidiat}} < 1$$

Est vérifier pour toutes traitement qu'on a fait sauf dans le cas du sol naturelle et

Le critère de portance CBR > 15 Est vérifier pour toutes traitement qu'on a fait

Donc on conclue que le traitement du sol B5 au liants hydraulique est nécessaire pour avoir une portance et une insensibilité a l'eau et toutes les traitements qu'on a fait sont vérifié

Et pour le sol A3 :

Le critère à appliquer Pour définir si le sol insensible à l'eau

$$\frac{ICBR_{immersion}}{IPI_{immidiat}} < 1$$

N'est pas vérifier pour le cas du sol naturelle et le sol traité par 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600

Le critère de portance CBR > 15 n'est pas vérifier pour le cas du sol naturelle

Donc on conclue que le traitement du sol A3 au liants hydraulique est nécessaire pour avoir une portance et une insensibilité a l'eau et 1,5 % Clinker + 4 % ARDIA 600 ne présente pas une insensibilité a l'eau suffisante pour faire notre projet il suffit d'augmenter le dosage du Clinker a 2 % avec 4% de ARDIA 600 et tester si le dosage est suffisant.

Et le seul traitement qui présente des résultats favorables c'est le traitent de sol a 1,5 % de la CHAUX.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les objectifs fixés dans le cadre de ce travail étaient d'étudier l'influence du traitement aux liants hydrauliques et/ou à la chaux sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols traités afin de les utiliser comme couches remblai. A cet effet, une planche d'essais expérimentale a été réalisée au laboratoire de développement de la construction (CDL) de LafargeHolcim (Algérie).

Les essais d'identification et de portance réalisés sur le sol dans le traitement ont permis de confirmer l'intérêt de l'apport de chaux et des liants hydrauliques pour atteindre des performances mécaniques élevées. Ces résultats constituent, en fait, la base de données nécessaire à l'exécution d'une planche d'essai expérimentale sur un chantier réel.

Les essais le plus intéressants qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail sont l'essai de gonflement volumique et l'essai de durabilité du traitement puisqu'ils constituent des critères décisifs pour la technique de traitement choisie.

L'étude expérimentale menée montre que l'utilisation des liants hydrauliques et de la chaux agissent, d'une façon très significative, sur l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques du matériau traité.

Le choix de l'utilisation des liants hydraulique seulement ou associés à la chaux (ou clinker) dépend de la nature du sol à traiter.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] R.CROISÉ. TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES . à l'Ecole Forestière des Barres .1994, page 427- 438
- [2] SETRA . LCPC . Réalisation des remblais et des couches de forme . PARIS : Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées , 2000 ,102 p.
- [3] CIM.Beton . Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme. Routes n°89 france , Septembre ,2004 , 8 p
- [6] Isis BRABET. LE TRAITEMENT DES SOLS POUR LA COUCHE DE FORME, PLATEFORME DE CHAUSSEE . 127 p. thèse master. : CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS ,PARIS.21,JUIN, 2012.
- [5] Dr. GHOMARI Fouad . SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION. 196 p. Thèse doctorat :UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL .2005
- [7] eurovia . TRAITEMENT DE SOLS et MATÉRIAUX EN PLACE . DIRECTION TECHNIQUE 18, place de l'Europe - 92565 Rueil-Malmaison Cedex, juin ,2010, 4 p
- [8] H. Backaert ,E. Barbé. Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Centre de recherches routières. Boulevard de la Woluwe 42 – 1200 Bruxelles, 2009. 89 p
- [8] H. Backaert ,E. Barbé . Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques . . Boulevard de la Woluwe 42 – 1200 Bruxelles : Centre de recherches routières , 2009 , 89 p.
- [9] F.schlosser . Essais de laboratoires et en places de mécanique des sols . Paris : laboratoire central des pentes et chaussées ,juin 1973 , 22 p .
- [10] Y.TLAN . Catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechniques d'Orléans. Orléans : BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES , 1978 , 34 p .
- [11] Florian.Weill,Moncef.Radi,HaPhong.Nguyen,Hamza.Sehaqui,Nafaï.Ilias.<RAPPORT D'IDENTIFICATION DES SOLS>.école polytechnique de Lausanne . Octobre 2010
- [12]Marcel LECOMTE. Bleu de méthylène.Cercle des Mycologues du Luxembourg belge asbl,1994, 6 p
- [13] lafarge algerie. IDENTIFICATION DES MATERIAUX EVSM Voie express Périphérique Rahmania – Zeralda ,janvier ,2018 , 12 p

[14] Pierre ROSSI . Ludovic GAVOIS . Guy RAOUL . Classification des matériaux . paris : Grands Travaux de Terrassement (Razel), 2008 , 14 p .

[15] GADOURI Hamid. Influence de la présence des sulfates sur le traitement des sols argileux par des ajouts minéraux.137 p . these doctorat . Université Yahia Farès – Médéa. 2017

[16] SETRA . LCPC . Réalisation des remblais et des couches de forme . PARIS : Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées , 2000 ,102 p.

[17] ARMENTI Yannick .BRUANT Etienne . Etude de marché des produits de traitement pulvérulents pour l'amélioration des sols .120p.these Master. ECOLE DES MINES DE DOUAI. 2011

[19] Arvor geotechnique .determination des referances de compactage dun materieu . 26,Janvier,2011 , 1p

[18] NF P 94-093. Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié . Octobre 1999

[20] M. POUGET. Mesures d'humidité sur les échantillons de sols Gypseux . 0. R. S. T. O. M ». Août ,1966, 10p .

[21] M. GHOMARI F . BENDI.OUIS A .SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION Travaux pratiques .119 p. thèse Master . UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR .2008

[22] Myriam OLIVIER , Ali MESBAH. construction en terre focus sur la fabrication et la construction en blocs de terre compressée . Construction en BTC Cayenne, Guyane, 11-15 ,avril , 2016

Normes

- NF P 11-300 Exécution des terrassements : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, 1998.
- NF P 94-051 Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau, 1993.
- NF P 18-573 Essai Los Angeles, décembre 1990.
- NF P 18-572 Essai micro deval, décembre 1990.
- NF P 18-576 Mesure du coefficient des friabilités des sables, décembre 1990.
- NF EN 459-1 Chaux de construction, octobre 2002.
- NF P 98-101 Chaux aérienne calcique pour sols et routes, juillet 1991.
- NF EN 197-1 Ciment, février 2001.
- NF P15-108 et ENV 13 282 Liants hydrauliques routiers, décembre 2000.
- NF P 18-560 Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage, 1996.
- NF P 94-068, EN-933.9 Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol, l'essai à la tache, 1998.
- NF P 94-100 Essai d'évaluation de l'aptitude sol au traitement, 199.
- NF P 94- 093 Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié, 1999.
- EN 13 286-41 Essai de résistance à la compression.
- EN 13286-42 Essai de résistance à la traction.
- NF P 94-050 Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage, 1995
- NF P 94-048 Détermination de la teneur en carbonates. Méthode du calcimètre 2eme tirage janvier 2003
- NF P 94-078 Indice CBR après immersion – Indice portant immédiat, 1997. ASTM D 559 – 96 Essai de durabilité.

Annexe

Annexe 01 : Classement des sols GTR

Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état		
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5^(*) ou I_p ≤ 12	A₁ Limons peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI^(*) ≤ 3 ou W_n ≥ 1,25 W_{OPN}	A ₁ th		
				3 < IPI^(*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ W_n < 1,25 W_{OPN}	A ₁ h		
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A ₁ m		
				0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN} W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₁ s A ₁ ts		
		12 < I_p ≤ 25^(*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI^(*) ≤ 2 ou I_c^(*) ≤ 0,9 ou W_n ≥ 1,3 W_{OPN}		A ₂ th	
				2 < IPI^(*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I_c^(*) < 1,05 ou 1,1 W_{OPN} ≤ W_n < 1,3 W_{OPN}	A ₂ h		
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I_c ≤ 1,2 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A ₂ m		
				1,2 < I_c ≤ 1,4 ou 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN} I_c > 1,3 ou W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₂ s A ₂ ts		
		25 < I_p ≤ 40^(*) ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marnieuses, limons très plastiques...	IPI^(*) ≤ 1 ou I_c^(*) ≤ 0,8 ou W_n ≥ 1,4 W_{OPN}		A ₃ th	
				1 < IPI^(*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I_c^(*) < 1 ou 1,2 W_{OPN} ≤ W_n < 1,4 W_{OPN}	A ₃ h		
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I_c ≤ 1,15 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,2 W_{OPN}	A ₃ m		
				1,15 < I_c ≤ 1,3 ou 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN} I_c > 1,3 ou W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₃ s A ₃ ts		
		I_p > 40^(*) ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marnieuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique			A ₄ th
							A ₄ h
							A ₄ m
							A ₄ s

Classe **B** (suite)

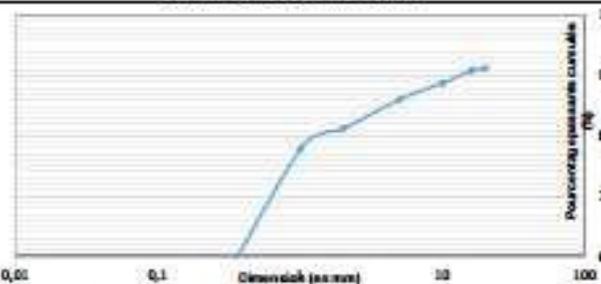
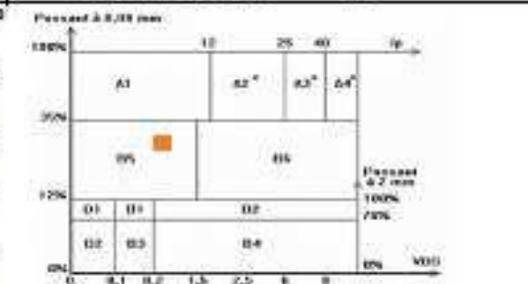
Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS							
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	Sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IPI^(*) ≤ 7 ou v₆ ≥ 1,25 v_{6 FN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th
				7 < IPI^(*) ≤ 15 ou 1,1 v_{6 FN} ≤ v₆ < 1,25 v_{6 FN}	B ₄ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th
				0,9 v_{6 FN} ≤ v₆ < 1,1 v_{6 FN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h
				0,6 v_{6 FN} ≤ v₆ < 0,9 v_{6 FN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h
				v₆ < 0,6 v_{6 FN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ s
					B ₄ tss	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ s
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5^(*) ou I_p ≤ 12	B₅ Sables et gravestres siliceux...	IPI^(*) ≤ 5 ou v₆ ≥ 1,25 v_{6 FN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
				5 < IPI^(*) ≤ 12 ou 1,1 v_{6 FN} ≤ v₆ < 1,25 v_{6 FN}	B ₅ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th
				12 < IPI^(*) ≤ 30 ou 0,9 v_{6 FN} ≤ v₆ < 1,1 v_{6 FN}	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h
				0,6 v_{6 FN} ≤ v₆ < 0,9 v_{6 FN}	B ₅ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h
				v₆ < 0,6 v_{6 FN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m
					B ₅ tss	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ m
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5^(*) ou I_p > 12	B₆ Sables et graves argileux à très argileux	IPI^(*) ≤ 4 ou w₂ ≥ 1,3 w_{OPN} ou I_c ≤ 0,8	B ₆ th		
				4 < IPI^(*) ≤ 10 ou 0,8 < I_c ≤ 1 ou 1,1 w_{OPN} ≤ w₂ < 1,3 w_{OPN}	B ₆ h		
				10 < IPI ≤ 25 ou 1 < I_c ≤ 1,2 ou 0,8 w_{OPN} ≤ w₂ < 1,1 w_{OPN}	B ₆ m		
				0,7 w_{OPN} ≤ w₂ < 0,8 w_{OPN} ou 1,2 < I_c ≤ 1,3	B ₆ s		
				w₂ < 0,7 w_{OPN} ou I_c > 1,3	B ₆ ts		
					B ₆ tss		

(*) Paramètres dont le choix est à privilégier

Annexe 2 :

Rapport d'essai d'identification des matériaux prélevés LAFARGE

 Membres de LafargeHolcim	Laboratoire de développement de la construction Lafarge Algérie Construction development laboratory - CDL Rapport d'essai d'identification Évaluation des terrassements Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières																																													
Client : ANA/EVSM Projet : voie expresso périphérique Rahmania – Zeralda Adresse Rahmania Wilaya : Alger	N° Projet : 15 Référence produit : SL-OCT17-22 Sondage : PUD1-PK 1+500 Date d'essai : 23/10/2017																																													
COURBE GRANULOMETRIQUE	CLASSIFICATION GTR : B5																																													
																																														
GRANULOMETRIE SUR (0/50)	SEDIMENTOMETRIE	ARGILOSITE																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Tamis (mm)</th> <th>Passant (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>20</td><td>91,2</td></tr> <tr><td>16</td><td>90,9</td></tr> <tr><td>10</td><td>88,8</td></tr> <tr><td>5</td><td>86,1</td></tr> <tr><td>2</td><td>81,2</td></tr> <tr><td>1</td><td>77,9</td></tr> <tr><td>0,1</td><td>35,2</td></tr> <tr><td>0,08</td><td>26,4</td></tr> </tbody> </table>	Tamis (mm)	Passant (%)	20	91,2	16	90,9	10	88,8	5	86,1	2	81,2	1	77,9	0,1	35,2	0,08	26,4	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Diamètre équivalent</th> <th>Passant (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Diamètre équivalent	Passant (%)							<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Limites d'Atterberg</td> <td>LL</td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td>LP</td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td>Ip</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Indice de consistance</td> <td>Ic</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Valeur de bleu de méthylène</td> <td>VBs</td> <td>0.73 g/100g</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">Plasticité : </td> </tr> </table>	Limites d'Atterberg	LL			LP			Ip		Indice de consistance	Ic		Valeur de bleu de méthylène	VBs	0.73 g/100g	Plasticité : 		
Tamis (mm)	Passant (%)																																													
20	91,2																																													
16	90,9																																													
10	88,8																																													
5	86,1																																													
2	81,2																																													
1	77,9																																													
0,1	35,2																																													
0,08	26,4																																													
Diamètre équivalent	Passant (%)																																													
Limites d'Atterberg	LL																																													
	LP																																													
	Ip																																													
Indice de consistance	Ic																																													
Valeur de bleu de méthylène	VBs	0.73 g/100g																																												
Plasticité : 																																														
PARAMETRES D'ETAT	CARACTERISTIQUES MECANIQUES																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>W_n</td><td>16,2%</td></tr> <tr><td>W_d/W_{opt}</td><td> </td></tr> <tr><td>IPI à W_n</td><td> </td></tr> <tr><td>ICBRI à W_n</td><td> </td></tr> </table>	W_n	16,2%	W_d/W_{opt}		IPI à W_n		ICBRI à W_n		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Los Angeles</td> <td>LA</td> <td>%</td> <td>Dégradabilité</td> <td>DG</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Micro-Deval</td> <td>MDE</td> <td>%</td> <td>Masse volumique sèche</td> <td>ps</td> <td>ton/m³</td> </tr> <tr> <td>Fritabilité</td> <td>FS</td> <td>%</td> <td>Teneur en éléments solubles</td> <td> </td> <td>%</td> </tr> </table>	Los Angeles	LA	%	Dégradabilité	DG	%	Micro-Deval	MDE	%	Masse volumique sèche	ps	ton/m ³	Fritabilité	FS	%	Teneur en éléments solubles		%																			
W_n	16,2%																																													
W_d/W_{opt}																																														
IPI à W_n																																														
ICBRI à W_n																																														
Los Angeles	LA	%	Dégradabilité	DG	%																																									
Micro-Deval	MDE	%	Masse volumique sèche	ps	ton/m ³																																									
Fritabilité	FS	%	Teneur en éléments solubles		%																																									
Observations :	Le responsable d'étude : Nom : Bilal Berkia Date : 19/11/2017																																													

