

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : GEOTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par :

BENSODAN Yaakoub et DJOUADI Noura Maroua

Intitulé :

**Amélioration des sols fins par ajout de  
sable en vue d'une valorisation en  
techniques routières**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. MEDDAH Abdelaziz	Université de M'sila	Président
Dr. BAKIR Nassima	Université de M'sila	Examineur
Mr. LAHMADI Azzeddine	Université de M'sila	Encadreur

Année universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1438



# إهداء وشكر

الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى وأهله ومن وفى

الحمد لله الذي وفقنا لتتميم هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية اعتبرها خطوة وليست نهاية فهذه ثمرة جهد ونجاح بفضل الله تعالى.

أهديها الى والدي العزيز حفظه الله تعالى وأطال في عمره، والى التي جعل الله الجنة تحية قدمها ربتني صغيرة ونصحتني كبيرة أمي أحامها الله نورا دربي، والى من قاسموني أفراحي وأحزاني أخواتي العزيزات، والى من رزقني الله به نعمة وسنحدا وبسمة رسمت على شفاهي خطبي، والى روح أجدادي رحيمهم الله وطيبهم تراهم الذين ل طالما تمنيتهم أن أقاسمهم فرحتي هذه، والى جدتي بارك الله عمرها، والى كل عائلتي من قريب أو بعيد. إلى الذي ساهم في إنجاح هذا العمل بكل معارفه الأستاذ عادل الدين أحمد.

والله أسأل أن تكون خير خلفه لخير سلفه.

نورة عروة





# إهداء وشكر

الحمد لله الذي بفضله تتم الساعات الحمد لله دائماً وأبداً

أهدي ثمرة جسدي إلي من قال فيهما الله عز وجل: "وأخفض لها جناح الظل من الرحمة وقتل ريبي، أرحمهما كما ربياني صغيراً"  
الآية 24 من سورة الإسراء.

إلي العظيمة في نور حياتي وضيائها إلي موطن الحبه وشاطئ الأمان ومرقأ المسكين، إلي من القلبج بصواها والعمر فداها  
والعين لا ترتاح إلا برؤياها إلي أجمل كلمة ينطق بها اللسان، أمي الغالية حفظها الله ورعاها.

إلي النور الوضاء، مصدر فخري وذكوري، إلي من كان سند لي في هذه الحياة إلي الذي ربحني وحماني في يدي ثمرة زرع  
إلي من كان سر وجودي إلي أغلى شيء في الوجود، أبي الغالي أطال الله في عمره.

إلي امرأ املك الذين تقاسمهم معي مسيرة الحياة اجرتي إلي كل أفراد عائلتي الكريمة، الي من جعل الله بها أيامي خطيبتي  
الغالية الي جدتي بارك الله عمرها والى روح اجدادي رحمهم الله وطيب ثراهم.

إلي الذين يحضوا معي أعلى أيام الجامعة، إلي من استوطنوا داخل القلبج وتركو بصاه لا تمنعها دائرة الزمن.

إلي الذي ساهم في إنجاح هذا العمل بكل معارفه الأستاذ عز الدين لحمادي.

يعقوب



## **RÉSUMÉ :**

Le but de la présente étude est la caractérisation géotechnique d'un sol de la région de M'sila et d'améliorer ses caractéristiques par l'ajout du sable (de Boussaâda) afin de l'utiliser dans le domaine de la géotechnique routière. La première étape de ce travail consiste à déterminer les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du sol, pour le classer selon le GTR. La deuxième étape est le traitement avec la technique de l'ajout d'un autre type de sol (sable) à deux pourcentages (25 et 50%). Les résultats obtenus permettent de prouver la faisabilité de son utilisation en remblai et en couche secondaire dans les routes.

## **Mots clés :**

Caractérisation géotechnique ; Classement selon le GTR ; Technologie routière, Traitement des sols ; Valorisation.

## **ABSTRACT:**

The aim of this study is the geotechnical characterization of a soil in the M'sila region and to improve its characteristics by adding sand (from Boussaâda) to use it in the field of road geotechnics. The first step of this work is to determine the physical, mechanical, and chemical properties of the soil, to classify it according to the GTR. The second stage is the treatment with the technique of adding another type of soil (sand) at two percentages (25 and 50%). The results obtained make it possible to prove the feasibility of its use as backfill and as a secondary layer in roads.

## **Keywords:**

Geotechnical characterization; Ranking according to the GTR; Road technology, Soil treatment; Valuation.

## ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى التوصيف الجيوتقني للتربة في منطقة المسيلة وتحسين خصائصها بإضافة الرمل (من بوسعادة) لاستخدامه في مجال جيوتكنيك الطرق. تتمثل الخطوة الأولى في هذا العمل في تحديد الخواص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية للتربة، وتصنيفها وفقًا لـ GTR 1. المرحلة الثانية هي المعالجة بتقنية إضافة نوع آخر من التربة (الرمل) بنسبتين (25 و 50%). النتائج التي تم الحصول عليها تجعل من الممكن إثبات جدوى استخدامه كطبقة ردم وكطبقة ثانوية في الطرق.

## الكلمات المفتاحية:

التوصيف الجيوتقني ؛ التصنيف وفقًا لـ GTR 1 ؛ تكنولوجيا الطرق ؛ معالجة التربة ؛ التثمين.

# SOMMAIRE

## Introduction Générale

## CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

<b>I.1. Classification des sols selon le GTR : (Référence GTR)</b>	..... 19
I.1.1. Paramètres de nature	.....19
<i>I.1.1.1. La granularité (normes P 94-056 et 057)</i>	..... 19
<i>I.1.1.2. L'argilosité</i>	..... 20
<i>I.1.1.3. La valeur de bleu de méthylène VBS</i>	..... 20
<i>I.1.1.4. Référence au paramètre équivalent de sable (ES)</i>	..... 22
I.1.2. Paramètres de comportement mécanique	.....22
I.1.3. Paramètres d'état	..... 23
<i>I.1.3.1. Différents états hydriques considérés</i>	..... 23
<i>I.1.3.2. Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique</i>	..... 24
<i>I.1.3.3 Exemple de classification des sols</i>	..... 25
<i>I.1.3.4. Classification des matériaux rocheux (classe R)</i>	..... 26
<i>I.1.3.5. Classification des matériaux rocheux d'après nature pétrographique la de la roche</i>	..... 26
<i>I.1.3.6. Classification des matériaux rocheux d'après leur état et leurs caractéristiques mécaniques</i>	..... 27
<i>I.1.3.7. Paramètres d'état et de comportement mécanique retenus dans la classification des matériaux rocheux</i>	..... 28
<i>I.1.3.8. Valeurs seuils retenues pour les paramètres d'état et de comportement des matériaux rocheux</i>	..... 29
<i>I.1.3.9. Classification des sols organiques et sous-produits industriels (classe F)</i>	..... 30
<b>I.2. Amélioration des sols</b>	..... <b>32</b>
I.2.1. Méthodes mécaniques	..... 32
<i>I.2.1.1. Vibrocompactage</i>	..... 32
<i>I.2.1.2. Le compactage dynamique (ou pilonnage)</i>	..... 33
<i>I.2.1.3. Colonnes ballastées</i>	..... 34
<i>I.2.1.4. Colonnes pilonnées</i>	..... 34
I.2.2. Méthodes hydromécaniques	..... 35
<i>I.2.2.1. Pré chargement</i>	..... 35
I.2.3. Méthodes chimiques	..... 36

<i>I.2.3.1. Injection Solide</i>	..... 36
I.2.4. Amélioration des sols par géotextiles	..... 37
<i>I.2.4.1. Généralités sur les géotextiles et leurs applications</i>	..... 37
<i>I.2.4.1.1. Géotextiles</i>	..... 37
<i>I.2.4.1.2. Principales fonctions des géotextiles</i>	..... 37
<i>I.2.4.1.3. Application des géotextiles en renforcement</i>	..... 38
<i>I.2.4.2. Geogrille</i>	..... 38
I.2.5. Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux	..... 38
<i>I.2.5.1. La chaux</i>	..... 39
<i>I.2.5.1.1. Traitement type et conditions de mise en œuvre</i>	..... 39
<i>I.2.5.2. Le ciment</i>	..... 42
<i>I.2.5.2.1. Utilisation des ajouts cimentaires</i>	..... 43
<i>I.2.5.2.2. Les techniques de traitement</i>	..... 44
<i>I.2.5.2.3. Différents types de chaux</i>	..... 45
<i>I.2.5.2.4. Action de la chaux</i>	..... 46
<i>I.2.5.3. Les liants hydrauliques routiers LHR</i>	..... 47
<i>I.2.5.3.1. Action des liants hydrauliques</i>	..... 47

## **Chapitre II : Caractérisation Géotechnique**

<b>II.1- Introduction</b>	..... <b>49</b>
<b>II.2. Essais d'identifications</b>	..... <b>49</b>
II.2.1. Teneur en eau (Méthode par étuvage) (NF P 94-050)	..... 49
II.2.2. La masse volumique	..... 51
II.2.3 -Mesure de la masse volumique (NF XP P 94-054)	..... 52
<i>II.2.3.1. Masse volumique apparente</i>	..... 52
<i>II.2.3.2. La masse volumique absolue</i>	..... 53
II.2.3. Méthode du pycnomètre à eau (NF P 94 -054)	..... 53
II.2.4. Analyse granulométrique	..... 55
II.2.5. Les limites d'Atterberg	..... 56
II.2.6. L'essai au bleu de méthylène	..... 58
II.2.7. Analyse chimique	..... 59
II.2.8. Matières organiques	..... 60
<b>II.3. Essais Mécaniques</b>	..... <b>61</b>
II.3.1. Essai Proctor (normal et modifié) (selon la norme : NF P 94-09)	..... 61

II.3.2. Essai de portance C.B.R (NF P 94-078)	..... 63
II.3.3. Essais de Cisaillement (NF P 94-71)	..... 65
II.3.4. Essais œdométrique (XP P 94-090-1)	..... 67
<b>II.4- Conclusion</b>	<b>..... 68</b>

### **Chapitre III : Résultats et Interprétations**

<b>III.1. Introduction</b>	<b>..... 71</b>
----------------------------	-----------------

<b>III.2. Essais d'identification</b>	<b>..... 71</b>
---------------------------------------	-----------------

III.2.1. La masse volumique	..... 71
-----------------------------	----------

III.2.2. Méthode du Pycnomètre (NF P 94-054)	..... 71
--	----------

III.2.3. La masse volumique	..... 72
-----------------------------	----------

<i>III.2.3.1. Analyse granulométrique des sols méthode par sédimentation NF P -94.057 Version Mai 1992 ref:E.G-Id/6</i>	..... 73
---	----------

III.2.4. Equivalent de sable	..... 74
------------------------------	----------

III.2.6. Limites d'Atterberg	..... 77
------------------------------	----------

<i>III.2.6.1 Limites d'Atterberg (25% sable+ 75% sol fin)</i>	.....77
---	---------

<i>III.2.6.2 Limites d'Atterberg (50% sable+ 50% sol fin)</i>	..... 77
---	----------

<b>III.3. Les essais mécaniques</b>	<b>..... 82</b>
-------------------------------------	-----------------

III.3.1. Essais Proctor normale	..... 82
---------------------------------	----------

<i>III.3.1.1. Essais Proctor normale (25% sable+ 75% sol fin)</i>	..... 82
---	----------

<i>III.3.1.2. Essais Proctor normale (50% sable+ 50% sol fin)</i>	..... 82
---	----------

III.3.2. Essai C.B.R	..... 85
----------------------	----------

<i>III.3.2.1. Essai C.B.R (25% sable + 75% sol fin)</i>	..... 85
---	----------

<i>III.3.2.2. Essai C.B.R (50% sable + 50% sol fin)</i>	..... 85
---	----------

III.3.3. Cisaillement à la boîte	..... 86
----------------------------------	----------

<i>III.3.3.1. Cisaillement à la boîte (25% sable + 75% sol fin)</i>	..... 86
---	----------

<i>III.3.3.2. Cisaillement à la boîte (50% sable + 50% sol fin)</i>	..... 88
---	----------

III.3.4. Essai œdométrique	..... 90
----------------------------	----------

<i>III.3.4.1. Essai œdométrique (25% sable + 75% sol fin)</i>	..... 90
---	----------

<i>III.3.4.2. Essai œdométrique (50% sable + 50% sol fin)</i>	..... 91
---	----------

### **Chapitre IV : Valorisation en Techniques Routières**

<b>IV.1. Introduction</b>	<b>..... 96</b>
---------------------------	-----------------

<b>IV.2. Classification des sols selon le GTR</b>	<b>..... 96</b>
---	-----------------

<b>IV.3. Conditions d'utilisation des matériaux en r...emblai et en couches de formes</b>	<b>..... 99</b>
---	-----------------

IV.3.1. Conditions d'utilisation des matériaux en remblai	..... 99
<i>IV.3.1.1. Conditions météorologiques</i>	..... 99
<i>IV.3.1.2. Conditions d'utilisation des matériaux en remblai</i>	..... 99
IV.3.2. Conditions d'utilisation des matériaux en couches de formes	..... 104
<i>IV.3.2.1. Conception de la couche de forme</i>	..... 104
<i>IV.3.2.1.1. Définition et nature de la couche de forme</i>	..... 104
<i>IV.3.2.1.2. Fonctions et conception de la couche de forme</i>	..... 105
<i>IV.3.2.1.3. Critères associés à la construction de la chaussée</i>	..... 107
<i>IV.3.2.2. Matériaux de couche de forme</i>	..... 107
<i>IV.3.2.2.1. Critères à satisfaire</i>	..... 107
<i>IV.3.2.2.2. Techniques de préparation et de protection des matériaux pour emploi en couche de forme</i>	..... 108
<b>Conclusion Générale</b>	<b>..... 113</b>
<b>Référence bibliographique</b>	<b>..... 114</b>

## LISTE DES FIGURES :

### Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Figure I.1 : Ensemble du matériel d'essai	..... 21
Figure I.2 : Auréole bleue apaisant à la périphérie de la tache indiquant la fin de l'adsorption du bleu sur le sol	..... 21
Figure I.3 : Le CLASSOL cet appareil réalise l'identification de la nature des sols de manière rapide et semi-mécanisée	..... 22
Figure I.4 : Extraction des sols de classes A2m et A3m par conditions météorologiques "évaporantes" : des conditions de chantier idéales !	..... 23
Figure I.5 : La portance des sables fins des classes B1 ou D1 est quasi-indépendante de leur teneur en eau mais ces sols sont en revanche très sensibles à l'érosion pluviale	..... 24
Figure I.6 : Extraction après rabattement de la nappe	..... 25
Figure I.7 : Comportement à la mise en remblai	..... 25
Figure I.8 : Pour caractériser un déblai rocheux, il faut au préalable être en mesure de prévoir à partir de la roche place le comportement du matériau après abattage	..... 26
Figure I.9 : Craie de la classe R12m (craie de densité moyenne à teneur en eau moyenne)	..... 27
Figure I.10 : Craie de la classe R13h (craie de densité faible à teneur en eau élevée)	..... 27
Figure I.11 : Un bloc immédiatement après extraction	..... 27
Figure I.12 : Le même bloc en cours de dégradation après plusieurs jours soumis aux intempéries	..... 27
Figure I.13 : Roche siliceuse (poudingue) de la classe R42	..... 28
Figure I.14 : Roche magmatique dure (basalte) de classe R6	..... 28
Figure I.15 : Principe de l'essai de Fragmentabilité (FR)	..... 29
Figure I.16 : Étapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller)	..... 29
Figure I.17 : Chantier de vibrocompactage	..... 32
Figure I.18 : Chantier de pilonnage	..... 33
Figure I.19 : Colonnes pilonnées	..... 34
Figure I.20 : Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements	..... 35
Figure I.21 : Techniques de pré chargement	..... 35
Figure I.22 : Injection solide (plates formes amélioration des sols)	..... 36
Figure I.23 : Types de Geogrille	..... 36
Figure I.24 : Application géotextiles	..... 38

Figure I.27 : Vue générale d'UN chantier de traitement de sol (documentation technique routes N89 septembre 2004)	..... 40
Figure I.28 : Ependage du liant	..... 40
Figure I.29 : Malaxage	..... 41
Figure I.30 : Compactage partiel (documentation technique routes N89 septembre 2004)	..... 41
Figure I.31 : Compactage final (documentation technique routes N89 septembre 2004)	..... 42
Figure I.32 : Protection de surface de la couche traitée (documentation technique routes N89 septembre 2004)	..... 42
Figure I.33 : Chantier de traitement du sol au ciment	..... 43
Figure I.34 : Le composition du ciment. BETON Degussa Construction Chemicals France	..... 45
Figure I.35 : Traitement de remblai à la chaux (Rossi et al .2007)	..... 45
Figure I.36 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive (Rossi et al. 2007)	..... 46
<b>Chapitre II : Caractérisation Géotechnique</b>	
Figure II.1 : Appareillage pour essai de Teneur en eau (Méthode par étuvage)	..... 50
Figure II.2 : Mode opératoire essai masse volumique apparente	..... 52
Figure II.3 : les éprouvettes de la masse volumique absolue	..... 53
Figure II.4 : Pycnomètre en verre	..... 54
Figure II.5 : Analyse granulométrique par tamisage	..... 55
Figure II.6 : Matériels spéciales de limites d'Atterberg	..... 57
Figure II.7 : Appareillage de l'essai au bleu de méthylène	..... 59
Figure II.7 : Matériel de Proctor (normal et modifie)	..... 61
Figure II.8 : Compactage de l'échantillon	..... 62
Figure II.9 : Appareil de poinçonnement (essai CBR)	..... 64
Figure II.10 : Imbibition des échantillons (essai CBR)	..... 65
Figure II.11 : Appareille de cisaillement rectiligne	..... 66
Figure II.12 : Schéma de la boîte de cisaillement	..... 66
Figure II.13 : Courbe œdométrique (teste de Knight 1963)	..... 67
Figure II.14 : Double odomètres (Knight et Jennings 1975)	..... 68
Figure II.15 : Les machines utilisées pour l'essai œdométrique laboratoire	..... 69

### **Chapitre III : Résultats et Interprétations**

Figure III.1 : La courbe de la Analyse granulométrique des sols (sols fins + sable)	..... 74
Figure III.2 : La courbe de la limite de liquidité (25% sable+ 75% sol fin)	..... 78
Figure III.3 : Détermination de la limite de liquidité (25% sable+ 75% sol fin)	..... 79
Figure III.4 : La courbe de la limite de liquidité (50% sable+ 50% sol fin)	..... 80
Figure III.5 : Détermination de la limite de liquidité (50% sable+ 50% sol fin)	..... 81
Figure III.6 : La courbe de l'essai Proctor normal. (25% sable+ 75% sol fin)	..... 83
Figure III.7 : La courbe de l'essai Proctor normal. (50% sable+ 50% sol fin)	..... 84

### **Chapitre IV : Valorisation en Techniques Routières**

Figure IV.1 : Tableau synoptique de classification des sols (P. Rossi, L. Gavois et G. Raoul)	..... 96
Figure IV.2 : Extraction en couche [15]	..... 98
Figure IV.3 : Extraction frontale	..... 98
Figure IV.4 : Aération [16]	..... 99
Figure IV.5 : L'humidification des sols [15]	..... 99
Figure IV.6 : Traitement à la chaux [16]	..... 100
Figure IV.7 : Traitement liants	..... 100
Figure IV.8 : Compactage	..... 101
Figure IV.9 : Hauteur des remblais	..... 101
Figure IV.10 : Définition des différents termes	..... 103
Figure IV.11 : Fonctions à court terme	..... 104

## **LISTE DES TABLEAUX :**

### **Chapitre I : Synthèse bibliographique**

Tableau I.1 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	..... 21
Tableau I.2 : tableau classe A sols fins	..... 25
Tableau I.3 : Tableau Classification des matériaux rocheux R1	..... 30
Tableau I.4 : Tableau - Classification générale des sols organiques, sous-produits industriels (classe F)	..... 31
Tableau I.5 : Ensemble des principales fonctions et des propriétés déterminantes du géotextile	..... 37
Tableau I.6 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition dans la norme NF P 15-301, (1994)	..... 43

### **Chapitre II : Caractérisation Géotechnique**

Tableau II.1 : Déterminée la teneur en eau est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient	..... 50
--	----------

### **Chapitre III : Résultats et Interprétations**

Tableau III.1: Détermination de la masse volumique de sol fin	..... 71
Tableau III.2 : Détermination de la masse volumique par Méthode du pycnomètre à eau	..... 72
Tableau III.3 : Détermination Analyse granulométrique par tamisage	..... 73
Tableau III.4 : Détermination Analyse granulométrique des sols méthode par sédimentation	..... 73
Tableau III.5 : Détermination équivalent de sable	..... 75
Tableau III.6 : Les résultats de l'essai de bleu de méthylène	..... 76
Tableau III.7 : Valeur de bleu de méthylène de quelques sols	..... 76
Tableau III.8 : Ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de limite de liquidité	..... 77
Tableau III.9 : Détermination de la limite de plasticité. : (25% sable+ 75% sol fin)	..... 78
Tableau III.10 : Les résultats des essais d'Atterberg. (25% sable+ 75% sol fin)	..... 79
Tableau III.11 : Ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de limite de liquidité	..... 80
Tableau III.12 : Détermination de la limite de plasticité. : (50% sable+ 50% sol fin)	..... 81

Tableau III.13. Les résultats des essais d'Atterberg. (50% sable+50% sol fin)	..... 82
Tableau III.14 : Essais Proctor normale :(25% sable+ 75% sol fin)	..... 83
Tableau III.15 : Essais Proctor normale :(50% sable+ 50% sol fin)	..... 83
Tableau III.16 : Détermination de Essai C.B.R (25% sable + 75% sol fin)	..... 85
Tableau III.17 : Détermination de Essai C.B.R (50% sable + 50% sol fin)	..... 85
Tableau III.18 : Détermination de Essai œdométrique (50% sable + 50% sol fin)	..... 86
Tableau III.19 : Détermination de Essai œdométrique (50% sable + 50% sol fin)	..... 86

#### **Chapitre IV : Valorisation en Techniques Routières**

Tableau IV.1 : Tableau récapitulatif des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai	..... 102
Tableau IV.2: Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme	..... 107

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE :**

# INTRODUCTION GENERALE :

Aujourd'hui, dans le cadre du développement durable, les investissements économiques et environnementaux encouragent l'utilisation de matériaux locaux dans les travaux de terrassement qui ont parfois des propriétés mécaniques inadaptées à l'usage.

L'amélioration des sols en les mélangeant avec des additifs est une solution potentielle à cet objectif, car elle peut modifier le comportement mécanique et la maniabilité du sol pour le rendre apte au terrassement.

Le but de la présente étude est d'étudier l'effet de l'utilisation d'un sable (de Boussaâda) sur les caractéristiques géotechniques d'un sol fin (de Hammam Dalaa) afin de le réutiliser en technique routière

Afin d'atteindre notre objectif, un plan de travail a été élaboré :

- Synthèse bibliographique.
- Caractérisation géotechnique.
- Résultats et interprétations.
- Valorisation en techniques routières.

A la fin de notre étude, on a exposé l'aboutissement de nos travaux de recherches dans une conclusion générale.

**CHAPITRE I :**  
**SYNTHÈSE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

# SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

## I.1. Classification des sols selon le GTR :

Les “sols” sont des matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer facilement par simple trituration ou éventuellement sous l’action d’un courant d’eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables : des argiles aux blocs. Les sols sont de nature et d’origine géologique diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, sols résiduels (exemple : arènes granitiques, latérites...).

Les sols ayant une teneur en matières organiques supérieure à 3 %, sont classés à part en classe F avec les sous-produits industriels

Les paramètres retenus se rangent en trois catégories :

- Paramètres de nature.
- Paramètres de comportement mécanique.
- Paramètre d’état.

Les paramètres sont toujours évalués sur la fraction 0/50 mm, cette fraction peuvent être identifiée par les essais de laboratoire employés. [1]

### I.1.1. Paramètres de nature :

Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c’est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les paramètres retenus concernent la granularité et l’argilosité.

#### I.1.1.1. La granularité (les normes : P 94-056 et P 94-057) :

##### Définitions :

- **Le Dmax** : la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

##### Seuil retenu :

- **50 mm** : la valeur donnée pour distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classes A, B, D1 et D2), des sols blocailleux (classes C et D3) Lorsque le matériau comporte des éléments fins et une fraction grossière 50/D non négligeable (classe C) on distingue deux sous-classes. [1]
- **Le tamisât à 80 µm** :

Avec ce paramètre on peut distinguer les sols riches en fines et, dans une large mesure, d’évaluer leur sensibilité à l’eau.

Seuils retenus :

- 35 % : c'est le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine ( $\leq 80 \mu\text{m}$ ),
- 12 % : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines. [1]

- **Le tamisât à 2 mm :**

Ce paramètre permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

Seuil retenu :

- 70 % : au-delà de 70 % on définit les sols à tendance sableuse et en-deçà les sols à tendance graveleuse.

**I.1.1.2. L'argilosité :**

- **L'indice de plasticité IP (norme P 94-051) :**

Le paramètre le plus généralement utilisé pour la caractérisation de argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus faible que la proportion pondérale de la fraction 0/400  $\mu\text{m}$  (fraction Servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

Après un rapport de 50 % de cette fraction et d'une valeur de 12, l'explication de l'IP est simple mais elle devient pratiquement impossible lorsque cette fraction tombe en dessous de 35 % et la valeur de l'IP en dessous de 7.

Les seuils retenus :

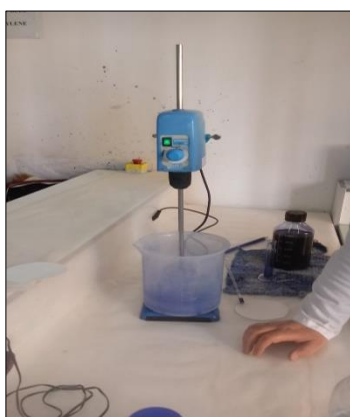
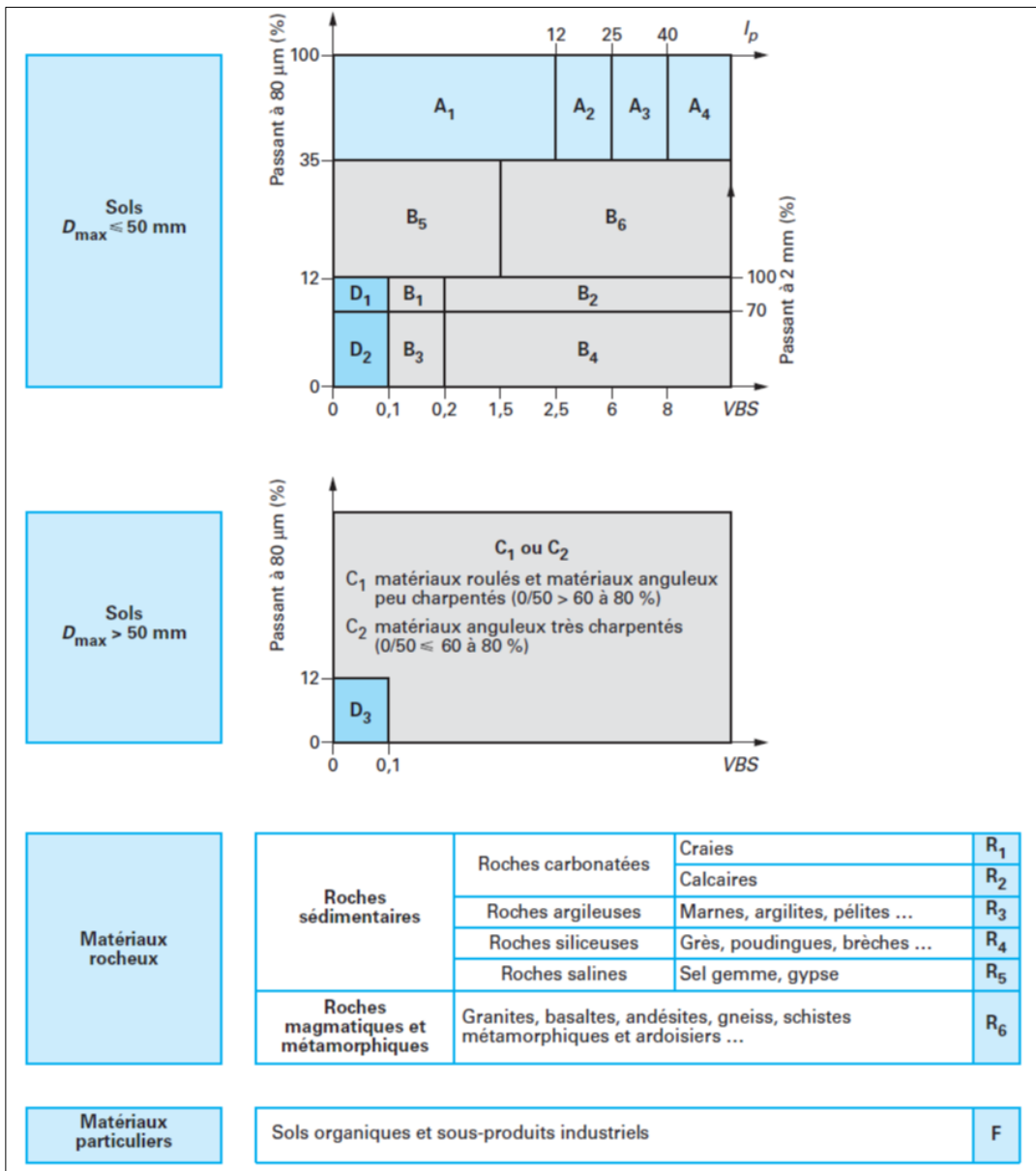
- 12 : limite supérieure des sols faiblement argileux,
- 25 : limite supérieure des sols moyennement argileux,
- 40 : limite entre les sols argileux et très argileux.

**I.1.1.3. La valeur de bleu de méthylène VBS :**

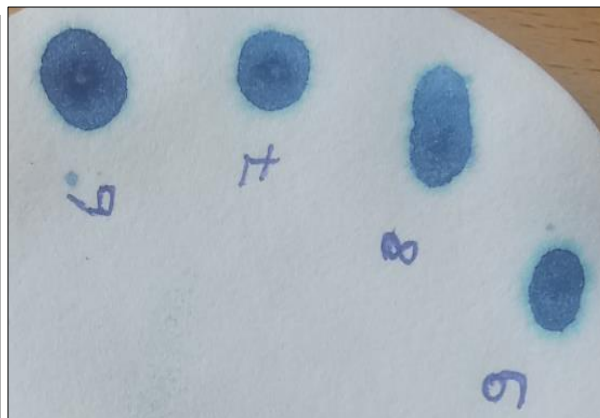
Il s'agit d'un autre paramètre permettant de déterminer l'argilosité d'un sol mais dont l'application à l'identification des sols remonte seulement à quelques années. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène adsorbé sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

Etant donné que dans un sol c'est avant tout la surface des particules contenues dans sa fraction argileuse ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) qui détermine sa surface spécifique, on peut observer que la valeur de bleu de méthylène VBS (valeur de bleu du sol) exprime totalement la quantité et la qualité (ou activité) de l'argile contenue dans ce sol. [1]

**Tableau I.1 :** Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature. [7]



**Figure I.1 :** Ensemble du matériel d'essai



**Figure I.2 :** Auréole bleue apparaissant à la périphérie de la tache indiquant la fin de l'adsorption du bleu sur le sol

La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol.

Seuils retenus :

- 0,1 : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau (au sens défini précédemment). Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisat à 80  $\mu\text{m}$  qui doit être  $\leq 12 \%$ . [1]
- 0,2 : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau.
- 1,5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.
- 2,5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.



**Figure I.3 :** Le CLASSOL cet appareil réalise l'identification de la nature des sols de manière rapide et semi-mécanisée.

#### **I.1.1.4. Référence au paramètre équivalent de sable (ES) :**

L'équivalent de sable tenu dans la classification RTR de 1976 pour différencier les sols peu à très peu argileux perd beaucoup de son importance depuis l'introduction de la VBS.

#### **I.1.2. Paramètres de comportement mécanique :**

Ces paramètres ne sont utilisés que pour juger des utilisations possibles des sols en couche de forme.

Il est principalement composé d'éléments fins et ne peut être utilisé à l'état naturel sans réglementation particulière (traitement...).

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont : les coefficients Los Angeles (LA) (norme P 18-573) et micro-Deval en présence d'eau (MDE) (norme P 18-572), mesurés sur la fraction granulaire 10/14(1) (ou à défaut sur la fraction 6,3/10(1)) et le coefficient de friabilité des sables (FS) mesuré sur la fraction 0/1 ou 0/2 mm (norme P 18-576). [1]

Seuils retenus :

- 45 pour les valeurs LA et MDE
- 60 pour les valeurs FS.

### I.1.3. Paramètres d'état :

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

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique. [1]



**Figure I.4 :** Extraction des sols de classes A2m et A3m par conditions météorologiques "évaporantes" : des conditions de chantier idéales.

#### I.1.3.1. Différents états hydriques considérés :

- 1- **L'état "très humide" (th) :** c'est un état d'humidité très élevé ne permettant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques françaises actuelles.
- 2- **L'état "humide" (h) :** c'est un état d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, remblais de faible hauteur...) estimées comme normales dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles.
- 3- **L'état d'humidité "moyen" (m) :** c'est l'état d'humidité optimum (minimum de contraintes pour la mise en œuvre).
- 4- **L'état "sec" (s) :** c'est un état d'humidité faible mais autorisant encore une mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, sur compactage...) estimées comme normales dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles.
- 5- **L'état très sec (ts) :** c'est un état d'humidité très faible n'autorisant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions.



**Figure I.5 :** La portance des sables fins des classes B1 ou D1 est quasi-indépendante de leur teneur en eau mais ces sols sont en revanche très sensibles à l'érosion pluviale

### I.1.3.2. Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique :

La présente classification a retenu pour déterminer l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants : [1]

- La position de la teneur en eau naturelle ( $w_n$ ) de la fraction 0/20 du matériau par ( $w_n$ ) rapport à l'optimum Proctor normal ( $w_{OPN}$ ) exprimée par le rapport  $\frac{w_n}{w_{OPN}}$ . Ce rapport est le paramètre d'état.
- La position de la teneur en eau naturelle ( $w_n$ ) par rapport aux limites d'Atterberg ( $w_L$  et  $w_P$ ) qui s'exprime par l'Indice de consistance ( $I_c$ ), (norme P 94-051).

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{I_p}$$

- L' $I_c$  permet de déterminer correctement les cinq états (th), (h), (m), (s) et (ts) mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 % à 90 % d'éléments  $\leq 400 \mu\text{m}$  (1),
- L'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur de l'Indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle (norme P 94-078).
- L'IPI est en général le paramètre à privilégier pour déterminer les états (h) et (th) car il traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. En revanche, il perd sa signification dans les états (s) et (ts).



Figure I. 6 : Extraction après rabattement de la nappe.



Figure I.7 : Comportement à la mise en remblai.

**I.1.3.3 Exemple de tableau de classification des sols : [7]**

On trouvera en annexe 1, la classification détaillée des sols (classes A, B, C et D). A titre d'exemple, un extrait de cette annexe est reproduit ci-après (Tableau) pour les sols de la classe A. [7]

**Tableau I.2 : Tableau classe A sols fins.**

Tableau 1 – Classe A – 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	Caractères principaux (2)	Paramètres et valeurs de seuils retenus (1)	Sous-classe
$D_{max} \leq 50$ mm et tamisat à 80 $\mu$ m > 35 %	A sols fins	$VBS \leq 2,5$ ou $I_p \leq 12$	A <sub>1</sub>  Limens peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur $W_N$ est proche de $W_{OPN}$ . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court mais, la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de $I_p$ .	$IPI \leq 3$ ou $W_N \geq 1,25 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> th
					$3 < IPI \leq 8$ ou $1,10 W_{OPN} \leq W_N < 1,25 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> h
					$8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_N < 1,10 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> m
					$0,7 W_{OPN} \leq W_N < 0,9 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> s
		$12 < I_p \leq 25$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	A <sub>2</sub>  Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que $I_p$ atteint des valeurs $\geq 12$ , il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	$W_N < 0,7 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> ts
					$IPI \leq 2$ ou $I_c \leq 0,9$ ou $W_N \geq 1,3 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> th
					$2 < IPI \leq 5$ ou $0,9 < I_c \leq 1,05$ ou $1,1 W_{OPN} \leq W_N < 1,3 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> h
					$5 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < I_c \leq 1,2$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_N < 1,1 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> m
		$25 < I_p \leq 40$ ou $6 < VBS \leq 8$	A <sub>3</sub>  Argiles et argiles marnées, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	$I_c > 1,4$ ou $W_N < 0,7 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> ts
					$IPI \leq 1$ ou $I_c \leq 0,8$ ou $W_N \geq 1,4 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> th
					$1 < IPI \leq 3$ ou $0,8 < I_c \leq 1$ ou $1,2 W_{OPN} \leq W_N < 1,4 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> h
					$3 < IPI \leq 10$ ou $1 < I_c \leq 1,15$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_N < 1,2 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> m
		$I_p > 40$ ou $VBS > 8$	A <sub>4</sub>  Argiles et argiles marnées, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	$1,15 < I_c \leq 1,3$ ou $0,7 W_{OPN} \leq W_N < 0,9 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> s
					$I_c > 1,3$ ou $W_N < 0,7 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> ts
					Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.	A <sub>4</sub> th
						A <sub>4</sub> h
						A <sub>4</sub> m
						A <sub>4</sub> s

(1)  $W_N$  : teneur en eau naturelle,  $W_{OPN}$  : teneur en eau optimum Proctor normal,  $I_c$  : indice de consistance.  
 (2) Les paramètres inscrits en gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

#### I.1.3.4. Classification des matériaux rocheux (classe R) :

Bien qu'après son extraction, un déblai rocheux soit transformé en un matériau susceptible d'être considéré, au moins partiellement, comme un sol meuble au sens défini au paragraphe précédent, il faut au préalable être en mesure de prévoir, à partir de la roche en place, le comportement du matériau après abattage. Ce besoin a conduit à établir un classement des matériaux rocheux sur la base de leur nature géologique, de résultats d'essais (fragmentabilité, dégradabilité, masse volumique... pratiqués sur des prélèvements représentatifs) et de l'expérience que l'on possède de leur comportement au cours des différentes phases du terrassement. [1]

- La première étape consiste à identifier, au moins sommairement, la nature pétrographique de la roche en s'appuyant principalement sur la documentation et le raisonnement géologique de la roche et son comportement prévisible.

- La seconde étape vise à préciser comment le matériau va se comporter tout au long des phases successives.



**Figure I.8 :** Pour déterminer un déblai rocheux, il faut au préalable être en mesure de prévoir à partir de la roche en place le comportement du matériau après abattage.

Ce n'est qu'au terme de cette seconde étape qu'il peut communiquer au projeteur les données utiles à l'évaluation des possibilités d'emploi des matériaux issus d'un déblai rocheux : granularité obtenue, comportement sous trafic, caractère évolutif. Il faut toutefois admettre qu'une part d'incertitude existera toujours du fait que ces données résultent d'hypothèses dont la fiabilité dépend de nombreux facteurs (compétence et expérience du géotechnicien, complexité géologique du site, moyens et délais d'étude disponibles...). [1]

#### I.1.3.5. Classification des matériaux rocheux d'après nature pétrographique la de la roche :

Deux classes principales de matériaux rocheux sont distinguées à partir des grandes familles de roches habituellement considérées : les matériaux rocheux issus des roches sédimentaires d'une part et ceux issus des roches magmatiques et métamorphiques d'autre part. [1]



**Figure I.9 :** Craie de la classe R12m  
(craie de densité moyenne à teneur en eau moyenne).



**Figure I.10 :** Craie de la classe R13h  
(craie de densité faible à teneur en eau élevée).

Dans le cas des roches sédimentaires, la classification est subdivisée suivant les principales natures de roches rencontrées dans cette catégorie : craies, calcaires, roches argileuses, roches siliceuses, roches salines. Cette subdivision s'avère indispensable, car les matériaux issus de chacune des roches précitées présentent des comportements différents dans leur utilisation en remblai et en couche de forme.

Dans le cas des matériaux provenant de roches magmatiques et métamorphiques, aucune subdivision complémentaire n'a été introduite, ces matériaux pouvant être considérés comme ayant des comportements voisins du point de vue de leur utilisation en remblai et en couche de forme. [1]

#### **I.1.3.6. Classification des matériaux rocheux d'après leur état et leurs caractéristiques mécaniques :**

Comme cela a été indiqué, la connaissance de la seule nature pétrographique de la roche dont est issu un matériau rocheux n'est généralement pas suffisante pour prévoir tous les problèmes que peut poser son utilisation en remblai ou en couche de forme. [1]



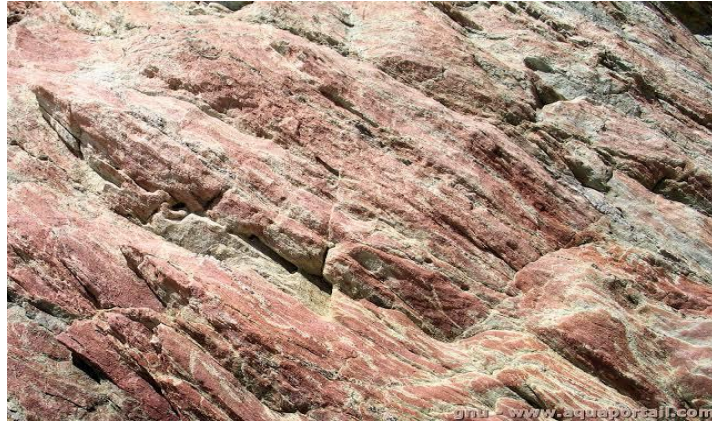
**Figure I.11 :** Un bloc immédiatement après extraction  
de dégradation.



**Figure I.12 :** Le même bloc en cours après plusieurs  
jours soumis aux intempéries.

### I.1.3.7. Paramètres d'état et de comportement mécanique retenus dans la classification des matériaux rocheux : [1]

- Le coefficient Los Angeles (LA) (norme P 18-573).
- Le coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE) (norme P 18-572).



**Figure I.13 :** Roche siliceuse (poudingue) de la classe R42

- La valeur de la masse volumique de la roche déshydratée en place ( $\rho_d$ ) (norme P 94-064).
- Le coefficient de Fragmentabilité (FR) (norme P 94-066).
- Le coefficient de dégradabilité (DG) (norme P 94-067).
- La teneur en eau naturelle ( $w_n$ ) (norme NF P 94-050)
- La teneur en éléments solubles (% NaCl, gypse...)



**Figure I.14 :** Roche magmatique dure (basalte) de classe R6.

**I.1.3.8. Valeurs seuils retenues pour les paramètres d'état et de comportement des matériaux rocheux :**

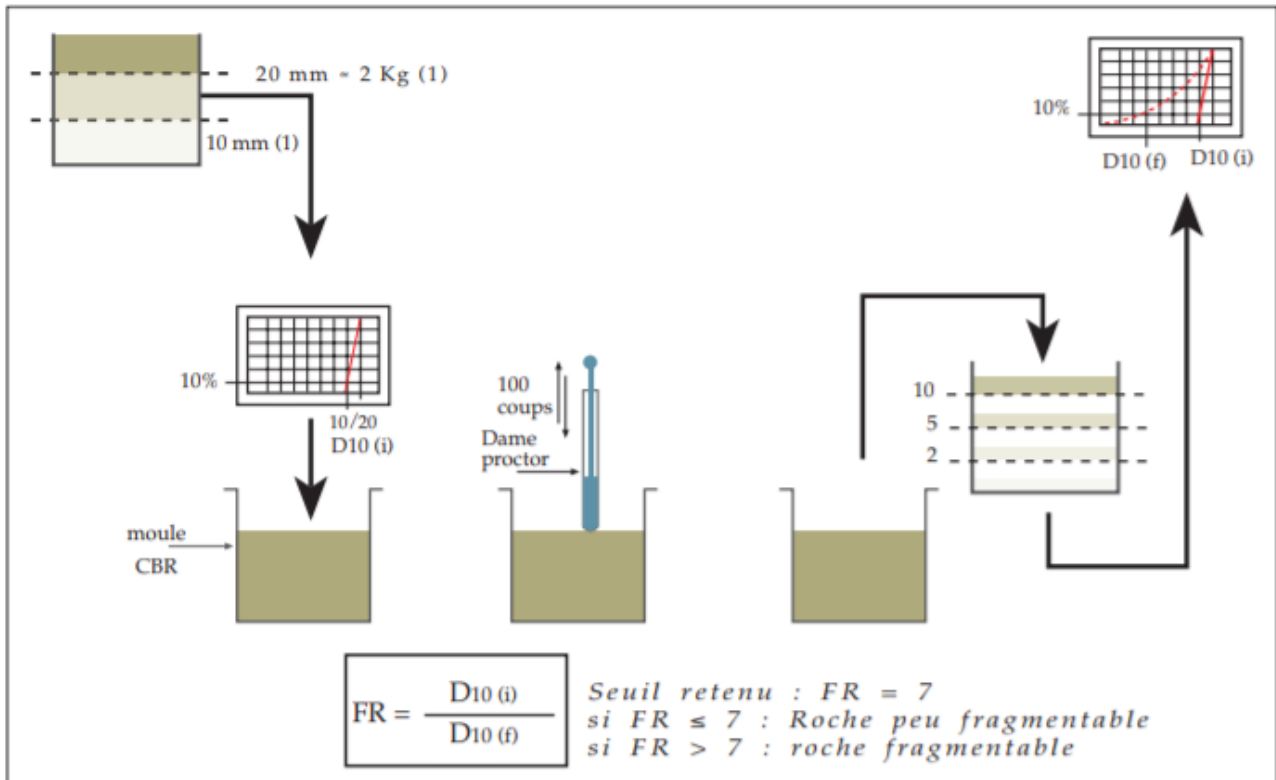


Figure I.16 : Principe de l'essai de Dégradabilité (DG).

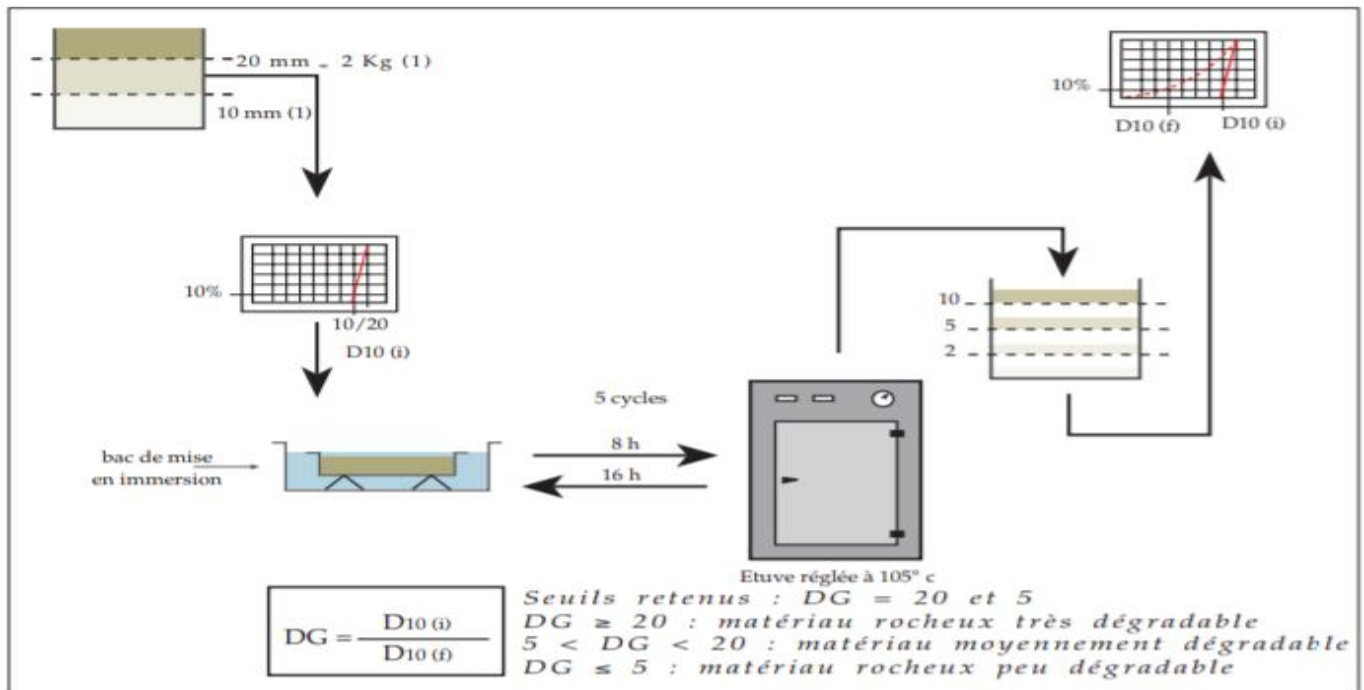


Figure I.15 : Principe de l'essai de Fragmentabilité (FR).

Tableau I.3 : Tableau Classification des matériaux rocheux R1. [7]

Tableau 2 – Classe R – Matériaux rocheux (évolutifs et non évolutifs) (suite)					
Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement		
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	
Roches siliceuses	R <sub>4</sub> Grès Poudingues Brèches	Les matériaux de cette classe peuvent être assimilés à des conglomérats de grains de sable (cas des grès) ou de galets (cas des brèches et poudingues), liés entre eux par un ciment naturel de silice ou de calcite. La résistance plus ou moins grande de cette cimentation confère à ces matériaux des comportements variables (risques de réarrangements après mise en œuvre lorsqu'ils ne sont pas suffisamment compactés, en particulier). Si ces roches sont très fragmentables, leur évolution ultime s'arrête aux grains élémentaires cimentés. Certaines d'entre elles contiennent également une fraction argileuse suffisante pour leur conférer un comportement voisin des matériaux de la classe R <sub>34</sub> .	$LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$	Roches siliceuses dures	R <sub>41</sub>
			$LA > 45$ ou $MDE > 45$ et $FR \leq 7$	Roches siliceuses de dureté moyenne	R <sub>42</sub>
			$FR > 7$	Roches siliceuses fragmentables	R <sub>43</sub>
Roches salines	R <sub>5</sub> Gypse Sel gemme Anhydrite	Du point de vue mécanique, les matériaux de cette classe s'apparentent à ceux des classes R <sub>2</sub> et R <sub>3</sub> , mais en outre ils sont plus ou moins solubles dans l'eau et induisent, de ce fait, dans les ouvrages, des risques de désordre qui seront d'autant plus grands que : – la solubilité du sel soluble est grande ; – sa proportion contenue dans l'ensemble du matériau est élevée ; – la fragmentabilité à la mise en œuvre est faible (grande perméabilité de l'ouvrage).	Teneur en sel soluble $\left\{ \begin{array}{l} \leq 5 \text{ à } 10 \% \text{ dans le cas du sel gemme (1)} \\ \leq 30 \text{ à } 50 \% \text{ dans le cas du gypse (1)} \end{array} \right.$	Roches salines peu solubles	R <sub>51</sub>
			Teneur en sel soluble $\left\{ \begin{array}{l} > 5 \text{ à } 10 \% \text{ dans le cas du sel gemme (1)} \\ > 30 \text{ à } 50 \% \text{ dans le cas du gypse (1)} \end{array} \right.$	Roches salines très solubles	R <sub>52</sub>
Roches magmatiques et métamorphiques	R <sub>6</sub> Granite, basalte, trachyte, andésite... Gneiss, schistes métamorphiques, schistes ardoisiers...	Les matériaux entrant dans cette classe peuvent avoir des caractéristiques mécaniques très différentes ; en particulier, leur fragmentabilité et leur friabilité peuvent varier très largement (de faible à très élevée). Les matériaux de la classe R <sub>61</sub> et la majorité de ceux de la classe R <sub>62</sub> ne s'altèrent pas au sein des ouvrages, sous l'effet des contraintes mécaniques et de l'eau ; mais en revanche, ceux de la classe R <sub>63</sub> ont un comportement voisin des classes R <sub>34</sub> ou R <sub>43</sub> .	$LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$	Roches magmatiques et métamorphiques dures	R <sub>61</sub>
			$LA > 45$ ou $MDE > 45$ et $FR \leq 7$	Roches magmatiques et métamorphiques de dureté moyenne	R <sub>62</sub>
			$FR > 7$	Roches magmatiques et métamorphiques fragmentables ou altérées	R <sub>63</sub>

(1) Suivant que la fragmentabilité est plus ou moins grande.

### I.1.3.9. Classification des sols organiques et sous-produits industriels (classe F) :

Cette dernière catégorie concerne des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai et en couche de forme peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois très divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée. [1]

**Tableau I.4 :** Tableau - Classification générale des sols organiques, sous-produits industriels (classe F). [7]

Famille de matériaux	Symbole	Paramètre(s) considéré(s) comme significatif(s) vis-à-vis du réemploi
Matériaux naturels renfermant des matières organiques	F <sub>1</sub>	Teneur en matières organiques puis examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Cendres volantes silico-alumineuses	F <sub>2</sub>	Rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau optimum Proctor normal et valeur de l'IPI à la teneur en eau naturelle.
Schistes houillers	F <sub>3</sub>	Taux de combustion et examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B, C, D ou aux matériaux rocheux.
Schistes des mines de potasse	F <sub>4</sub>	Teneur en NaCl et pour ceux à faible teneur, examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Phosphogypse	F <sub>5</sub>	Mode d'obtention comportant ou non une neutralisation à la chaux, examen de la granulométrie et de la teneur en eau.
Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères	F <sub>6</sub>	Taux d'imbrulés et d'éléments solubles, qualité du déferrailage, du criblage et de l'homogénéisation, durée du stockage, présence ou non de cendres volantes de combustion.
Matériaux de démolition	F <sub>7</sub>	Qualité du déferrailage et de l'homogénéisation, présence d'éléments indésirables (plâtres, bois...), granulométrie.
Laitiers de hauts-fournaux	F <sub>8</sub>	Caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols B, C, D, ou aux matériaux rocheux.
Autres sous-produits industriels	F <sub>9</sub>	Paramètres à définir à l'appui d'une étude spécifique.

## I.2. Amélioration des sols :

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets. [2]

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de : o augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement o diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer, o diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer. [2]

## I.2.1. Méthodes mécaniques :

### I.2.1.1. Vibrocompactage :

#### A. Origine et développement :

Le procédé de vibrocompactage, développé à la fin des années 30, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximums de plus de 50 m. est une technique d'amélioration de sol des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier dans la masse sous l'effet de la vibration. [2]

#### B. Principe de la technique :

La technique de vibrocompactage consiste à foncer dans le sol un vibreur relativement puissant, qui densifie l'empilement des particules du sol, et à procéder à un apport de matériaux pour atteindre le niveau final de la plate-forme (figure 17). [2]

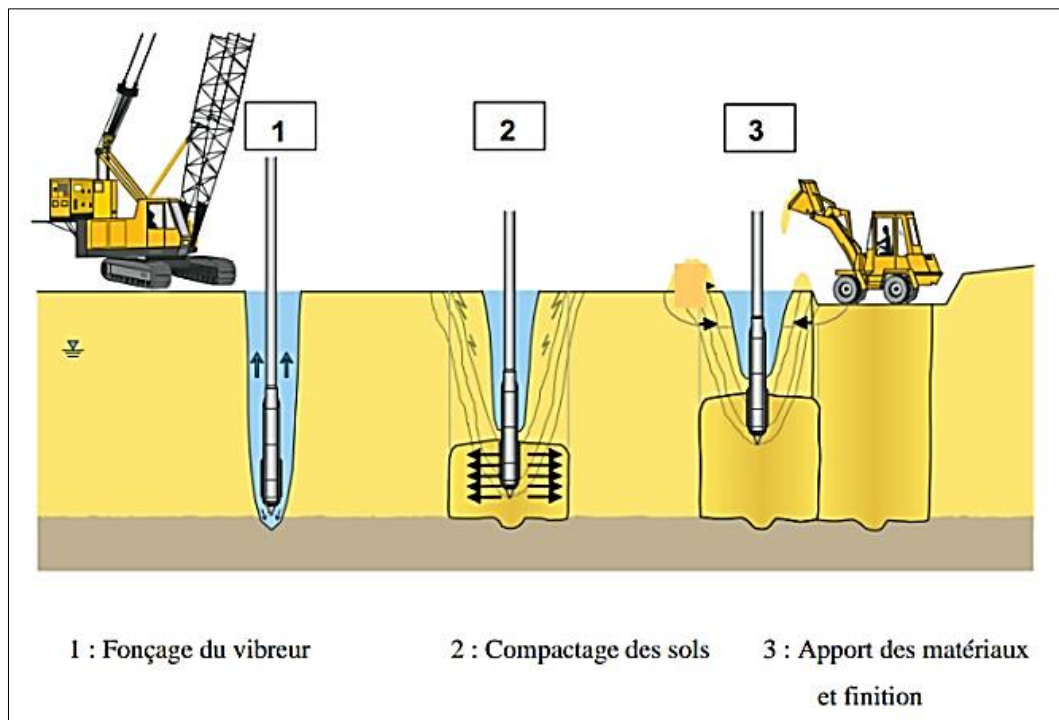


Figure I.17 : Étapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller).



**Figure I.18 :** Chantier de vibrocompactage.

### **c-Exemples d'applications : [2]**

La technique de vibrocompactage trouve son application pour tous types d'ouvrages :

- Le vibrocompactage permet de réaliser des semelles isolées ou filantes avec des capacités portantes élevées de l'ordre de 0,5 à 0,8 MPa aux ELS (immeubles R+8 voire plus, centres commerciaux, hôpitaux, etc.)
- Le vibrocompactage du sol graveleux en place garantit des tassements d'ordre millimétrique sous des ouvrages dits sensibles (sites nucléaires, turbines, machines vibrantes, éoliennes).
- Le vibrocompactage est reconnu comme étant le procédé le plus efficace dans la limitation du risque potentiel de liquéfaction des sols. ([www.keller-france.com/techniques/brochures/le\\_vibrocompactage](http://www.keller-france.com/techniques/brochures/le_vibrocompactage)).

### **I.2.1.2. Le compactage dynamique (ou pilonnage) :**

#### **A. Objectifs :**

Le compactage dynamique vise l'amélioration des propriétés géotechniques de sols lâches sur de grandes profondeurs par l'application d'impacts de très forte intensité. L'application des chocs à la surface d'un massif de sol grenu est un moyen efficace de compactage. Avant le pilonnage, le sol est recouvert d'une couche de matériaux grossiers d'un mètre d'épaisseur au minimum, destinée à éviter un enfoncement trop important du pilon. Le pilon est lâché d'une grue, plusieurs impacts étant réalisés au même endroit. Cette opération est répétée sur toute la surface à traiter, selon un maillage défini au préalable. Entre les phases de pilonnage, un temps de repos permet la dissipation des surpressions interstitielles créées par les chocs. En fin de chantier, une dernière phase, dite de tapotage, est réalisée pour compacter la surface du sol, désorganisée par les chocs. [2]



**Figure I.19 :** Chantier de pilonnage.

## **B. Domaines d'application :**

Le compactage dynamique est également utilisé pour :

- Support faible pour fondations superficielles de tous de structures par l'amélioration des caractéristiques de portance et la satisfaction des critères de tassement total et différentiel sévères.
- Assurer la bonne tenue de revêtement dans les aires de stockage ou de manutention de matériaux hautement chargées, telles celles des entrepôts, pistes d'aéroport, terminaux de conteneurs, etc. ;
- Réduire le potentiel de liquéfaction des sols dans les zones à haute sensibilité sismique ;
- Stabiliser des pentes, barrages, digues, ...etc. ;
- Réduire les vides dans les dépotoirs(décharges). [2]

### **I.2.1.3. Colonnes ballastées :**

- on réalise d'abord un forage jusqu'à la profondeur désirée (10 ou 20 m au maximum) au moyen d'une aiguille vibrante, corps cylindrique de 30 à 40 cm de diamètre et de quelques mètres de longueur comportant un vibreur.

- le forage est ensuite rempli de matériaux grenus à fort angle de frottement interne et la colonne ainsi constituée et compactée grâce au vibreur ; le diamètre de la colonne obtenue dépend de la consistance du terrain qui l'entoure. Il atteint couramment 0,6 à 1 m. [2]

#### I.2.1.4. Colonnes Pilonnées :

On peut réaliser des pieux de ballast compacté par la technique des colonnes pilonnées. On enfonce dans le sol un tube creux, que l'on remplit de matériau grenu. Le matériau est compacté à la base du tube au moyen d'un pilon que l'on lâche dans le tube. [2]



Figure I.20 : Colonnes Pilonnées.

#### Domaine d'application :

En augmentant la capacité portante du sol et en réduisant sa compressibilité, la colonne ballastée permet l'économie de pieux et de planchers portés en rendant possible la réalisation de dallages sur terre-plein. Ce renforcement de sol trouve une application dans tous les domaines de la construction (bâtiments de logements, industriels et commerciaux, ouvrages génie civil, remblais routiers et ferroviaires, plateformes portuaires). Il est une alternative, souvent très rentable, aux substitutions, puits béton et pieux. Toute extraction de déblais est évitée. Les colonnes ballastées permettent aussi de lutter contre la liquéfaction des sols et les argiles gonflantes. [2]

#### I.2.2. Méthodes hydromécaniques :

##### I.2.2.1. Préchargement :

Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement. Le préchargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir [2]

L'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fin et surtout argileux. Préchargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage

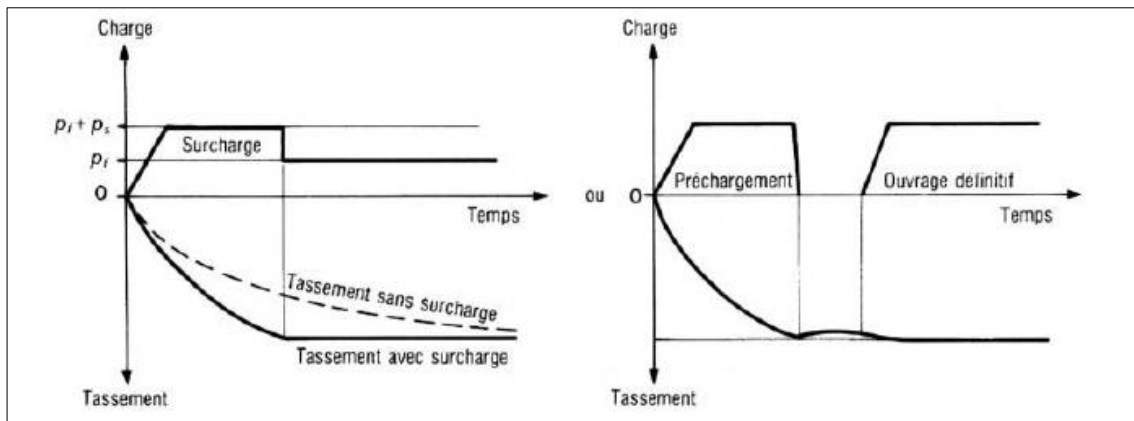


Figure I.21 : Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements.

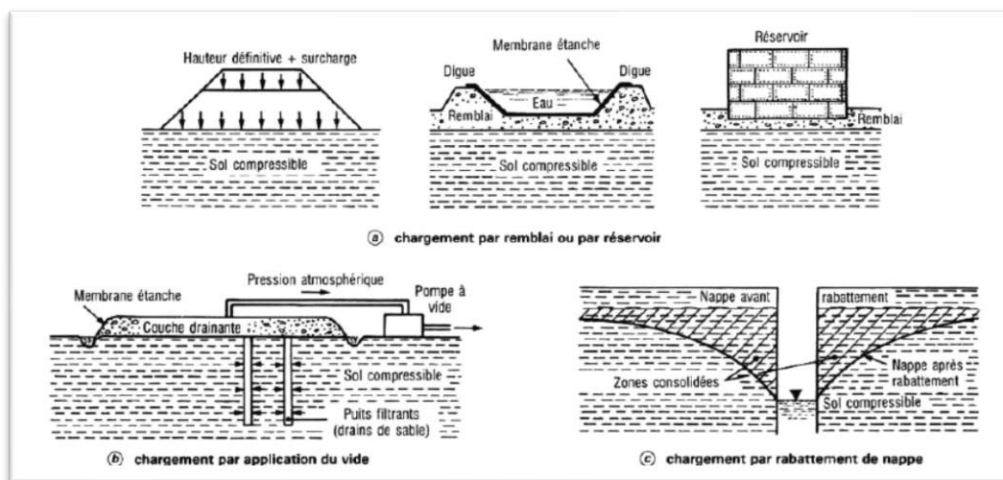


Figure I.22 : Techniques de pré chargement.

### Principe :

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive  $p_f$  augmentée éventuellement d'une surcharge  $p_s$  qui assure tout ou partie des effets suivants :

- Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants ;
- Augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes. [2]

## I.2.3. Méthodes chimiques :

### I.2.3.1. Injection Solide :

Utilisée pour le traitement des terrains sableux, limoneux ou argileux, humides ou saturés, la technique d'injection solide consiste à injecter sous pression un mortier très visqueux, suivant un maillage spécifique établi en fonction de la nature du terrain et des objectifs recherchés, de manière à réaliser une densification statique horizontale. Technique éprouvée, économique et souple, elle permet en outre de réduire le potentiel de liquéfaction en cas de séisme. [2]

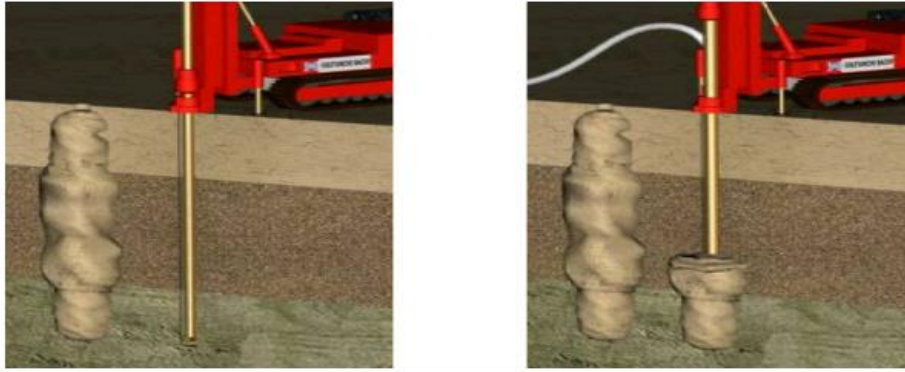


Figure I.23 : injection solide (plates formes amélioration des sols).

## I.2.4. Amélioration des sols par géotextiles :

### I.2.4.1. Généralités sur les géotextiles et leurs applications :

#### I.2.4.1.1. Géotextiles :

Les géotextiles sont des produits employés principalement dans le domaine de la géotechnique et sont constitués de fibres textiles. [3]

#### I.2.4.1.2. Principales fonctions des géotextiles :

Il est possible de distinguer dans les applications des géotextiles six fonctions principales : drainage, filtration, séparation, protection, interfaces anti-fissures et renforcement. [3]

Tableau I.5 : Ensemble des principales fonctions et des propriétés déterminantes du géotextile.

	Fonctions					
	Drain	Filtre	Séparation	Renforcement	Protection	Conteneur
Epaisseur	***	*			***	*
Compressibilité		**			*	
Permittivité	**	***	**			**
Transmissibilité	***	*				*
Distribution des pores	***	(a)				
Résistance à la traction			*	**	*	*
Raideur				***		
Déformation			***	*	*	**
Résistance au déchirement			**	**	***	
Résistance au percement			***	**	***	*
Frottement				****	**	**

(a) critère de filtration

\* propriété d'importance mineure.

\*\* propriété d'importance moyenne.

\*\*\* propriété d'importance majeure.

### I.2.4.1.3. Application des géotextiles en renforcement :

Les géotextiles sont utilisés avec succès en construction dans le monde entier pour renforcer les sols depuis des dizaines d'années par de nombreux ingénieurs.

Le développement et la confection de la géogrille pour les renforcements horizontaux ont été mis au point selon les derniers développements techniques disponibles. [3]

### I.2.4.2. Geogrille :

La Geogrille est une structure plane, à base polymère, constituée par un réseau ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants. Elles sont utilisées en contact avec le sol pour renforcer les fondations, remblais...etc. [3]

Il y a deux types de Geogrille :

- Geogrille uniaxiale.
- Géogrille biaxiale.

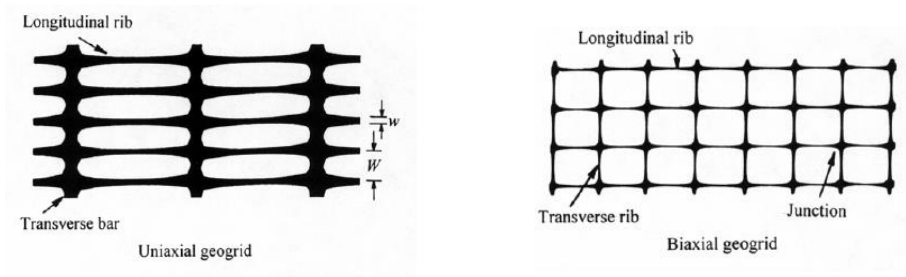


Figure I. 24 : types de géogrilles.



Figure I.25: Application géotextiles.

### **I.2.5. Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux :**

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que, les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités : Résistance (capacité portante) et de durabilité.

Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, en fonction des spécificités du terrain :

- utilisation d'addition (chaux, ciment, ajouts minéraux.....) ;
- dosages à respecter ;
- épaisseur du sol à traiter.

Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé sur tout le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en œuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés :

- La chaux
- Le ciment
- Sable
- Les ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes et fumée de silice...etc.) [3]

#### **I.2.5.1. La chaux :**

##### **I.2.5.1.1. Traitement type et conditions de mise en œuvre :**

Les conditions de mise en œuvre doivent être conformes aux recommandations du Guide Technique "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme" (SETRA / LCPC - 2000) (plus communément nommé GTS). L'exécution type des travaux de traitement des sols suit, en règle générale, le processus suivant [3]

##### **a- Préparation du sol à traiter :**

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste à procéder à l'ouverture du sol au scarificateur ou au ripper. [3]



**Figure I.26:** vue générale d'UN chantier de traitement de sol (documentation technique routes N89 septembre 2004)

### **b- Ajustement de l'état hydrique du sol :**

Une teneur en eau optimale est indispensable pour obtenir, après compactage du mélange sol-liant, une densité maximale. Ainsi, il est possible soit d'assécher le sol par brassage mécanique, soit de l'humidifier avec une arroseuse avec rampes à eau, gicleurs ou systèmes enfouisseurs [3]

### **c- Épandage du liant :**

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant, il est préférable de retenir – dans le cas de chantiers moyens ou importants – un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite "à la bêche".[3]



**Figure I.27 :** Epandage du liant

### **d- Malaxage :**

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur importante du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur ou un pulvimixer à rotor horizontal. D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux. [3]



Figure I.28 : malaxage

### e- Compactage partiel :

La qualité du compactage est, en général, déterminée par un objectif de densification. Ainsi pour le compactage des remblais, l'objectif de densification est une énergie de compactage  $q_4$ , qui correspond succinctement à 95 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal et pour le compactage des couches de forme, il est une énergie de compactage  $q_3$  qui correspond succinctement à 98,5 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal. [3]



Figure I.29 : compactage partiel (documentation technique routes N89 septembre 2004)

### f- Réglage :

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm). [3]

### g- 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 I.30** : compactage final (documentation technique routes N89 septembre 2004)

### h- 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 I.31** : protection de surface de la couche traitée (documentation technique routes N89 septembre 2004)

### I.2.5.2. Le ciment :

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice. Le ciment Portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse.



Figure I.32 : chantier de traitement du sol au ciment

Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile.

Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker Portland (clinker) et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par cuisson, aux environs de 1450°C, d'un mélange (le cru) composé d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, ensuite il est finement broyé.

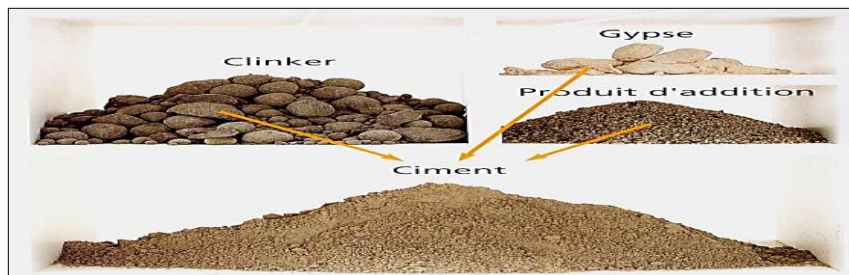


Figure I.33 : Le composition du ciment. BETON Degussa Construction Chemicals France

Les constituants ajoutés au clinker sont des laitiers de hauts fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes, une faible quantité de gypse (de l'ordre de 3%).

Désignation	Notation	Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumées de silice D	Pouzzolanes naturelles Z	Cendres volantes		Schistes calcinés T	Calcaires L	Constituants secondaires
						siliceuses V	calciques W			
Ciment Portland	CPA-CEM I	95 – 100	—	—	—	—	—	—	—	0 – 5
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A	80 – 94	← 6 – 20 <sup>4) 5)</sup> →							
	CPJ-CEM II/B	65 – 79	← 21 – 35 <sup>4) 5)</sup> →							
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35 – 64	36 – 65 <sup>5)</sup>	—	—	—	—	—	—	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20 – 34	66 – 80 <sup>5)</sup>	—	—	—	—	—	—	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5 – 19	81 – 95	—	—	—	—	—	—	0 – 5
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65 – 90	—	← 10 – 35 <sup>5)</sup> →		—	—	—	—	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45 – 64	—	← 36 – 55 <sup>5)</sup> →		—	—	—	—	0 – 5
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 – 64	18 – 30 <sup>5)</sup>	—	← 18 – 30 <sup>5)</sup> →		—	—	—	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20 – 39	31 – 50 <sup>5)</sup>	—	← 31 – 50 <sup>5)</sup> →		—	—	—	0 – 5

**Tableau I.6:** Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition dans la norme NF P 15-301, (1994).

### I .2.5.2.1. Utilisation des ajouts cimentaires :

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice, les cendres volcaniques, et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Souvent utilisées Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation [3]

### I .2.5.2.2. Les techniques de traitement :

Le traitement du sol est une technique utilisée pour améliorer la structure physique du sol, c'est grâce à des expériences que nous utilisons plusieurs matériaux.

Les techniques comportent de nombreuses méthodes de préparation telles que le mélange avec la chaux ou le liants hydraulique ou la correction granulaire pour améliorer les performances mécaniques pendant la durée du travail.

La préparation se fait dans des laboratoires spéciaux de sélection de la production ou à des doses appropriées pour obtenir des performances mécaniques absolues et la plage de la teneur en eau du mélange.

#### a-Traitement par la correction de la courbe granulométrique :

L'objectif principal d'apport d'un correcteur granulométrie est pour améliorer le squelette granulaire afin de réduire les vides.

La méthodologie proposée par Dubois (**Dubois V., 2006**) est utilisée. Cette méthodologie est principalement basée sur : [4]

- La limitation de la proportion de la fraction fine dans les mélanges ;

- L'optimisation de la distribution granulométrique ;
- La limitation de la quantité de matières organiques ;
- L'optimisation de la quantité des fines. [5]

### **b-Traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques :**

Le traitement consiste à mélanger les matériaux avec des liants minéraux afin d'améliorer leurs caractéristiques et leur donner une résistance compatible avec les exigences recherchées. Dans le cadre de ce travail, grâce aux études précédentes, les sols contiennent une proportion importante de particules fines et une teneur en matière organique moyenne. Les additifs choisis sont le ciment et la chaux.

### **c- Traitement à la chaux :**

Depuis fort longtemps, la chaux a été employée pour stabiliser les routes et chemins en milieu agricole et les voies forestières et autres chemins divers. Son utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques physiques du sol, elle sert à diminuer le pourcentage d'eau contenu dans un sol humide et à flocculer les argiles du sol provoquant ainsi une réaction physico-chimique qui permet le passage d'une structure plastique à une composition stable grumeleuse. Elle sert aussi à modifier les caractéristiques du sol, ainsi elle agit pour solubiliser la silice et l'alumine contenues dans l'argile et former un silicate et aluminat de calcium. Le liant ainsi composé agglomère les composants du sol et augmente la dureté.



Figure I34 : Traitement de remblai à la chaux (Rossi et al .2007)

### **I .2.5.2.3. Différents types de chaux :**

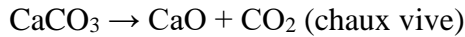
La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

- chaux aérienne provenant d'un calcaire pur ;
- chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium ;
- chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

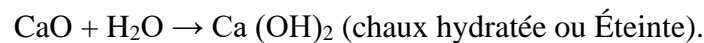
Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes Elles se présentent sous deux formes

**Chaux vive :**

Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO, généralement à plus de 90%. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

**Chaux éteinte :**

Contient essentiellement de l'hydroxyde de calcium Ca (OH)<sub>2</sub>. Elle est obtenue par extinction de la chaux vive selon la réaction d'hydratation suivante :



**Chaux magnésienne :** On distingue 3 types de chaux:

- Chaux calcique (CL)
- Chaux magnésienne
- Chaux dolomitique (DL)

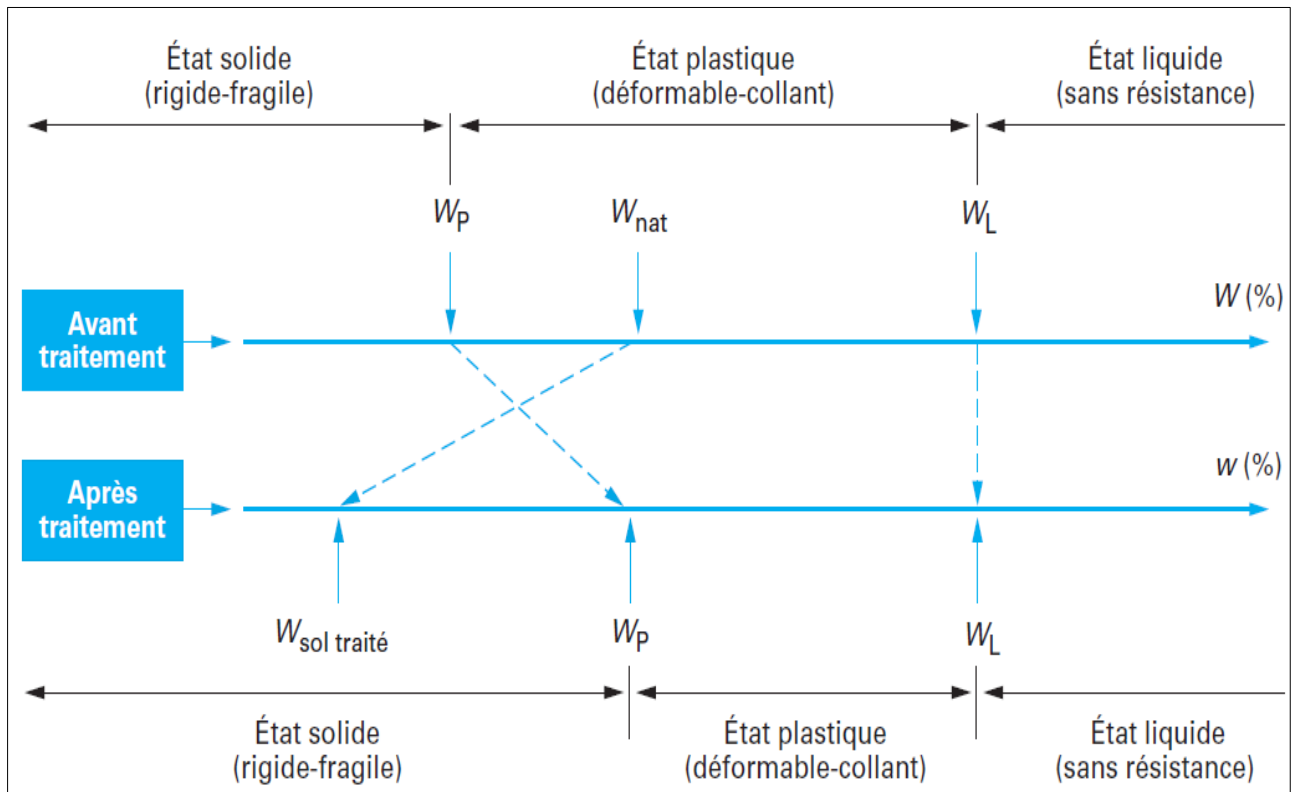
**Chaux hydraulique :**

Provenant d'un calcaire argileux, riche en fer, alumine et surtout en silice (provenant des marnes ou argiles) environ 15 à 20 %. A température entre 800 et 1500°C, le CaO du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium,

**I .2.5.2.4. Action de la chaux :**

L'incorporation de la chaux dans un sol provoque :

- Des actions dites « immédiates » qui se produisent dès l'instant où le mélange sol-chaux est constitué.
- Des actions dites « à long terme » qui se produisent durant plusieurs mois, voire plusieurs années après la mise en œuvre du sol traité. [5]



**Figure I-35 :** Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive (Rossi et al. 2007).

### I .2.5.3. Les liants hydrauliques routiers LHR : [5]

Des LHR ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assise de chaussées. Les principes d'action des LHR ne sont pas différents de ceux des ciments, car on y trouve, mais en proportions différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des ciments spécifiques. Les LHR présentent certains avantages notamment :

- Leurs coûts de fabrication plus faibles, car certains de ces constituants ne nécessitent pas de cuisson spécifique.
- Leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier.

#### I .2.5.3.1. Action des liants hydrauliques :

Dans le cas des liants hydrauliques, ce sont principalement les modifications à moyen et à long terme qui sont recherchées.

En général, la stabilisation des sols par des techniques de traitement aide à améliorer la structure physique qui est dans un état bas. Pour cette raison, les ajouts comme le ciment, la chaux ou la correction granulaire rendent les performances mécaniques plus fortes et plus résistantes à l'effondrement ou à la fissure.

Dans un contexte de développement durable, la valorisation des sols fins reste pour l'instant à explorer au stade de la recherche, que ce soit dans la dépollution des sols ou dans la gestion des quantités des matières.

La théorie du traitement des sols fins permet d'obtenir un meilleur rendement à moindre coût et des matériaux locaux, ce qui est avantageux pour les technique routières ou d'autres domaines. [5]

**CHAPITRE II :**  
**CARACTÉRISATION**  
**GÉOTECHNIQUE**

## Chapitre II : Caractérisation Géotechnique :

### II.1- Introduction :

A partir de ce chapitre on entreprend notre contribution d'étude expérimentale qui sera présentée comme suit :

- Caractéristiques des matériaux testés.
- Matériels utilisés et manipulation.

### II.2. Essais d'identifications :

#### II.2.1. Teneur en eau (Méthode par étuvage) : (NF P 94-050)

##### A. Définitions -Terminologie :

###### a-Teneur en eau pondérale (w) :

C'est le rapport entre la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage ( $m_w$ ) sur la masse des grains solides ( $m_s$ ), exprimé en pourcentage :  $w = m_w / m_s$  [%].

###### b- Teneur en eau naturelle ( $w_{nat}$ ) :

C'est la teneur en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site (in-situ), de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

##### B. Principe de la détermination de la teneur en eau :

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

##### C. Méthode de détermination de la teneur en eau :

L'échantillon est pesé à nouveau (masse des grains solides  $m_s$ ). Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée ( $m_w$ ).

## D. Appareillage :

- Une étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C et à 105 °C ;
- Une balance (avec une incertitude de 1/1 000 de la masse de matériau) ;
- Des coupelles, des boîtes de pétri, des vases à peser ou des bacs en matériau non altérable à l'humidité et à la chaleur, permettant les pesées des échantillons



Figure II.1 : Appareillage pour essai de Teneur en eau (Méthode par étuvage)

## E. Mode opératoire :

### . Masse d'échantillon à soumettre à l'essai :

La masse (m) du matériau sur laquelle est déterminée la teneur en eau est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient (tableau II.1).

<b>dm</b> <b>(mm)</b>	<b>0.40</b>	<b>0.50</b>	<b>0.63</b>	<b>0.80</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>6.3</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12.5</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>...</b>
<b>Masse</b> <b>(g)</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>800</b>	<b>1200</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>5000</b>	<b>...</b>

## F. Procédure d'essai :

Une masse (m) de matériau est placée dans une coupelle ou un bac propre et sec de masse connue. La prise d'essai et son contenant sont pesés immédiatement. Puis, ils sont introduits dans une étuve à 105 °C pour les matériaux insensibles à la chaleur et à 50 °C pour les matériaux sensibles à la chaleur. Deux pesées, séparées par un étuvage d'un intervalle de temps t, sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve. Conventionnellement l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse (ms) de la prise d'essai n'a pas varié de plus de 2/1 000 entre ces deux pesées

L'intervalle test au minimum : - de 4 h dans le cas d'un étuvage à 105 °C ; - de 8 h dans le cas d'un étuvage à 50 °C

## G. Expression des résultats :

Teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$w = (m - m_s) / m_s = m_w / m_s [\%]$$

## II.2.2. La masse volumique :

### A-Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire :

#### Objet :

La présente norme a pour objet la détermination, en laboratoire, de la masse volumique des sols fins. Cette norme définit les termes employés et les paramètres mesurés, spécifie les caractéristiques de l'appareillage, fixe le mode opératoire et précise les résultats à présenter

#### B-Domaine d'application

La norme s'applique à la détermination de la masse volumique d'un échantillon prélevé sur site dans le sol en place ou dans un remblai ou préparé en laboratoire selon un processus défini. La masse volumique des sols est un paramètre d'état. Utilisé avec la teneur en eau (NF P 94-050) et la masse volumique des particules solides (NF P 94-054) il permet de déterminer l'indice des vides, la porosité, le degré de saturation et la masse volumique du sol sec.

#### C-Référence normative

NF X 07-001 Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.

#### D- Généralités

##### D.1. Définitions- Terminologie 11 :

La masse volumique d'un sol  $p$  est le quotient de la masse ( $m$ ) du sol par le volume ( $V$ ) qu'il occupe (y compris les fluides qu'il contient).

$$p = m / V$$

##### E-Méthodes de détermination de la masse volumique :

La masse de l'échantillon est obtenue par pesage et pour mesurer le volume, deux méthodes sont utilisables.

## II.2.3 -Mesure de la masse volumique : (NF XP P 94-054) :

### A-But :

Par définition la masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Il faut distinguer :

### II.2.3.1- Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

### A-Principe :

Remplir une mesure de 1 dm<sup>3</sup>, et en déterminer la masse. La masse volumique apparente est donné par :

$$\text{Masse volumique apparent} = \text{masse/volume.}$$

### B-Appareillage :

- Un récipient calibré.
- Une règle à araser.

### C-Mode opératoire :

- peser le récipient.
- règle et arase le récipient.
- peser le récipient rempli.



**FigureII.2** : Mode opératoire essai masse volumique apparente

### II.2.3.2 - La masse volumique absolue :

La masse volumique réelle est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, compris les vides contenus dans les grains (volume réel) ( $\rho = M / V$ ).

La masse volumique d'un granulat est le rapport entre sa masse et son volume. Pour un granulat donné, ce rapport est une constante qui est propre aux caractéristiques physiques du granulat. Elle permet alors de déterminer un granulat et d'établir un lien entre sa masse et son volume.

Le volume des grains est appelé le volume absolu et le volume des grains avec l'air est appelé le volume apparent. Puisqu'il existe deux volumes pour désigner un granulat. La densité des grains solides du sol est donnée directement par la formule :

$$D_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 - m_3 - m_2}$$



Figure II.3 : les éprouvettes de la masse volumique absolue

### II.2.3. Méthode du pycnomètre à eau (NF P 94 -054) :

#### A- Définition

Densités spécifiques des grains solides du sol c'est le rapport du poids du matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume des grains du sol.

$$\rho_s = w_s / v_s$$

## B- Appareillage :

- Pycnomètre en verre.
- Une balance de précision.
- Un entonnoir à long col

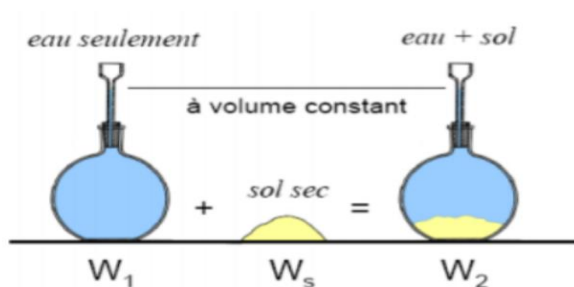


Figure II.4: - Pycnomètre en verre.

## C-Mode opératoire

- Préparer un échantillon de sable, sèche a l'étuve et refroidi.
- Peser le pycnomètre vide (sec et propre) M0.
- Deviser le couvercle et introduire 25g du matériau, peser l'ensemble, soit M1.
- Remplir la bouteille à moitié avec de l'eau et remuer énergiquement avec la tige en verre pour chasser les bulles d'aires.
- Ajouter de l'eau jusqu'à 2 cm du bord supérieur, visser à fond le couvercle et remplir à l'aide d'une pissette par le trou supérieur.
- Secouer le pycnomètre en rebouchant avec un doigt le trou du couvercle.
- Laisser Reposer un bon moment.
- Sécher les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit M2.
- Vider le pycnomètre, laver et le remplir d'eau jusqu'au niveau du trou supérieur.
- Sécher les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit M3

## II.2.4. Analyse granulométrique :

### A-Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (figure II.5).

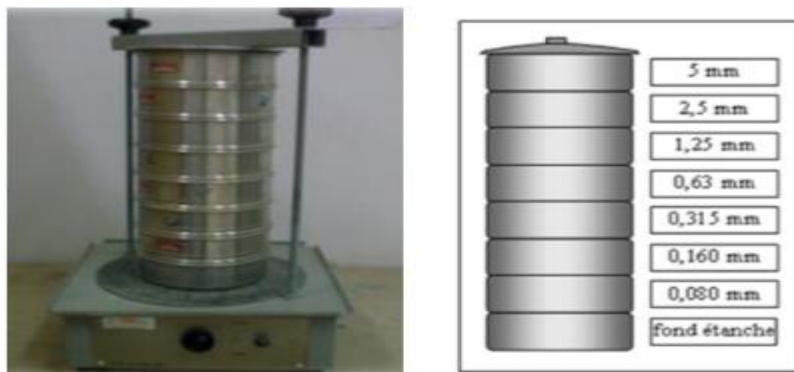


Figure II.5- Analyse granulométrique par tamisage

### B- Analyse granulométrique par sédimentation (NF P 94-057) :

Les particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$  séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil.

#### B.1. Appareillage :

Récipient, étuve, les éprouvettes, bac, agitateur manuel, densimètre, chronomètre.

#### B.2. Mode opératoire :

L'essai s'effectue en quatre étapes qui sont :

#### Traitement de l'échantillon de sol :

- Le tamisât, au tamis de 80  $\mu\text{m}$  de l'échantillon de sol est recueilli avec son eau de lavage dans un bac.
- Le tout est mis à décanter une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entraîner d'éléments fins.
- Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve.

**Imbibition de la prise :**

- Introduire de la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique.
- Ajouture 500 cm<sup>3</sup> du mélange (garder à la température ambiante).
- Laisser imbiber pendant ou mois 15h à la température ambiante.

**Dispersion à l'agitateur mécanique**

- La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau et de flocculant ou moyenne et l'agitateur (mécanique 3min à 10000tr/min).

**B.3. Exécution de l'essai :**

- Verser suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après à la fin de l'agitation mécanique.
- Rincer le récipient et les palettes de l'agitateur avec de l'eau distillée ou déminéralisée.
- Compléter par de l'eau distillée ou déminéralisée jusqu'à 2000 cm<sup>3</sup>.
- Agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel.
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même temps le chronomètre.
- Plonger le densimètre dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre.

**II.2.5. Les limites d'Atterberg :****A-But de l'essai :**

On détermine par cet essai les limites de liquidité et de plasticité d'un sol. Cet essai est réalisé sur la partie de sol passant au tamis de 400 µm.

**B- Matériels spéciales :****B.1. Pour la limite de liquidité et de plasticité (Méthode de la coupelle) :**

- Appareil de Casa grande.
- Outil à rainurer.
- Une spatule. Surface lisse non absorbante.



**Figure II.6:** Matériels spéciales de limites d'Atterberg.

## **B.2. Pour la limite de liquidité (2ème méthode) :**

Appareil de pénétration à cône (la masse de la tige +le cône =240g).

## **C- Principe de l'essai :**

Les limites d'Atterberg consistent en des teneurs en eau limites qui marquent la transition entre deux états de consistance dans un sol cohérent.

Ces limites permettent de classer les sols selon leur plasticité et sont obtenues de manière empirique à l'aide de méthodes normalisées.

## **D- Mode opératoire :**

### **D-1- Préparation du sol :**

- Brasser l'échantillon du sol ;
- Imbiber le sol dans un bac d'eau 24heures ;
- Tamisé le matériau par voie humide au tamis 0,4mm.
- Après une durée siphonnée l'eau clair du bac ;
- L'eau excédentaire est évaporée à une température de 50°.

### **D-2-Détermination de la limite de liquidité selon la norme (NF P 94-051) :**

- Prendre environ 200 grammes de sol.
- Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande laide de la spatule.

- Pratiquer une rainure dans cette pâte de telle sorte à la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle.
- Soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient à des chocs répétés.
- Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 2 cm, noter le nombre de coups N correspondant.
- Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 grammes de sol afin d'en déterminer la teneur en eau.
- homogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations. Il faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalée entre 15 et 35

### **D-3-Détermination de la limite de plasticité : (La méthode des rouleaux selon la norme NF P 94-051) :**

La mesure de limite de plasticité s'effectue après celle de la liquidité. On prend un échantillon trop humide qu'on dessèche en le malaxant et en l'étalant sur le marbre. On forme une boulette de l'échantillon et, à l'aide d'une plaque ou à la main.

#### **E- Etapes de détermination de la limite de plasticité La limite de plasticité « WP » :**

est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3mm plus au moins 0,5 mm. Indice de plasticité :

#### **II.2.6. L'essai au bleu de méthylène :**

##### **-L'essai au bleu de méthylène :(selon la norme : NF P-068) :**

##### **A- But de l'essai :**

Cette méthode permet d'appréhender rapidement l'argilo site (présence de fines de nature argileuse) d'un sol.

##### **B- Principe :**

Le principe de la méthode consiste à contrôler l'adsorption du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant les fines de la prise d'essai, en observant une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier-filtre.

##### **C- Matériels spéciales :**

- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par 10 cm<sup>3</sup>, des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée ;

- Un chronomètre, un papier-filtre blanc, une baguette de verre ;
- Un agitateur mécanique à ailettes ;
- Un récipient cylindrique d'une capacité minimale de 3 000 cm<sup>3</sup> ;
- Un tamis de maille 80 mm.



Figure II.7 : - Appareillage de l'essai au bleu de méthylène

### D-Mode opératoire :

- Préparer la solution de bleu de méthylène 10 g/l ;
- Mettre la prise 30g (tamisé au tamis 0,080 mm) dans le récipient puis ajouter 500 ml d'eau distillée ;
- Agiter l'ensemble par un agitateur à ailettes à vitesse ( $700 \pm 100$ ) ;
- Injecter dans le récipient 5 à 10 cm<sup>3</sup> de solution de bleu de méthylène à l'aide d'une burette de 50 ml ;
- L'agitateur permanent doit être tel que les particules soient en mouvement ;
- Prélever une goutte du liquide à l'aide d'une baguette en verre et la déposer sur le papier-filtre ;
- Apparition autour du dépôt central d'une auréole bleu clair : test positif ;
- Apparition autour du dépôt central d'une auréole incolore : test négatif ;
- L'essai termine que si l'on obtient 5 tests positifs espacés chacun d'une minute sans n'ajouter la solution de bleu.

### II.2.7. Analyse chimique :

La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs.

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages de plans réticulaires plus ou moins denses. Les plans contiennent les atomes : certains plans contiennent bien plus d'atomes que d'autres en fonction de la formule chimique du minéral. Ces plans réticulaires sont séparés par des distances caractéristiques ( $d$ ) selon la nature du cristal ou du minéral considéré. Trois ou quatre distances réticulaires bien choisies permettent une reconstitution du réseau cristallin du minéral.

La théorie a été élaborée concomitamment par W.L. Bragg et G. Wulff : on l'appelle la relation de Bragg. Un faisceau de rayons X incident de longueur d'onde  $\lambda$  ne sera réfléchi par une famille de plan ( $h, k, l$ ), que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle dit angle de Bragg tel que :

La position en  $2\theta$  est convertie en distance inter réticulaire  $d$  par la loi de Bragg, afin d'avoir une valeur indépendante de la longueur d'onde des rayons X. L'intensité  $I$  de chaque pic est exprimée en pourcent, étant la hauteur du pic le plus intense. On constitue ainsi des bases de données, et le diagramme mesuré sur le produit inconnu est comparé de manière informatique à toutes les fiches des bases de données. La base de données la plus complète est la Powder diffraction file (PDF) de l'ICDD (ex-JCPDS : Joint Committee on Powder diffraction standards).

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de distinguer les différentes formes de cristallisation d'un même composé (par exemple pour la silice, distinguer le quartz de la cristobalite). Cependant, elle ne peut généralement pas permettre d'identifier des composés amorphes. La procédure d'identification des phases se fait en deux étapes : une étape de recherche dans une base (Sirach), puis une confrontation des fiches probables avec ce qui est possible chimiquement (match) ; on parle donc fréquemment de search/match pour désigner cette procédure.

### II.2.8- Matières organiques :

La teneur en matières organiques (MO) est le quotient de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon de sol par la masse totale des particules solides minérales et organiques.

#### A- Objectif :

Le présent document s'applique à la détermination de la teneur massique en matières organiques de la fraction granulométrique inférieure ou égale à 2 mm d'un échantillon de sol ou d'un matériau.

#### B- Principe de l'essai :

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché, après calcination dans un four à une température de 450 °C et 500°C.

#### C- Mode opératoire :

- L'échantillon est séché dans l'étuve à 50 °C ;

- Tamiser l'échantillon à 0.08 mm ;
- Prendre 200 grammes de sol ;
- Placer les creusets devant contenir les prises d'essai dans le four à une température comprise 450 °C et 500 °C pendant 3 h au moins ;
- Peser l'échantillon.

## **II.3.- Essais Mécaniques :**

### **II.3.1-Essai Proctor (normal et modifié) : (selon la norme : NF P 94-093)**

#### **A- But de l'essai :**

L'essai Proctor 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

#### **B- Principe de la méthode :**

Le principe de l'essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à la compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et l'on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. Cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique sèche, elle est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor modifié.

#### **C-Matériel spécifique :**

- Moule Proctor avec embase et hausse.
- Dame Proctor (normal et modifié)
- Règle à araser.
- Balance.



**Figure II.8 :** Matériel de Proctor (normal et modifié).

## D-Mode opératoire

### D-1- Pour Proctor normal :

- Préparation du matériau :
- Fixer la hausse sur le moule. Lubrifier l'intérieur du moule et celui de la hausse
- Mettre une quantité de matériaux dans le moule, suffisante pour qu'une fois compactée chacune des trois couches ait sensiblement la même épaisseur (la dernière couche devant avoir sa face supérieure au-dessus du niveau supérieur du moule, c'est à-dire à l'intérieur de la hausse)
- Compacter chaque couche à l'aide de dame de compactage en 25 coups. S'arranger pour que le compactage soit uniforme.
- Une fois les trois couches compactées, enlever la hausse avec beaucoup de soin afin d'éviter la rupture de l'échantillon.
- Enlever la base du moule.
- Arrêter l'essai quand on obtient par deux fois consécutives une diminution du poids total humide par rapport à l'essai précédent.



**Figure II.9** : - Compactage de l'échantillon

### D-2- Pour Proctor modifié :

- L'échantillon est séché dans l'étuve à 50 C° ;
- Tamiser l'échantillon à 20 mm ;
- Diviser l'échantillon en quatre parts égale ;
- Humidifier chacun des parts à une teneur en eau ;
- Chaque part est conservé dans un sac étanche pendant 24 h pour la diffusion de l'eau ;
- Peser du moule vide
- L'embase, la hausse sont fixée au moule puis le disque d'espacement est introduit avec un papier-filtre
- La part est divisée en cinq couches (environ de 650g pour chaque couche), chaque couche reçoit 25 coups ;
- Après compactage, la hausse et le disque d'espacement sont enlevées ;
- Le surplus est arasé ;
- Effectuez-la pesée du moule ;
- prélever une petite quantité de sol en haut du moule et en bas du moule pour en déterminer la teneur en eau ; Ces opérations sont répétées sur chacune des quatre parts de matériau ;
- Pour chaque éprouvette compactée, il convient de calculer : La teneur en eau, La masse de sol contenu dans le moule, La masse du sol sec.

### II.3.2- Essai de portance C.B.R (NF P 94-078) :

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées 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

### A- Essai C.B.R immédiat :

On pose l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :

Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.

Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.

Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants :

0,625 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 et 10 mm

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{13,35}$$

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{19,93}$$



FigureII.10 : - Appareil de poinçonnement (essai CBR).

### B-Essai C.B.R après imbibition :

Après quatre (4) jours d'immersion ( $\pm 2$  h) on mesure la hauteur de gonflement  $\Delta h$  indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement (**figure III.22**). La même procédure que la détermination de l'indice C.B.R Immédiat. La valeur de déformation de l'éprouvette  $g$ , exprimé en pourcentage :

$$g(\%) = \left( \frac{\Delta h}{h} \right) \times 100$$



Figure II.11:- Imbibition des échantillons (essai CBR).

### II.3.3 - Essais de Cisaillement (NF P 94-71) :

#### A- Introduction :

Dans n'importe quelle étude il est nécessaire de connaître la capacité portante du sol donc il est nécessaire de connaître la résistance du sol. La résistance à la compression simple, essai CBR, essai pénétromètre, essai pressiométrique, essai triaxial. Nous allons aborder l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casa grande.

#### B- But de l'essai :

Les valeurs de la résistance au cisaillement ainsi définies sont portées sur un graphe appelé droite de coulomb, en fonction de la contrainte normale s'appliquant sur le plan de rupture à partir de cette courbe on tire la cohésion du sol  $c$  et l'angle de frottement.

Deux grandes catégories de sols :

sol pulvérulent la droite de coulomb passe par l'origine c'est-à-dire la cohésion est nul

sol cohérent : l'eau joue un rôle fondamental dans la résistance au cisaillement des sols cohérent pour simplifier le problème trois types d'essai peuvent être définie suivant qu'il y a drainage ou non ; la consolidation consiste à charger l'échantillon en drainant jusqu'à ce que la pression interstitielle soit totalement dissipée ( $u=0$ )

#### C- Matériel utilisée :

- Machine de cisaillement
- Une boîte de Casa grande

- Une série de poids
- Une trousse coupante
- Un comparateur



FigureII.12 : -Appareille de cisaillement rectiligne.

### D-Mode opératoire :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de demi-botte indépendante le plan de séparation des deux demi boîte consiste un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort normal de compression  $N$  par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant en déplaçant la demi-botte inférieure. Un comparateur mesure le déplacement relatif de l'échantillon

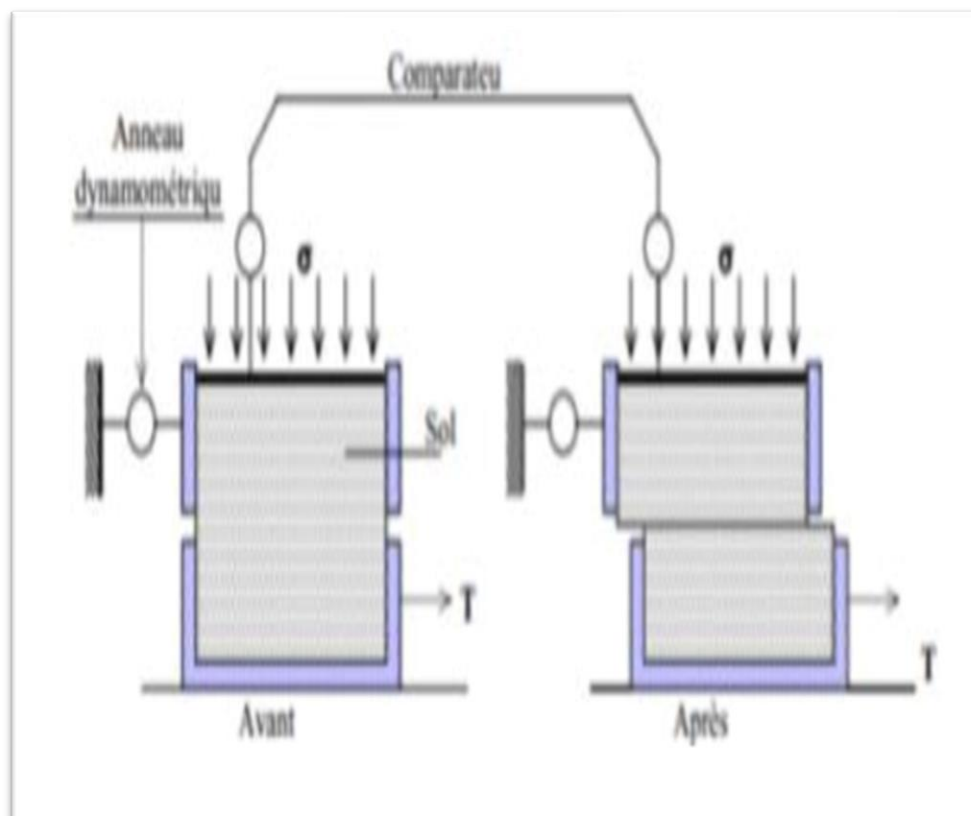


Figure II.13 : - Schéma de la boîte de cisaillement

### II.3.4 -Essais œdométrique (XP P 94-090-1) :

#### a) Définition :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une enceinte cylindrique rigide « odomètre ». Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissant et décroissant suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge

#### II.3.4 .1- Essai œdométrique simple :

L'essai œdométrique simple consiste à charger le spécimen en incréments jusqu'à un certain niveau de contrainte verticale en permettant au spécimen d'être en équilibre sous la contrainte appliquée. L'échantillon est ensuite saturé par l'eau, et la déformation est mesurée. Cette déformation induite par l'addition de l'eau divisée par la hauteur de l'échantillon avant saturation, exprimée en pourcentage, définit le degré d'affaissement

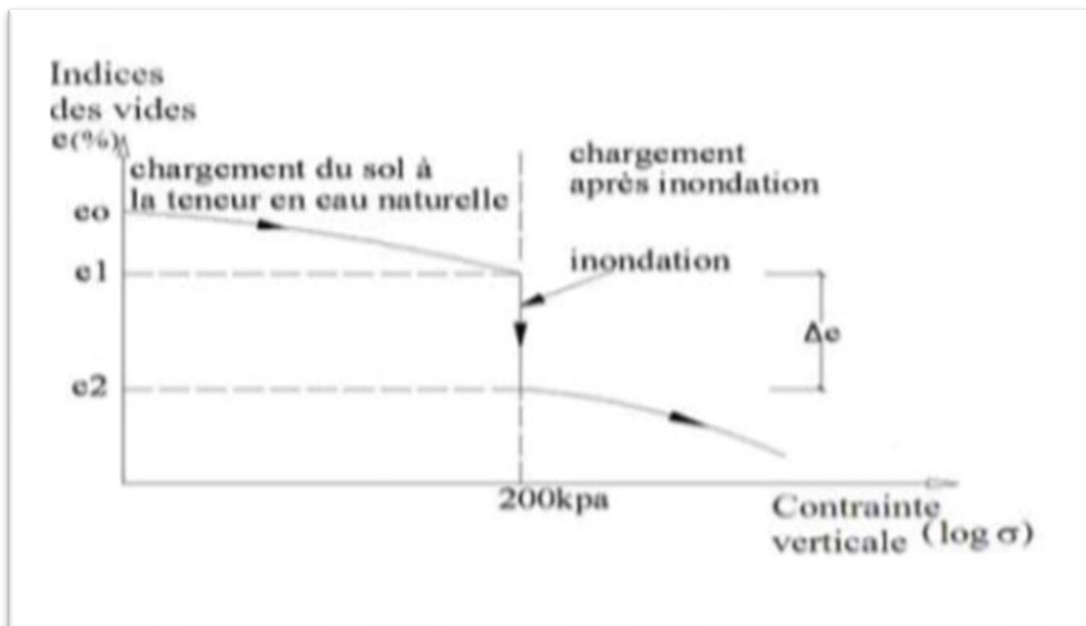


Figure II.14 : Courbe œdométrique (teste de Knight 1963)

**II.3.4 .2- Essai œdométrique double :**

L'essai œdométrique double implique une paire de spécimens identiques du même échantillon. Le premier spécimen est chargé à l'état naturel et la déformation est mesurée à chaque niveau de contrainte. Le second spécimen est initialement saturé et une procédure de chargement similaire est conduite. La différence entre les déformations, à l'équilibre et au même incrément de contrainte, est déterminée pour déterminer le degré d'affaissement.

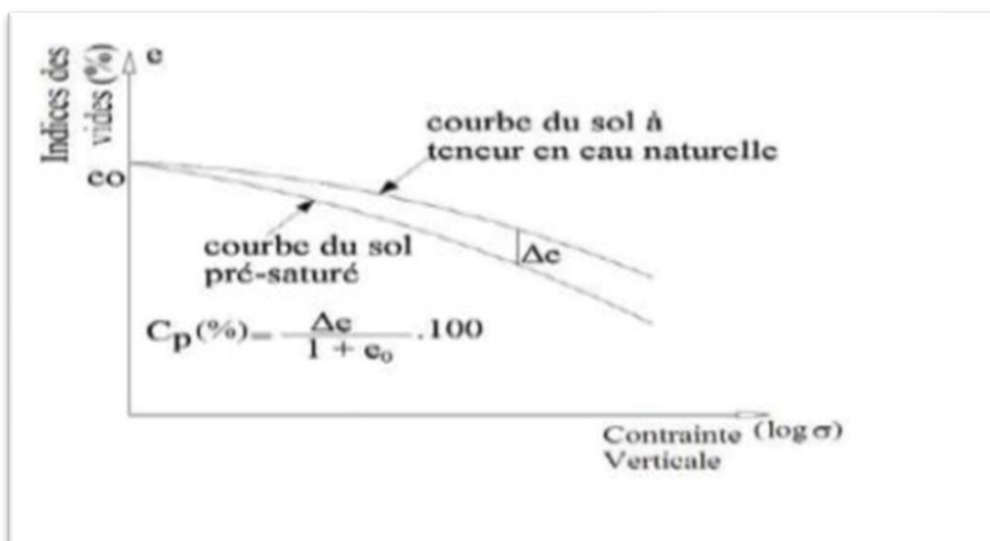


Figure II.15 : - Double odomètres (Knight et Jenkins 1975).

### A- But de l'essai :

La manipulation a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permet d'estimer le tassement provoqué par consolidation d'un massif de sol, par exemple sous une fondation superficielle.

Il permet de suivre la consolidation au cours du temps et de déterminer la relation entre les charges de la déformation obtenue après consolidation, il permet également d'atteindre le coefficient de perméabilité verticale pour une compacité donnée.

Il fournit les caractéristiques du sol en place :

- l'indice de compression  $c_c$  qui indique la compressibilité du sol
- le coefficient de consolidation  $c_v$  qui permet de déterminer le temps de consolidation sous une charge donnée.

### B-Appareillage :

- Balance
- Une étuve
- Une série de poids
- Odomètre cellule de perméabilité
- Un comparateur



Figure II.16 : - Les machines utilisées pour l'essai œdométrique laboratoire

### C- Mode opératoire :

L'échantillon de sol est placé dans une boîte cylindrique rigide de section circulaire entre deux pierres poreuses assurant son drainage.

Un piston permet d'appliquer sur l'échantillon une contrainte verticale uniforme constante pendant un temps déterminé. On mesure alors la variation de hauteur de l'éprouvette de sol en fonction de la

contrainte appliquée. On recommence le processus à différent paliers de chargement de 24 h ; A partir de cet essai ; on peut établir des courbes de compressibilité (indice des vides en fonction de la contrainte) et de consolidation (variation relative de tassement en fonction du logarithme du temps) utiles pour évaluer l'amplitude des tassements et les durées de consolidation des sols.

#### **II.4- Conclusion :**

Ce chapitre a comporté une présentation des essais préliminaire de caractérisation et d'identification effectuée sur les sols utilisés dans notre étude. Tous les essais effectués sont réalisés aux laboratoires avec des appareillages et outils et méthodes de manipulation conformes aux normes géotechniques.

**CHAPITRE III :**  
**RÉSULTATS ET**  
**INTERPRÉTATIONS**

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### III.1. Introduction :

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés sur le sol étudié et leur interprétation.

Comporte les essais d'identification (analyse minéralogique, analyses chimique, paramètres d'état, granularité, limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène) et les essais mécaniques (Proctor normale, Essai C.B.R, Cisaillement à la boîte, Essai œdométrique).

### III.2. Essais d'identification :

#### III.2.1. La masse volumique :

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai La masse volumique de sol fin :

**Tableau III.1:** Détermination de la masse volumique de sol fin.

	M	V	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Essai : 01	50	150	2.5	<b>2.419</b>
Essai : 02	50	150	2.5	
Essai : 03	50	150	2.27	

#### III.2.2. Méthode du Pycnomètre (NF P 94-054) :

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai La masse volumique par Méthode du pycnomètre à eau :

**Tableau III.2 :** Détermination de la masse volumique par Méthode du pycnomètre à eau.

N° essai	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
<b>m<sub>0</sub></b> (g)	109.02	109.01
<b>m<sub>1</sub></b> (g)	150.28	159.14
<b>m<sub>2</sub></b> (g)	390.31	389.63
<b>m<sub>3</sub></b> (g)	359.13	359.04
<b><math>\rho_s</math></b> (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.56
<b>Moyenne</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.59</b>	

### III.2.3. La masse volumique

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai La masse volumique par tamisage :

**Tableau III.3.1 :** Détermination Analyse granulométrique par tamisage (25% sable+ 75% sol fin).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat (%)
2	0	0	0	<b>100</b>
1	2.60	2.60	2.60	<b>97.40</b>
0.5	3.59	6.19	6.19	<b>93.81</b>
0.2	11.19	17.39	17.39	<b>82.61</b>
0.1	14.45	31.83	31.83	<b>68.17</b>
0.08	9.74	41.57	41.57	<b>58.43</b>
<b>Fonds</b>	58.43			

**Tableau III.3 :** Détermination Analyse granulométrique par tamisage (50% sable+ 50% sol fin).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
2	0	0	0	<b>100</b>
1	2.21	2.21	2.21	<b>97.79</b>
0.5	3.35	5.56	5.56	<b>94.44</b>
0.2	18.82	24.38	24.38	<b>85.62</b>
0.1	17.50	41.88	41.88	<b>58.12</b>
0.08	3.88	45.76	45.76	<b>54.24</b>
<b>Fonds</b>	54.24			

**III.2.3.1. Analyse granulométrique des sols méthode par sédimentation NFP-94.057 Version MAI 1992 réf : E.G-Id/6 :**

**Tableau III.4 :** Détermination Analyse granulométrique des sols méthode par sédimentation (50% sable+ 50% sol fin).

<b>Temps de lecture (min)</b>	<b>Lecture R</b>	<b>Temp T</b>	<b>Correction C</b>	<b>Lecture corrigée RC</b>	<b>Diamètre D</b>	<b>Percentage (%)</b>
<b>30 s</b>	21	22.5	+0.480	21.48	80	<b>54.24</b>
<b>1</b>	20	22.5	+0.480	20.48	75	<b>51.71</b>
<b>2</b>	19	22	+0.380	19.38	55	<b>49.17</b>
<b>5</b>	18	22	+0.38	18.38	38	<b>46.63</b>
<b>10</b>	16.5	22	+0.38	16.88	25	<b>42.82</b>
<b>20</b>	15.8	22	+0.38	16.8	17	<b>41.05</b>
<b>40</b>	15.00	22	+0.38	15.38	12	<b>39.02</b>
<b>80</b>	13.00	22	+0.38	13.38	08	<b>33.94</b>
<b>4h:240</b>	8.00	22	+0.38	8.38	05	<b>21.26</b>
<b>24h:1440</b>	0.08	22	+0.38	1.18	02	<b>2.99</b>

❖ La courbe de l'Analyse granulométrique des sols (50% sable+ 50% sol fin)

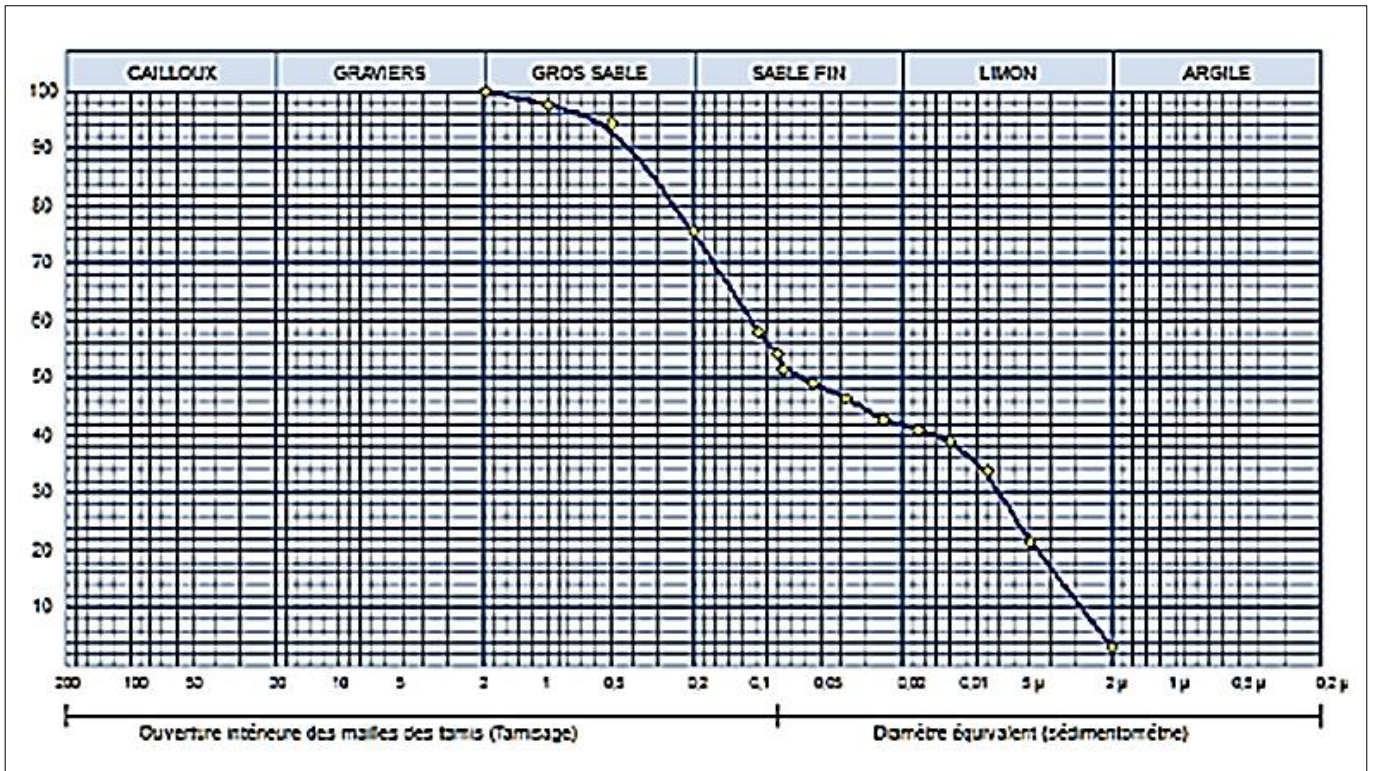


Figure III.1 : La courbe de l'Analyse granulométrique des sols (sol fin + sable).

### III.2.4. Equivalent de sable :

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de l'équivalent de sable :

**Tableau III.5** : Résultats d'essais d'équivalent de sable.

	Sable		25 % Sable 75 % Sol Fin		50% Sable 50% Sol Fin	
	<b>h<sub>1</sub></b>	10.3	10.3	17.3	16.5	16.6
<b>h<sub>2</sub>'</b>	9.1	9.00	15.3	15.1	14.5	15.8
<b>h<sub>2</sub> (piston)</b>	9.00	9.1	15.5	15.5	14.1	15.3
<b>Es = (h<sub>2</sub> /h<sub>1</sub>)*100</b>	87.37	87.37	89.99	91.51	84.93	94.44
<b>Moyenne</b>	<b>87.37</b>		<b>90.55</b>		<b>89.68</b>	
<b>Es' = (h<sub>2</sub>'/h<sub>1</sub>)*100</b>	88.34	88.34	88.43	93.93	87.34	93.82
<b>Moyenne</b>	<b>88.34</b>		<b>91.18</b>		<b>90.58</b>	

### III.2.5. La capacité d'absorption de bleu de méthylène VBS :

D'après les résultats obtenus, la valeur de bleu de mélange, donc selon la classification de (Hang.1984) et la norme française NF P 11-300 il s'agit d'un sol Sablo limoneux des sols argileux :

$$\text{VBS} = \frac{m}{V}$$

On a réalisé essais au bleu de méthylène, les résultats obtenus sont repris dans le Tableau :

**Tableau III.6 :** Les résultats de l'essai de bleu de méthylène.

N° d'essai	Masse du sol (g)	Volume de la solution (cm <sup>3</sup> )	VBS (g/cm <sup>3</sup> )
Essai : (sol fin )	30	44	1.46
Essai : (25% sol fin+75% sable)	50	45	<b>0.9</b>
Essai :(50% sol fin+50% sable )	50	37	<b>0.74</b>

**Tableau III.7 :** Valeur de bleu de méthylène de quelques sols.

Vb (%)	Sols
0.1	sols insensibles à l'eau
0.2	Appariation de la sensibilité à l'eau
1.5	Seuil distinguant les sols sablo limoneux des sols argileux
2.5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
>8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

**III.2.6. Limites d'Atterberg :**

Les limites de liquidité et de plasticité, dites limites d'Atterberg ou limites de consistance, sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols, déterminer leur consistance et permettre de ce fait selon les normes : NFP 94-051 et NFP 94-051-1.

**La limite de liquidité (selon la norme NF P94-051) : (25% sable+ 75% sol fin)**

**Le tableau III.8 :** Résultats d'essai de limite de liquidité.

<b>Nombre d'essais</b>	<b>Essai 01</b>		<b>Essai 02</b>		<b>Essai 03</b>	
<b>Nombre de coups</b>	19		25		30	
<b>Numéro de la tare</b>	A23	Z6	80	S42	74	19
<b>Masse de la tare</b>	3.484	3.844	3.835	3.751	3.650	4.007
<b>Masse du sol humide + la tare (g)</b>	12.268	11.545	12.680	12.356	10.720	12.520
<b>Masse du sol sec + la tare (g)</b>	10.849	10.300	11.268	10.980	9.615	11.193
<b>Masse d'eau (g)</b>	1.419	1.245	1.412	1.376	1.105	1.327
<b>Masse du sol sec (g)</b>	7.365	6.456	7.433	7.229	5.965	7.186
<b>Teneur en eau (%)</b>	19.26	19.28	18.99	19.03	18.52	18.46

❖ La courbe de la limite de liquidité (25% Sable+ 75% Sol fin)

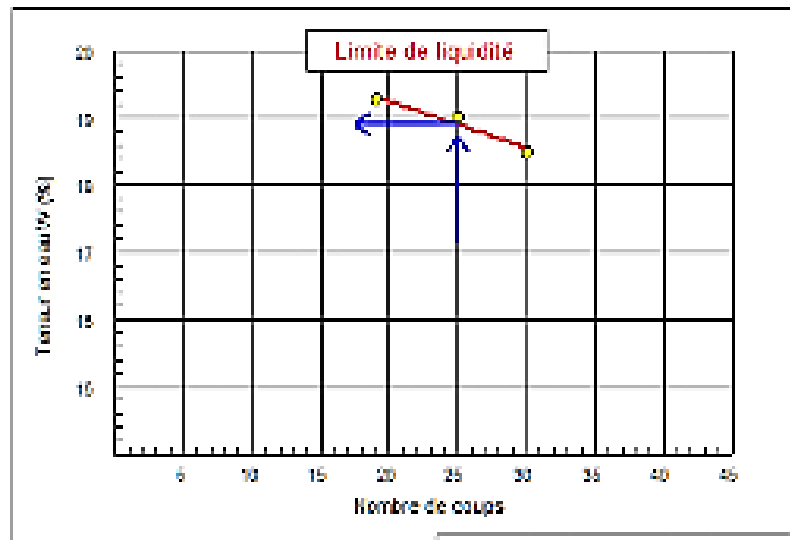


Figure III.2 : La courbe de la limite de liquidité (25% sable+ 75% sol fin)

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de limite de plasticité :

Tableau III.9 : Détermination de la limite de plasticité. : (25% sable+ 75% sol fin).

	Essai 01		Essai 02		Essai 03	
N° de la tare	M	B13	9	33	T10	26
Masse humide + la tare (g)	4.932	4.890	4.690	4.545	4.962	4.914
Masse du sol sec + la tare (g)	4.829	4.760	4.580	4.446	4.873	4.810
Masse de la tare	3.930	3.711	3.692	3.617	3.772	3.955
Masse d'eau (g)	0.103	0.13	0.11	0.099	0.125	0.104
Masse du sol sec (g)	0.899	1.049	0.888	0.829	1.065	0.855
Teneur en eau (%)	11.45	12.39	12.38	11.94	11.73	12.13

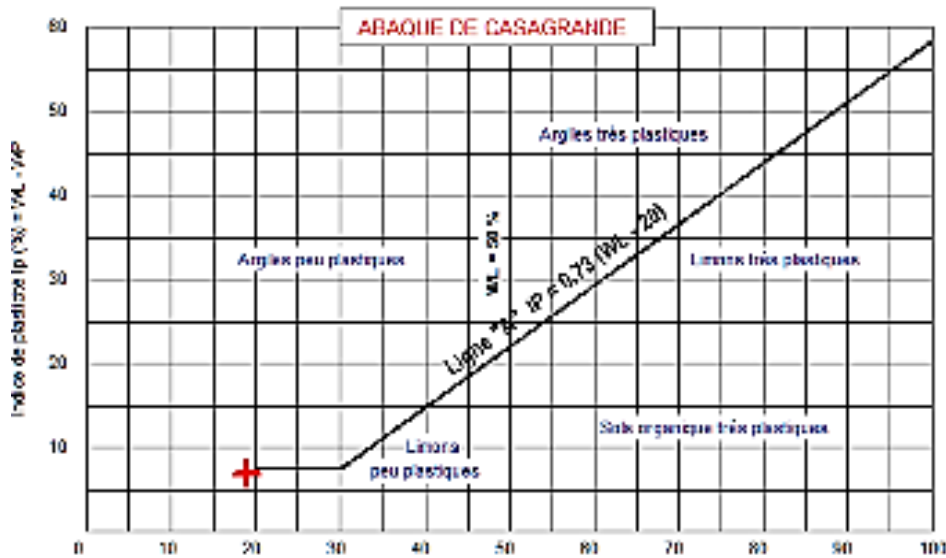


Figure III.3 : Détermination de la limite de liquidité (25% sable+ 75% sol fin).

Tableau III.10 : Les résultats des essais d'Atterberg. (25% sable+ 75% sol fin).

	WL (%)	wP (%)	Ip (%)
01	19.03	11.92	7.11

Remarque :  $IP (\%) = 7.11$  alors on peut dire que le sol est peu plastique et dans l'ordre de grandeur sable limoneux.

**La limite de liquidité (selon la norme NF P94-051) : (50% sable+ 50% sol fin) :**

Le tableau III.11 : Les résultats d'essai de limite de liquidité.

N° d'essais	Essai 01		Essai 02		Essai 03	
Nombre de coups	17		22		31	
Numéro de la tare	Z6	9	33	A23	542	T10
Masse de la tare	3.84	3.69	3.61	3.49	3.75	3.77
Masse du sol humide + la tare	7.799	6.860	8.111	8.690	7.500	7.238
Masse du sol sec + la tare	7.216	6.40	7.45	7.93	6.96	6.74
Masse d'eau	0.538	0.46	0.661	0.76	0.54	0.498
Masse du sol sec	3.37	2.71	3.84	4.44	3.21	2.97
Teneur en eau	15.96	16.97	17.21	17.11	16.82	16.76

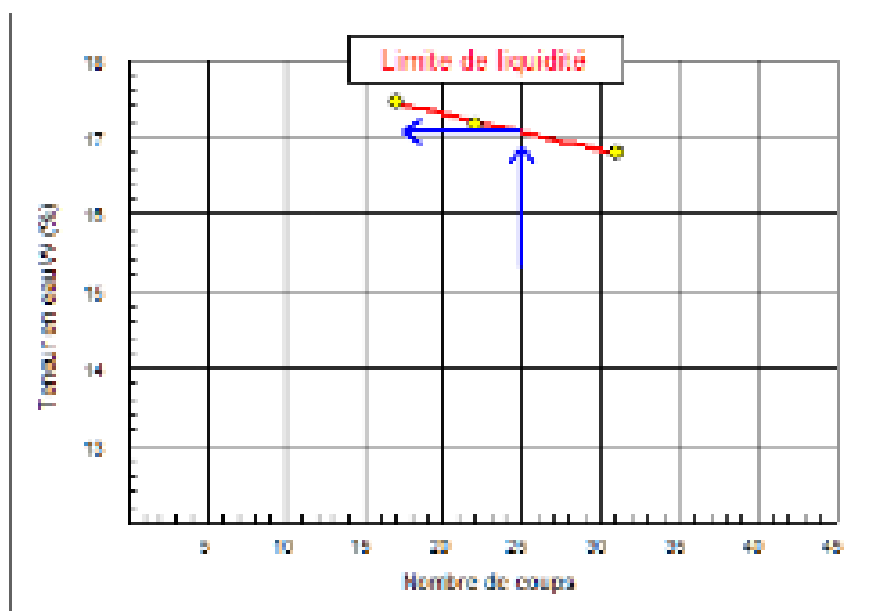
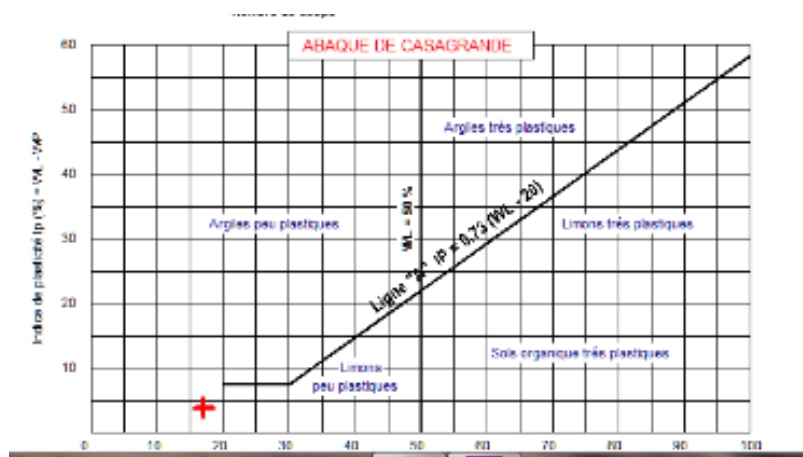


Figure III.4 : La courbe de la limite de liquidité (50% Sable+ 50% Sol fin)

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de limite de plasticité.

**Tableau III.12 :** Détermination de la limite de plasticité. : (50% Sable+ 50% Sol fin).

	Essais01		Essais02		Essais03	
<b>N° de la tare</b>	74	19	80	B13	26	M
<b>Masse humide + la tare</b>	4.255	4.498	4.744	4.290	4.753	4.496
<b>Masse du sol sec + la tare</b>	4.19	4.44	4.63	4.22	4.66	4.44
<b>Masse de la tare</b>	3.67	3.99	3.85	3.71	3.95	3.92
<b>Masse d'eau</b>	0.065	0.058	0.114	0.07	0.093	0.056
<b>Masse du sol sec</b>	0.52	0.45	0.78	0.51	0.71	0.52
<b>Teneur en eau</b>	12.5	12.88	14.61	13.72	13.09	13.46



**Figure III.5 :** Détermination de la limite de liquidité (50% sable+ 50% sol fin)

**Tableau III.13 :** Les résultats des essais d'Atterberg. (50% sable+50% sol fin)

	<b>wL (%)</b>	<b>wP (%)</b>	<b>Ip (%)</b>
<b>01</b>	<b>16.89</b>	<b>12.70</b>	<b>4.20</b>

**Remarque :** IP (%) = 4.20 alors on peut dire que le sol est non plastique.

### III.3. Les essais mécaniques :

#### III.3.1. Essai Proctor normal :

##### III.3.1.1. Essai Proctor normal (25% Sable+ 75% Sol fin) :

Le tableau III.14 : Les résultats des essais Proctor normal effectués sur le sol (25% Sable+ 75% Sol fin).

Teneur en eau (%)	8	10	12	14	16
Masse d'eau ajoutée (g)	160	200	240	280	320
Masse totale humide (g)	3552	3695	3796.49	3818.76	3765.47
Masse de la mole (g)	1820				
Masse du sol humide (g)	1732	1875	1976.49	1998.76	1945.47
Masse volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1.94</b>	<b>2.10</b>	<b>2.22</b>	<b>2.24</b>	<b>2.18</b>
Masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1.80</b>	<b>1.91</b>	<b>1.98</b>	<b>1.97</b>	<b>1.88</b>

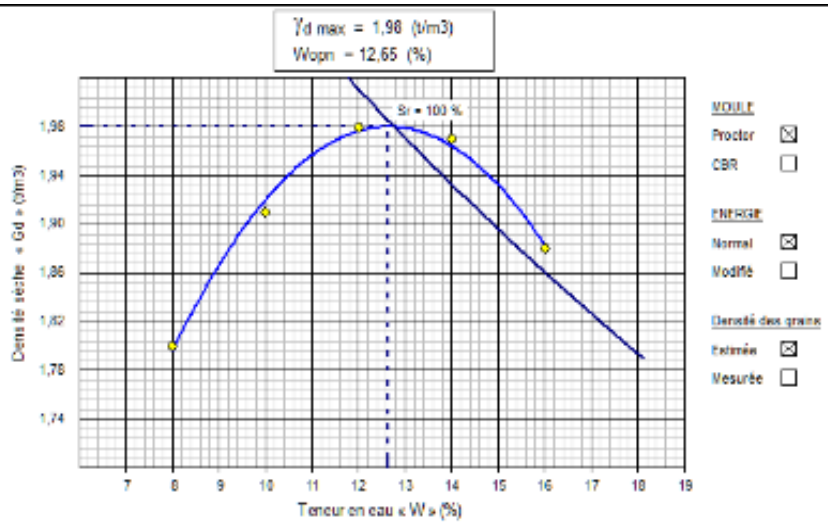


Figure III.6 : La courbe de l’essai Proctor normal. (25% sable+ 75% sol fin)

Le tableau et la courbe présentent les résultats obtenus à partir de l’essai Proctor normal.

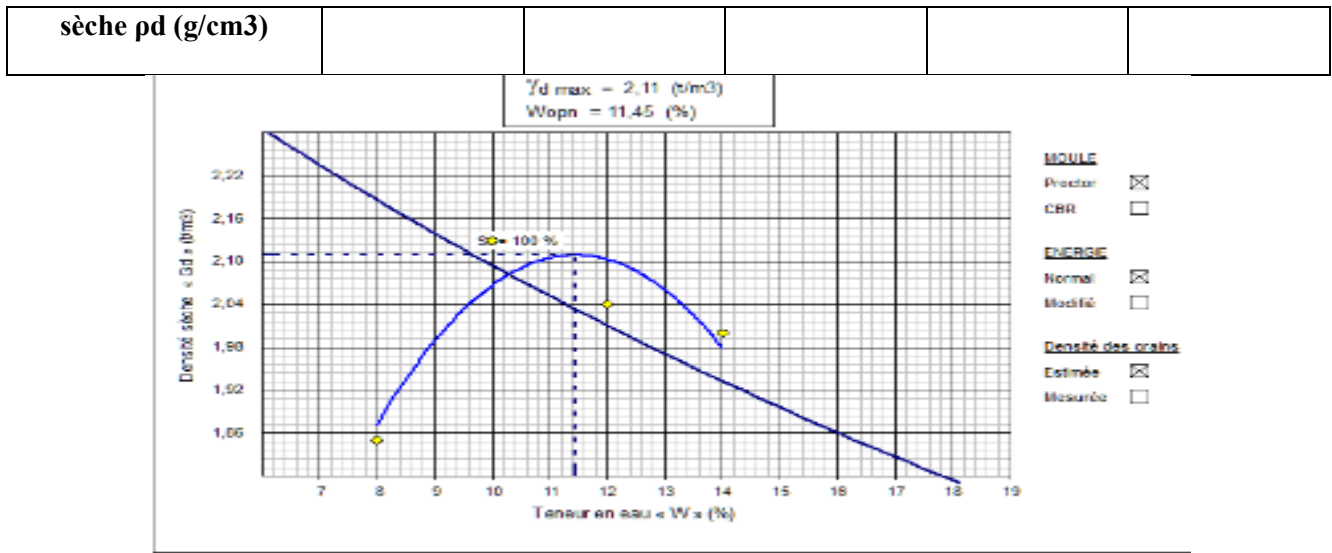
$$w_{opt} = 12.65 \%$$

$$\rho_d \text{ max} = 1.96 \text{ T/m}^3.$$

### III.3.1.2. Essais Proctor normale :(50% Sable+ 50% Sol fin)

Le tableau III.14 : Les résultats des essais Proctor normal effectués sur le sol (50% Sable+ 50% Sol fin).

Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Masse d’eau ajoutée (g)	80	160	200	240	280
Masse totale humide (g)	3385.73	3599.01	3910.1	3852.4	3844.9
Masse de la mole (g)	1817				
Masse du sol humide (g)	1568.73	1782.01	2093.1	2035.4	2027.9
Masse volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1.76</b>	<b>2.00</b>	<b>2.35</b>	<b>2.28</b>	<b>2.29</b>
Masse volumique	<b>1.69</b>	<b>1.85</b>	<b>2.13</b>	<b>2.04</b>	<b>2.00</b>



**Figure III.7 :** La courbe de l’essai Proctor normal. (50% sable+ 50% sol fin).

Le tableau et la courbe présentent les résultats obtenus à partir de l’essai Proctor normal.

$w_{opt} = 10,3 \%$

$\rho_d \text{ max} = 2,13 \text{ T/m}^3$ .

**III.4- Conclusion :**

D’après les résultats qu’on a obtenus, dans ce chapitre on peut conclure :

- Type de sol étudié.
- La teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximum à l’optimum.

## III.3.2. Essai C.B.R :

## III.3.2.1. Essai C.B.R (25% sable + 75% sol fin) :

Tableau III.16 : Détermination de Essai C.B.R (25% sable + 75% sol fin)

Enfoncement (mm)	Lecteur comparateur	Force (kN)
0.625	0.430	
1.25	0.590	
2	0.770	
2.5	1.034	7.65
5	1.300	6.52
7.5	2.050	
10	2.300	

$$\text{IPI} = \text{Max} (7.65/13,35 = 57.3\% \text{ et } 6.52/19,93 = 32.7\%) = 57.3\%$$

## III.3.2.2. Essai C.B.R (50% sable + 50% sol fin) :

tableau III.17 : Détermination de Essai C.B.R (50% sable + 50% sol fin)

Enfoncement (mm)	Lecteur comparateur	Force (kN)
0.625	0.307	
1.25	0.437	
2	0.611	
2.5	0.730	5.40
5	1.400	7.02
7	2.600	
10	2.921	

$$\text{IPI} = \text{Max} (5.40/13,35 = 40.5\% \text{ et } 7.02/19,93 = 35.2\%) = 40.5\%$$

**III.3.3. Cisaillement à la boîte :****III.3.3.1. Cisaillement à la boîte (25% sable + 75% sol fin) :**

Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de Cisaillement

Et trace la courbe

**Tableau III.18** : Détermination de Essai Cisaillement à la boîte (25% sable + 75% sol fin)

dl(mm)	$\tau$ max( 1bar)	$\tau$ max(2 bar)	dl(mm)	$\tau$ max(1bar)	$\tau$ max(2bar)
<b>0</b>	0	0	<b>3.50</b>	0.20	0.22
<b>0.25</b>	0.02	0.05	<b>3.75</b>	0.21	0.23
<b>0.50</b>	0.05	0.07	<b>4</b>	0.22	0.24
<b>0.75</b>	0.07	0.08	<b>4.25</b>	0.23	0.25
<b>1</b>	0.09	0.09	<b>4.5</b>	0.24	0.26
<b>1.25</b>	0.11	0.11	<b>4.75</b>	0.24	0.27
<b>1.5</b>	0.11	0.13	<b>5</b>	0.26	0.27
<b>1.75</b>	0.12	0.14	<b>5.25</b>	0.27	0.29
<b>2</b>	0.14	0.14	<b>5.5</b>	0.28	0.3
<b>2.25</b>	0.15	0.16	<b>5.75</b>	0.29	0.31
<b>2.50</b>	0.16	0.18	<b>6</b>	0.3	0.32
<b>2.75</b>	0.18	0.19	<b>6.25</b>	0.3	0.33
<b>3</b>	0.2	0.21	<b>6.5</b>	0.3	0.33
<b>3.25</b>	0.2	0.21	<b>6.75</b>	0.31	0.33

La courbe de Cisaillement (25% sable + 75% sol fin) :

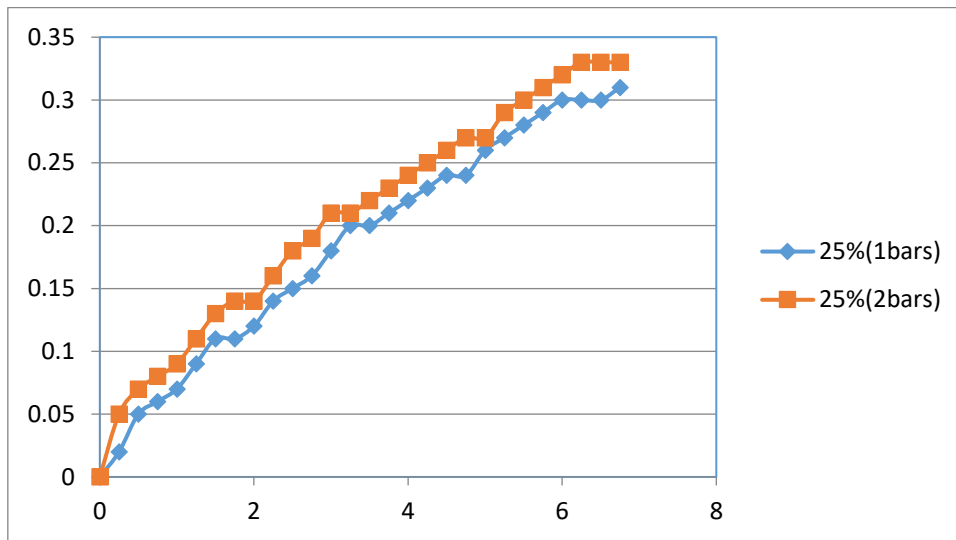


Figure III.8 : La courbe de de Cisaillement (25% sable + 75% sol fin).

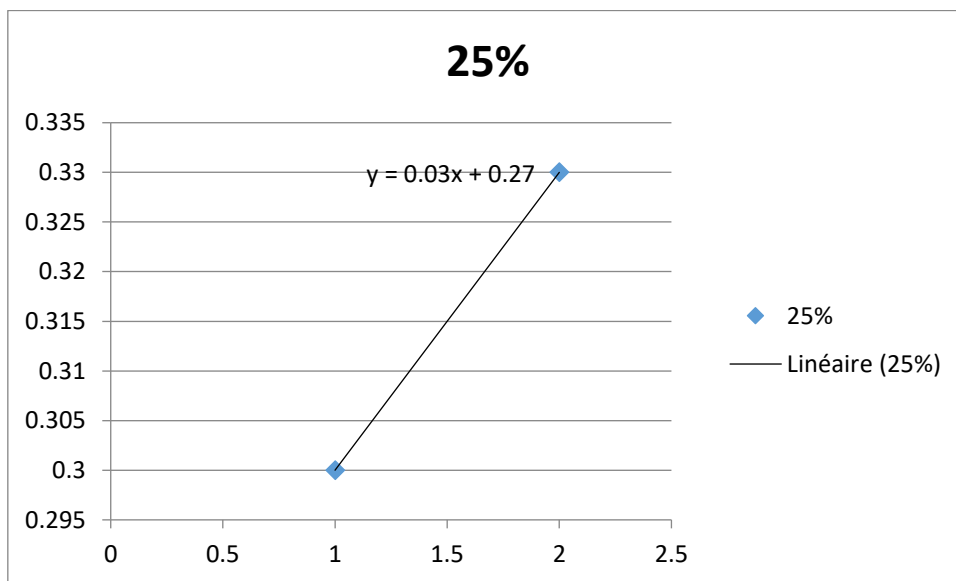


Figure III.9 : La courbe de de Cisaillement (25% sable + 75% sol fin) :

Résultat :

**C= 0.27 bar ,  $\tau_{max}$ = 1.32 deg**

**III.3.3.2. Cisaillement à la boîte (50% sable + 50% sol fin) :**

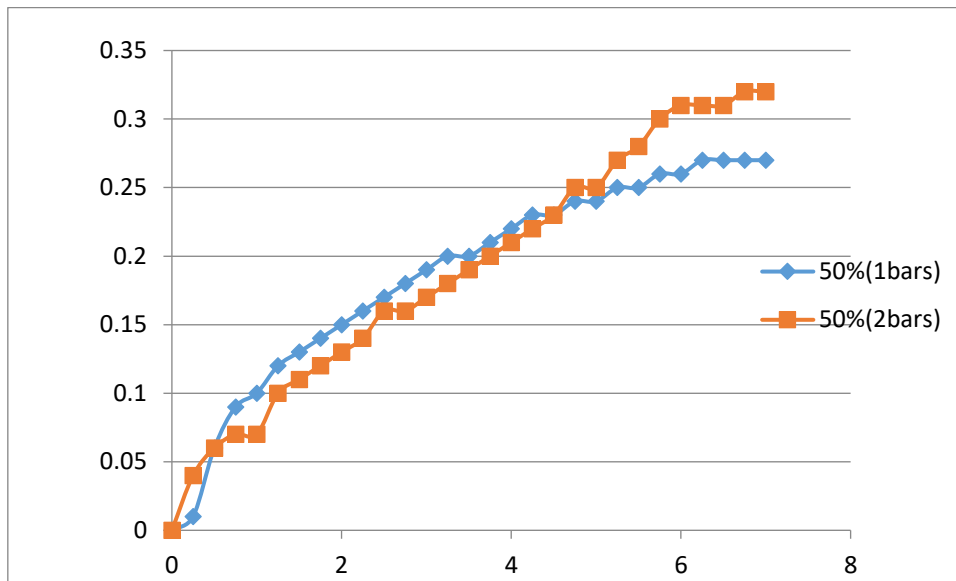
Le tableau ci-dessous présente la récapitulation des résultats d'essai de Cisaillement

Et trace la courbe :

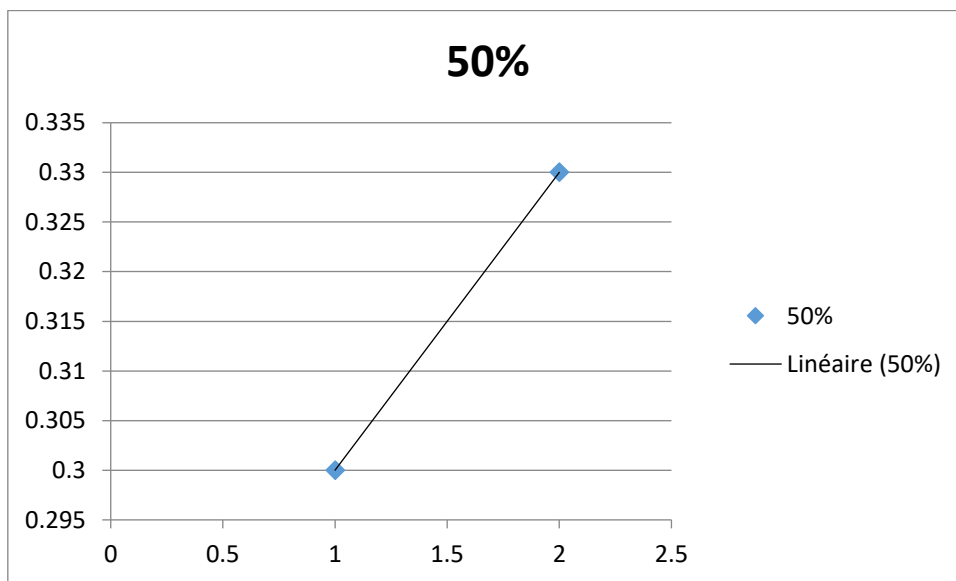
**Tableau III.19** : Détermination de Essai Cisaillement à la boîte (50% sable + 50% sol fin)

dl(mm)	$\tau$ max( 1bar)	$\tau$ max(2 bar)	Dl(mm)	$\tau$ max(1bar)	$\tau$ max(2bar)
<b>0</b>	0	0	<b>3.50</b>	0.2	0.19
<b>0.25</b>	0.01	0.04	<b>3.75</b>	0.21	0.2
<b>0.50</b>	0.06	0.06	<b>4</b>	0.22	0.21
<b>0.75</b>	0.09	0.07	<b>4.25</b>	0.23	0.22
<b>1</b>	0.1	0.07	<b>4.5</b>	0.23	0.23
<b>1.25</b>	0.12	0.1	<b>4.75</b>	0.24	0.25
<b>1.5</b>	0.13	0.11	<b>5</b>	0.24	0.25
<b>1.75</b>	0.14	0.12	<b>5.25</b>	0.25	0.27
<b>2</b>	0.15	0.13	<b>5.5</b>	0.25	0.28
<b>2.25</b>	0.16	0.14	<b>5.75</b>	0.26	0.3
<b>2.50</b>	0.17	0.16	<b>6</b>	0.26	0.31
<b>2.75</b>	0.18	0.16	<b>6.25</b>	0.27	0.31
<b>3</b>	0.19	0.17	<b>6.5</b>	0.27	0.31
<b>3.25</b>	0.2	0.18	<b>6.75</b>	0.27	0.32

**La courbe de Cisaillement (50% sable + 50 % sol fin) :**



**Figure III.10 :** La courbe de de Cisaillement (50% sable + 50% sol fin).



**Figure III.11 :** La courbe de de Cisaillement (50% sable + 50% sol fin).

**Résultat :**

**C= 0.23 bar ,  $\tau_{max}$ = 2.23 deg**

## III.3.4. Essai œdométrique :

## III.3.4.1. Essai œdométrique (25% sable + 75% sol fin) :

Temps (min)	Pression (kg/cm)	Tassement ou gonflement	H
0.25	0.05	4900	245
0.5	0.05	4900	245
1	0.05	4900	245
1440	0.05	4902	245.1
2880	0.1	4910	245.5
4320	0.2	4918	245.9
5760	0.4	4923	246.15
7200	0.9	4041	202.05
8640	3.9	4056	202.8
10080	7.9	4587	229.35
11520	3.9	4121	206.05
12960	0.4	4309	215.45
14400	0.2	4988	249.4
15840	0.1	5080	254

## III.3.4.2. Essai œdométrique (50% sable + 50% sol fin) :

<b>Temps (min)</b>	<b>Pression (kg/cm)</b>	<b>Tassement ou gonflement</b>	<b>H</b>
<b>0.25</b>	<b>0.05</b>	<b>6000</b>	<b>300</b>
<b>0.5</b>	<b>0.05</b>	<b>5090</b>	<b>254.5</b>
<b>1</b>	<b>0.05</b>	<b>5985</b>	<b>299.25</b>
<b>1440</b>	<b>0.05</b>	<b>5973</b>	<b>298.65</b>
<b>2880</b>	<b>0.1</b>	<b>5870</b>	<b>293.5</b>
<b>4320</b>	<b>0.2</b>	<b>5142</b>	<b>257.1</b>
<b>5760</b>	<b>0.4</b>	<b>4979</b>	<b>248.95</b>
<b>7200</b>	<b>0.9</b>	<b>3243</b>	<b>162.15</b>
<b>8640</b>	<b>3.9</b>	<b>3220</b>	<b>161</b>
<b>1008</b>	<b>7.9</b>	<b>2853</b>	<b>142.65</b>
<b>11520</b>	<b>3.9</b>	<b>2893</b>	<b>144.65</b>
<b>12960</b>	<b>0.4</b>	<b>3088</b>	<b>154.4</b>
<b>14400</b>	<b>0.2</b>	<b>3488</b>	<b>174.4</b>

## ❖ Résultat final :

	<b>Sol</b>				<b>Sol + 25% sable</b>				<b>Sol+ 50% sable</b>			
Paramètre	0.08 mm	IP %	IPI kN	VBS g/cm <sup>3</sup>	0.08 mm	IP %	IPI kN	VBS g/cm <sup>3</sup>	0.08 mm	IP %	IPI kN	VBS g/cm <sup>3</sup>
Résultat	61.78	7.24		1.46	54.24	7.11	7.65	0.9	34.91	4.20	7.02	0.74
Classement dans GTR	A1h				A1h				B5			
Utilisation de matériaux	Remblai				Remblai				Remblai			

## Résultat final essais d'identifications :

	0.08 mm	ES	ES'	VBS g/cm <sup>3</sup>	wl %	wp %	IP %
<b>Sol</b>	61.78	-	-	1.46	23.85	16.61	7.24
<b>25% sable</b>	54.24	90.55	91.18	0.9	19.03	11.92	7.11
<b>50% sable</b>	34.91	89.68	90.58	0.74	16.89	12.70	4.20

**Résultat final essais mécaniques :**

	<b>W<sub>opt</sub></b> (%)	<b>P<sub>d</sub> max</b> (T/m <sup>3</sup> )	<b>IPI</b> (kN)	<b>C</b> (bar)	<b>τ max</b> (bar)
<b>25% sable</b>	<b>12.65</b>	<b>1.96</b>	<b>7.65</b>	<b>0.27</b>	<b>1.32</b>
<b>50% sable</b>	<b>10.30</b>	<b>2.13</b>	<b>7.02</b>	<b>0.23</b>	<b>2.23</b>
<b>Sol</b>	<b>14.91</b>	<b>1.90</b>	-	-	-

**CHAPITRE IV :**  
**VALORISATION EN**  
**TECHNIQUES**  
**ROUTIÈRES**

# VALORISATION EN TECHNIQUES ROUTIERES :

## IV.1- Introduction :

Ce chapitre fournit des moyens d'utiliser le sol dans les techniques routières, et comment faire face aux obstacles qui menacent le succès du projet.

Pour cela on doit d'abord faire la classification du notre sol selon le GTR et les conditions de leur utilisation en remblai et en couches de formes.

## IV.2- Classification des sols selon le GTR :

La classification des sols se fait à partir de différents paramètres. Ces paramètres sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

### IV.2.1- Principe général :

Le GTR utilisent trois types de paramètres pour classer un sol :

- Les paramètres de nature.
- Les paramètres de comportement mécanique.
- Les paramètres d'état.

#### IV.2.1.1- Les paramètres de nature : [6]

Il s'agit de définir des caractéristiques intrinsèques des sols. Deux paramètres caractérisent la nature d'un sol :

##### IV.2.1.1.1- La granularité :

L'étude est basée sur trois grandeurs issues d'une analyse granulométrique :

##### ▪ La valeur du $D_{max}$ : dimension des plus gros granulats

- de 50 mm : sols fins, sableux et graveleux (classes A, B, D1 et D2)

+ de 50 mm : sols blocailleux (classes C et D3)

##### ▪ La valeur du tamisât à 0,08 mm

+ de 35 % : sols fins de type A ; ils peuvent être considérés comme régis par celui de la fraction fine ( $\leq 80 \mu\text{m}$ ).

- de 35 % et + de 12% : sols sableux et graveleux riches en fines (classes B5 et B6).

- de 12 % : sols sableux et graveleux pauvres en fines (classes B1 à B4, D1 et D2).

**▪ La valeur du tamisât à 2 mm**

- de 70 % : sols à tendance graveleuse (B3, B4 et D2).

+ de 70 % : sols à tendance sableuse (B1, B2 et D1).

**IV.2.1.1.2- L'argilosité :**

L'étude est basée soit sur la valeur de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) du sol, soit sur la valeur au bleu sec (VBS).

Le GTR propose dans de nombreux cas de se référer à l'indice de plasticité, mais l'évolution des techniques d'essai conduit généralement à mesurer la valeur au bleu.

**▪ Indice de plasticité  $I_p$  :**

- $I_p \leq 12$  : sols faiblement argileux,
- $12 \leq I_p \leq 25$  : sols moyennement argileux,
- $25 \leq I_p \leq 40$  : sols argileux et très argileux.

**▪ Valeur au bleu VBS :**

- $VBS \leq 0,1$  : sol est insensible à l'eau
- $0,1 \leq VBS \leq 0,2$  : apparition de la sensibilité à l'eau.
- $0,2 \leq VBS \leq 1,5$  : seuil distinguant les sols sablo-limoneux.
- $1,5 \leq VBS \leq 2,5$  : sols limoneux de plasticité moyenne.
- $,5 \leq VBS \leq 6$  : sols argileux.
- $8 \leq VBS$  : sols très argileux.

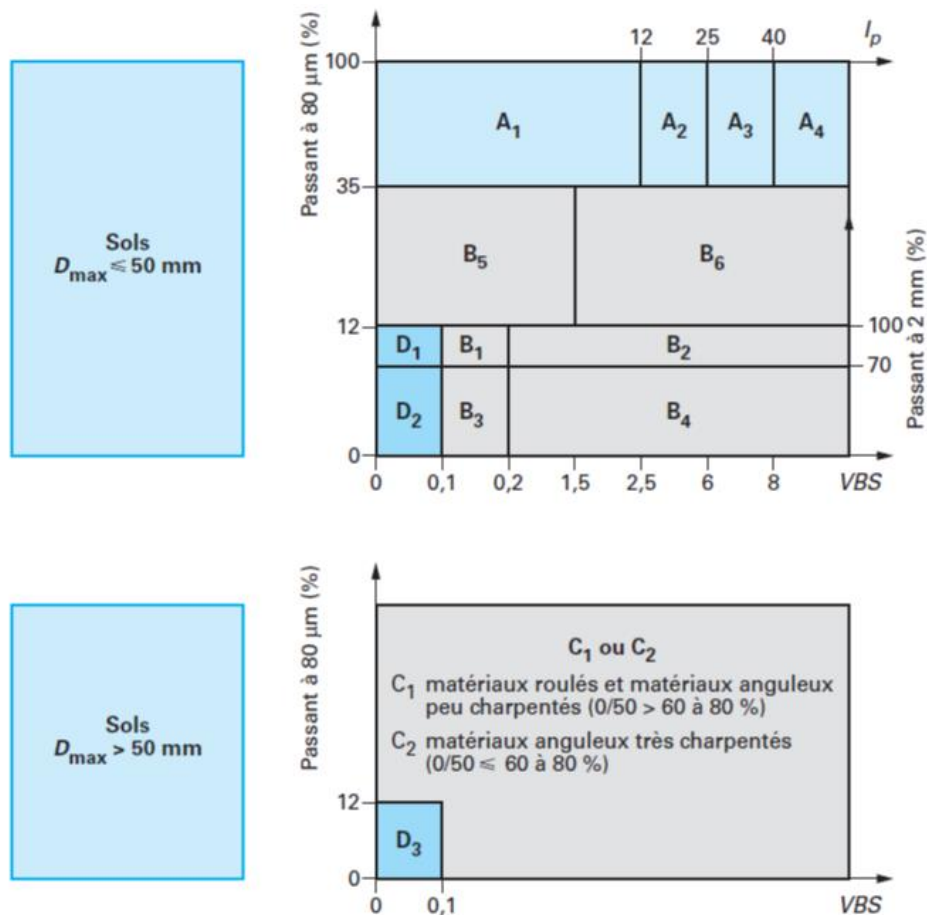


Figure IV.1 : Tableau synoptique de classification des sols.

#### IV.2.1.2- Les paramètres de comportement mécanique :

Il s'agit de déterminer l'aptitude d'un sol à être utilisé en couche de forme. Trois paramètres de comportement mécanique ont été retenus :

- Le coefficient "Los Angeles" (LA) ;
- Le coefficient "Micro-Deval en présence d'eau" (MDE) ;
- Le coefficient de "friabilité des sables" (FS)

##### IV.2.1.2.1- Le coefficient "Los Angeles" L.A. et le coefficient "Micro-Deval en présence d'eau" M.D.E :

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic

- L.A. et M.D.E.  $\leq 45$  : sols pouvant être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme.
- L.A. et M.D.E.  $> 45$  : sols risquant de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières.

#### IV.2.1.2.2. Le coefficient de "friabilité des sables" F.S :

Ce paramètre n'est pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols B1, B2 et D1 en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic.

- F.S.  $\leq$  60 : sols pouvant être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme.
- F.S.  $>$  60 : sols risquant de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières

#### IV.2.1.3- Les paramètres d'état :

Il s'agit de déterminer l'état hydrique d'un sol.

### IV.3- Conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couches de formes :

#### IV.3.1- Conditions d'utilisation des matériaux en remblai :

La classification GTR permet de définir les modalités d'utilisation des matériaux en remblai en tenant compte de leur état hydrique constaté à l'extraction et de la situation météorologique qui modifie cet état au moment de la mise en œuvre des matériaux.

##### IV.3.1.1- Conditions météorologiques :

Selon le GTR, les différentes situations météorologiques sont désignées par les signes ++, +, = et –. Ces symboles expriment le sens dans lequel a tendance à varier la teneur en eau en fonction de la situation météorologique.

- **pluie forte ++** : exprime que la situation météorologique a pour effet d'accroître la teneur en eau du matériau de manière brutale et imprévisible.
- **pluies faibles +** : exprime que la situation météorologique a pour effet d'accroître la teneur en eau de manière lente et relativement prévisible.
- **ni pluie – ni évaporation importante =** : exprime que la situation météorologique n'a pas d'action sensible sur la teneur en eau du matériau considéré.
- **évaporation importante –** : diminution de la teneur en eau (température élevée ou temps sec ou vent)

##### IV.3.1.2- Conditions d'utilisation des matériaux en remblai :

Les conditions d'utilisation en remblai présentées dans les tableaux se groupent en sept rubriques symbolisées par une lettre.

##### ▪ **E : Extraction :**

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais dans la mesure où :

- L'extraction En Couche : (d'épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux. Elle a

la particularité d'exposer au maximum les sols aux agents atmosphériques, ce qui selon les cas peut-être un effet recherché ou au contraire contre-indiqué, [8]



**Figure IV.2 :** Extraction en couche.

### - L'extraction Frontale :

Se caractérise évidemment par des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans les formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.



**Figure IV.3 :** Extraction frontale.

### ▪ G : Action sur la granularité :

On distingue deux actions qui permettent d'agir sur la granularité :

#### ○ Elimination des Eléments :

- > 800 mm : Cette valeur constitue une limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement.

- < 250 mm : Cette valeur constitue la dimension maximale des blocs permettant encore un malaxage du sol avec un agent de traitement

#### ○ Fragmentation complémentaire après extraction :

Cette modalité s'applique aux matériaux rocheux évolutifs. Les moyens utilisables pour agir sur la granularité sont variés : pétardage, concassage, utilisation d'engins spéciaux. [8]

### ▪ W : Action sur la teneur en eau :

Il s'agit des différentes mesures pouvant être prescrites pour modifier l'état hydrique des matériaux et notamment : l'aération par conditions météorologiques favorables ou l'humidification.



**Figure IV.4 :** Aération.

Pour ce qui concerne l'humidification, il convient de distinguer deux modalités.

La première consiste en un arrosage simple durant la mise en œuvre. Elle n'a pour objectif que de maintenir l'état hydrique du matériau lorsque les conditions météorologiques sont " évaporantes ".

La seconde modalité vise quant à elle, le changement d'état hydrique du matériau. Dans ce cas il faut être conscient qu'il s'agit d'une opération délicate qui exige de grandes quantités d'eau et le recours à un brassage ou un malaxage pour la faire pénétrer au sein du matériau (une vérification de l'efficacité de l'opération s'impose avant d'en généraliser l'application sur tout un chantier).



**Figure IV.5 :** L'humidification des sols.

#### ▪ **T : Traitement :**

Le traitement d'un sol consiste à mélanger différents produits tels que la chaux (éventuellement sous forme de lait de chaux), des liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers, ...) ou des correcteurs granulométriques, pour conférer aux matériaux des performances mécaniques supérieures à celles qu'ils possèdent à l'état naturel, et durables tout au long de la vie de l'ouvrage.

Dans le cas du traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques, il convient :

- de déterminer par une étude de laboratoire le choix du produit de traitement, les dosages nécessaires, pour atteindre les performances mécaniques recherchées et la plage de teneur en eau du mélange sol-liant.
- de s'assurer de la pérennité des liaisons engendrées par le traitement
- les modalités de traitement pour une couche de forme seront beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement en remblai [8]



**Figure IV.6 :** Traitement à la chaux.



**Figure IV.7 :** Traitement liants.

### ▪ R : Régalage :

Sous cette rubrique est donnée une indication sur l'épaisseur des couches élémentaires à mettre en œuvre. Il ne s'agit que d'une indication approximative compte tenu des méthodes de régalage utilisées en terrassement. Pour fixer les idées, on peut retenir : - qu'une couche "mince" a une épaisseur de 20 à 30 cm, - qu'une couche "moyenne" a une épaisseur de 30 à 50 cm.

### ▪ C : Compactage :

Trois niveaux d'énergie sont distingués : faible, moyen, intense. Comme pour les épaisseurs de régalage il s'agit d'une indication qualitative sur le niveau d'énergie de compactage requis par les différents matériaux.



**Figure IV.8 :** Compactage.

### ▪ H : Hauteur des remblais :

L'utilisation des matériaux est fonction de la hauteur du remblai On considère les remblais :

- faible hauteur, limités à 5 m
- hauteur moyenne, limités à 10 m
- grande hauteur, supérieurs à 10m [8]



**Figure IV.9 :** Hauteur des remblais.

**Tableau IV.1 :** Tableau récapitulatif des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai.

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
<b>E</b> Extraction	<b>0</b>	-Pas de condition particulière à recommander.
	<b>1</b>	-Extraction en couches (0,1 à 0.3m)
	<b>2</b>	-Extraction frontale (pour un front de taille >1 à 2m)
<b>G</b> Action sur la Granularité	<b>0</b>	-Pas de condition particulière à recommander.
	<b>1</b>	-Elimination des éléments > 800mm
	<b>2</b>	-Elimination des éléments > 250mm pour traitement
	<b>3</b>	-Fragmentation complémentaire après extraction
<b>W</b> Action sur la Teneur en eau	<b>0</b>	-Pas de condition particulière à recommander.
	<b>1</b>	-Réduction de la teneur en eau par aération
	<b>2</b>	-Essorage par en dépôt provisoire
	<b>3</b>	-Arrosage pour maintien de l'état
	<b>4</b>	-Humidification pour changer d'état
<b>T</b> Traitement	<b>0</b>	-Pas de condition particulière à recommander.
	<b>1</b>	-Traitement avec un réactif ou un additif adapté
	<b>2</b>	-Traitement à la chaux seule
<b>R</b> Réglage	<b>0</b>	-Pas de condition particulière à recommander.
	<b>1</b>	-Couches minces (20 à 30cm)
	<b>2</b>	-Couches moyennes (30 à 50cm)
<b>C</b> Compactage	<b>1</b>	-Compactage intense
	<b>2</b>	-Compactage moyen
	<b>3</b>	-Compactage faible
<b>H</b> Hauteur des Remblais	<b>0</b>	-Pas de condition particulière à recommander.
	<b>1</b>	-Remblai de hauteur faible ( $\leq 5m$ )
	<b>2</b>	-Remblai de hauteur moyenne ( $\leq 10m$ )

## IV.3.2- Conditions d'utilisation des matériaux en couches de formes :

### IV.3.2.1-Conception de la couche de forme :

#### IV.3.2.1.1-Définition et nature de la couche de forme :

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée.

La surface supérieure de cette structure d'adaptation constitue la "plate-forme support de chaussée" (PF).

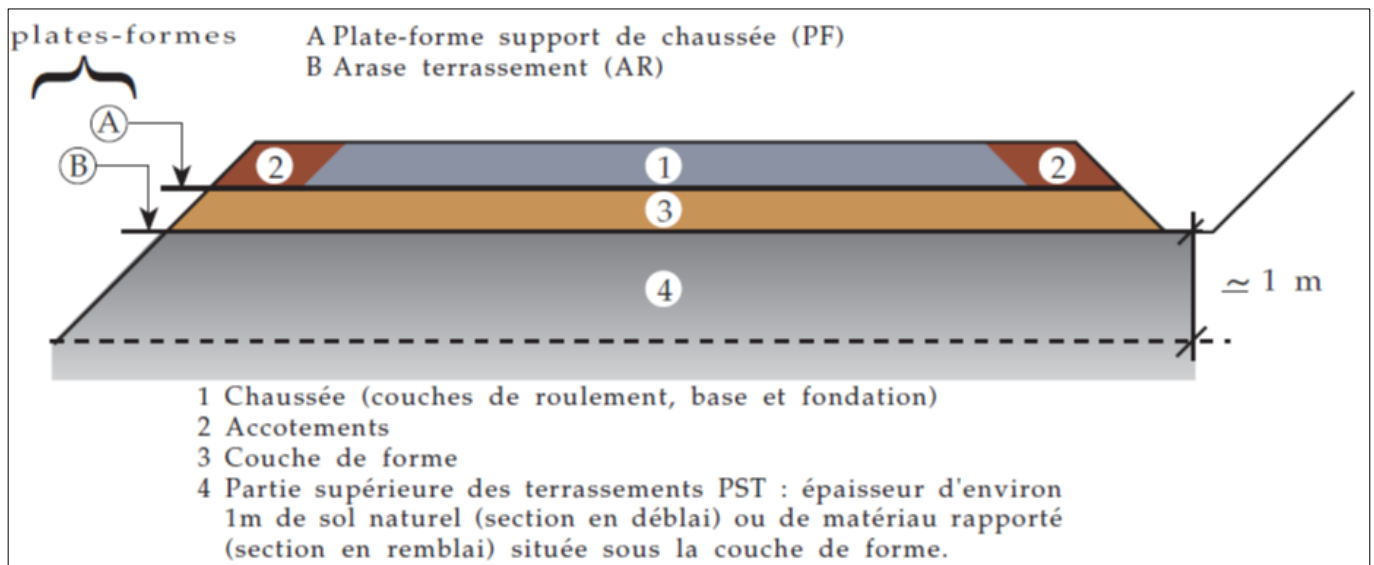


Figure IV.10 : Définition des différents termes.

#### IV.3.2.1.2. Fonctions et conception de la couche de forme :

La couche de forme répond à la fois à des objectifs :

- à court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée)
- à long terme (lorsque l'ouvrage est en service).

Selon le cas de chantier, on cherchera à assurer, avec la couche de forme, l'ensemble ou certaines des fonctions suivantes :

##### ▪ Fonctions à court terme :

- un nivellement de la plate-forme support de chaussée permettant de réaliser la couche de fondation dans les tolérances d'épaisseur fixées,
- une portance suffisante, compte tenu en particulier des aléas météorologiques, pour une exécution correcte du compactage des couches de chaussées et l'obtention d'un bon uni,
- une protection du sol support vis-à-vis des intempéries,

- une traficabilité permettant la circulation, dans de bonnes conditions, des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation,
- éventuellement supporter le trafic de chantier pour d'autres besoins.

▪ **Fonctions à long terme :**

- homogénéiser la portance du sol : permettant ainsi de concevoir des chaussées d'épaisseur constante.
- assurer le maintien dans le temps : en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau.
- améliorer la portance de la plate-forme : afin d'optimiser le coût de l'ensemble "couche de forme structure de chaussée".
- assurer la protection thermique des sols supports gélifs.
- contribuer au drainage de la chaussée.

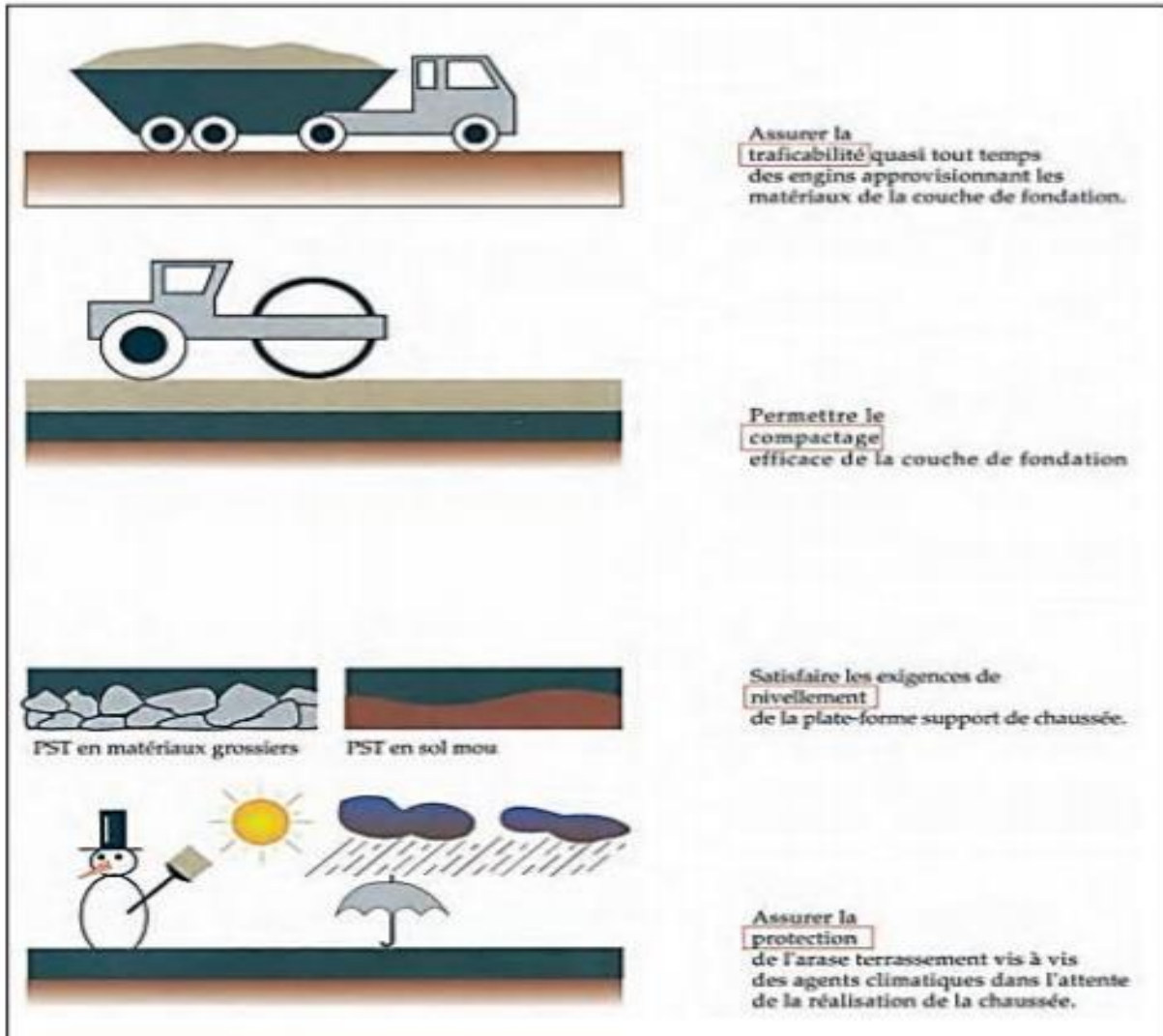


Figure IV.11 : Fonctions à court terme.

#### IV.3.2.1.3-Critères associés à la construction de la chaussée :

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

Pour la réalisation des couches de chaussée, les exigences minimales préconisées antérieurement sont maintenues

- la plate-forme support de chaussée doit être nivelée avec une tolérance de + ou - 3 cm,

- la déformabilité de la plate-forme, au moment de la mise en œuvre des couches de chaussée, doit être telle que :

le module EV2 déterminé à la plaque, ou le module équivalent à la dynaplaque soit supérieur à 50 MPa.

la déflexion relevée au déflectographe Lacroix ou à la poutre Benkelman sous essieu de 13 tonnes soit inférieure à 2 mm

Dans certaines conditions, comme celles de grands chantiers sur lesquels la circulation sur la couche de forme sera importante, ou du fait de la nature des matériaux de la couche d'assise et des conditions d'exécution de chantier envisagées (épaisseurs et matériels de compactage), il pourra s'avérer utile d'adopter des seuils plus exigeants. Mais cela ne doit pas être systématique et doit être raisonné.

#### **IV.3.2.2-Matériaux de couche de forme : [8]**

Pour qu'un matériau puisse être employé en couche de forme il faut qu'il satisfasse aux critères définis ci-après. Certains matériaux pourront être utilisés en l'état, d'autres pourront être rendus aptes à un emploi en couche de forme moyennant une modification de leur nature et/ou de leur état par une technique

##### **IV.3.2.2.1-Critères à satisfaire :**

Les critères à prendre en considération concernent :

##### **▪ L'insensibilité à l'eau :**

Le matériau de couche de forme doit avoir les caractéristiques mécaniques indépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel, soit par traitement à la chaux ou avec des liants hydrauliques.

##### **▪ dimension des plus gros éléments :**

La dimension des plus gros éléments doit permettre d'assurer un nivellement de la plateforme dans les tolérances requises, en général +/- 3 cm.

##### **▪ Résistance au trafic de chantier :**

Un matériau de couche de forme, utilisé sans traitement avec un liant hydraulique, doit être suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition pour ne pas donner lieu, sous l'effet du compactage et du trafic, à la formation d'éléments fins en surface qui le rendraient sensible à l'eau. Cette résistance est appréciée à partir des résultats d'essais mécaniques (Los Angeles, micro-Deval en présence d'eau, friabilité des sables).

Il faut encore que sa résistance aux efforts tangentiels transmis par les pneumatiques (en accélération, virage, freinage) soit suffisante pour éviter tout risque d'enlèvement (problèmes rencontrés surtout avec les matériaux granulaires holométriques roulés).

##### **▪ Sensibilité au gel**

L'incidence néfaste du gel s'apprécie sous deux aspects :

- la dégradation des roches et des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par "gélifraction",

- le gonflement au gel des sols par “cryosuccion”.

#### **IV.3.2.2.2- Techniques de préparation et de protection des matériaux pour emploi en couche de forme :**

Les techniques considérées se rangent en quatre rubriques :

##### **▪ G : Granularité :**

Les actions envisageables sur la granularité sont :

- élimination de la fraction fine sensible à l'eau 0/d par criblage dans l'état naturel ou avec lavage-débouillage,
- élimination de la fraction grossière,
- élimination à la fois de la fraction fine sensible à l'eau et de la fraction grossière,
- fragmentation de la fraction grossière pour produire une certaine quantité d'éléments fins.

##### **▪ W : Etat hydrique :**

Les actions envisageables sur l'état hydrique sont :

- un arrosage (superficiel),
- une humidification (changement d'état hydrique).

##### **▪ T : Traitement :**

Les traitements envisageables sont :

- liant hydraulique,
- chaux,
- correcteur granulométrique,
- mixte.

**Tableau IV.2 :** Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme. [8]

Rubrique	Code	Technique de préparation des matériaux
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
	2	Humidification pour changer d'état hydrique
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	6	Traitement avec un correcteur granulométrique
S Protection superficielle	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
	3	Couche de fin réglage

#### IV.4- Conclusion :

Dans ce chapitre, on a discuté la classification des matériaux selon le GTR pour leurs valorisations en techniques routières.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE :**

## **CONCLUSION GENERALE :**

Certains sols à cause de leurs faibles caractéristiques sont classés comme des sols normalement inutilisables en l'état créant donc des problèmes économique et technique pour les différentes parties engagées dans le domaine de la géotechnique routière. Ces sols donc demandent une certaine amélioration pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer leur performance.

Les travaux de recherches réalisés dans ce mémoire consiste à l'utilisation de matériaux locaux lors du processus d'excavation, dans le respect d'un développement durable qui encourage les investissements économiques et environnementaux, mais parfois l'utilisation de ces matériaux présente des propriétés mécaniques qui ne sont pas utilisable et puisque l'amélioration du sol par l'ajout de sable est considérée comme une solution pour atteindre cet objectif et nous l'avons montré à travers nos travaux de recherche, il était nécessaire de mener une étude approfondie des propriétés physiques, chimiques et propriétés mécaniques des sols fins et étudier la composition résultant du mélange du sable avec des sols fins dans certaines proportions. Notre objectif a été atteint, qui est d'améliorer la qualité des sols fins et d'améliorer ses propriétés mécaniques.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

- [1] Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transport Guide technique. (Juillet 2000) Fascicule Réalisation des remblais et des couches de forme 2ème Edition
- [2] Rouabhia El Houssayne Zedadra Hanane (Juin 2017). Amélioration des sols Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma
- [4] Seklaoui-Oukid, O. (2016). Valorisation des sédiments du barrage d'El merdja Sidi Abed : Etude technico-économique. Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Algérie.
- [5] Benaissa, A. (2017). Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routière. Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès Sidi-Bel-Abbès, Algérie.
- [6] Rossi, P., Gavois, L., & Raoul, G. (2008). Classification des matériaux. Ed. Techniques Ingénieur (C5 361–1).
- [7] BELKHEIR B. (2013) Influence du traitement par la chaux sur les caractéristiques mécaniques des sédiments de dragage de barrage K'sob. Mémoire de Master, Université de M'sila.
- [8] Conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couches de formes. Site : « [https://www.ente-aix.fr/documents/135geotechnique/4\\_ConditionsUtilisation/co/cours\\_1\\_CdUtilisation.html](https://www.ente-aix.fr/documents/135geotechnique/4_ConditionsUtilisation/co/cours_1_CdUtilisation.html) »

### Les Normes :

- AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-050 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.
- AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-053 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.
- AFNOR (1996) Norme Française : NF P 94-056 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage après lavage.
- AFNOR (1992) Norme Française : NF P 94-057 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.
- AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-068 Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache.
- AFNOR (1999) Norme Française : NF P 94-093 Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.
- AFNOR (1944) Norme Française : NF P 94-071-1 Sols : Reconnaissance et Essais –de cisaillement direct.