

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**

**Université 20 Août 1955-Skikda.**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master Génie Civil**  
**Option : Géotechnique**

**Thème :**

**Caractérisation d'un sol spécifique**

**Réalisée Par : - Bouklioua Leila & Abdelaziz Aya**

**Sous la direction de : Dr Ihcene Lamri université 20 aout Skikda**

**Devant le jury**

Dr. Houssou Noura	<b>Présidente</b>	université 20 aout Skikda
Dr. Mokhbi Hicham	<b>Examineur</b>	université 20 aout Skikda
Dr. Boulfoul Khalifa	<b>Examineur</b>	université 20 aout Skikda
Pr. Hidjeb Mustapha	<b>Invité</b>	université 20 aout Skikda

**Promotion : 2023-2024**

## Sommaire :

### Introduction général

---

### *CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

---

<b>1.Introduction .....</b>	<b>1.</b>
<b>2.DIFFERENTS TYPES DE SOL.....</b>	<b>1.</b>
<b>2.1. Eléments constitutifs d'un sol .....</b>	<b>1.</b>
<b>2.2. Les argiles .....</b>	<b>2.</b>
<b>2.2.1. Structure élémentaire des minéraux argileux.....</b>	<b>2.</b>
<b>2.2.2. Les différents types d'argile.....</b>	<b>3.</b>
<b>a) Kaolinite.....</b>	<b>3.</b>
<b>b) Montmorillonites .....</b>	<b>3.</b>
<b>c) Illite .....</b>	<b>4.</b>
<b>2.3. Les limons .....</b>	<b>5.</b>
<b>2.4. Les marnes.....</b>	<b>5.</b>
<b>2.5. Les sables.....</b>	<b>6.</b>
<b>2.6. Les gravillons .....</b>	<b>7.</b>
<b>3.CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS.....</b>	<b>8.</b>
<b>3.1. Classification élémentaire .....</b>	<b>8.</b>
<b>3.1.1. Classification basé sur la granulométrie.....</b>	<b>8.</b>
<b>3.1.2. Classification triangulaire .....</b>	<b>9.</b>
<b>3.2. Classification (USCS/LCPC) .....</b>	<b>10.</b>
<b>3.3. Classification GTR .....</b>	<b>11.</b>
<b>4.LES SEDIMENTS DES BARRAGES.....</b>	<b>13.</b>
<b>4.1. Introduction .....</b>	<b>13.</b>
<b>4.2. Caractéristiques des sédiments .....</b>	<b>13.</b>
<b>4.3. Origines et nature des sédiments .....</b>	<b>14.</b>
<b>4.3.1. Origines naturels .....</b>	<b>14.</b>
<b>4.3.2. Anthropique .....</b>	<b>15.</b>
<b>4.4. Composition structurelle des sédiments .....</b>	<b>15.</b>

4.5. Constituant des sédiments.....	15.
4.6. Mécanisme de l'envasement.....	16.
4.6.1. Comportement des sédiments fins .....	16.
4.7. Processus de sédimentation.....	16.
4.8. Définition de dragage.....	17.
5. STABILISATION DES SOLS .....	18.
5.1. Introduction .....	18.
5.2. Principaux objectifs de la stabilisation .....	18.
5.3. Stabilisation chimique des sols .....	19.
5.4. Les différents agents d'amélioration .....	19.
5.4.1. Agents classique .....	19.
a) La chaux.....	19.
b) Le ciment .....	21.
5.4.2. Agents nouveaux (le laitier des hautes fourneaux) .....	21.
6. LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES SOLS .....	24.
6.1. Introduction .....	24.
6.2. Notion de la résistance au cisaillement .....	24.
6.3. Paramètres C et $\phi$ pour différents sols et différents types d'essais.....	26.
6.4. Différents types d'essais de cisaillement.....	26.

---

## *CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET METHODES*

---

1.Introduction .....	28.
2.Matériau utilisés.....	28.
2.1. Sol étudié .....	28.
3.Méthodes .....	29.
3.1. Détermination de la teneur en eau NF P94-050 .....	30.
3.2. Essai au bleu de méthylène NF P18-592.....	31.
3.3. L'analyse granulométrique par sédimentation NF P94-057 .....	33.
3.4. Limites d'Atterberg NF P94-051.....	36.

3.5. Essai du cisaillement direct à la boîte de casagrand NF P94-071-1.....	40.
---	-----

---

***CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION***

---

1.Introduction .....	43.
2.Caractéristiques physique des sédiments.....	43.
2.1. Teneur en eau .....	43.
2.2. L'analyse granulométrique par sédimentation .....	44.
2.3. Valeur au bleu de méthylène .....	45.
2.4. Limites d'Atterberg .....	45.
2.4.1. Limite de plasticité (LP) .....	46.
2.4.2. Limite de liquidité (LL).....	46.
2.4.3. Indice de plasticité (IP).....	46.
3.Caractéristiques mécaniques des sédiments .....	47.
3.1. Résistance au cisaillement à la boîte de casagrand .....	47.
3.2. Stabilisation des sédiments au laitier des hautes fourneaux.....	48.

## Liste des figures

### CHAPITRE 1 :

N°	Titre	Page
1.1	Constituants d'un sol	1
1.2	Structure Elémentaire Tétraédrique	2
1.3	Structure élémentaire Octaédrique	3
1.4	Structure de la kaolinite	3
1.5	Structure de la montmorillonite	4
1.6	Structure d'illite	4
1.7	Schéma représentant des colonnes lithologiques simplifiées (marno-calcaire)	6
1.8	Aspect visuel des sables	7
1.9	Photos des gravillons roulés (à gauche) et concassés (à droite)	7
1.10	Classification triangulaire des sols	9
1.11	Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC	10
1.12	Classification GTR des sols pour $D_{max} < 50\text{mm}$ .	12
1.13	Classification routière selon le GTR	12
1.14	Formation de la vase au fond de barrage	17
1.15	Processus de sédimentation	17
1.16	Chantier de traitement d'un sol à la chaux	19
1.17	Cycle de la chaux	20
1.18	Chantier de traitement du sol au ciment	21
1.19	Le laitier de haut-fourneau	22

<b>1.20</b>	<b>Courbe Contrainte-Déformation</b>	<b>25</b>
<b>1.21</b>	<b>Droite intrinsèque</b>	<b>25</b>

## CHAPITRE 2 :

N°	Titre	Page
1.3	Classification GTR des sols pour $D_{max} < 50\text{mm}$	28
2.3	Etuve de dessiccation et balance	30
3.3	Appareillage de l'essai du bleu de méthylène	32
3.4	L'essai de valeur au bleu de méthylène	33
3.5	Préparation de l'échantillon du sol	34
3.6	Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentation	35
3.7	Analyse granulométrique par sédimentation du sol	36
3.8	Préparation de l'échantillon du sol pour l'essai des limites d'Atterberg	38
3.9	Détermination de la limite de liquidité	39
3.10	Détermination de la limite de plasticité	40
3.11	Matériel essai de cisaillement a la boite	41

## CHAPITRE 3 :

N°	Titre	Page
3.1	courbe granulométrique	44
3.2	Echantillon n°1. Sol sans laitier de hauts fourneaux	48
3.3	Echantillon n°2. Sol +2 % de laitier de hauts fourneaux	49
3.4	Echantillon n°3. Sol +6 % de laitier de hauts fourneaux	49
3.5	la variation de la cohésion en fonction des pourcentages de laitier de haut fourneau	50
3.6	La variation de l'angle de frottement en fonction des pourcentages de laitier de haut fourneau	50

## Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1.1	Caractéristiques de certaines familles d'argile	5
1.2	Dénomination des fractions granulaires des particules de sols	9
1.3	Classification des sols grenus (USCS/LCPC)	11
1.4	Classement granulométrique des sédiments	15
1.5	Composition chimique du laitier de haut fourneau	23
2.1	les caractéristiques physique et mécanique des sédiments	28
2.3	Analyses chimiques du laitier granulé utilisé d'El-Hadjar	29
3.1	Résultat de l'essai teneur en eau effectué	43
3.2	Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation	44
3.3	Valeur au bleu de Méthylène	45
3.4	type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène	45
3.5	Résultat de l'essai limite de plasticité	46
3.6	Résultat de l'essai limite de liquidité	46
3.7	Degré de plasticité des sols	46
3.8	les caractéristiques physiques des sédiments	47
3.9	Séries d'essai de cisaillement réalisé sur sol+ laitier Des hauts fourneaux.	48
3.10	le changement de c en fonction des pourcentages de stabilisation de laitier de haut fourneau	50
3.11	le changement de c en fonction des pourcentages de stabilisation de laitier de haut fourneau	50

# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction générale

Lorsqu'on parle d'étude de sol, on fait référence à un ensemble d'analyses et d'investigations menées sur le terrain où sera érigée une construction.

Cette étude permet de comprendre les caractéristiques physiques et mécaniques du sol, déterminantes pour la sécurité et la viabilité de tout projet de construction.

Dans ce mémoire on va étudier les caractéristiques physiques et mécanique, la stabilisation des sédiments de barrage de Zardedas.

Le domaine de stabilisation est très vaste et les géotechniciens essayant de déterminer et explorer des nouvelles techniques dans ce domaine, et dans ce travail on va parler de la stabilisation de sol avec le laitier des hauts fourneaux.

Le travail présenté dans ce mémoire est donné sous forme de trois chapitres, une introduction et une conclusion.

Le premier chapitre est consacré sur une thèse bibliographique: (présentation des éléments constitutifs des sols, différents types d'argile, les sédiments des barrages, le traitement de ces sédiments).

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés et méthodes.

Le troisième chapitre présente les différents résultats obtenus (teneur en eau, VBS, granulométrie par sédimentation, les limites d'Atterberg, cisaillement direct avec et sans stabilisation).

La dernière partie est une conclusion globale récapitulative du résultat final de notre recherche.

CHAPITRE I

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1. INTRODUCTION :

Dans leur état naturel, les sols sont des matériaux hétérogènes avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés à l'utilisation des sols dans les terrassements des infrastructures de transport (routes, chemins de fer, aéroports, ports, ...) se manifestent en général par une capacité portante faible, des déformations (tassements) et des glissements de talus.

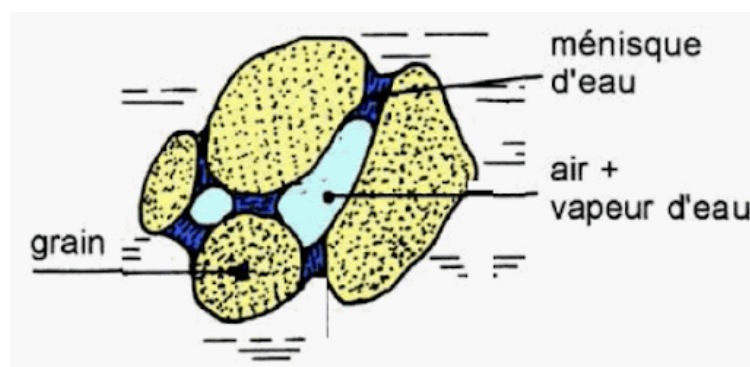
Le développement de la mécanique des sols et la recherche dans le domaine géotechnique, ont permis de mieux connaître les sols à travers des essais de caractérisation afin de mettre au point des techniques permettant l'amélioration des sols présentant de médiocres propriétés mécaniques.

Dans ce chapitre on va décrire les différents types de sols et leurs caractéristiques, les systèmes de classification USCS/LCPC, GTR et AASHTO, les sédiments de barrage, la stabilisation chimique des sols et ainsi que les propriétés mécaniques des sols.

## 2. DIFFERENTS TYPES DE SOLS :

### 2.1. Eléments constitutifs d'un sol :

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau libre ou liée et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases : phase solide, phase liquide et phase gazeuse (Fig1.1).



**Figure 1.1 :** Constituants d'un sol

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par l'eau, par un gaz ou les deux à la fois. Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent). L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé.

Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec. L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe.

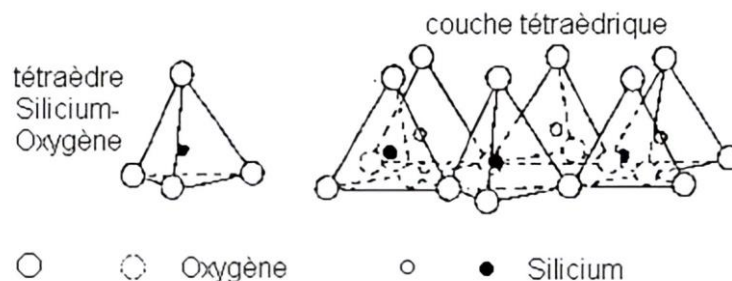
## 2.2. Les argiles :

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllo silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption.

### 2.2.1. Structure élémentaire des minéraux argileux :

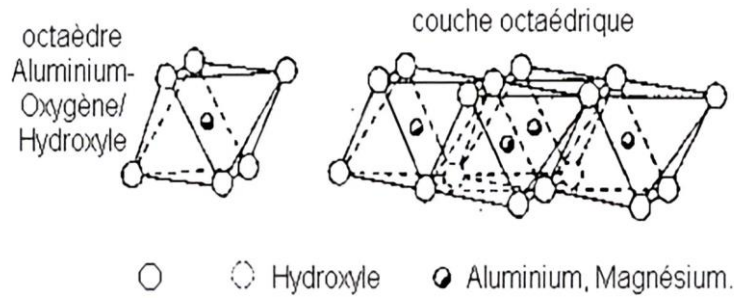
Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, d'eau ( $H_2O$ ), de silice, sous forme de silicates ( $SiO_3$ ) et d'aluminium, sous forme d'alumine ( $Al_2O_3$ ). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines.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

- **Le Tétraèdre de silice  $SiO_4$**  : Quatre atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Fig1.2).



**Figure 1.2** : Structure Élémentaire Tétraédrique

- **L'octaèdre d'alumine  $Al_2(OH)_6$  ou de magnésium  $Mg_3(OH)_6$**  : Six ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (Fig1.3).



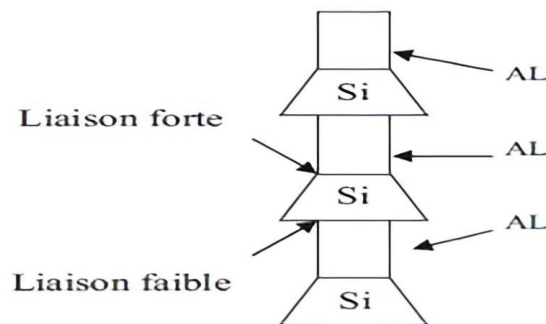
**Figure 1.3 :** Structure élémentaire Octaédrique

### 2.2.2. Les différents types d'argiles :

Les types d'argiles les plus fréquents sont :

#### a) Kaolinite :

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche (Fig1.4).

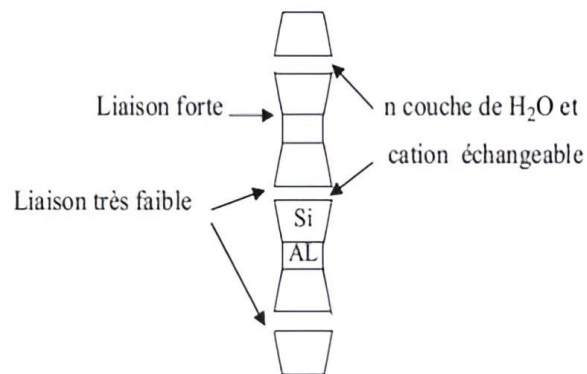


**Figure 1.4 :** Structure de la kaolinite

#### b) Montmorillonite :

La montmorillonite, parfois appelée Smaltite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions

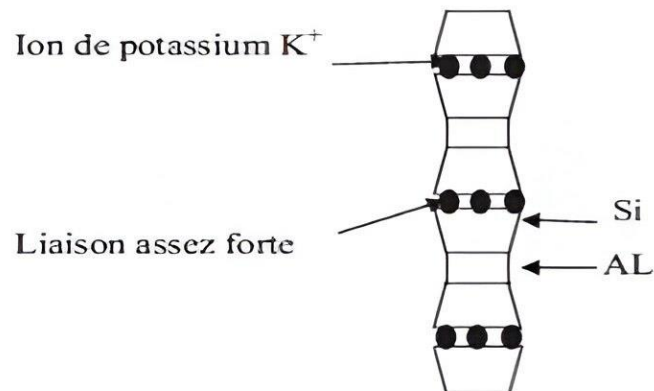
de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages (Fig1.5).



**Figure 1.5 :** Structure de la montmorillonite

**c) Illite :**

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il ya des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles (Fig1.6).



**Figure 1.6 :** Structure d'illite

➤ **caractéristiques physiques des argiles :**

Nom	Nombre feuillets par particule	Diamètre particule ( $\mu\text{m}$ )	Epaisseur particule ( $\mu\text{m}$ )	Surface spécifique $\text{m}^2/\text{g}$
Kaolinite	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 - 20
Illite	1 - 10	0,1 - 1	0,003 - 0.01	65 - 100
Montmorillonite (smectite)	1	0,1	0,001	700 - 840

**Tableau 1.1 :** Caractéristiques de certaines familles d'argile

### 2.3. Les Limons :

Les limons possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles (la teneur en argile est variable). Ils sont constitués par des éléments de dimensions comprises entre 2 et 20  $\mu\text{m}$ .

Le principal minérale constitutifs est le quartz associé le plus souvent l'argile, la calcite, les feldspaths, les oxydes des hydroxydes de fer, le mica ou les minéraux lourds.

L'origine du limon peut être fluviatile ou éolienne ; dans ce dernier cas, on lui donne souvent le nom de lœss. Le lœss, habituellement de couleur jaunâtre ou brun, est un sol caractérisé par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ . Il contient, en proportion moindre des sables et des argiles (ces dernières pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin). Les limons peuvent contenir des graviers des galets, des concrétions.

### 2.4. Les Marnes :

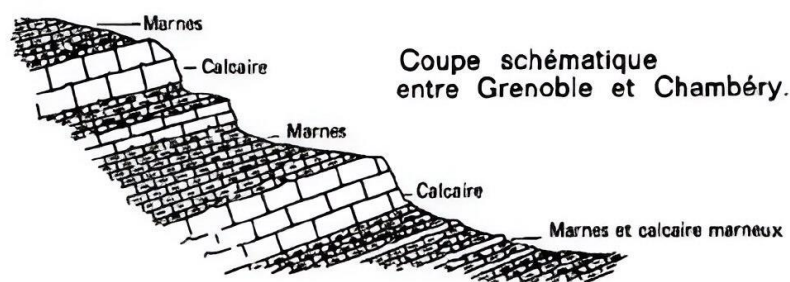
Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- Les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonatent de calcium.
- Les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse.

D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Le caractère évolutif des marnes est dû à la présence des minéraux argileux qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques).



**Figure 1.7 :** Schéma représentant des colonnes lithologiques simplifiées (marno-calcaire)

## 2.5. Les Sables :

On entend par sable la fraction des granulats dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm, Il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%. Selon leurs provenances, les sables peuvent être classés comme suit :

**Sable de rivière :** il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.

**Sable de mer :** il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.

**Sable de carrière (artificiel) :** il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, grés...) dans les carrières de granulats. Il est souvent plein de filler (fines).

**Sable de dune :** Il se trouve dans les régions présahariennes du sud du pays. Il est similaire à un sable de mer.



**Figure 1.8 :** Aspect visuel des sables

## **2.6. Les Gravillons :**

Les gravillons sont un ensemble de petits cailloux ni trop gros ni trop petits de dimension homogène que l'on utilise avec du sable dans la fabrication du béton et dans les différents domaines des bâtiments et les travaux publics (routes, ouvrages en terre, ...). Leur dimension commence de 3 à 4 mm pour les plus petits à 20 mm pour les plus gros. Il existe deux grands types de gravillons :

**Les gravillons roulés :** ce sont principalement les matériaux alluvionnaires, ils sont extraits directement dans le lit des rivières, ou dans des zones qui l'étaient auparavant et qui sont devenues des zones agricoles depuis, dans ces cas-là les terres végétales sont enlevées par l'exploitant pour atteindre les gisements anciens. Les éléments arrachés aux roches environnantes ont été usés et arrondis par l'action de l'eau et du courant.

**Les gravillons concassés :** lorsque la roche est massive comme le calcaire, elle est extraite dans des carrières à l'explosif. Les bancs de pierre peuvent faire plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, la roche est alors explosée en blocs de plusieurs mètres cubes qui sont ensuite concassés dans des grosses mâchoires métalliques avant d'être criblés. Les arêtes sont alors vives sans toutefois être coupantes : ce sont les gravillons concassés.



**Figure 1.9 :** Photos des gravillons roulés (à gauche) et concassés (à droite)

### **3. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS :**

Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain. Ces coupes sont précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement. Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols, parmi elles on peut citer :

- Les classifications élémentaires qui se réfèrent uniquement à la granularité du sol (triangulaire) ou aux seuils granulométriques (dimensions des particules)
- Classification LCPC/USCS (on utilise simultanément la granularité et la plasticité du sol)
- Classification GTR et ASHTOO (pour les terrassements routiers).

#### **3.1. Classification élémentaire :**

##### **3.1.1. Classification basée sur la granulométrie :**

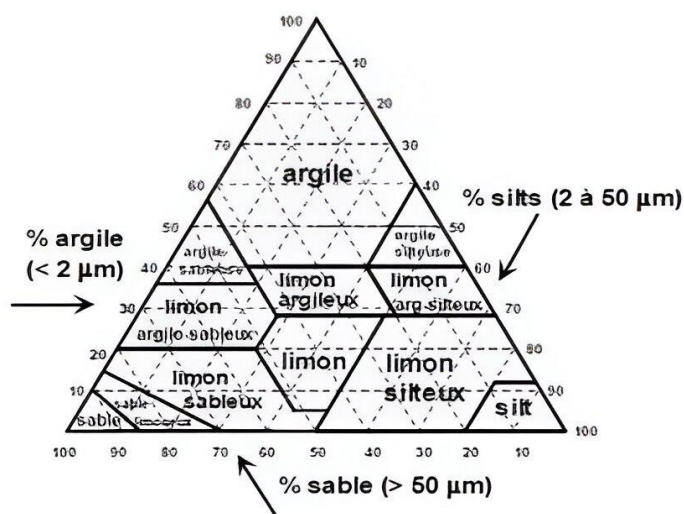
Les courbes granulométriques couvrent de large variation des dimensions des particules des sols. Les sols peuvent être classés selon les différentes parties de l'échelle des dimensions des particules appelés « classes granulaires ». Ces intervalles ont des noms différents selon les classifications et les pays. Le tableau ci-dessous compare trois de ces classifications. La classification de la Société Internationale de Mécanique des sols et des Travaux de Fondations (SIMSTF, 1977), utilisée par les normes Britanniques et Allemandes et dans certaines normes Américaines, est progressivement adoptée par de nombreux pays.

SIMSTF (1977)		France (traditionnelle)	
Dimensions	Nom	Dimensions	Nom
> 200 mm	Blocs	> 200 mm	Blocs
60 à 200 mm	Galets, cailloux	20 à 200 mm	Galets, cailloux
20 à 60 mm	Gravier grossier	2 à 20 mm	Gravier
6 à 20 mm	Gravier moyen		
2 à 6 mm	Gravier fin		
0,6 à 2 mm	Sable grossier	0,2 à 2 mm	Sable grossier
0,2 à 0,6 mm	Sable moyen	20 à 200 $\mu\text{m}$	Sable fin
0,06 à 0,2 mm	Sable fin		
20 à 60 $\mu\text{m}$	Limon grossier	2 à 20 $\mu\text{m}$	Limon
6 à 20 $\mu\text{m}$	Limon moyen		
2 à 6 $\mu\text{m}$	Limon fin		
< 2 $\mu\text{m}$	Argile	< 2 $\mu\text{m}$	Argile

**Tableau 1.2 :** Dénomination des fractions granulaires des particules de sols

### 3.1.2. Classification triangulaire :

Les diagrammes triangulaires sont bien adaptés à la représentation de la composition des sols et ont servi de base à certaines classifications. La figure ci-dessous montre un diagramme de classification des sols formé de particules de dimension argileuse (< 2 $\mu\text{m}$ ). De particules de dimension limoneuse (2 $\mu\text{m}$  à 20 $\mu\text{m}$ ) et de particules de dimension sableuse (> 20 $\mu\text{m}$ ). Les pourcentages sont ceux de la masse des particules. Cette classification est utilisée notamment en pédologie.



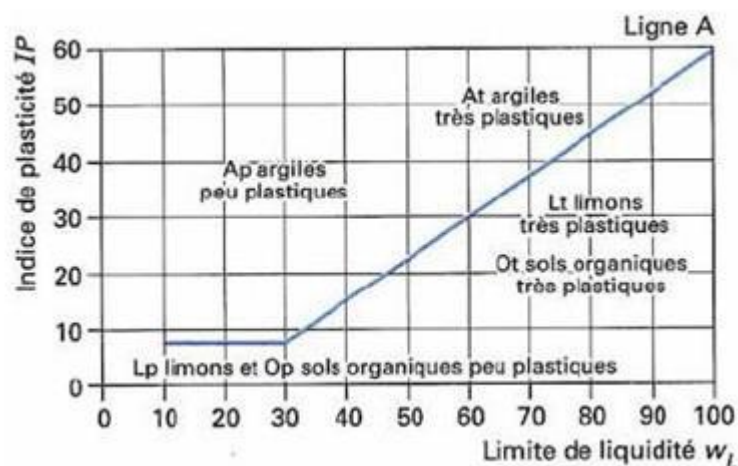
**Figure 1.10 :** Classification triangulaire des sols

### 3.2. Classification (USCS/LCPC) :

La classification LCPC (1965) utilise les résultats des essais physiques et mécaniques des sols :

- Des critères granulométriques : les pourcentages de gravier, Sable et particules fines (tamisât à 2mm et 0,08mm), la forme de la courbe granulométrique (coefficient d'uniformité  $C_u$ , et le coefficient de courbure  $C_c$ )
- Les limites d'atterberg  $W_L$ ,  $W_P$  et  $IP$ , et la ligne A d'équation  $IP = 0,73 (W_L - 20)$  ou diagramme de plasticité
- La teneur en matières organiques.

La classification débouche sur 15 sols types, affectés chacun d'un symbole à deux lettres. La figure (1.11) et le tableau (1.3) présentent la classification des sols fins et la classification des sols grenus respectivement. La classification LPC/USCS présente l'avantage d'être d'un maniement relativement simple et d'être utilisée dans de nombreux pays autres que la France.



**Figure 1.11** : Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC

Définitions			Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
			GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse
		GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse	
Sable	Plus de 50% des éléments >	moins de 5% d'éléments	Sb (SW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
	0,08 mm ont un diamètre < 2mm	< 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileux
<b>Lorsque la teneur en particules fines (&lt; 0,08 mm) est comprise entre 5% et 12% on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL</b>					

**Tableau 1.3 :** Classification des sols grenus (USCS/LCPC).

La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle du sol et de tests simples sur chantier. Mais il faut une grande expérience pour appliquer correctement cette méthode de classification de chantier.

### 3.3. Classification GTR :

Une classification particulière des sols est utilisée en France pour les travaux de terrassements routiers. Cette classification, dite classification du Guide de Terrassements Routiers (GTR), définit des classes de sols corrélées avec l'aptitude au compactage des matériaux en fonction

des conditions de chantiers et leur comportement mécanique ultérieur. Elle tient compte des mêmes caractéristiques de base que la classification LCPC/USCS, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses, qui ont une grande influence sur la conduite des terrassements, et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps. Les principes généraux de cette classification sont présentés sur les figures ci-dessous.

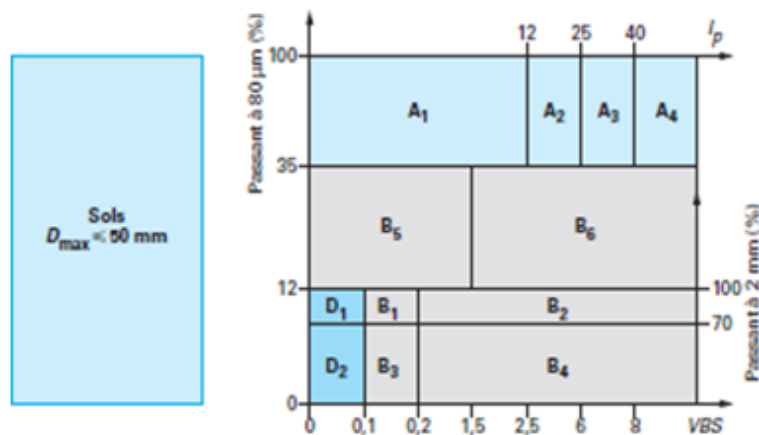


Figure 1.12 : Classification GTR des sols pour  $D_{max} < 50\text{mm}$ .

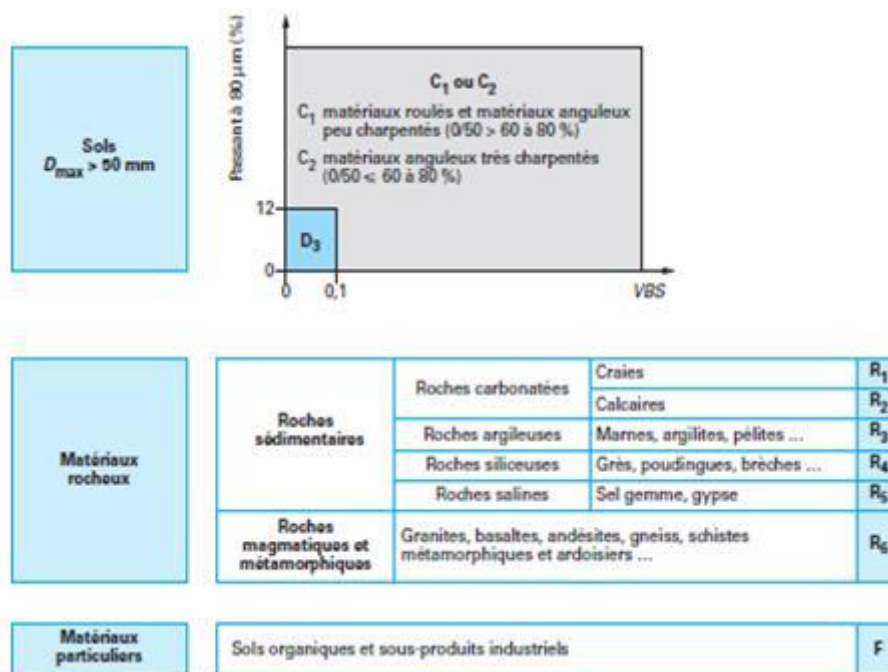


Figure 1.13 : Classification routière selon le GTR.

## **4. LES SÉDIMENTS DE BARRAGES :**

### **4.1. Introduction :**

L'envasement dans les barrages réservoirs est l'un des principaux problèmes que rencontrent de nombreux barrages dans le monde, Selon le rapport publié par le Comité International des Grands Barrages (CIGB), plus de 50.000 grands barrages existent dans le monde avec une capacité très importante de stockage, exploités à des fins diverses comme l'approvisionnement en eau, la production d'énergie hydroélectrique et le contrôle des inondations. Notamment dans les pays du bassin méditerranéen, au grave problème d'envasement.

Ce phénomène est l'une des conséquences du changement climatique qui se traduit par une pluviosité irrégulière et une sécheresse durant une grande partie de l'année. Les pluies, durant les saisons humides, arrivent souvent sous forme d'averses de courtes durées drainant de grands volumes d'eau et entraînant l'érosion rapide des bassins versants.

Ainsi, les barrages de retenue s'ensavent et perdent rapidement leurs fonctions initiales et se transforment beaucoup plus en réceptacles de vase que d'eau. Ce phénomène, a pris énormément d'ampleur notamment au sud et à l'est de la méditerranée. En effet, le potentiel hydraulique de ces régions chute sans cesse au cours du temps.

### **4.2. Caractéristiques des sédiments des barrages :**

Les sédiments sont des matériaux solides particuliers qui véhiculés par l'eau, finissent par décanter sur le fond. Ils proviennent de l'érosion du bassin versant, des berges, du ruissellement sur les surfaces imperméabilisées et des rejets de toute nature.

Ils sont constitués de particules de différentes tailles selon s'il s'agit de limons, de sables, de graviers, ou de galets. Ces éléments solides se déplacent soit en suspension dans l'eau soit par charriage sur le fond de la rivière.

Quand le courant d'eau ralentit suite à un élargissement du cours d'eau ou quand la charge solide excède occasionnellement ce que la capacité de transport permet d'évacuer les éléments décantent et sédimentent, provoquant l'envasement du cours d'eau. Voici quelques-unes des caractéristiques principales des sédiments :

- **Taille des particules :** les sédiments peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur taille, allant des particules grossières comme le sable et le gravier aux particules plus fines comme le limon et l'argile. Cette taille peut influencer divers aspects tels que la perméabilité, la capacité de rétention d'eau et la stabilité des sédiments.

- **Composition chimique** : les sédiments peuvent être composés de divers minéraux, de matière organique décomposée, de débris biologiques, de roches érodées, etc. Leur composition chimique peut varier considérablement en fonction de la géologie locale, des processus de transport et de la décomposition des organismes.
- **La texture des sédiments** : se réfère à la manière dont les particules sont agencées et compactées. Elle peut être homogène ou hétérogène, et elle est souvent influencée par les processus de transport et de sédimentation.
- **Porosité et perméabilité** : la porosité des sédiments fait référence à l'espace vide entre les particules, tandis que la perméabilité se réfère à la capacité des sédiments à permettre le passage de fluides (comme l'eau). Ces propriétés sont importantes pour la filtration de l'eau, la recharge des nappes phréatiques et d'autres processus hydrologiques.
- **La couleur des sédiments** : peut fournir des indications sur leur composition chimique et leur état de décomposition. Par exemple, les sédiments riches en matière organique peuvent avoir une couleur plus sombre, tandis que les sédiments riches en minéraux peuvent avoir une couleur plus claire.
- **Structure stratigraphique** : les sédiments peuvent former des structures stratifiées en couches, reflétant les variations dans les conditions environnementales et les processus de dépôt au fil du temps.

Les sédiments peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques.

### 4.3. Origine et nature des sédiments :

Les sédiments sont des dépôts qui proviennent de l'altération et de la désagrégation de roches préexistantes. Ces dépôts sont ensuite transportés par les cours d'eau et/ou par le vent, pour finalement se déposer dans des bassins de sédimentation. Les particules solides qui constituent les dépôts de sédiments peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

#### 4.3.1 Origines naturelle :

Peuvent être endogène (constituées principalement de matière organiques provenant des organismes aquatiques : plantes aquatiques, cadavres de microphytes et d'animaux) ou exogène (particules minérales provenant de l'érosion du bassin versant ou de l'érosion éolienne des sols ces particules exogènes peuvent être minérales ou organiques). Celles-ci sont issues du ruissellement des fleuves, des effluents ou de l'atmosphère

#### 4.3.2. Origines anthropiques :

Peuvent être minérales ou organiques (apports de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques). Le lieu où se déposent les particules et leur taille dépendent principalement de la force du courant et de l'environnement géologique.

#### 4.4. Composition structurale des sédiments :

La composition des sédiments est variée. Elle dépend de la constitution des éléments de nature minérale, de l'eau et des matières organiques ainsi que leurs influences sur les propriétés géotechniques du sédiment. Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables sont des sédiments terrigènes c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols, (Tableau.1.6) leur nature chimique dépend principalement des terrains érodés. Ils sont classés en fonction de leurs tailles, on distingue ainsi : les argiles et les limons. [Tran N Thanh 2009].

Taille	Dénomination
Supérieur à 20 cm	Blocs
De 2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
De 2mm à 2 cm	Graviers
De 63 $\mu$ m à 2mm	Sables (grossiers et fins)
De 2 $\mu$ m à 63 $\mu$ m	Limons (ou silt)
Inférieur à 2 $\mu$ m	Vases, boues argileuses

**Tableau 1.4 :** Classement granulométrique des sédiments

#### 4.5. Constituant des sédiments :

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux (Agence de l'eau, 2002)

- ✓ La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates)
- ✓ La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite)
- ✓ La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, etc....)

- ✓ Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

#### **4.6. Mécanisme de l'envasement :**

##### **4.6.1. Comportement des sédiments fins :**

Dans la zone du remous, les eaux turbides entrant dans la retenue forment avec les eaux claires de celles-ci un front plus au moins net et plus ou moins vertical.

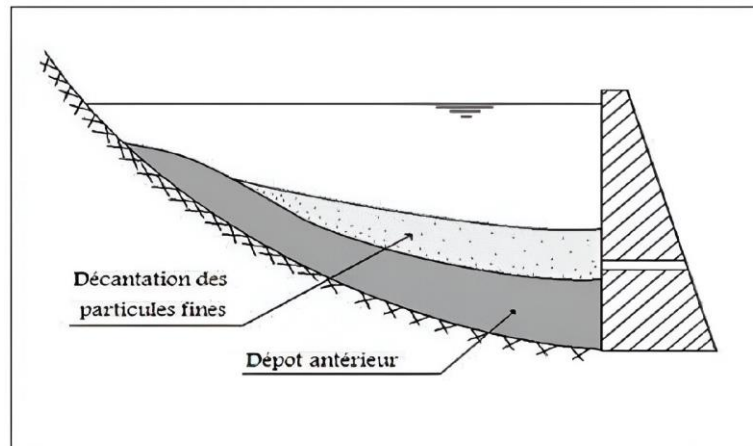
**1<sup>er</sup> Cas :** Si l'écoulement amont est torrentiel, les eaux chargées, plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de turbidité, de densité supérieure à celle des eaux claires. Le débit de ce courant de densité est supérieur au débit entrant en raison de la dilution dans la zone du remous qui est fortement turbulente

**2<sup>eme</sup> Cas :** Si l'écoulement amont est fluvial, il y a toujours une tendance à l'écoulement des eaux au pied du front avec contre-courant d'eau claire à la surface. Mais il ne se forme un véritable courant de densité que pour les débits et concentrations des apports suffisamment élevés. Si ce n'est pas le cas et que les apports et les eaux du lac sont à des températures voisines, le front est discontinu et sujet à des fluctuations importantes. L'écoulement amont se disperse alors plus au moins dans la retenue.

#### **4.7. Processus de sédimentation :**

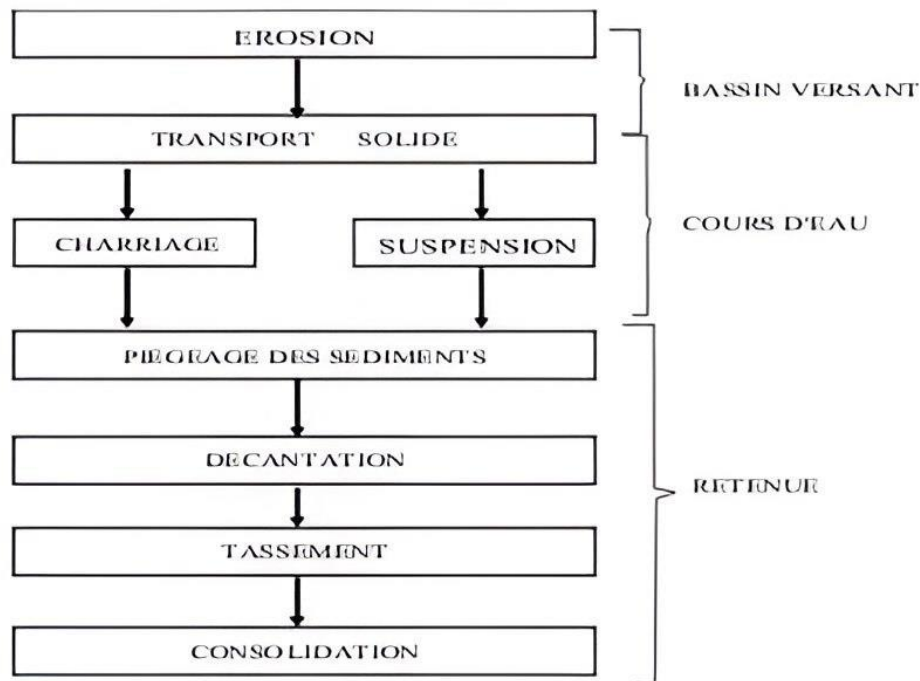
Les sédiments pénétrant dans une retenue provenant du bassin versant sont transportés par le réseau hydrographique jusqu'à la retenue, ces sédiments étant dans une retenue s'y déposent ou franchissent le barrage. La partie disposée peut avoir un caractère permanent. Ces dépôts peuvent progresser rapidement lors des crues importantes entrant dans le réservoir du barrage à niveau minimum d'exploitation, comme ils peuvent être chassés à travers les vidanges de fond.

La portion des sédiments qui franchissent le barrage est généralement constituée des particules fines en suspension ou déplacées par des courants de densité au début de la mise en eau de la retenue. La figure.1.14 illustre la formation de la vase au fond d'un barrage.



**Figure 1.14 :** Formation de la vase au fond de barrage.

L'organigramme suivant donne les étapes du processus de l'envasement des retenues :



**Figure 1.15 :** Processus de sédimentation

#### 4.8. Définition de Dragage :

On appelle dragage l'opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. L'objectif d'entretenir les cuvettes des retenues de barrage, afin de gagner un volume de stockage ou d'extraire des granulats pour répondre aux besoins du secteur de la construction. Les dragages concernent en premier lieu les retenues de barrage qu'ils sont soumis à des apports sédimentaires provenant du bassin versant, pour lesquels ces opérations constituent une

nécessité pour récupérer un volume de stockage. Ils sont justifiés par l'accumulation des sédiments dans les cuvettes de barrage

➤ **Utilisation des matières draguées :**

- La production de matériaux de construction, tels que : les briques, l'argile, les agrégats
- Les travaux de construction en faisant le remplissage de fondation, des digues.

## **5. STABILISATION DES SOLS :**

### **5.1. Introduction :**

Le traitement des sols consiste à modifier leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, il existe de nos jours trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique routière :

- Le traitement mécanique (drainage, substitution, compactage dynamique, ...)
- Le traitement thermique (augmentation de la température du sol traité)
- Le traitement chimique (par additif).

Les deux premières techniques peuvent être considérées comme coûteuses, la dernière technique étant donc la mieux privilégiée en raison des avantages techniques, économiques, écologiques et environnementaux qu'elle procure.

On peut simplement noter que le choix de l'une de ces techniques dépend de plusieurs paramètres liés aux considérations économiques, à la nature du sol à traiter, à la durée de l'opération de traitement (donc du chantier), à la disponibilité des produits de traitement à utiliser et/ou des moyens disponibles pour leur mise en œuvre et aux conditions environnementales plus ou moins favorables.

### **5.2. Principaux objectifs de la stabilisation :**

La stabilisation répond à un certain nombre d'objectifs qui sont :

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (porosité).
- Colmater les vides qui ne peuvent être supprimé (perméabilité).
- Créer des liens ou améliorer les liaisons existantes entre les particules (résistance mécaniques).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques du matériau et de :

- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques (augmenter la résistance à la compression simple à l'état sec, à l'état humide et la résistance à la traction et au cisaillement)

- Obtenir une meilleure cohésion
- Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau
- Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser
- Réduire sa sensibilité à l'eau : gonflement et retrait.

### **5.3. Stabilisation chimique des sols :**

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale.

Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes,

L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

### **5.4. Les différents agents d'amélioration :**

Différents agents de traitement peuvent être utilisés pour améliorer le comportement ou les propriétés des sols. Ces agents peuvent être regroupés en deux catégories.

#### **5.4.1. Agents classique :**

##### **a. La chaux :**

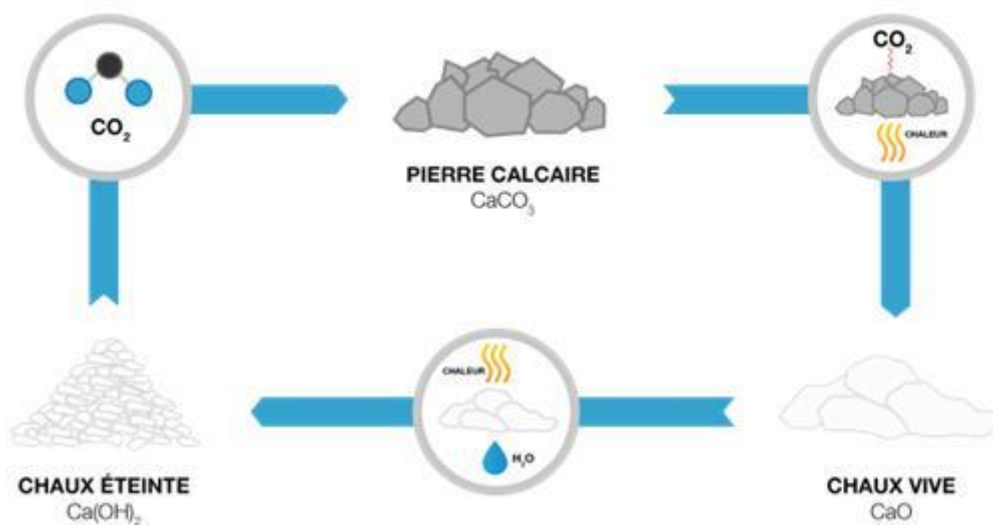
La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis des siècles. Il existe plusieurs types de chaux utilisées dans des différents domaines notamment dans le traitement des sols.



**Figure 1.16 :** Chantier de traitement d'un sol à la chaux

➤ **Fabrication de la chaux**

Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive ( $\text{CaO}$ ). La chaux éteinte  $\text{Ca(OH)}_2$ , peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans la figure ci-dessous, on peut remarquer que le dioxyde de carbone contenu dans les produits dérivés du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) possède la capacité unique d'être transformés de l'atmosphère et réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. Ce cycle de continuité s'appelle le cycle de la chaux.



**Figure 1.17 :** Cycle de la chaux

➤ **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.

#### **b. Le ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est à dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange.

Le ciment est obtenu par le mélange homogène dans certaines proportions des constituants principaux et des constituants secondaires avec du sulfate de calcium.

Le ciment composé au départ de calcaire (environ 75-80%) et d'argile (20-25%) broyée et éventuellement additionnées de produits secondaires ou de matériau apportant la silice, l'alumine et le fer. Ce mélange est ensuite chauffé dans un four à 1450 C°.



**Figure 1.18 :** Chantier de traitement du sol au ciment.

#### **5.4.2. Agents nouveaux :**

##### **Le laitier de haut-fourneau :**

##### **a. Généralités**

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits de l'élaboration de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent

- Le laitier vitrifié (granulé) obtenu par refroidissement rapide, par trempe.

L'origine des deux types de laitiers est la même, la différence entre ces deux matériaux réside seulement dans leurs cristallographiques et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation. Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulité latente. Au contraire, le laitier cristallisé à une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste.



**Figure 1.19** : Le laitier de haut-fourneau

### **b. Production du laitier granulé**

La matière première du laitier moulu est un matériau secondaire issu de la fabrication de la fonte. Le minerai de fer (constitué essentiellement de silice, d'oxyde de fer et d'alumine) et le fondant (chaux CaO et dolomie MgO) sont portés à haute température (1400 à 1600°C) dans un haut-fourneau. La fonte est obtenue par cette opération de fusion. La gangue liquéfiée du minerai, de densité plus faible, vient en surface de la fonte en fusion et peut, de ce fait, être récupérée par écoulement séparé.

A la sortie du haut-fourneau, cette gangue (laitier de haut-fourneau) est soumise à un refroidissement brutal : la trempe, généralement effectuée à l'aide de jets d'eau sous forte pression. Sous l'effet de cet abaissement très rapide de la température, le laitier se solidifie et forme des « granules » de dimension comparable à celle d'un sable (moins de 5mm) : le matériau obtenu, le laitier granulé de haut-fourneau, est vitreux et possède des propriétés hydrauliques latentes.

### c. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les composantes principales du laitier de hauts fourneaux sont la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95% à 97% des constituants du laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est variée d'un pays à l'autre.

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO <sub>2</sub>	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO <sub>3</sub> ,S*	0.15	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO <sub>2</sub>	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na <sub>2</sub> O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K <sub>2</sub> O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
Total	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

**Tableau 1.5 :** Composition chimique du laitier de haut fourneau

#### ➤ Activation du laitier granulé :

L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue par trois modes : l'activation alcaline par la soude ou la chaux, l'activation sulfatique par les sulfates, ou l'activation sulfatocalcique (ou sodosulfatique) qui est une combinaison des deux premières activations.

L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate.

La soude agit comme un catalyseur tandis que la chaux et les sulfates agissent comme des réactifs.

➤ **Utilisation :**

Le laitier de haut fourneau granulé est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons. Le laitier granulé peut être valorisé comme addition minérale dans la stabilisation des sols. Il est utilisé aussi comme sable. Différents chercheurs ont rapporté sur la formulation des nouveaux matériaux stabilisés en remplaçant la chaux avec les différents pourcentages de laitier de haut fourneau pour stabiliser le sol, avec les avantages de la réduction du gonflement, amélioration des résistances mécaniques et durabilité, la gestion des déchets et conservation des ressources.

## **6. LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES SOLS**

### **6.1. Introduction**

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondations, ouvrages de soutènement, remblais, talus, etc.), il est nécessaire de connaître la « résistance » du sol. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent. La « résistance » d'un sol peut être définie par de nombreux critères : résistance à la compression simple, essai CBR, essai pénétrométrique, essai pressiométriques, essai triaxial.

Le présent mode opératoire s'applique exclusivement à l'essai de cisaillement rectiligne, dit « à La boîte ».

### **6.2. Notion de la résistance au cisaillement**

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement.

Ces contraintes de cisaillement entraînent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle surfaces de glissement ou surfaces de rupture.

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de la rupture, au moment de la rupture.

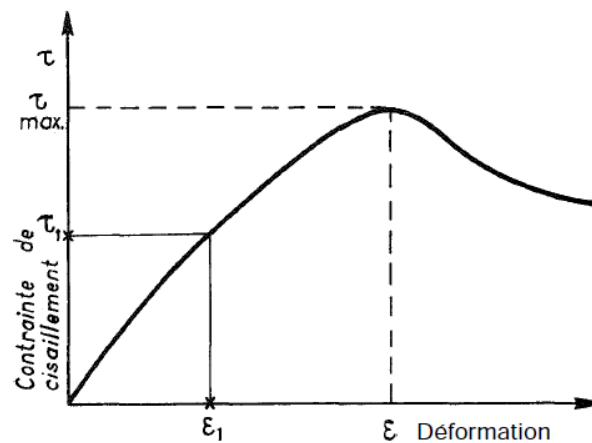
Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage.

En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction de la déformation dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient graphique indiquant sur la figure ci-dessus

La résistance au cisaillement peut être définie, sur ce graphique, comme étant :

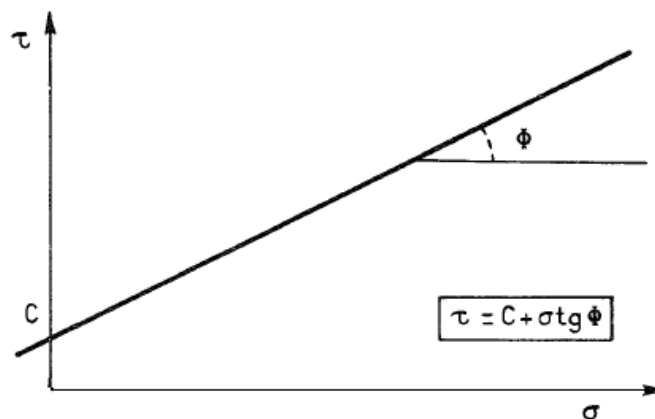
- Le maximum de la contrainte de cisaillement  $\tau_{max}$ ,
- Ou la contrainte de cisaillement correspondant à une déformation très grande,
- Ou la contrainte de cisaillement correspondant à une déformation plus ou moins arbitraire

Sauf dans des cas particuliers, on prendra comme résistance au cisaillement, le maximum de contrainte de cisaillement.



**Figure 1.20 :** Courbe Contrainte-Déformation

Les valeurs de la résistance au cisaillement ainsi définies sont portées sur un graphique en fonction de la contrainte normale  $\sigma$  s'appliquant sur le plan de rupture.



**Figure 1.21 :** Droite intrinsèque

La courbe obtenue est approximativement une droite appelée « droite intrinsèque ». L'angle que fait cette droite avec l'axe des abscisses est appelé « angle  $\phi$  » et l'ordonnée à l'origine de cette droite est appelée « valeur C ».

L'équation de cette droite est donc :

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

Elle exprime la loi de Coulomb

### 6.3. Paramètres C et $\phi$ pour différents sols et différents types d'essais

Deux grandes catégories de sols seront envisagées dans ce mode opératoire :

- Les sols pulvérulents : les graviers et surtout les sables,
- Les sols cohérents : argiles et limons.

#### ➤ Sols pulvérulents

Dans ce cas, la droite de Coulomb passe par l'origine, c'est-à-dire que le terme C'est nul. L'équation de Coulomb devient :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi$$

L'angle  $\phi$ , qui peut être appelé dans ce cas angle de frottement interne, dépend principalement de la compacité du sol, de la forme et de l'état de surface des grains solides.

#### ➤ Sols cohérents

L'eau joue un rôle fondamental dans la résistance au cisaillement des sols cohérents. Pour simplifier le problème, seuls seront considérés les sols saturés.

Les valeurs de C et de  $\phi$  obtenues dépendent essentiellement de la vitesse de l'essai et de la perméabilité des sols, car l'un des paramètres déterminants est la pression interstitielle de l'eau, pression qui est directement liée aux conditions de drainage de l'essai.

### 6.4. Différents types d'essais de cisaillement

Trois types d'essais peuvent être définis suivant qu'il y a drainage ou non, consolidation ou non, la consolidation consistant à charger l'échantillon en le drainant jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit totalement dissipée ( $U=0$ ).

#### ➤ Type non consolidé - non drainé (essai UU)

L'éprouvette ne subit aucune consolidation, ni aucun drainage préalable, sous la contrainte normale  $\sigma$  de l'essai. C'est un essai rapide et sauf dans des cas très particuliers, la droite de Coulomb est horizontale (pour un sol cohérent saturé).

$$\tau = C_u$$

La rapidité de l'essai doit être telle qu'elle ne permette aucun drainage de l'échantillon.

Ce type d'essai est le plus couramment utilisé pour les études de fondations.

➤ **Type consolidé - non drainé (essai CU)**

Chaque éprouvette de sol est consolidée avant l'expérience, sous la même contrainte normale  $\sigma$  que celle qu'elle subira pendant l'essai. La contrainte de cisaillement est suffisamment rapide pour que le drainage n'ait pas le temps de s'effectuer, donc pour que la pression interstitielle  $U$  de l'eau ne puisse pas se dissiper en cours d'essai.

La contrainte de cisaillement à la rupture est donnée par l'équation :

$$\tau = C_{cu} + \sigma \operatorname{tg} \varphi_{cu}$$

➤ **Type consolidé – drainé (essai CD)**

Cet essai est mené comme l'essai du type consolidé - non drainé, mais la vitesse de cisaillement est suffisamment lente pour que la pression interstitielle de l'eau puisse se dissiper et être considérée comme nulle à chaque instant ( $u = 0$ ).

Il en résulte que  $\sigma = \sigma'$ . L'essai se faisant en contraintes effectives, donne une cohésion et un angle de frottement effectifs.

L'équation de Coulomb devient :

$$\tau = C' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

# CHAPITRE II

## **MATERIAUX ET METHODES**

## 1. Introduction

Les essais d'identification sur les matériaux utilisés dans notre étude géotechnique est une étape importante, ce chapitre, traite les essais sur l'échantillons utilisées, a pour objet de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques selon les normes préconisées. Ces essais ont été effectués au laboratoire du département génie civil de l'université de Skikda, au Laboratoire des Travaux Publics Est (LTP est) et laboratoire LNHC de Skikda.

## 2. Matériaux utilisées

### 2.1. Sol étudié

Le sol utilisé est un sédiment du barrage de Zardezas situé au nord-est de l'Algérie, Dans la Wilaya de Skikda.

Les essais procédés dans la caractérisation du sol sont les suivants

- L'essai de la teneur en eau
- Essai au bleu Méthylène
- Granulométrie par sédimentométrie
- Limites d'Atterberg
- Essai de cisaillement rectiligne a la boite.

Le tableau 2.1 résume les caractéristiques physiques obtenues à partir des résultats d'essais effectués au laboratoire

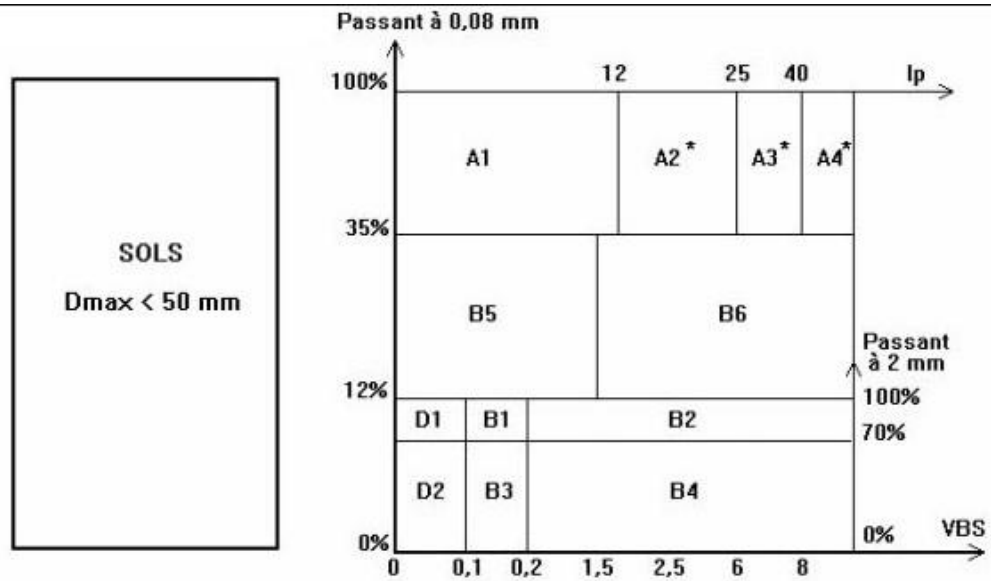
Teneur en eau naturel %	31.13
Valeur au bleu de méthylène	3.43
Limite de liquidité	59.34
Limite de plasticité	35.15
Indice de plasticité	24.19
Indice de consistance	1.17
Teneur en eau optimal %	16
Densité sèche maximale (g/cm <sup>3</sup> )	1.51

**Tableau 2.1** : les caractéristiques physique et mécanique des sédiments

#### ❖ Classification du sol selon GTR :

La classification du sol a été faite selon la classification des matériaux GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et de couche de forme) décrite dans la norme française P11-300 (septembre 1992).

Le sol appartient à la classe des sols fins (**classe A2**) Sables fins argileux, peu plastique.



**Figure 2.1 :** Classification GTR des sols pour  $D_{max} < 50\text{mm}$ .

## 2.2. Le laitier de haut fourneau

Le laitier utilisé dans cette étude provient de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar de Annaba. C'est un laitier de haut fourneau granulé, obtenu à partir d'un refroidissement rapide du laitier fondu dans les bassins d'eau, ce qui conduit à la formation d'une grande quantité de la phase vitreuse. Les propriétés chimiques du laitier données par laboratoire de l'usine El-Hadjar sont regroupées au tableau 2.2.

Constituants	FeT	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ip	H <sub>2</sub> O
Pourcentages (%)	0.55	41.24	38.66	3.01	6.79	2.17	0.007	1.07	10.28

**Tableau 2.2 :** Analyses chimiques du laitier granulé utilisé d'El-Hadjar.

## 3. Méthodes

### 3.1 Détermination de la teneur en eau (NFP 94-050) :

#### a. Principe d'essai

L'échantillon de matériau est pesé, puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée.

#### b. Appareillage

Le matériel suivant est nécessaire :

- Une étuve
- Une balance

- Des coupelles, des boîtes de pétri, des vases de peser non altérable à l'humidité et à la chaleur,



**Figure 2.2 :** Etuve de dessiccation et balance.

### **c. Mode opératoire**

Le sol est placé dans une coupelle puis peser, puis l'ensemble est placé dans une étuve à 105°C (sols insensible à la chaleur) et 50°C (sols sensible à la chaleur, débris organiques ou gypse) pendant 24 heures. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau, les deux pesées donnent par différence la masse d'eau libérée.

### **3.2. Essai au bleu de méthylène (NF P 18-592) :**

Cet essai permet de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. L'essai s'effectue sur 30g de matériau trempé dans 0,200 litre d'eau distillée et maintenus en permanence sous agitation.

#### **a. But de l'essai**

Cet essai est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sol. Il consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela, on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

#### **b. Principe de l'essai**

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité

directe à la fraction 0/50mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux. D'autre part, le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

### c. Appareillage

- Balance
- Chronomètre ou équivalente indiquant la seconde
- Agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400tr/min à 700tr/min
- Un récipient cylindrique d'une capacité minimale de 3000 cm<sup>3</sup>
- Un tamis - papier filtre blanc
- Eau distillée + pissette
- Bleu de méthylène
- Dmax du matériau égal à 5mm.



**Figure 2.3 :** Appareillage de l'essai du bleu de méthylène.

### d. Produits utilisés

Les produits utilisés dans cet essai sont les suivants :

- Solution de bleu de méthylène à  $(10 \pm 0,1)$  g/l fabriquée depuis moins d'un mois et

conservée dans un flacon bouché à l'abri de la lumière

- Eau déminéralisée ou distillée.

#### e. Mode opératoire

- Tamiser l'échantillon à étudier au tamis 5mm
- Sécher le matériau de l'étuve jusqu'à masse constante
- Prélever une masse de 120gr
- Verser un échantillon de 30gr de sol sec dans le bécher et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge
- Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur à ailettes
- Ajouter 5cm<sup>3</sup> de bleu de méthylène dans le bécher
- Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre
- Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en bleu de méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer
- Si la tâche est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm<sup>3</sup> jusqu'à ce que le teste soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer
- La valeur au bleu du sol (VBS) est calculée par cette formule :

$$\text{VBS} = 100 (\text{B} / \text{MS})$$

Avec B : masse de bleu introduite dans le bécher en gr

MS : masse sèche de la prise d'essai en gr.



**Figure 2.4 :** L'essai de valeur au bleu de méthylène

### 3.3. L'analyse granulométrique par sédimentation (NF P 94.057) :

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 des refus cumulés sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

#### a. But de l'essai

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids de particules fines (de diamètre inférieur à  $80\mu m$ ) d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle complète l'analyse par tamisage. La séparation par décantation consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute dans un environnement visqueux afin d'obtenir le tracé d'une courbe granulométrique pour des particules inférieures à  $0,08mm$ .

#### b. Principe de l'essai

Tamiser l'échantillon du sol par lavage (passant au tamis  $0,08mm$ ), et récupérer le tamisât, sécher l'échantillon dans une étuve jusqu'au poids constant, prendre à  $80g$  de tamisât sec. Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de deux litres contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée, et de solution à  $5\%$  d'hexamé-taphosphate de sodium

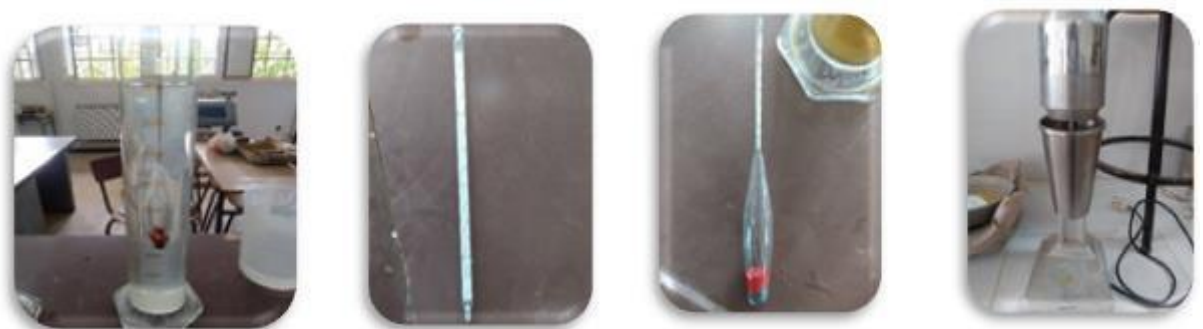
[Na<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 10H<sub>2</sub>O].



**Figure 2.5** : Préparation de l'échantillon du sol.

### c. Appareillage

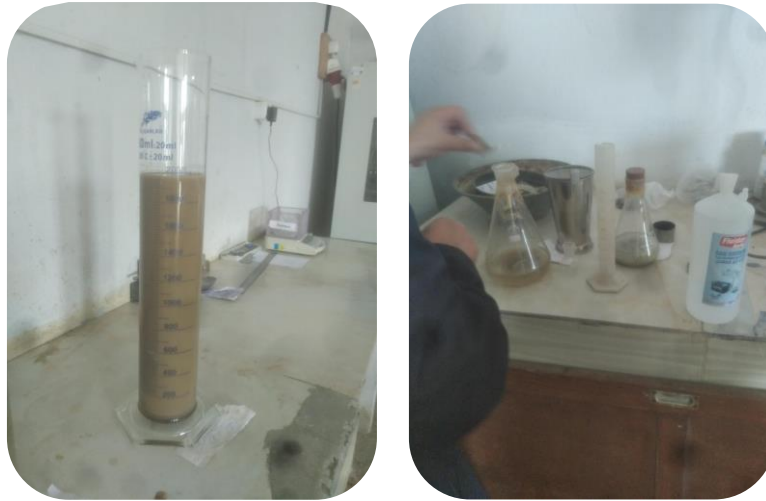
- Balance, étuve
- Agitateur mécanique, bac
- Un tamis de 80 µm
- Eau distillée ou déminéralisée et défloculant, deux éprouvettes
- Un densimètre gradué de 0.995 à 1.035g/cm<sup>3</sup> de forme torpille avec des graduations tous les 0.005g/cm<sup>3</sup>
- Thermomètre, chronomètre, thermomètre de la salle d'essai
- Des éprouvettes de 2l de contenance.



**Figure 2.6** : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie.

#### **d. Mode opératoire**

- Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée. Le tamisât, au tamis de 80  $\mu\text{m}$ , de l'échantillon de sol, préparé selon la norme NF P 94-056, 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 entrainer d'éléments fins. Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve. Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80g (plus ou moins 10g)
- Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500cm<sup>3</sup> du mélange spéciale et garder à la température ambiante
- Laisser imbiber pendant au moins 15h à la température ambiante. La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau est de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3min minimum à 10000tr/min
- Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation, compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000cm<sup>3</sup>
- Verser 2000cm<sup>3</sup> de la même eau distillée dans un second éprouvette témoin, et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propre.
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre, Faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants : 0.5; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 240 ; 1440 minute.
- Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque, à partir de 5mn plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30s avant la mesure



**Figure 2.7 :** Analyse granulométrique par sédimentation du sol.

### **3.4. Limites d'Atterberg (NF P94-051)**

Les limites d'Atterberg représentent les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance, à savoir, l'état solide (sans retrait), l'état semi-solide (avec retrait), état plastique et état liquide. Ces limites, qui s'expriment en pourcentages, soit : la limite de retrait ( $W_s$ ), la limite de plasticité ( $W_p$ ) et la limite de liquidité ( $W_l$ ).

- **La limite de liquidité ( $W_l$ ) :** est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique (sépare l'état liquide de l'état plastique). Elle peut atteindre 100% dans le cas de certaines argiles, mais généralement elle ne dépasse pas 100%
- **La limite de plasticité ( $W_p$ ) :** est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et semi-solide. A cette teneur en eau, le sol perd sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Cette teneur en eau varie de 0% à 100%, mais elle est généralement inférieure à 40%.
- **La limite de retrait ( $W_s$ ) :** est la teneur en eau limite qui sépare l'état semi-solide de l'état solide. C'est la teneur en eau maximale que peut contenir le sol sans charge de volume
- **L'indice de plasticité  $I_p$  :** il représente la différence entre les limites de liquidité et de plasticité ; il définit donc l'étendue du domaine plastique.

### a. But de l'essai

Cet essai a pour objet de déterminer les limites de liquidité et de plasticité d'un sol. Il est réalisé sur la partie de sol passant au tamis de  $400\mu\text{m}$ . Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état.

### b. Principe de l'essai

L'essai s'effectue en deux phases :

- Mesurer la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande
- Mesurer la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3mm de diamètre.

### c. Matériels utilisés

- Appareille de Casa grande, outil a rainuré
- Coupelle, verres de montres tarés
- Pissette, spatule
- Balance électronique
- Four électrique.

### d. Mode opératoire

Après l'échantillonnage du sol une masse de matériau  $m$  est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24h.



**Figure 2.8 :** Préparation de l'échantillon du sol pour l'essai des limites d'Atterberg.

➤ **Pour déterminer la limite de liquidité Wl**

- Contrôler, si le fonctionnement de l'appareil est bien
- Malaxer la totalité du tamisât, afin d'obtenir une pâte homogène presque fluide
- Mettre dans une coupelle propre et sèche, une masse du sol malaxé avec l'eau
- Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer
- Fixer délicatement sur le support métallique de l'appareille de Casagrande
- Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de choc à la cadence de deux coups par seconde
- Noter le nombre N des chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm
- Prélever environ de 5g de pate de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermée, afin d'en déterminer la teneur en eau, on note poids total humide
- Placer le prélèvement dans une capsule de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccations ; on note poids total sec
- Effectuer au moins quatre (04) fois la même opération complète sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois, on note teneur en eau.



**Figure 2.9** : Détermination de la limite de liquidité (Wl).

➤ **Pour déterminer limite de plasticité Wp**

- Former une boulette à partir de la pâte préparée
- Rouler la boulette sur une plaque lisse à la main, de façon à obtenir un rouleau qui aminci progressivement, jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3mm et une longueur d'environ 10cm et ne doit être creux

- La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint  $3\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$
- Si, aucune fissure n'apparaît, le rouleau réintégré à la boulette et reformer à nouveau
- Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau, elle est placée dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.
- Effectuer un deuxième essai sur un nouveau échantillon.



**Figure 2.10 :** Détermination de la limite de plasticité ( $W_p$ ).

### 3.5. Essai de cisaillement (NF P94-071-1) :

#### a. Introduction

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrage de soutènement, remblais, talus...) il est nécessaire de connaître la résistance du sol. Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent. La résistance d'un sol peut être définie par nombreux essais, parmi eux l'essai de cisaillement rectiligne dit (à la boîte).

#### b. But de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer les deux paramètres " $C$ " et " $\phi$ " graphiquement à partir de la courbe intrinsèque du sol, la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) est fonction de la contrainte normale ( $\sigma$ ) appliquée, du frottement interne ( $\phi$ ) et de sa cohésion ( $C$ ) du matériau :

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad \text{C'est la «loi de coulomb»}$$

#### c. Principe de l'essai

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de

deux demi - boites indépendantes. Le plan de séparation de deux demi - boites constitue 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 vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi - boites l'une par rapport à l'autre auxquelles est imposé un déplacement relatif (DL) à vitesse constante
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant
- Trois échantillons identiques doivent être testés, pour trois contraintes normales différentes.

#### d. Matériel utilisés

- La boîte de Casagrande
- Le bâti de consolidation sur lequel on dépose la boîte surmontée d'un étrier recevant les poids qui vont fournir la charge N
- Un échantillon de sol d'environ 250ml
- Le dispositif de cisaillement qui permet de cisailier le sol à vitesse constante, il est constitué d'un anneau dynamométrique, et d'un chariot sur lequel, on vient placer la boîte de Casagrande, le chariot est animé par un moteur d'un mouvement de translation à vitesse constante réglable.



**Figure 2.11 :** Matériel essai de cisaillement a la boite.

## e. Mode opératoire

### ➤ Mises-en place de l'échantillon dans la boîte

Les deux demi boîtes étant verrouillées, on place successivement

- Le fond de boîte, une pierre poreuse
- Une plaque striée, les stries étant perpendiculaires au sens de cisaillement (les plaques perforées permettent les essais drainés, les plaques pleines sont utilisées pour les essais non drainés)
- L'échantillon de sol
- Une plaque striée identique à la première
- Une pierre poreuse, le piston.

### ➤ Mises-en place de la boîte sur la machine

- Placement de l'étrier de charge sur le piston de la boîte
- Placement du comparateur vertical et mise à zéro de celui-ci
- Montage de l'anneau dynamométrique sur la machine
- Reliage à la boîte et bien compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro
- Nous appliquons sur l'éprouvette la charge désirée, en principe : 1, 2, 3 bars
- Désolidarisation des deux demi boîtes en enlevant les goupilles
- Mise en route à la vitesse désirée (1mm/min);

Nous arrêtons la manipulation à 6mm de déplacement.

# CHAPITRE III

## RESULTATS ET INTERPRETATION

## 1.Introduction :

Le présent chapitre présente les différents résultats obtenus lors des essais qui ont été conduits en laboratoire LTP EST et LNHC Skikda sur le sol étudié, à savoir le sédiment de barrage de Zardezas El Harrouche situé à Skikda, le sol en question a été stabilisé par des différents pourcentages de laitier de haut fourneau de Hdjar-soud à Skikda afin d'étudier la résistance au cisaillement qui est un paramètre essentiel en géotechnique.

## 2. Caractérisation physique des sédiments :

Une série d'essais a été réalisé sur un échantillon prélevé. Le premier essai était la détermination de la teneur en eau naturelle et cela pour quantifier l'humidité des sédiments.

La granulométrie, les limites d'Atterberg, l'argilosité ont été aussi entrepris

### 2.1 Teneur en eau :

La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin

L'essai a été conduit par la norme (NF P94-050)

N° tare	1	2
Masse total humide (g)	200.1	200.4
Masse total sec (g)	304.3	293.6
Masse sec (g)	153.2	152.2
Mw (g)	46.9	48.2
W (%)	30.61	31.66
<b>W moyenne %</b>	<b>31.13</b>	

**Tableau 3.1** : Résultat de l'essai teneur en eau effectué

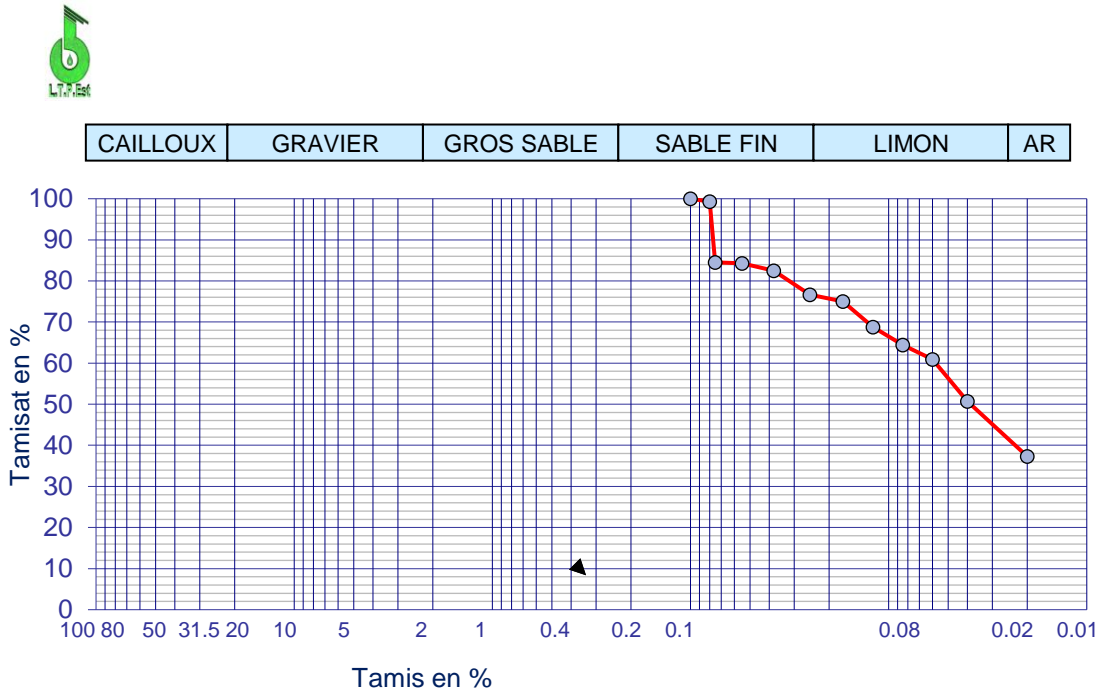
Après deux mesures successives, la teneur en eau moyenne trouvée est : **31.13%**.

### 2.2 L'analyse granulométrique par sédimentation :

Cette analyse permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80  $\mu$ ) d'un sol en fonction de leur dimension donc elle complète l'analyse par tamisage (NF P94-057).

<b>Tamis(mm)</b>	0.1	0.08	0.075	0.055	0.038	0.025	0.017	0.012	0.0085	0.006	0.004	0.002
<b>Tamisat(%)</b>	100	99.3	84.48	84.3	82.52	76.62	75	68.76	64.44	60.9	50.69	37.33

**Tableau 3.2** : Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation.



**Figure 3.1** : courbe granulométrique

D'après la courbe granulométrique, on constate une grande présence des fines dans les sédiments de barrage

Par contre les propriétés granulométriques des sédiments ne sont pas analysés à cause des diamètres  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  qui sont indéterminés, seul le diamètre  $d_{60}$  est établi

$$d_{60} = 0.006$$

D'après la courbe granulométrique les pourcentages des granulats sont les suivants

Sable 24%

Limon 38%

Le sol est limon-sable fin.

### 2.3 Valeur au bleu de Méthylène :

On considère que cet essai exprime globalement le contenu de l'argile dans le sol L'essai a été réalisé conformément à la norme (NF P94-068).

- $Vb = \frac{v}{m}$

Masse sèche de sol (g)	35
Volume du bleu introduit (ml)	120
<b>VBS</b>	<b>3.43</b>

**Tableau 3.3 :** Valeur au bleu de Méthylène.

$VBS \leq 0.2$	Sols sableux(sol insensible à l'eau)
$0.2 < VBS \leq 2.5$	Sols limoneux(sol peu plastique et sensible à l'eau)
$2.5 < VBS \leq 6$	Sols limono-argileux,(plasticité moyenne)
$6 < VBS \leq 8$	Sols argileux
$VBS > 8$	Sols très argileux

**Tableau 3.4 :** type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène

La valeur de bleu fait ressortir qu'il s'agit d'un **sol limono-argileux, (sol de plasticité moyenne)**.

### 2.4 Limites d'Atterberg :

La détermination des limites d'Atterberg est essentielle dans cette étude, elle nous permet d'évaluer la plasticité et prévoir le comportement du sol.

L'essai a été conduit par la norme (NF P94-051).

**2.4.1 Limite de plasticité (LP) :** est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastiques et solides.

N° d'essai	1	2
Masse sol humide	2.13	2.102
Masse sol sec	1.583	1.554
W%	34.81	35.48
<b>Limite de plasticité moyenne (WP) %</b>	<b>35.15</b>	

**Tableau 3.5 : Résultat de l'essai limite de plasticité**

**2.4.2 Limite de liquidité LL :** est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquides et plastiques.

N° de la tare	153	LA	6	2
Masse sol humide	22.947	24.358	20.405	27.80
Masse sol sec	63.79	59.88	60.26	54.32
W%	63.79	59.88	60.26	54.32
Nombre de coups	15	18	26	31
<b>Limite de liquidité moyenne(WL)%</b>	<b>59.34</b>			

**Tableau 3.6 : Résultat de l'essai limite de liquidité**

**2.4.3 Indice de plasticité IP :** est la différence entre les limites de liquidité (LL) et de plasticité (LP). Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_p = 59.34 - 35.15$$

$$I_p = 24.19$$

<b>Indice de plasticité</b>	<b>Degré de plasticité</b>
$0 < IP < 5$	Sol non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeur)
$5 < IP < 30$	Sol peu plastique
$30 < IP < 50$	Sol plastique
$50 < IP$	Sol très plastique

**Tableau 3.7 : Degré de plasticité des sols.**

D'après le tableau 2.4.3 de degré de plasticité des sols on observe que notre sol est peu plastique

**2.4.4 Indice de consistance :** rapport défini par la formule suivante :

$$I_c = (WL - W) / IP$$

$$I_c = (59.34 - 31.13) / 24.19 = 1.17$$

D'après la valeur de l'indice de consistance les sédiments de barrage sont considérés comme **sol plastique**.

Toutes les caractéristiques déterminées précédemment sont résumés dans le tableau ci-après :

<b>Teneur en eau naturel %</b>	31.13
<b>Valeur de bleu de méthylène</b>	3.43
<b>Limite de liquidité</b>	59.34
<b>Limite de plasticité</b>	35.15
<b>Indice de plasticité</b>	24.19
<b>Indice de consistance</b>	1.17
<b>Teneur en eau optimal %</b>	16
<b>Densité sèche maximale (<math>g/cm^3</math>)</b>	1.51

**Tableau 3.8 :** les caractéristiques physiques des sédiments.

### **3. Caractérisation mécanique des sédiments :**

#### **3.1 Résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande :**

Afin de déterminer les propriétés de résistance au cisaillement des sédiments un essai de cisaillement directe a été mené conformément à la norme **NF P94-71-1-1**

- **Essais de cisaillement rectiligne non consolidé non drainé :(NF P 94-071-1)**

Ces essais de cisaillement comportent deux phases :

1. -phase d'application de contrainte normales avec ou sans drainage
2. -phase de rupture proprement dite

Les deux phases de l'essai de cisaillement non consolidé non drainé (UU) sont réalisées à drainage fermé correspondant au comportement à court terme du sol.

Les caractéristiques ainsi déterminées dans notre cas sont la cohésion apparente ( $C_u$ ) et l'angle de frottement interne ( $\phi_u$ ).

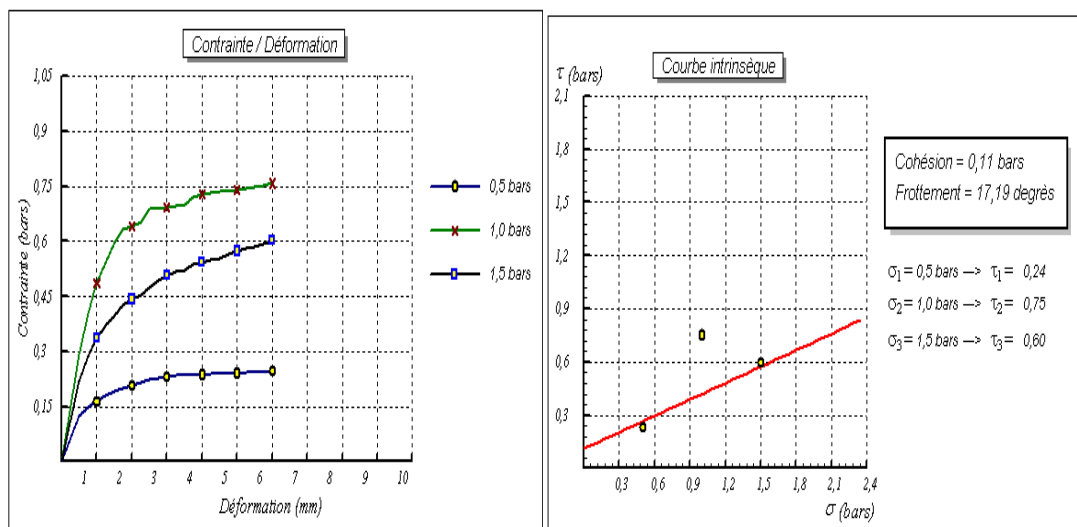
### 3.2 Stabilisation des sédiments au laitier de haut fourneau :

Pour des raisons de stabilisation et d'amélioration des sédiments, une série d'essais a été réalisée sur des échantillons stabilisés avec différents pourcentages de laitier, afin de déterminer leurs caractéristiques mécaniques améliorées.

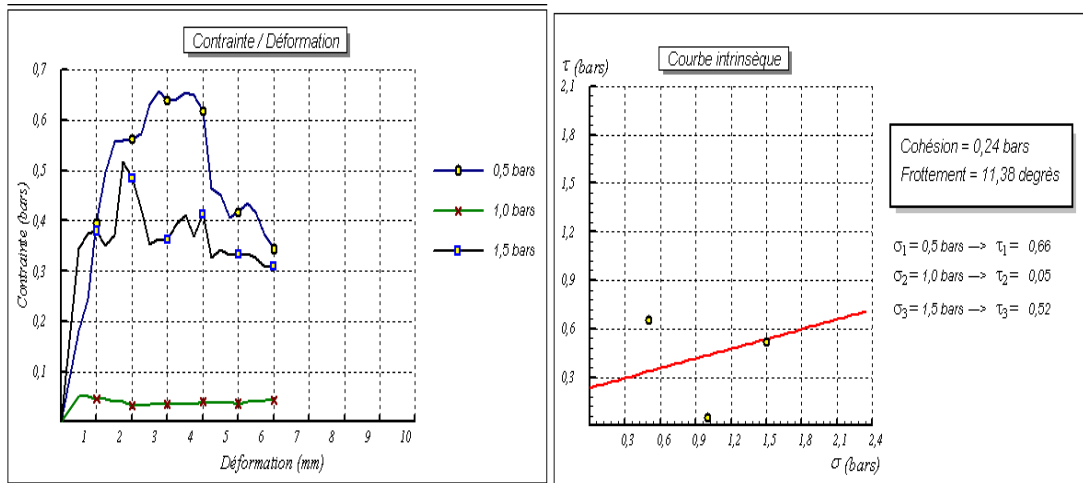
Suite à l'ajout du laitier de hauts fourneaux, on remarque une variation aléatoire de  $c$  et  $\phi$ .

Echantillon N°	$P_d(\text{max})$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	L'eau %	Laitier %	Cohésion (bar)	Frottement (°)
1	1,52	16	0	0,11	17,19
2	1,52	16	2 %	0,24	11, 38
3	1,52	16	6 %	0,48	14, 38

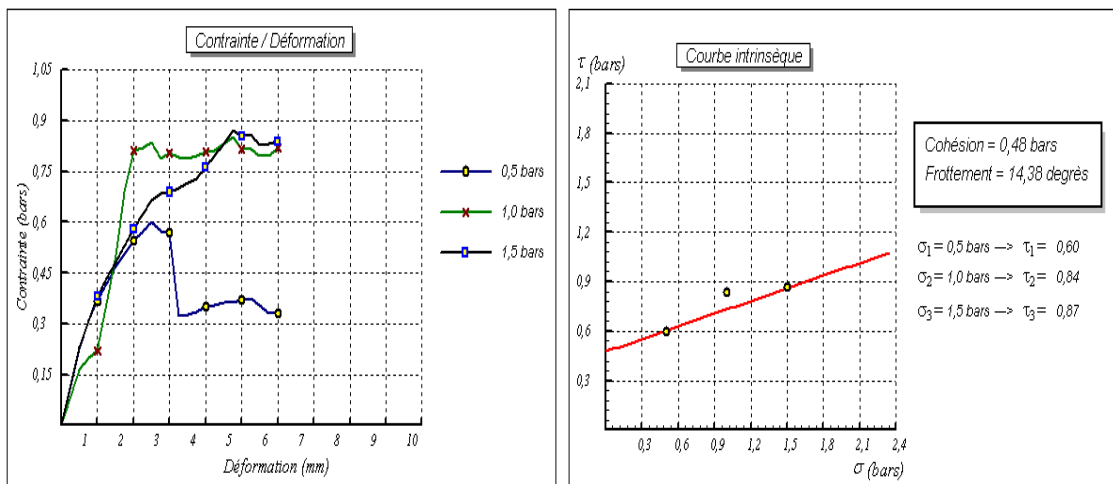
**Tableau 3.9 :** Séries d'essai de cisaillement réalisé sur sol+ laitier Des hauts fourneaux.



**Figure 3.2 :** Echantillon n°1. Sol sans laitier de hauts fourneaux



**Figure 3.3 :** Echantillon n°2. Sol +2 % de laitier de hauts fourneaux



**Figure 3.4 :** Echantillon n°3. Sol +6 % de laitier de hauts fourneaux

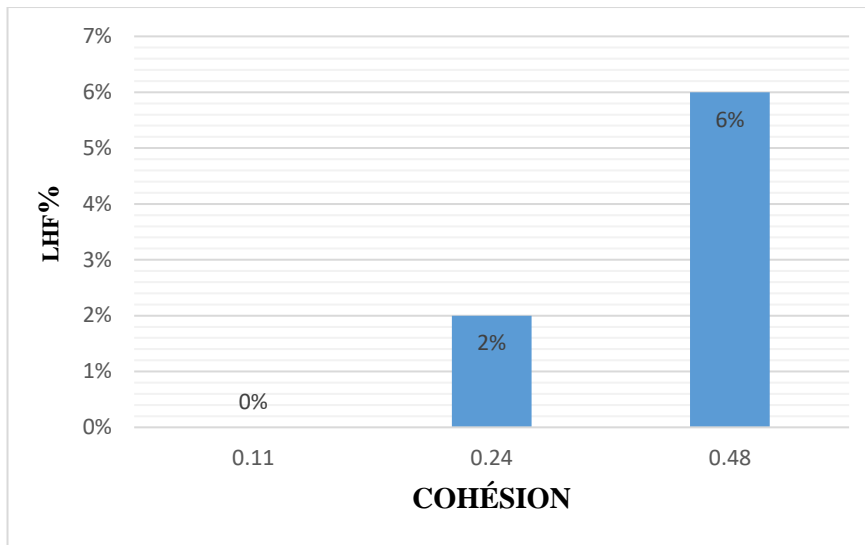
En conclusion, on remarque que la cohésion (c) augmente avec l'augmentation du taux de laitier des hauts fourneaux.

Par ailleurs l'ajout de 2% de laitier induit une diminution considérable de l'angle de frottement interne alors que cette tendance s'inverse avec l'ajout de 6% de laitier de hauts fourneaux.

Les tableaux ci-dessous résumes les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion des sols traités par trois pourcentages (0%, 2% et 6%) du laitier.

<b>Cohésion (bars)</b>	0.11	0.24	0.48
<b>Laitier (%)</b>	0%	2%	6%

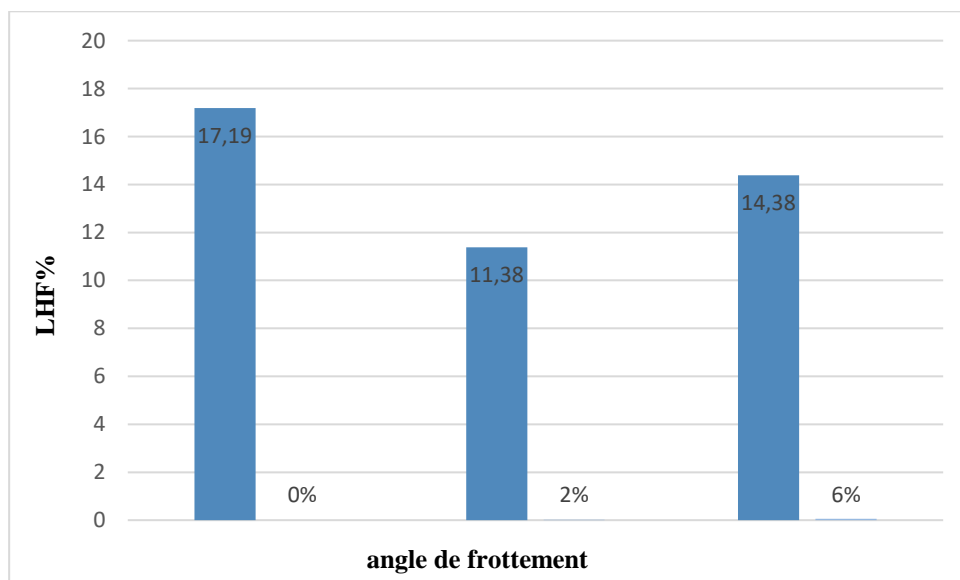
**Tableau 3.10** : le changement de c en fonction des pourcentages de stabilisation de laitier de haut fourneau



**Figure 3.5** : la variation de la cohésion en fonction des pourcentages de laitier de haut fourneau

<b>Angle de frottement (°)</b>	17,19	11,38	14,38
<b>Laitier (%)</b>	0	2	6

**Tableau 3.11** : le changement de c en fonction des pourcentages de stabilisation de laitier de haut fourneau



**Figure 3.6** : la variation de l'angle de frottement en fonction des pourcentages de laitier de haut fourneau

## **Conclusion générale**

Ce travail est présenté dans le cadre de l'étude du comportement physique et mécanique de sédiment de barrage traité au laitier des hauts fourneaux par des études expérimentales au laboratoire.

Le traitement de sol est une technique d'amélioration des matériaux pour les rendre aptes à l'usage.

Traiter un sol c'est le mélanger intimement avec un produit, comme la chaux ou un liant hydraulique, afin de lui conférer des propriétés mécaniques de qualité supérieure.

En effet, l'ajout du laitier avec des différents pourcentages : (0% 2 % et 6 %) peut apporter une solution idéale pour les stabiliser et ceci par des modifications intéressantes de leurs propriétés.

## Références bibliographiques

- Bouafia.A, « Mécanique des sols appliquée problèmes résolus », l'office des publications universitaires, Ben Aknoun- Alger, 1996.
- Traitement du sol argileux par des ajouts minéraux ». Mémoire de master, université de Khamis Miliana, 2015.
- Guefaifia Lamia traitement et renforcement d'un sol fin par différentes techniques d'amélioration Université 8 Mai 1945 de Guelma.
- Abidat Wafa effet de traitement des sols argileux par la chaux et le sable sur les propriétés déportance Université Badji Mokhtar Annaba.
- Krine Ismail étude du comportement d 'un sol argileux traité par des ajouts du  
-Ciment et laitier de haut fourneau.
- Fambai China Noé termination des zones optimales de dragage du barrage de K'sob (M'sila) université Saad dahlab – blida 1.
- Beghiel Chahinez Effet des fines sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'un sol pulvérulent Université du 20 Aout 1955 Skikda
- Chapitre I Les sédiment de dragage.
- Sanglerat, « Cours pratiques de mécanique des sols », plasticité et calcul des tassements, 3ème Edition, Dunod, janvier 1981.
- Alexandre.L, Sebileau.J.L. « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 340 p, 1988.
- Behim M. « Sous-produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire ». Thèse de doctorat, Université de Annaba, 173 p, 2005.

- Zemouli.S et Chelghoum.N, « Utilisation du laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation des sols », Revue Science et Technologie.
- Norme française NF P 94- 050 « Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux »
- Norme française NF P 94-057, « Essai granulométrique des sols par sédimentation », paris, mai 1992.
- Norme Européenne NF P 94-068, « Essai au bleu de méthylène », Décembre 1990.
- Norme Européenne NF P 94-051, « La limite d'Atterberg », Mars 1993.
- Norme Européenne NF P 94-071-1, « Essai de cisaillement a la boite », aout 1994.