



UNIVERSITE CADI AYYAD  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES MARRAKECH  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE  
Mémoire de fin d'études  
Licence en Science et Technique **GEOLOGIE APPLIQUEE AUX RESSOURCES MINIERES**  
**LST GARM**

# **Etudes géotechniques des sols et leurs utilisations comme matériaux en remblai**

**Réalisé par:**

Mlle. Bouazizi Inès

**Encadré par:**

M.Kchikach Azzouz : Faculté des sciences et techniques – Marrakech

M. Lamsougar Ilyasse : Ingénieur d'état à l'organisme LPEE-El Jadida

**Soutenu: Le 27 Juin 2016**

**Devant le jury composé de :**

*M. A. KCHIKACH:* Faculté des sciences et techniques – Marrakech

*M.A.HAFID* : Faculté des sciences et techniques – Marrakech

## Sommaire

1. Remerciement .....	4
2. Introduction.....	5
3. Présentation de l'organisme L.P.E.E.....	6
3.1 Rôle du L.P.E.E. : .....	6
3.2 Domaines d'intervention : .....	6
3.3. L'organisme LR/L.P.E.E. El Jadida .....	7
3.4. Unité de stage .....	7
4. Intérêt de la géotechnique dans l'activité humaine.....	8
4.1. La protection de l'Homme à l'aide de la géotechnique .....	8
4.2. Le rôle de la géotechnique dans le développement de l'activité humaine .....	8
4.3. Le tunnel sous la Manche (euro tunnel).....	8
4.3.1 Dans quelle couche géologique le tunnel a-t-il été construit ?.....	9
4.3.2. Les 5 paramètres géologiques dont dépendait la réussite du projet :.....	10
5. Classification géotechnique des sols .....	11
5.1 Nécessité d'une classification spécifique .....	11
5.2 Classification des sols .....	11
5.3. Les paramètres retenus pour la classification des sols .....	17
5.4. Les essais permettant la classification des sols.....	17
5.4.1. Echantillonnage NF X 31-300.....	17
5.4.2. Les essais .....	19
5.4.2.1. Essais déterminant la nature du sol .....	19
5.4.2.2. Essais mécaniques de sols .....	22
6. Utilisation des matériaux en remblai .....	24
6.1. Définition .....	24
6.2 Terrassement et réutilisation et utilisation des matériaux de déblai en remblai.....	25
6.3 Conditions d'utilisation des matériaux en remblai (GTR) .....	26
7. Etude de cas: Tuf marno-calcaire verdâtre à beige concassé .....	28
7.1. Objectif de l'étude.....	28
7.2. Les essais .....	29

7.2.1 Analyse granulométrique .....	29
7.2.2 Essai de VBS .....	31
7.2.3.Essai proctor .....	31
7.3. Résultats des essais effectués sur l'échantillon .....	34
7.4. Interprétation des résultats .....	34
8. Conclusion .....	39
10. Références bibliographiques .....	41

## Liste des photos, tableaux et figures

Photo 1:Schéma montrant le trajet du tunnel(ANTEA).....	9
Photo 2: Carte géologique: emplacement du tunnel sous la Manche(ANTEA) .....	10
Photo 3:Echantillonneur pour gravier .....	18
photo 4:Echantillonneur pour gravier -photo 5:Opération de tamisage- photo 6: Pesage des refus ..	19
Photo 7:essai de pénétration à cône.....	21
Photo 8:agitateur à ailette et papier filtre .....	21
Photo 9:Modalité de compactage selon le type de Proctor (NF_P94-093) .....	23
Photo 10:Remblai (source SETRA).....	24
photo 11:Compactage d'un remblai - photo 12:Humidification de sol .....	27
Photo 13:Humidification des matériaux .....	35
Tableau 1:les différentes classes du sol(SETRA).....	12
Tableau 2:Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (SETRA).....	13
Tableau 3:classification des sols granuleux(kchikach) .....	15
Tableau 4:conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai(SETRA) .....	26
Tableau 5:Résultats de l'ensemble des essais effectués sur le sol étudié .....	34
Tableau 6:Conditions d'utilisation de matériaux de type C1B5s en remblai .....	36
Figure 1:les grandes catégories de sols (kchikach).....	14
Figure 2: classification des sols granuleux(kchikach) .....	14
Figure 3:classification des sols fins(kchikach) .....	15
Figure 4:La séparation est soit manuelle, soit avec un appareil appelé échantillonneur.....	18

## 1. Remerciement

Au terme de cette soutenance, je tiens à remercier mes chers parents qui m'ont soutenue depuis mon premier jour jusqu'aujourd'hui.

Je tiens à exprimer mes vives reconnaissances, et mon dévouement à toute l'équipe LPEE El Jadida qui n'ont pas hésité à m'aider durant toute ma période de stage.

Mes remerciements les plus distingués s'adressent à Mr I.Lamsouguar mon parrain de stage, pour son aide et la qualité de son encadrement qui, malgré ses préoccupations, s'est trouvé un temps pour me donner le nécessaire.

De la part de mon établissement FSTG, je remercie sincèrement tous les professeurs du département de géologie pour leurs efforts et leur aide et spécialement mon encadrant Mr. Kchikach pour ses précieux conseils.

Enfin, toute ma gratitude à chaque personne qui m'a soutenue et aidée afin d'accomplir ma formation.

## 2. Introduction

Le présent projet décrit le travail que j'ai effectué au sein du laboratoire, dont premièrement j'ai essayé d'avoir une idée sur les différents types d'essais visant entre autre l'analyse des matériaux de construction des bâtiments ou d'infrastructures routières.

Deuxièmement, j'ai traité comme sujet, une étude d'utilisation des matériaux dans un remblai pour la réalisation d'un nouveau parc de charbon à JORF LASFAR.

Durant mon stage, j'ai acquis la grande importance de la géotechnique dans la prévision de la vie humaine ainsi que la facilité de l'activité de l'Homme grâce au développement que la géotechnique a connu.

La géotechnique est un domaine d'activité multidisciplinaire et multiforme. Les sols et les roches sont les deux grandes familles dans lesquelles on regroupe les matériaux naturels pour les études de mécanique, ces sols et ces roches sont rencontrés :

- Soit comme support de construction (bâtiments, ouvrages de génie civil).
- Soit comme matériau de construction (matériau de remblai, granulats pour le béton ou les matériaux de chaussées).
- Soit comme milieu naturel (environnement), en distinguant les milieux géologiques à risques (glissement de terrain, séisme, subsidence, excavations abandonnées, zones karstiques, etc.) et les milieux naturels soumis à des pollutions...

Les études géotechniques ont pour but de caractériser la nature du sous-sol et ainsi d'adapter le projet de construction en conséquence. En effet, un sol argileux devant supporter un ouvrage d'art imposant n'aura pas le même comportement qu'un sol rocheux dans le même état de contrainte. Les essais géotechniques ont donc pour objectif de clarifier l'état du sous-sol et donc, après interprétation, de définir le système de fondation le plus adéquat à notre ouvrage.

## 3. Présentation de l'organisme L.P.E.E.

Laboratoire publique des essais et d'étude(L.P.E.E.) a été crée en 1947 sous le Protectorat, le laboratoire a été nationalisé en 1973 à la faveur de la marocanisation. Etude du sol et des matériaux de construction, hydraulique, électricité, environnement, métrologie..., il couvre des domaines très variés. Ce laboratoire est leader dans le domaine du Bâtiment, des Travaux Publics et des Industries associées. Il intervient durant toutes les phases de la réalisation d'un projet tel qu'il offre et assure diverses prestations d'essais, d'analyse, d'études, de contrôles, d'expertise et d'assistance technique.

### 3.1 Rôle du L.P.E.E. :

Son principal rôle est d'assurer l'exécution et l'interprétation des travaux expérimentaux nécessaires pour tous les ouvrages du bâtiment et de génie civile.

### 3.2 Domaines d'intervention :

Ses principaux domaines d'intervention sont les suivants :

- Géotechnique et sciences de la terre,
- Bâtiment, structures, matériaux et physico-chimie des matériaux,
- Infrastructures de transports,
- Aménagements hydrauliques, maritimes et portuaires,
- Environnement et prévention des pollutions,
- Industrie: électricité, métallurgie, métrologie, sécurité et emballage,
- Recherche et développement, qualité et coopération.

### 3.3. L'organisme LR/L.P.E.E. El Jadida



### 3.4. Unité stage

Nom : LABORATOIRE PUBLIC D'ESSAI ET D'ETUDE

LABORATOIRE REGIONAL D'EL JADIDA

ADRESSE : LOT 206-ZONE INDUSTRIELLE EL JADIDA

TELEPHONE : (0523) 37.38.82

FAX : (0523)35.39.12

## 4. Intérêt de la géotechnique dans l'activité humaine

La géotechnique est la technoscience consacrée à l'étude pratique de la subsurface terrestre sur laquelle notre action directe est possible pour son aménagement et/ou son exploitation, lors d'opérations de BTP (génie civil, bâtiment, carrières), de gestion des eaux souterraines (exploitation, drainage) et de prévention des risques naturels.

### 4.1. La protection de l'Homme à l'aide de la géotechnique

Le sol connaît toujours des risques qui menacent la vie humaine. Parmi ces risques figurent les **glissements de terrain, les inondations et les tassements de sol**. L'étude permet également de déterminer quel type de fondation est nécessaire pour une sécurité optimale en fonction du type de terrain.

L'étude du sol est composée de différentes missions, régies par la norme NF P 94-500. Cette norme permet de définir un cadre à la fois juridique, contractuel et commercial à l'étude du sol.

D'après Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, Le terme mouvements de terrain regroupe plusieurs types de phénomènes bien différents :

- Les affaissements et les effondrements liés aux cavités souterraines ;
- Les éboulements et les chutes de pierres et de blocs ;
- Les glissements de terrain ;
- Le retrait-gonflement des sols argileux

### 4.2. Le rôle de la géotechnique dans le développement de l'activité humaine

Au long de plusieurs années, les différents types de fondation se développent afin d'atteindre les objectifs qui sont la satisfaction des besoins des gens de nos jours

Parmi les plus importants accomplissements que la géotechnique a connue au niveau mondial « le tunnel sous la manche ».

### 4.3. Le tunnel sous la Manche (euro tunnel)

Le Tunnel sous la Manche, appelé The Channel Tunnel ou Chunnel en anglais, est un tunnel ferroviaire long de 50.km qui relie le Royaume-Uni à la France.

Sur 37 km, ce tunnel passe sous la Manche entre Coquelles et Folkestone, à quelques kilomètres de Douvres.

Aujourd'hui, ce tunnel fait circuler jusqu'à 53 trains par jour, assurant une liaison France-Angleterre en seulement 35 minutes.

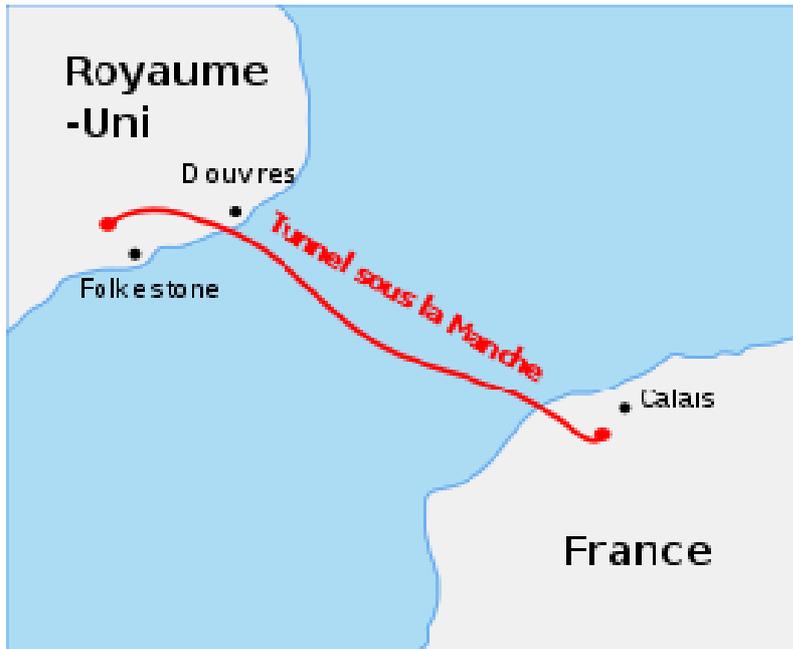


Photo 1:Schéma montrant le trajet du tunnel(ANTEA)

#### 4.3.1 Dans quelle couche géologique le tunnel a-t-il été construit ?

Le sol est constitué de différentes strates :

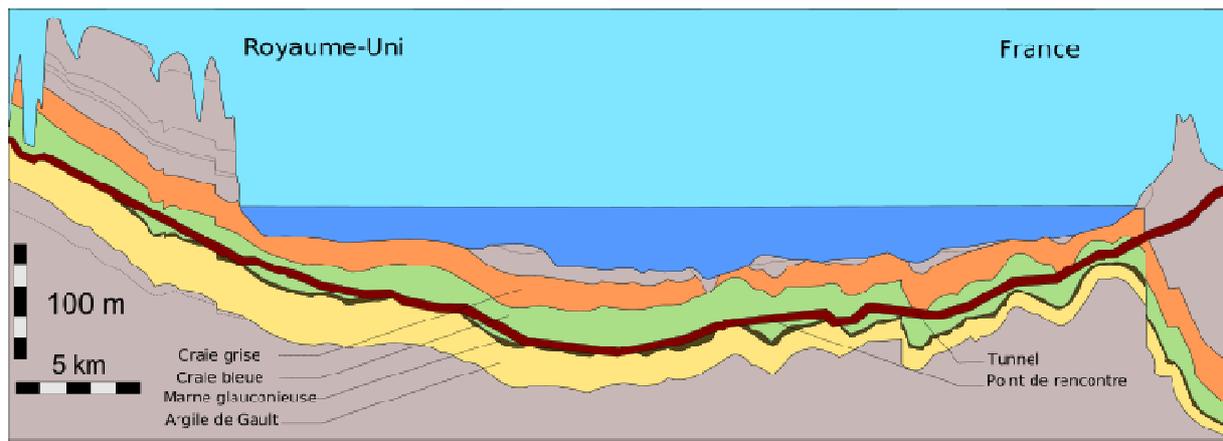
- La première, est une couche de sédiments.
- La deuxième, est un mélange de craie blanche et grise, mais le problème est que la craie est poreuse.
- La troisième, est une couche de craie bleue. Elle est adaptée pour le tunnel car elle est très résistante et très étanche.

La craie est une roche sédimentaire carbonatée contenant plus de 90% de  $\text{CaCO}_3$  (carbonate de calcium). Elle est d'origine marine formée par l'accumulation des restes de coccolithophoridés (algues calcaires unicellulaires) dans des bassins de moins de 300 m de profondeur. D'autres espèces planctoniques sont présentes dans la craie mais aussi des espèces de plus grande taille (oursins, ammonites...).

En effet, cette couche de craie bleue, vieille de 100 millions d'années, résistante mais pas trop dure (dureté 3 à 5) peu fracturée donc peu perméable ( $10^{-7}$  m/s), mais juste assez épaisse (25 à 35m) pour bien contenir les trois tunnels, est située à une profondeur raisonnable : 30 à 60 m sous le fond de la mer.

Par contre, la craie grise est plus perméable (2 à 5<sup>-5</sup> m/s), soit 100 fois plus que la craie bleue. On trouve 60% de calcimétrie pour la craie grise (mesure du calcium dans la matière) contre 59% pour la craie bleue, ce qui est quasiment similaire.

- Après, c'est une couche d'argile dite « gonflante ». L'argile est étanche mais cette matière est très caoutchouteuse (dureté 2).



**Photo 2: Carte géologique: emplacement du tunnel sous la Manche(ANTEA)**

C'est pourquoi les constructeurs ont décidé d'utiliser la couche de craie bleue pour creuser le tunnel sans qu'il ne dépasse ni au-dessus, dans la craie grise (car il y aurait des risques de venues d'eaux nombreuses et dangereuses) ni au-dessous, dans l'argile (l'argile du Gault qui risquerait de bloquer les tunneliers).

#### **4.3.2. Les 5 paramètres géologiques dont dépendait la réussite du projet :**

D'après la conception géologique du tunnel sous la manche, il a fallu traquer l'erreur de logique, hiérarchiser les objectifs et identifier les causes d'incertitudes lors des 5 phases suivantes :

1. Définir les données nécessaires au projet et hiérarchiser leur importance pour la réussite du projet,
2. Organiser et concevoir les reconnaissances de telle façon que les données les plus importantes soient le mieux possible appréhendées,
3. Mesurer les caractéristiques physiques mécaniques et hydrauliques, en identifiant et en réduisant chaque cause d'erreur ou d'incertitude,
4. Interpréter les résultats en tenant compte des incertitudes résiduelles,
5. Prévoir les difficultés lors des travaux, compte tenu des particularités de chaque zone.

## 5. Classification géotechnique des sols

### 5.1 Nécessité d'une classification spécifique

Les différents systèmes de classifications géotechniques des sols et des matériaux rocheux proposés jusqu'à présent ont été établis avec le souci de servir l'ingénieur dans l'ensemble des différents domaines de Génie Civil où ces matériaux sont concernés dans les ouvrages en terre, fondations, stabilité des pentes, assises de chaussée ou élaboration des granulats.....

La classification des sols d'après la recommandation pour les terrassements routiers (GMTR) se fait en fonction des problèmes posés par leur utilisation dans la construction des remblais et des couches de forme.

### 5.2 Classification des sols

Les sols sont des matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer par simple trituration ou sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables: des argiles aux blocs (classes A, B, C et D). Il existe une dernière classe de sol ayant une teneur en matières organiques supérieure à 3 %, c'est la classe F.

La classification des sols et matériaux présentée dans le tableau suivant conserve l'esprit de la classification 1976 et apporte certaines améliorations déjà évoquées dans le préambule. Elle fait l'objet de la norme AFNOR (NF P 11-300).

Tout sol ou matériau rocheux peut donc être rangé selon ce système de classification dès lors que les valeurs des paramètres sur lesquels il s'appuie sont connues et que les essais permettant de les déterminer sont reconnus significatifs sur le sol ou le matériau rocheux considéré.

**Tableau 1: les différentes classes du sol (SETRA)**

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
<b>A</b>	Sols fins	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou $I_p$
<b>B</b>	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou $I_p$ et tamisat
<b>C</b>	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50mm$ et passant à $80\mu m > 12\%$ ou passant à $80\mu m \leq 12\% +$ VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS, $I_p$ et tamisat à 50 mm
<b>D</b>	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ et passant à $80\mu m \leq 12\%$	D1 à D3
<b>R</b>	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
<b>F</b>	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	

$D_{max}$  = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension inférieure (soit  $D_{95}$  si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments)

A : sols fins (limons, argiles...),

B : sols sableux ou graveleux avec fines (sables et graves argileuses...),

C : sols comportant des fines et de gros éléments (alluvions grossières, argile à silex...),

D : sols et roches insensibles à l'eau (sables et graves propres, matériaux rocheux sains...),

Tableau 2:Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature(SETRA)

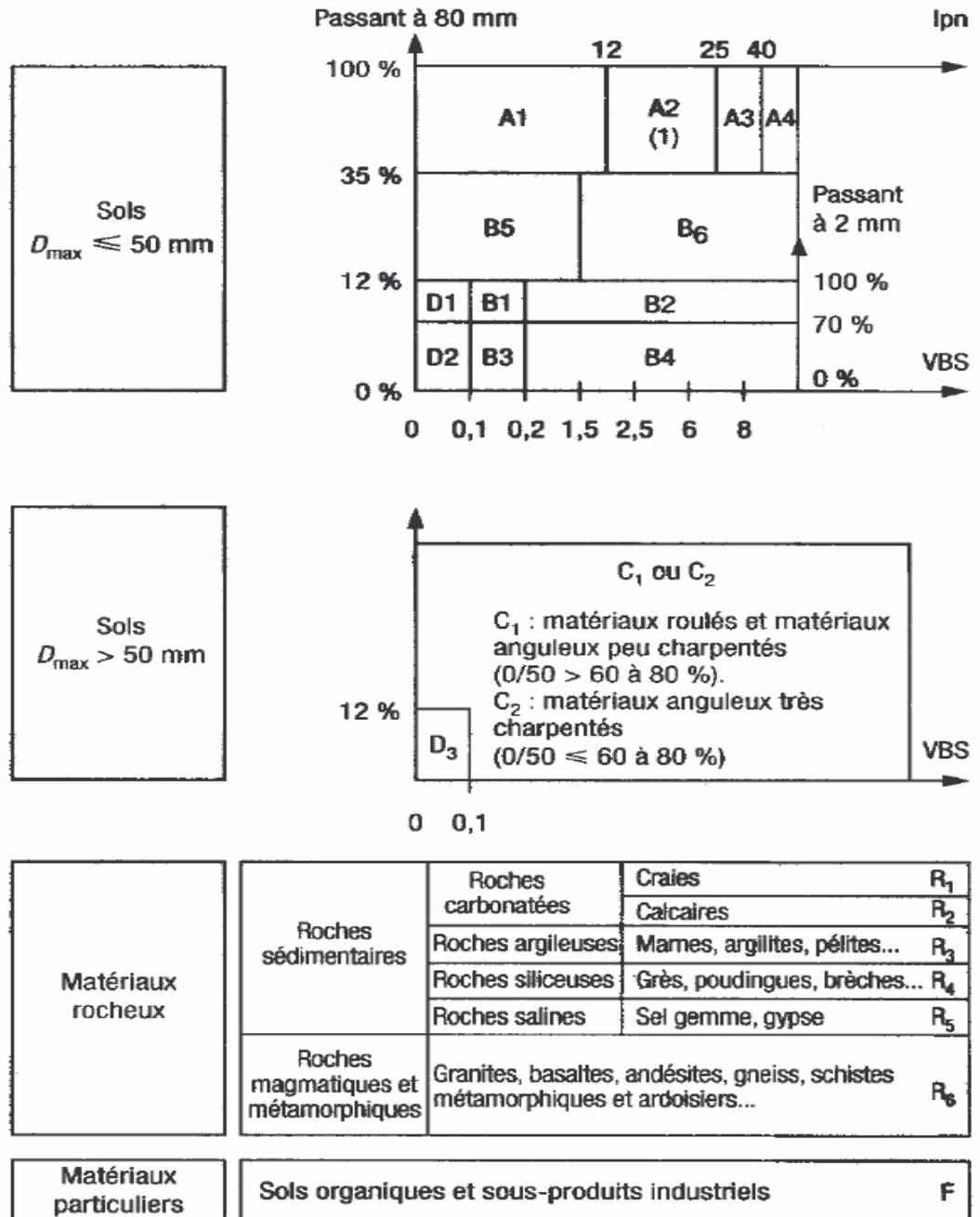




Figure 1: les grandes catégories de sols (kchikach)



Figure 2: classification des sols granuleux(kchikach)

Tableau 3:classification des sols granuleux(kchikach)

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	G <sub>b</sub>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			G <sub>na</sub>	Une des conditions de G <sub>b</sub> non satisfaite
		GL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
		GA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	S <sub>b</sub>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			S <sub>m</sub>	Une des conditions de S <sub>b</sub> non satisfait
		SL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
		SA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

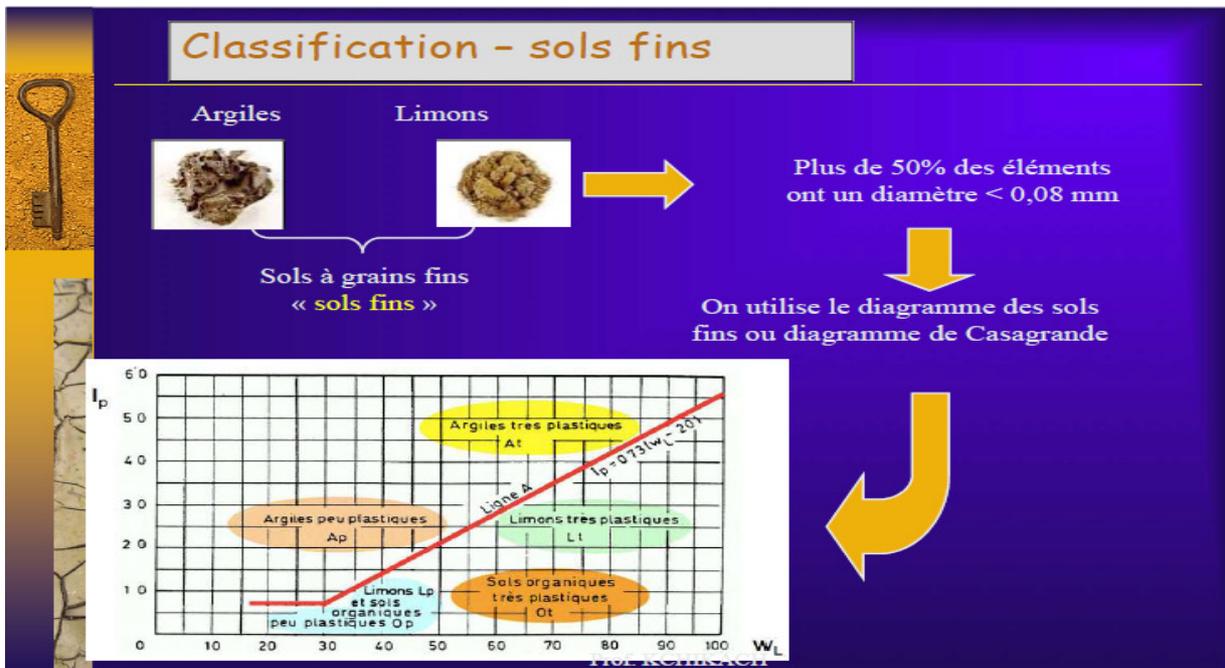


Figure 3:classification des sols fins(kchikach)

Les essais d'identification permettent de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux,...). Le géotechnicien sait, pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles, quelles sont les aptitudes principales.

Une argile, un limon argileux conviennent a priori pour réaliser la zone étanche d'un barrage (noyau par exemple), un sol fin est plus compressible qu'un sol grossier. Un sable grossier peut convenir pour construire le drain d'un barrage. Dans la pratique, la classification des sols passe par l'analyse granulométrique et par la détermination des limites d'Atterberg.

### 5.3. Les paramètres retenus pour la classification des sols

Les paramètres retenus se rangent en trois catégories:

- Paramètres de nature

->La granularité(normes P94-056) Elle dépend de  $D_{max}$  (la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol)

->L'argilosité

+L'indice de plasticité  $I_p$  (norme P 94-051)

+La valeur du bleu de méthylène VBS (norme P94-068)

+Référence au paramètre équivalent de sable ES (norme P18---598)

- Paramètres de comportement mécanique : distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui, de ce fait, peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme - - -

- 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.

Dépend des différents états hydriques des sols:

+L'état très humide(th)

+L'état humide(h)

+L'état d'humidité moyenne(m)

+L'état sec(s)

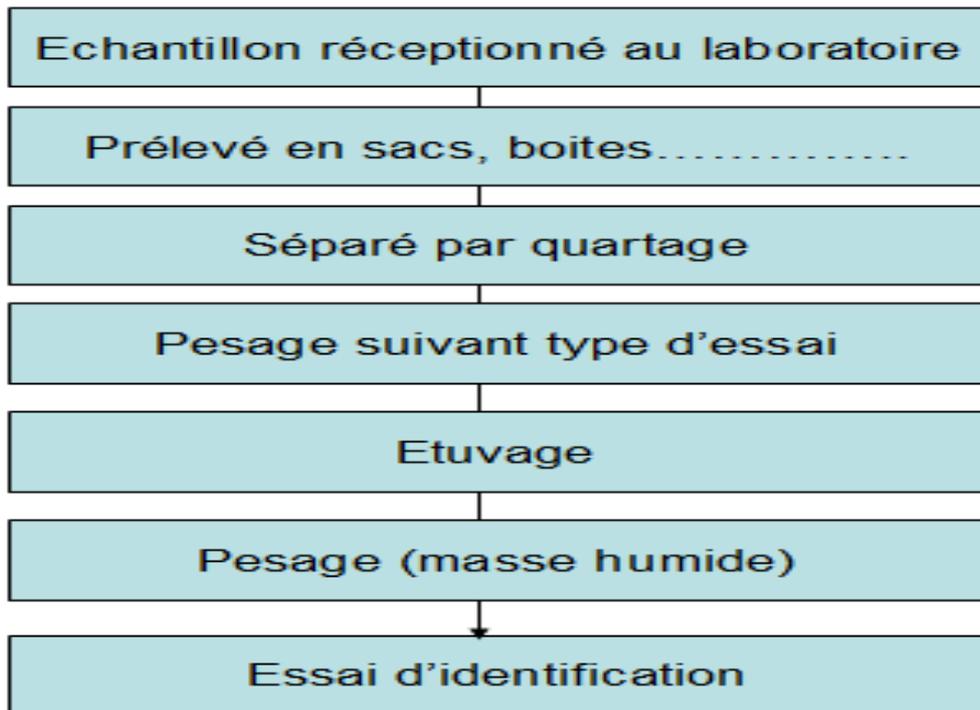
+L'état très sec(ts)

### 5.4. Les essais permettant la classification des sols

#### 5.4.1. Echantillonnage NF X 31-300

Le prélèvement de l'échantillon et sa préparation se font d'une façon spécifique afin qu'il soit homogène et propre pour les essais (norme X31-100).

Le principe d'échantillonnage consiste sur l'exécution d'un certain nombre de prélèvements élémentaires dans une zone présumée homogène et une couche d'épaisseur choisie et une profondeur donnée.



**Séparation par quartage**

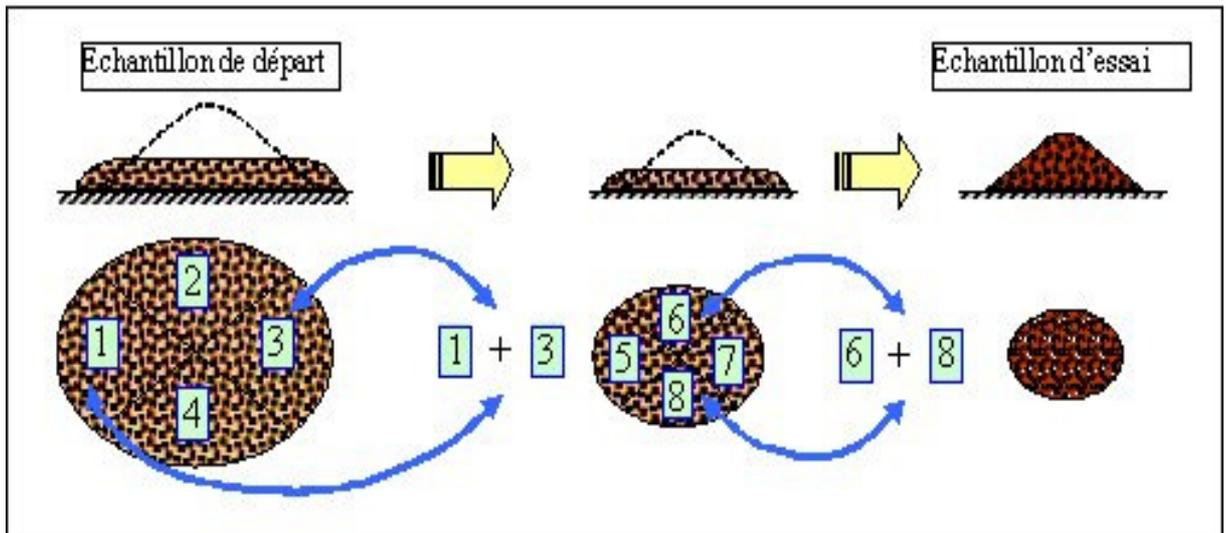


Figure 4: La séparation est soit manuelle, soit avec un appareil appelé échantillonneur



Photo 3: Echantillonneur pour gravier

## 5.4.2. Les essais

### 5.4.2.1. Essais déterminant la nature du sol

#### a. Analyse granulométrique : NF P 94-056

L'essai de l'analyse granulométrique permet la description des sols en vue de leur classification et la détermination des classes granulométriques. Cet essai contribue à apprécier les qualités drainantes et la sensibilité à l'eau des matériaux ainsi que leur aptitude au compactage.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés du matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol au moyen d'une série de tamis en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et la précision attendue.

#### Exécution de l'essai

- Préparation de l'échantillon
- Tamisage avec lavage
- Etuvage
- Tamisage à sec pesage des refus



Photo4: Echantillonneur pour gravier



photo 5: Opération de tamisage



photo 6: Pesage des refus

### **b. Détermination des Limites d'Atterberg (NF P94-052-1):**

Les limites d'Atterberg sont parmi les paramètres d'identification des sols fins. Elles sont déterminées sur les sols passant des tamis de 400 µm de diamètre d'ouverture nominale des mailles carrées. Elles permettent de déterminer la plasticité et la consistance du sol.

La limite de liquidité WL est la teneur en eau minimale pour laquelle le sol s'écoule sous l'action d'un faible remaniement. Elle représente le point de transition entre les états liquides et plastiques, et est exprimée en %.

La limite de plasticité WP est la teneur en eau sous laquelle le sol ne peut plus être pétri sans se fissurer. C'est le point de transition entre l'état plastique et l'état solide.

$$IP = WL - WP$$

C'est l'un des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser sa nature.

Si  $IP < 12$  : le sol est faiblement plastique,

Si  $12 < IP < 25$  : le sol est moyennement plastique,

Si  $25 < IP < 40$  : le sol est plastique,

Si  $IP > 40$  : le sol est très plastique,

#### **Exécution de l'essai**

Pour limite de plasticité WP

- Forme des petits boudins de 3mm de diamètre et 10 mm de longueur sur une plaque en marbre lisse
- Peser les boudins avant et après étuvage

**REMARQUE:** WP est la moyenne des teneurs en eau des 4 échantillons, l'écart entre les échantillons ne doit pas dépasser 2%

Pour limite de liquidité WL

- Préparation de l'échantillon et réglage de l'appareil.
- Libérer le cône et laisser s'enfoncer dans l'échantillon.
- Prendre une part de l'échantillon dans une tare pour définir la teneur en eau

**REMARQUE:** il faut effectuer 4 pénétrations sur une même pâte avec différentes teneurs en eau. De plus, les enfoncements doivent encadrer 17mm et dans un intervalle entre 12 et 25 mm.



Photo 7:essai de pénétration à cône

**c. Détermination de la Valeur de Bleu de Méthylène VBS d'un sol : (norme P94-068)**

La valeur de bleu de méthylène d'un sol constitue un paramètre d'identification qui mesure globalement la qualité et l'activité de la fraction argileuse contenant dans un sol ou un matériau rocheux. Elle s'exprime en gramme de bleu pour 60 g de la fraction 0/50 mm du sol étudié. C'est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassement.

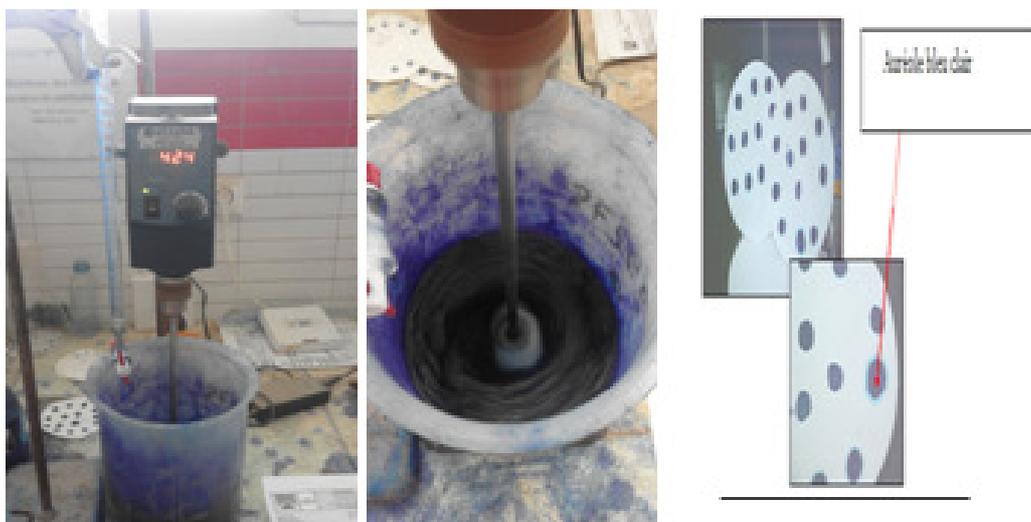


Photo 8:agitateur à ailette et papier filtre

D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92), six catégories de sols sont définies selon la valeur de VBS :

Valeur de bleu de méthylène (VBS) par rapport à la catégorie de sol

$VBS < 0,1$  sol insensible à l'eau

$0,2 \leq VBS < 1,5$  sol sablo-limoneux, sensible à l'eau

$1,5 \leq VBS < 2,5$  sol sablo-argileux, peu plastique

$2,5 \leq VBS < 6$  sol limoneux de plasticité moyenne.

$6 \leq VBS < 8$  sol argileux.

$VBS > 8$  sol très argileux.

#### Exécution de l'essai

- Mélanger 60g +/- 10 de l'échantillon avec 500ml d'eau distillée dans un récipient de 3L et les agiter pendant 5 min avec une vitesse de 700 tr/min +/- 100
- Diminuer la vitesse à 400tr/min +/-100 et ajouter 5 à 10 ml de la solution bleu de méthylène et laisser agiter pour 1 min.
- A l'aide d'une baguette en verre, on prend une goutte et on la place sous forme de point de 8 à 12 mm sur un papier filtre.  
On ajoute à chaque fois la solution et on laisse agiter jusqu'à ce qu'une auréole bleu clair de taille millimétrique apparaît sur le papier filtre.

#### 5.4.2.2. Essais mécaniques de sols

La portance du sol est étudiée par les essais de compactage et de poinçonnement (Proctor, CBR).

##### a. Essai ProctorNF P94-093

Les infrastructures routières sont généralement menacées par plusieurs risques, à savoir : le tassement, la mauvaise résistance des sols, la stabilité des talus, le gonflement...etc.

Afin d'éviter ces risques, et d'améliorer la capacité portante des infrastructures routières, les sols ou les matériaux d'assise de chaussée sont traités par le compactage. Cependant, l'obtention d'un bon compactage exige de trouver la teneur en eau optimale permettant d'obtenir une densité sèche maximale. Cette teneur en eau est déterminée au laboratoire, sur un matériau ayant un  $D_{max}$  ne dépassant pas 20 mm, par deux essais, selon l'énergie de compactage appliquée au moule:

- Essai Proctor normal.
- Essai Proctor modifié.

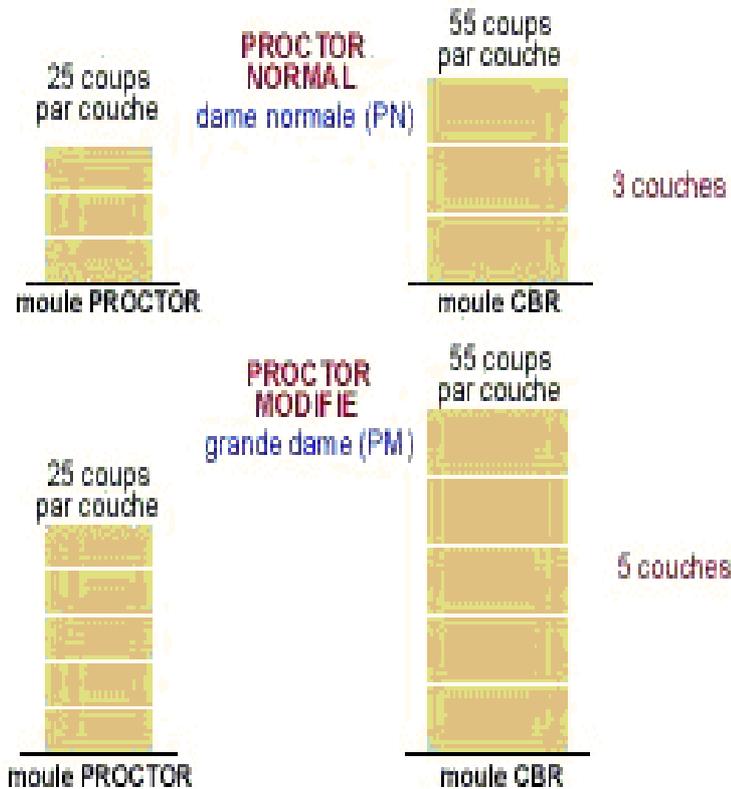


Photo 9: Modalité de compactage selon le type de Proctor (NF\_P94-093)

### **b. Essai CBR : Indice CBR après immersion – Indice Portant Immédiat (IPI)**

#### **(NF P94-078) :**

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'applique sur les matériaux dont le pourcentage des éléments est supérieur à 20 mm ne dépassant pas 30%.

On détermine 3 types d'indice:

- L'indice de portance (IPI) : aptitude du sol à permettre la circulation des engins directement sur le sol.
- L'indice CBR immédiat : qui est l'évolution de la portance d'un sol compacté à différentes teneur en (w%)
- L'indice CBR après immersion : qui est l'évolution de la portance du sol compacté à différents teneur en eau (w%) et soumis à des variations de régime hydrique.

## 6.Utilisation des matériaux en remblai

### 6.1.Définition

Un remblai est un travail de terrassement qui consiste à rapporter de la terre pour combler un creux ou surélever un terrain. Un remblai est souvent constitué de matériaux argileux et imperméables (Terrassements et compactage des remblais).

On attend du remblai :

- L'homogénéité de l'ouvrage
- Un bon déroulement du chantier
- La stabilité à long terme.

Les principales préoccupations sont :

- L'état hydrique du matériau
- L'homogénéité du matériau (nature, état)
- La traficabilité
- L'aptitude au traitement ( $D_{max}$ ),
- La qualité du compactage (corps et bordures)
- L'absence d'évolution granulométrique à long terme



**Photo 10:Remblai (source SETRA)**

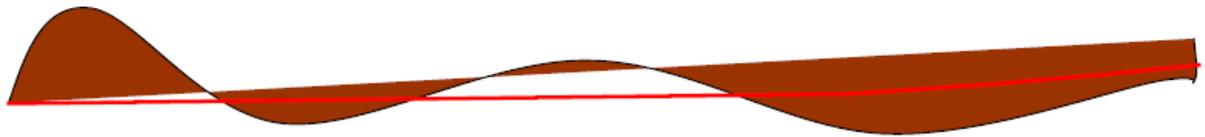
## 6.2 Terrassement et réutilisation et utilisation des matériaux de déblai en remblai.

Le sol support ne peut pas supporter les charges sans se déformer, d'où la nécessité de construire une structure permettant de répartir les charges au sol.

Les terrassements modifient la topographie du terrain et lui donnent une forme et des caractéristiques déterminées, correspondant à la finalité des travaux (route, voie ferrée, barrage, plateforme industrielle, etc.).

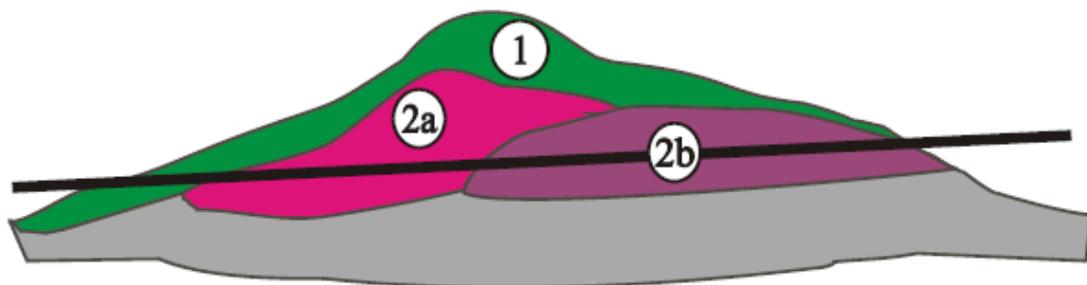
- Les travaux de terrassements consistent à extraire, transporter et mettre en œuvre des sols et des matériaux variés.
- Les déblais sont taillés dans les terrains en place. Les remblais sont édifiés en répandant des couches successives de roches et de sols.
- Le résultat final est la réalisation d'une plate-forme (partie supérieure des remblais ou des déblais) à la cote prévue par le projet. En construction routière, cette plate-forme, appelée « arase de terrassement », sert d'appui à une couche de forme et aux couches de chaussées

**Le projet de terrassements:** Un chantier de terrassements est une succession de déblais et de remblais dont le volume dépend de la position de la ligne de référence.



(J.P.Magnan ,2010)

Chaque déblai est constitué de matériaux dont l'extraction et la réutilisation dépendent de la nature et de l'état naturel de la roche ou du sol, ainsi que des conditions climatiques de leur mise en œuvre en remblai.



(J.P.Magnan ,2010)

### L'étude des terrassements a pour objectifs :

- De déterminer la nature des terrains dans les déblais concernés par le projet ;
- De déterminer les conditions d'extraction puis de réemploi de ces terrains en remblai et en couche de forme ;
- De prévoir le destin de chaque mètre cube de matériaux dès son extraction et jusqu'à sa mise en œuvre dans l'un des remblais du tracé, ou bien dans un dépôt temporaire ou définitif.

### Le géotechnicien est responsable de la fourniture des données nécessaires

- En organisant la reconnaissance géotechnique du tracé,
- En faisant exécuter les essais normalisés d'identification et de compactage sur chaque nature de matériau,
- En analysant les conditions d'emploi de tous les matériaux de déblai d'après leurs caractéristiques et des hypothèses sur les conditions climatiques lors des travaux.

## 6.3 Conditions d'utilisation des matériaux en remblai (GTR)

Les conditions d'utilisation des sols, des matériaux rocheux, des produits industriels sont celles qu'il y a lieu de respecter pour autoriser l'emploi en remblai de différentes classes et sous-classes de matériaux qui sont distingués dans la classification des sols.

**Tableau 4: conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai (SETRA)**

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

## E : Extraction

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais.

### Extraction en couche :

L'extraction en couche (épaisseur 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux.

### Extraction frontale :

Pour l'extraction frontale, on observe des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans des formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.

## G : Action sur la granularité

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

### **Élimination des éléments :**

#### **> 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*

## C : Compactage

Il s'agit d'une donnée qualitative sur le niveau de compactage requis par les différents matériaux.

## H : Hauteur du remblai

L'utilisation des matériaux est fonction de la hauteur du remblai.



Photo11:Compactage d'un remblai



photo 12:Humidification de sol

## 7. Etude de cas: Tuf marno-calcaire verdâtre à beige concassé

### 7.1. Objectif de l'étude

Définir la possibilité d'utilisation de ces matériaux dans un remblai pour la réalisation d'un nouveau parc de charbon au centre thermique JORF LASFAR situé à 20 km d'El Jadida, à proximité du Port de JorfLasfar, et à 130 km de Casablanca.



#### **Nécessité d'un remblai :**

La centrale thermique couvre plus de 50% de la demande nationale et 30% de la capacité installée du Royaume de l'énergie électrique ce qui nécessite de mettre en œuvre 4,3 millions de tonnes/ande charbon. Pour cela, on a besoin d'une surface avec une capacité de stockage d'un million de tonnes de charbon brut.

Afin d'éviter tout tassement ou glissement de terrain après le dépôt du charbon car le sol support ne peut pas supporter les charges sans se déformer, on a besoin de construire une structure permettant de répartir les charges au sol et aussi de le rendre dure pour que le sol ne se mélange pas avec le charbon d'où la nécessité de réaliser un remblai.

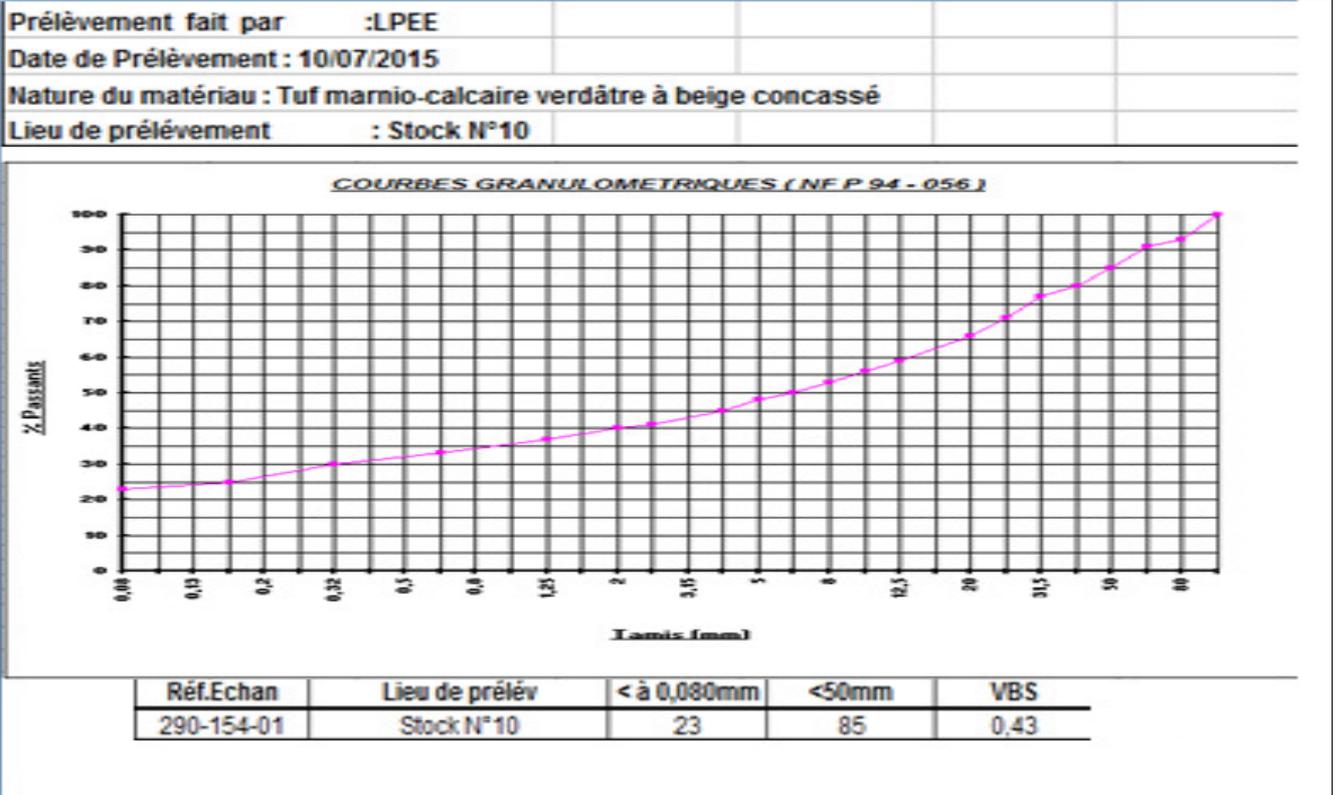
## 7.2. Les essais

### 7.2.1 Analyse granulométrique

Après avoir prélevé notre échantillon et l'échantillonner, on le fera passer dans une série de tamis à mailles carrées de dimensions inférieure ou égale à 100 mm

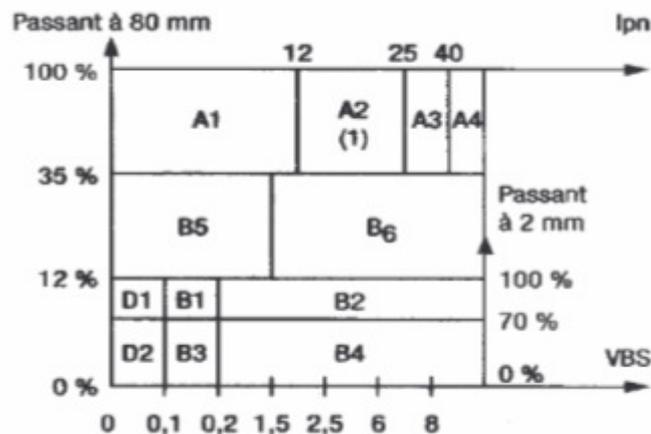
On a ainsi regroupé les résultats dans le tableau suivant :

<b>ANALYSE GRANULOMETRIQUE</b>							
<b>PAR TAMISAGE a Sec après Lavage</b>							
<b>NF P 94-056</b>							
Référence échantillon : 330/.../154.../.../01...			Date d'essai : ... 10/10/2015...				
Ouverture des tamis (mm)	Masse refus mesuré (g)		Masse refus cumulé (g)	Pourcentage massique		Etuve à	
	ri	R		Masse refus cumulé g	Tamisât cumulés g	50°C <input type="checkbox"/>	105°C <input checked="" type="checkbox"/>
80,000					100	Matériau dm =	Masse m =
63,000			2928	7	93	Partager au tamis de dc=20mm	
50,000			3685	9	91	Masse sèche du refus au amis de Rc = 14175 g	
40,000			6485	15	85	Masse passant au tamis de Mh = 29710 g	
31,500			8581	20	80	Part (1) sur tamisât au tamis dc	Masse Humide Mh1 = 3674
25,000			9780	23	77		Masse sèche Ms1 = 3454 g
20,000			12433	29	71	Part (2) sur tamisât au tamis dc	Masse Humide Mh2 = 5364
16,000			14175	34	66		Masse sèche Ms2 = g
14,000	558		17266	41	59	Masse Totale Ms = 42105	
12,500	789		18546	44	56	Coefficient multiplicateur sur refus T 0.80mm b = 5,54	
10,000	1004		19537	47	53	Masse >0.08mm dc Part n°2 ms4=	
8,000	1245		21032	50	50	Masse passant à (0.080mm dc) Part n°2 ms3=	
6,300	1419		22036	52	48	Ms = Rc+Mh x ms1 / mh1 b = Mh / mh2 refus cumuli R=Rc + b x ri	
5,000	2585		22956	55	45	Pourcentage Refus r = 100R/ ms Tamisât 100(1-R)	
4,000						Vérification (ms2 - ms4)/ ms2= Doit être ≤ 0.01	
3,150	1913		24773	59	41		
2,500	2039		25671	60	40		
2,000							
1,600	2272		26762	66	37		
1,250							
1,000							
0,800	2515		28108	68	33		
0,630							
0,500							
0,400	2801		29692	70	30		
0,315							
0,250							
0,200	3162		31692	75	25		
0,160							
0,125							
0,100							
0,080	3323		32584	77	23/27		



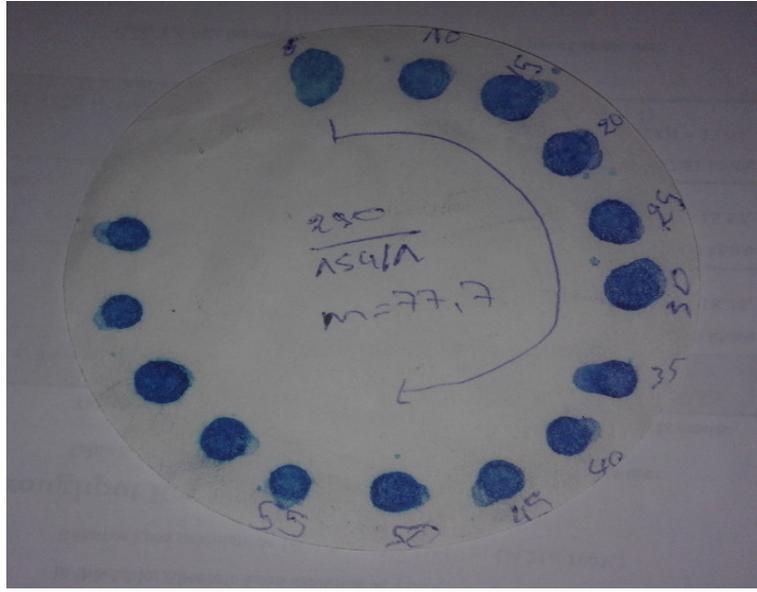
On remarque d’après les résultats obtenus et la courbe granulométrique des tamis en fonction des pourcentages des passants accumulés que 85 % des grains sont inférieur ou égal à 50mm et le passant de 0.080 égal à 23 %.

D’après le diagramme de classification on remarque que notre sol appartient soit à la sous classe B5 ou B6 ça dépend du VBS.



### 7.2.2 Essai de VBS

Pendant l'essai de valeur de bleu de méthylène, on a obtenu les résultats suivants :



Ces résultats sont classés dans un tableau afin d'être calculer :

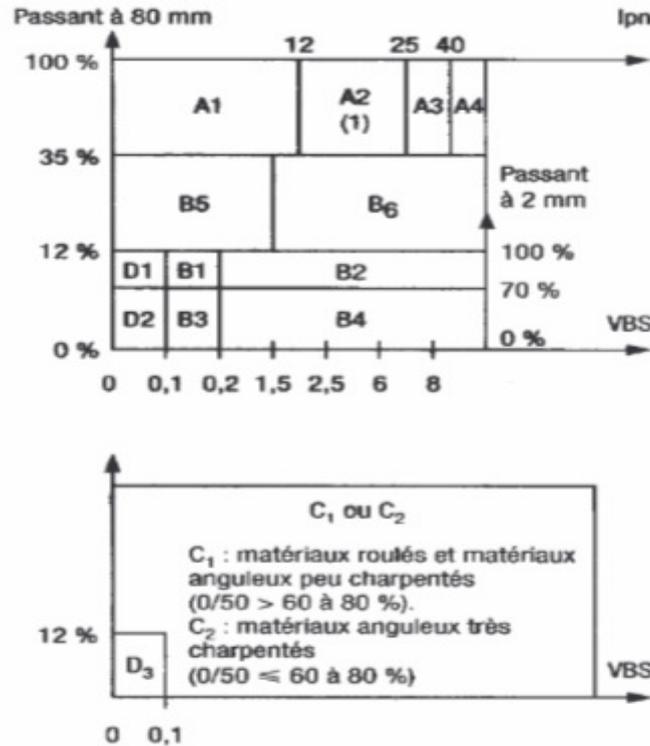
<b>Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol</b> - Essai à la tâche - <b>NF P94-068</b>
--

Référence échantillon : 154/04...	Date d'essai : 10.11.2015
-----------------------------------	---------------------------

Proportion pondérale fraction 0/5 mm contenue dans la fraction 0/50 mm de sol sec	$c = 56,5 \%$
Masse humide de l'échantillon de la 1 <sup>ère</sup> prise d'essai	$mh_1 = 77,7 \text{ g}$
Masse humide de l'échantillon de la 2 <sup>ème</sup> prise d'essai	$mh_2 = 252 \text{ g}$
Masse sèche de l'échantillon de la 2 <sup>ème</sup> prise d'essai	$ms_2 = 234 \text{ g}$
Teneur en eau	
$W = (mh_2 - ms_2) / ms_2 = 7,26 \%$	

Volume solution injectée ( cm <sup>3</sup> )	Résultat test	Volume solution injectée ( cm <sup>3</sup> )	Résultat test	Masse sèche pour prise d'essai $m_0 = mh_1 / (1 + W) = 72,44 \text{ g}$	
5	-			Masse de bleu introduite $B = V \times 0,01 = 0,55 \text{ g}$	
10	-				
20	-			<b>Valeur de bleu de méthylène</b> $VBS^{(**)} = 0,43 \text{ g de bleu}$ pour 100 g de sol sec <small>(**)</small> - si $D_{max} \leq 5 \text{ mm}$ : $VBS = 100 \times B / m_0$ - si $D_{max} > 5 \text{ mm}$ : $VBS = 100 \times C \times B / m_0$	
25	-				
30	-				
35	-				
40	-				
45	-				
50	-				
55	+				
Volume total de solution de bleu $V = \quad \text{cm}^3 > 10 \text{ cm}^3$					

La valeur du VBS obtenue est gale à 0.43 d'où d'après le diagramme et le résultat de l'analyse granulométrique :

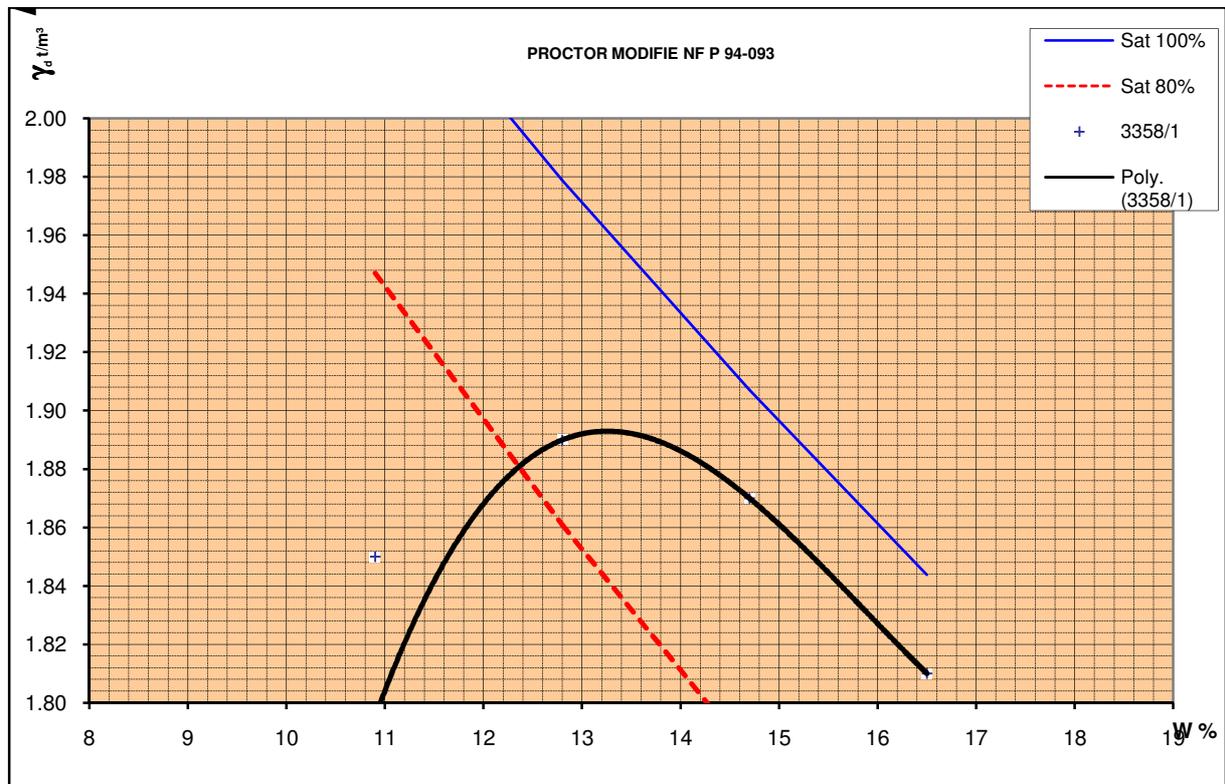


On remarque que le sol étudié appartient à la sous-classe B5 plus la classe C1 tel que la nature des matériaux est roulé et anguleux peu charpentés. **7.2.3 Essai Proctor normal**

Pour mesurer la portance du sol un essai Proctor normal c'est effectué afin de déterminer la teneur en eau optimal de notre sol

Détermination des références de compactage d'un matériau					
Essai Proctor					
<input checked="" type="checkbox"/> Normal					
<input type="checkbox"/> Modifié					
NF P94-093					
Dossier : 2012-310-06802-2012-0178	Type moule : <input checked="" type="checkbox"/> CBR <input type="checkbox"/> Proctor		% refus : <input checked="" type="checkbox"/> 20mm <input type="checkbox"/> 5mm : .....		
Date de prélèvement : 09/10/15	γ <sub>s</sub> = 2,65 T/m <sup>3</sup>		Wop : 10,9		
Lieu de prélèvement : ...	γ <sub>d op</sub> (t/m <sup>3</sup> ) : 1,78		Date d'essai : 09/10/15		
Nature : ...	Réf. Ech : 15/NPC/290/15.2.10.1				
Poids d'eau ajouté à chaque compactage					
Poids total humide	8119	8272	8328	8405	8371
Poids du moule	3895	3795	3895	3795	3795
Poids du sol humide	4324	4477	4533	4610	4576
Volume du moule n°	2087	2087	2087	2087	2087
Masse volumique humide	2,07	2,16	2,20	2,21	2,19
Masse volumique sèche	1,94	1,97	1,98	1,96	1,93
n° de la tare					
Poids total humide	984	1324	1724	1325	1277
Poids total sec	521	1216	1555	1176	1124
Poids de la tare					
Poids de l'eau					
Poids du sol sec					
Teneur en eau	61,8	81,9	10,9	12,7	13,6

Les résultats sont représentés dans le diagramme suivant :



D'après cet essai, on constate que la valeur de teneur en eau optimal = 10.9 est très faible d'où un sol très sec.

### 7.3. Résultats des essais effectués sur l'échantillon

L'ensemble des analyses effectuées sur le sol étudié ont donné des résultats et des valeurs permettant la classification de ce dernier. Le tableau suivant regroupe ces résultats:

**Tableau 5: Résultats de l'ensemble des essais effectués sur le sol étudié**

Réf. Ech 15/NPC.	Date de prélèvement	Lieu de prélèvement	Granulométrie 0/100 mm				Dmax mm	% < 80µm /(0/50)	Proctor normal		NF P 94-052-1	NF P	NF P	NF P	NF P	Classe GTR / Etat Hydrique	
			NF P 94-093		et NF P 94-051				94-068	94-066	94-067	94-050					
			80 µm	2 mm	20 mm	50 mm			γ <sup>A</sup> OPN t/m <sup>3</sup>	WOPN %	WL (%)	IP	VBS	FR	DG		Wn
152/01	10/07/2015	Sous tapis du concasseur (Stock N°10)	23	40	66	85	100	27,1	1,98	10,9	-	-	0,43	-	-	6,3	C1B5ts

### 7.4. Interprétation des résultats

Résultats obtenus à partir de l'annexe 2 du guide de terrassements routiers :

C1B5ts	Sols normalement inutilisables en l'état, mais leur humidification pour les ramener à l'état s ou m est envisageable . Celle-ci doit être décidée en fonction d'une étude spécifique.	NON
--------	---	-----

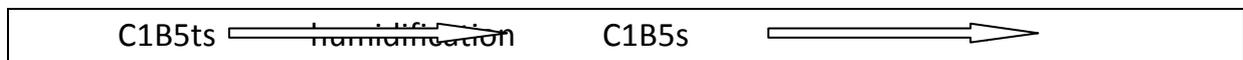
On remarque d'après la GTR, que notre sol est utilisable en état. Une modification est nécessaire pour changer l'état du sol de très sec à sec. Une étude spécifique sera réalisée pour déterminer la teneur en eau ajoutée adéquate à notre remblai.

Le sol étudié a besoin d'une humidification afin de pouvoir l'utiliser autant que matériaux en remblai courant.



**Photo 13:Humidification des matériaux**

L'humidification emmènera le sol de l'état très sec à l'état sec:



Les matériaux sont maintenant prêts à être utilisés en remblai courant.

**Tableau 6: Conditions d'utilisation de matériaux de type C1B5s en remblai**

s o l	Observations général	Situation météorolog ique	Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
C 1 B 5 s	Ces sols sont difficiles à compacter  L'humidification pour changer l'état exigeant un malaxage au moins grossier du sol	Évaporation importante	<b>Solution1:</b> maintien de l'état W: arrosage par maintien de l'état C: compactage intense H: remblai de hauteur moyenne	00 3 0 0 12
			<b>Solution2:</b> humidification W: humidification pour changer l'état R: couches minces C: compactage intense	00 4 0 1 10

On trouve que la nouvelle classe du sol est utilisable en état suivant deux solutions avec les codes suivants 0030012 et 0040110 déchiffrer dans les tableaux qui suivants

### Solution1:Maintien de l'état

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E extraction	0	Pas de condition particulières à recommander
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulières à recommander
W Action sur la teneur en eau	3	Arrosage pour maintien de l'état
T Traitement	0	Pas de condition particulières à recommander
R Réglage	0	Pas de condition particulières à recommander
C Compactage	1	Compactage intense
H Hauteur des remblais	2	Remblai de hauteur moyenne (<ou = 10m)

D'après cette résolution, on conclut que le sol a besoin d'un arrosage pour le maintien de l'état accompagné d'un compactage intense afin de réaliser un remblai de hauteur moyenne d'environ 10m. Le reste des paramètres n'ont pas des conditions particulières à recommander.

## Solution 2: Humidification

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E extraction	0	Pas de condition particulières à recommander
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulières à recommander
W Action sur la teneur en eau	4	Humidification pour changer d'état
T Traitement	0	Pas de condition particulières à recommander
R Réglage	1	Couches minces (20 à 30 cm)
C Compactage	1	Compactage intense
H Hauteur des remblais	0	Pas de condition particulières à recommander

La deuxième résolution ne recommande pas des conditions particulières au niveau de l'extraction, l'action granulométrique ou même le traitement mais nécessite plutôt le changement de teneur en eau par humidification du sol pour changer d'état, formation de couche mince à l'aide d'un compactage intense.

## 8. Conclusion

Après l'humidification du sol et son changement de l'état très sec à l'état sec, on remarque, d'après le guide de terrassement routier qu'on a deux solutions pour exécuter ce remblai tel que la première se manifeste dans le maintien de l'état à travers l'arrosage et le compactage pour former un remblai de hauteur moyenne environ 10 m . La deuxième solution c'est l'humidification et elle consiste à humidifier le sol pour changer d'état suivi d'un compactage intense.

Au terme de cette période d'essai, je retiendrai qu'il existe une différence fondamentale entre le monde universitaire et la vie professionnelle, et que la motivation et le savoir-faire sont deux éléments déterminants dans l'épanouissement de l'individu au sein de l'entreprise.

Cependant, ce stage m'a permis de s'intégrer au domaine professionnel, de maîtriser les différents essais exécutés dans le laboratoire, acquérir un esprit d'équipe et une grande faculté d'adaptation. Une autre fois, mes remerciements à tout le personnel du laboratoire, ingénieurs et techniciens, qui, sans eux, ce travail ne serait passé dans les meilleures conditions.

## 9. Liste des abréviations

Abréviation	Description
NF	Norme française
L.P.E.E.	Laboratoire publique d'essai et d'étude
CBR	California bearing ratio
VBS	Valeur de bleu de méthylène d'un sol
WL	Limite de liquidité
WP	Limite de plasticité
IP	Indice de plasticité
Dmax	Dimensions des plus gros éléments
IPI	Indice portant immédiat
$\gamma$	densité
W	Teneur en eau

## 10. Références bibliographiques

- BIGOT, G(décembre 1990) NF P 94-068 : reconnaissance et essai. Détermination de la Valeur de Bleu de Méthylène VBS d'un sol, AFNOR (association française de normalisation), édité par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs su Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2 France
- BIGOT, G,(mai 1997). NF P94-078 : Essai CBR : Indice CBR après immersion – Indice Portant Immédiat (IPI) AFNOR (association française de normalisation), édité par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs su Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2 France
- BIGOT, G, (Mars 1996) NF P 94-056 057: reconnaissance et essai. Analyse granulométrique des sols AFNOR (association française de normalisation), édité par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs su Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2 France
- BIGOT, G, (novembre 1995) NF P 94-052: reconnaissance et essai. Détermination des limites d'atterberg AFNOR (association française de normalisation), édité par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs su Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2 France
- BIGOT, G, (octobre1999) NF P 94-093: reconnaissance et essai. Détermination des références de compactage d'un matériau: essai Proctor normal et modifié AFNOR (association française de normalisation), édité par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs su Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2 France
- BIGOT, G, NF X 31-300 : Méthode de prélèvement d'échantillon de sol AFNOR (association française de normalisation), édité par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs su Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2 France
- JEAN-PIERRE MAGNAN, (8avril 2010), Terrassements et compactage des remblais, 87 pages, p : 4 et 32
- M. Azouz KCHIKACH : cours de classification des sols
- Patrick MARGRON, (7 et 8 juin 1994), Séminaire COME TT : LA CONCEPTION GEOLOGIQUE DU TUNNEL SOUS LA MANCHE : Choisir les terrains à traverser et non les subir - Bruxelles. ANTEA, Groupe BRGM
- Technique, G. (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. GTR) SETRA/LCPC–1992
- Technique, G. (septembre 1992), Guide technique Routiers, édité par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, SETRA, 211p
- Wikipédia, tunnel sous la manche
- [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr), Mouvement de terrain, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.