



# Mémoire de Fin d'Etudes

## Présenté au

**Domaine** : Sciences de la Technologie  
**Département** : Génie Civil  
**Filière** : Génie Civil  
**Spécialité** : Géotechnique et matériaux

## Réalisé par

**BELATRA Ahmed Siradj Eddin**  
**BEROMAN Rafik Riad Rabeh**

**Pour l'obtention du diplôme de**  
**MASTER ACADEMIQUE**

## Intitulé

*Etude expérimentale des mélange sable de dune-bentonite :leurs performance  
comme barrière de confinement dans les centres d'enfouissement technique  
(CET)*

Soutenu le : **02/06/2017**

Devant le jury de soutenance composé de :

MM : Guettala salim	MCA	Univ. Djelfa	Président
Allout Naas	MAA	Univ. Djelfa	Encadreur
Sebkhauoui Harizi	Vacataire	Univ. Djelfa	Co-encadreur
Cheriet Faycal	MAA	Univ. Djelfa	Examineur

# Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier très chaleureusement mon maître de mémoire M<sup>r</sup> Allout Naas pour son aide, son attention, et sa gentillesse tout au long de mon travail, ainsi je remercie M<sup>r</sup> Sebkhiaoui Harizi, pour ces précieux conseils.*

*Je remercie aussi l'ensemble du personnel de l'unité LNHC pour leurs accueils et leurs aides.*

*A la mémoire de mon cher grand père Beroman Rabeh, mes remerciements à mes parents particulièrement mon père Djamel et ma mère pour leurs aide précieuse, leurs support moral et leurs soutient durant mon parcours, à eux j'offre le fruit de mon travail.*

# Remerciements

*Avant toute chose, nous tenons à remercions Dieu, le tout puissant de m'avoir accordé patience, force et volonté pour terminer ce travail et qui nous a donné la force de continuer nos études.*

*Je tiens à remercier en premier lieu Mr Allout Naas. Maître Assista au département de génie civil à l'université Ziane Achour à Djelfa notre promoteur, qui m'a encadrée, aidée, conseillée, corrigée et recorrecte pendant toute la durée de notre travail.*

*J'ai le plaisir d'exprimer mes vifs remerciements à notre Co- promoteur Mr Sebkhiaoui Harizi Qui a bien voulu accepter de diriger ce travail, ses critiques judicieuses et ses conseils ont été pour nous d'un grand bénéfice.*

*On voudrait remercier chaleureusement l'équipe de laboratoire LNHC, qui en tête, nous tenons à remercier Mr MONIR nous lui exprime nos sincères remerciements et gratitude pour son très bon accueil.*

*Je ne saurais oublier de remercier mon père Abdel Aziz, ma mère Rahouadja et ma sœur pour ses aides sur le terrain. Je tiens à remercier également toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*J'assure ma profonde sympathie à tous les amis du département de génie civile qui 'ont aidé et soutenu dans les moments les plus difficiles. Que chacun trouve ici l'expression de mon entière amitié et de ma sincère reconnaissance.*

## ملخص:

في إطار العمل ومن أجل تقييم المواد المحلية واستثمارها في استعمالها كحاجز محكم متكون من رمل الكثبان من منطقة الأغواط والطين (بنتونيت).

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تقييم سلوك الهيدروميكانيك لخليط رمل الكثبان والطين (بنتونيت)، وتتبع الحالة المطلوبة وبالتالي الخليط المثالي الكافي من ناحية التدفق الهيدروليكي ومقاومة حواجز التخزين النفايات العامة والخاصة.

من خلال دراستنا للمزيج بنتونيت ورمل الكثبان لإنجاز حاجز مثالي لمراكز الردم التقني تمكنا من الوصول للخليط الأمثل الذي يناسب النفاذية والذي يتكون من نسبة 85% من الرمل الكثبان و15% بنتونيت.

كلمات مفتاحية: رمل الكثبان – الطين – التدفق الهيدروليكي – النفايات – حواجز التخزين.

## Résumé

On se propose dans ce travail, et dans le but de valoriser les matériaux locaux, d'investiguer la possibilité d'utiliser une barrière étanche constituée d'un mélange de sable de dune de Laghouat et de bentonite.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer expérimentalement le comportement hydro-mécanique de mélanges de sable de dune-bentonite, portés à des états de saturation différents et rechercher. Ce faisant, le mélange optimal satisfaisant en termes de conductivité hydraulique et de résistance pour les barrières de stockage des déchets ménagers et spéciaux.

Les matériaux de base étant le sable de dune de Laghouat et la bentonite de Mostaganem. Une étude de formulation basée sur le critère de perméabilité a permis d'adopter un mélange optimal constitué de 85% de sable et de 15% de bentonite.

Mots clé : Sable de dune– Bentonite – conductivité hydraulique – déchets – barrière de stockage.

## **Abstract**

In this work, it is proposed to investigate the possibility of using a waterproof barrier consisting of a mixture of Laghouat dune sand and bentonite.

The main objective of this study is to evaluate experimentally the hydro-mechanical behavior of dune-bentonite sand mixtures, brought to different saturation states and to investigate. In doing so, the optimum mixture is satisfactory in terms of hydraulic conductivity and resistance to barriers for the storage of household and special waste.

The basic materials are dune sand and bentonite from Laghouat and Mostaganem regions respectively. A design study based on the criterion of permeability enable us to choose an optimal mixture composed of 85% sand and 15% bentonite

**Key words:** Dune sand - Bentonite - hydraulic conductivity - waste - storage barrier.

## TABLE DES MATIERES

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Recherche Bibliographique.</b> .....	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	3
I.2. Généralités sur les centres de stockage de déchets .....	4
I.3. Définition déchets : .....	4
I.3.1 Déchets .....	5
I.3.2 Déchets ménagers et assimilés .....	5
I.3.3 Déchets spéciaux .....	5
I.3.4 Déchets spéciaux dangereux .....	5
I.3.5 Déchets inertes : .....	5
I.4. Classification des déchets .....	5
I.4.2 Selon le mode de traitement et d'élimination : .....	5
I.4.3 Selon le comportement et les effets sur l'environnement : .....	6
I.4.4 Selon l'origine : .....	6
I.4.5 Selon le mode d'enlèvement des déchets on distingue quatre catégories .....	7
I.5. Production des déchets : .....	7
I.6. Définition de CET .....	8
I.7. Classification de CET .....	9
I.7.1 Classe 01 pour les déchets dangereux : .....	9
I.7.2 Classe 02 pour les déchets non dangereux : .....	9
I.7.3 Classe 03 pour les déchets inertes : .....	9
I.8. La conception du C.E.T : .....	9
I.9. Réglementation pour les sept : .....	10
I.10. Barrières étanches : .....	10
I.10.1 Composition : .....	10
I.10.2 Les couches sable-bentonite (s/b) : .....	12
I.11. Choix de matériaux : .....	14
I.11.1 : Critères de nature : .....	14
I.11.2 Critères d'ouvrabilité : .....	14
I.11.3 Critères de perméabilité : .....	15
I.12. Caractéristiques des matériaux naturels utilisés pour la mise en œuvre des barrières étanches : .....	15

I.12.1 Les paramètre de nature .....	15
I.12.2 Les paramètre d'état : .....	15
I.12.3 Le comportement hydraulique .....	15
I.13. Traitements des matériaux constituant la barrière étanche : .....	16
I.14. Rappels sur les sols argileux .....	16
I.14.1 Minéralogie et propriétés : .....	16
I.14.1.1 Définition des argiles : .....	16
I.14.1.2 Structure des argiles : .....	17
I.14.1.3 Définition de la bentonite : .....	21
I.14.1.4 Les type de bentonites : .....	21
I.15. Microstructure et comportement avec l'eau : .....	22
I.15.1 Le feuillet : .....	22
I.15.2 L'agrégat : .....	25
I.15.3 Le système bentonite-eau : .....	26
I.16. Conclusion : .....	27
<b>Chapitre II : Caractéristique des matériaux utilisés .....</b>	<b>28</b>
II.1. Introduction : .....	28
II.2. Bentonite de Mostaganem .....	28
II.2.1 Analyses minéralogiques : .....	28
II.2.2 Analyse chimique : .....	29
II.2.3 Analyse granulométrique : .....	30
II.2.4 Densité des grains solides : .....	30
II.2.5 Essai Proctor Normal : .....	31
II.2.6 Essai au bleu de méthylène : .....	32
II.2.7 Limites d'Atterberg : .....	33
II.3. Sable de dune : .....	35
II.3.1 Définition : .....	35
II.3.2 Analyses minéralogiques : .....	36
II.3.3 Analyse chimique : .....	36
II.3.4 Analyse granulométrique : .....	37
II.3.5 Equivalent de sable : .....	38
II.3.6 Densité des grains solides : .....	38
II.3.7 Essai Proctor Normal : .....	39
II.3.8 Essai au bleu de méthylène : .....	39
II.3.9 Microscope électronique à balayage (MEB) : .....	39

II.4. Conclusion :	40
<b>Chapitre 03 : Essais et interprétations</b>	<b>41</b>
III.1. Introduction :	41
III.2. Analyse granulométrique :	41
III.2.1. Influence du pourcentage de bentonite sur l'analyse granulométrique :	43
III.3. Essai Proctor Normal des mélanges :	43
III.3.1 Influence du bentonite sur la densité sèche maximale :	44
III.3.2. Influence du pourcentage de bentonite sur la teneur en eau :	45
III.4. la densité des grains solides des mélanges sable de dune/bentonite :	45
III.5. Essais au bleu de méthylène VBS :	46
III.5.1 Influence du pourcentage de la bentonite sur la valeur de $V_{bs}$ :	47
III.5.3 La surface spécifique des mélanges sable de dune/bentonite :	47
III.6. Essai sur les limites d'Atterberg :	48
III.6.1. Influence du pourcentage du bentonite sur les limites d'Atterberg :	48
III.7.1. Préparation des échantillons :	50
III.7.2. Influence du pourcentage de la bentonite sur les paramètres mécanique des différents mélanges sable de-dune bentonite :	55
III.8. Essai œdométrique :	56
III.8.1. Préparation des échantillons :	57
III.8.2. Coefficient de compressibilité volumique $m_v$ :	59
III.8.3. Influence du pourcentage de la bentonite sur la compressibilité et le gonflement des différents mélanges sable de dune bentonite :	59
III.8.4. Mesure du coefficient de consolidation $C_v$ :	60
III.8.5. Mesure de la conductivité hydraulique $K$ :	61
9. Conclusion :	61
<b>4. Conclusion générale</b>	<b>62</b>
<b>Recherche bibliographique</b>	<b>63</b>
<b>Annexe</b>	<b>65</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.01 : Réglementations pour les installations de stockage des déchets. (Van Impe et Bouazza, 1996 ; Cazeaux, 2001) .....	11
Tableau II.01 : Composition chimique de la Bentonite de Mostaganem. [4].....	29
Tableau II.02 : Surface spécifique totale (Sst) de la bentonite .....	32
Tableau II.03 : Surfaces spécifiques totales (Sst) de quelques argiles .....	32
Tableau II.04 : Limites de consistance de la bentonite.....	34
Tableau II.05 : Analyse chimique de sable de dune .....	36
Tableau II.06 : l'analyse granulométrique de sable de dune .....	37
Tableau II.07 : essai proctor normal du sable de dune .....	39
Tableau III.01 : Analyse granulométriques des différents mélanges. ....	42
Tableau III.02 : Essai proctor des différents mélanges sable de dune-bentonite.....	43
Tableau III.03 : la densité des grains solides des mélanges sable de dune/bentonite.....	45
Tableau III.04 : classification des sols par la valeur de V <sub>bs</sub> . ....	46
Tableau III.05 : la classification des différents mélanges sable de dune/bentonite selon v <sub>bs</sub> . .....	46
Tableau III.06 : la surface spécifique des différents mélanges sable de dune/bentonite. ....	47
Tableau III.07 : la limite de liquidité et l'indice de plasticité des mélanges sable de dune-bentonite. ....	48
Tableau III.08 : classification du sol selon l'abaque de Casagrande.....	50
III.7. Essai de cisaillement : .....	50
Tableau III.09 : angle de frottement et la cohésion de mélange sable de dune bentonite. ....	54
Tableau III.10 : Coefficient de compressibilité volumique pour les différents mélange sable de dune bentonite.....	59
Tableau III.11 : Influence du pourcentage de la bentonite sur le coefficient C <sub>v</sub> .....	61
Tableau III. 12 : Influence du pourcentage de la bentonite sur la perméabilité K. ....	61

## LISTE DES FIGURES

Figure I.01 : principe de confinement.....	11
Figure I.03 : Couches tétraédriques et octaédriques .....	17
Figure I.04 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile .....	18
Figure I.05 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite D'après Lambe (1953).....	19
Figure I.06 : Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite. D'après Grim (1959).....	20
Figure I.07 : Vue isométrique de la structure atomique de l'illite (cité par Bengraa, 2004) [.....	21
FigureI.08 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité inter stratifiée.....	25
FigureI.09 : Les différents types d'espaces poreux [Touret <i>et al.</i> (1990)].....	26
Figure II.01 : Diffractomètre X'PERT PRO .....	29
FigureII.02 : Diffractogramme aux rayons X (DRX) d'un échantillon de bentonite de Mostaganem. [4] .....	29
FigureII.03 : Courbe granulométrique de la bentonite de Mostaganem .....	30
FigureII.04 : Courbe Proctor Normal de la bentonite de Mostaganem.....	31
FigureII.05 : La coupelle de Casagrande. ....	33
FigureII.06 : Etats de consistance d'un sol .....	34
FigureII.07 : Essai de micro-poinçonnement.....	34
FigureII.08 : Sable de dune de wilaya de Laghouat.....	36
Figure II.09 : DRX du sable de dune[4] .....	36
FigureII.10 : analyse granulométrique de sable de dune .....	38
FigureII.11 : Courbe proctor du sable .....	39
FigureII.12 : Vue générale (à grande échelle,MEB.) du sable de dune [4] .....	40
FigureIII.01 : l'analyse granulométrique des différents mélanges sable de dune/bentonite.....	42
FigureIII.02 : courbes proctor normal des différents mélanges sable de dune/bentonite.....	43
FigureIII.03 : courbe sur influence de la bentonite sur la densité sèche maximale. ....	44

FigureIII.04 : influence du pourcentage de la bentonite sur la teneur en eau.....	45
FigureIII.05 : influence du pourcentage de la bentonite sur la valeur de Vbs. ....	47
FigureIII.06 : influence du pourcentage de la bentonite sur la surface spécifique.	48
FigureIII.07 : influence du pourcentage de bentonite sur la limite de liquidité $W_L$ . .....	49
FigureIII.08 : influence du pourcentage de bentonite sur l'indice de plasticité $I_P$ .	49
FigureIII.09 : abaque de Casagrande. ....	50
FigureIII.10 : courbes de déformation de mélange sable de dune 97%-bentonite 03%. ....	52
FigureIII.11 : courbes de déformation de mélange sable de dune 95%-bentonite 05%. ....	52
FigureIII.12 : courbes de déformation de mélange sable de dune 90%-bentonite 10%. ....	53
FigureIII.13 : courbes de déformation de mélange sable de dune 85%-bentonite 15%. ....	53
FigureIII.14 : courbes de déformation de mélange sable de dune 80%-bentonite 20%. ....	54
FigureIII.15 : influence du pourcentage de la bentonite sur la cohésion $C$ . ....	55
FigureIII.16 : influence du pourcentage de la bentonite sur l'angle de frottement. .....	55
Figure II.17 : courbe de consolidation. ....	
Figure III.18 : courbe de compressibilité. ....	56
Figure III.19 : Cellule œdométrique. ....	57
FigureIII.21 : courbe de compressibilité pour 85% sable de dune-15%bentonite.	58
FigureIII.22 : Courbe de compressibilité pour 80% sable de dune-20%bentonite.	59
FigureIII.23 : Influence du pourcentage de la bentonite sur le coefficient de compressibilité $C_c$ .....	60
FigureIII.24 : Influence du pourcentage de la bentonite sur le coefficient de compressibilité $C_g$ .....	60

## **Introduction générale :**

Les déchets sont inévitables et certains peuvent même être extrêmement dangereux. Il faut d'une part, essayer de les réduire, et d'autre part, de les gérer. Cela est possible en entreposant les déchets en surface ou en les enfouissant au sein du sol lui-même. Dans les deux cas, le risque de contamination de la nappe souterraine existe si des précautions dans le sens de l'imperméabilisation du sol encaissant ne sont pas observées. Le risque de pollution de la nappe est grandissant pour les régions du sud. Ceci est dû, d'une part à l'augmentation progressive du volume de déchets domestiques (expansion des villes) et industriels (exploitation des hydrocarbures), et d'autre part à l'absence quasi-totale de cours d'eau qui se déversent vers la mer.

L'efficacité des couches étanches dépend de leur comportement mécanique, de leur comportement hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination. Elles doivent résister, structurellement et dans le temps, aux attaques physiques et chimiques, et offrir de bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques.

L'expérience a montré que le fond et les flancs de l'installation de stockage des déchets (ISD) doivent répondre au minimum à une perméabilité en saturé inférieure à  $10^{-9}$  m/s. L'angle de frottement recommandé pour les interfaces sols/géosynthétiques bentonitiques dans les installations de stockage des déchets est de l'ordre de  $26^\circ$ .

Les sols argileux compactés présentent des performances vis-à-vis de la perméabilité qui sont souvent intéressantes. Ils constituent de ce fait des matériaux de prédilection dans la construction des systèmes étanches. Ces mêmes sols, présentent la particularité de perdre leur résistance en présence d'eau, ce qui pose un problème de portance de la barrière étanche.

L'intérêt porté à l'environnement s'est considérablement développé, et la protection de l'environnement est à présent inscrite dans l'action continue des administrations et des industriels.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres une introduction et une conclusion générale.

Dans Le premier chapitre, présente une revue bibliographique sur les barrières de confinement des déchets solides. Une présentation exhaustive sur les définitions juridique des déchets selon le ministère de l'aménagement et du territoire de l'environnement et du tourisme algérien (guide algérien des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés ....)Et par la suite une présentation sur les cadres réglementaires et choix des matériaux par des critères selon les règles algérienne pour la réalisation de la barrière étanche enfin un rappel sur les sols argileux.

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation de la caractérisation physico-chimique ainsi qu'une caractérisation mécanique pour les matériaux utilise à savoir sable de dune et la bentonite.

Dans le dernier chapitre, on présente une caractérisation physico-chimique ainsi qu'une étude des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques des mélanges sable-bentonite et par conséquence l'effet des ajouts de la bentonite sur ces dernières.

# Chapitre I : Recherche Bibliographique.

## I.1. Introduction :

L'intérêt porté à l'environnement s'est considérablement développé, et la protection de l'environnement est à présent inscrite dans l'action continue des administrations et des industriels. La prise de conscience de la gravité des problèmes posés par les déchets solides sur l'environnement en général et sur les ressources en eau en particulier est une réalité. En effet l'essor industriel et l'accroissement de la production ainsi que la densité de la population dans les villes font qu'aujourd'hui le volume des déchets urbains a beaucoup augmenté et on constate une prolifération des décharges publiques sauvages. Ces dernières constituent une réelle et permanente menace à la qualité de la vie. [1]

Les couches étanches à base de sols compactés sont utilisées pour isoler les contaminants et les matériaux contaminés de l'environnement extérieur et empêcher par le fait même la contamination des sols, des eaux souterraines et de l'air. Une des solutions actuelles est de les contenir dans des lieux spécifiques ceinturés d'une couche étanche protectrice. L'efficacité de ces couches dépend de leur comportement mécanique, hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination. D'après les recommandations de la communauté européenne, le coefficient de perméabilité saturée doit être inférieur à  $10^{-9}$  m/s pour les fonds des installations de déchets ménagers et spéciaux. Ces recommandations sont conformes avec celles préconisées par le ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme algérien dans le Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés (2009)[2].

Il existe 3000 décharges sauvages en Algérie dont 350 au niveau des 40 grandes villes du pays, représentant une superficie totale de 150.000 hectares [3].

L'objectif principal dans ce mémoire c'est l'étude expérimentale des mélanges sable de dunes/bentonite pour réaliser des barrières étanches de confinement dans les centres d'enfouissement technique (c.e.t) et opter pour celui qui répond aux critères réglementaires

## **I.2. Généralités sur les centres de stockage de déchets :**

Avant 1930, et dans beaucoup de pays, les déchets ménagers étaient stockés sur des sites non contrôlés à proximité des habitations. Ce stockage aléatoire était la source de nuisances telles que les odeurs, la présence d'insectes, les incendies et la contamination des eaux de surface et des nappes souterraines voisines. [4]

Durant ces dernières années, les statistiques montrent que la production des déchets ménagers a presque doublé ou plus à cause de la croissance de la population et du changement de mode de consommation. Ce qui a entraîné une évolution de la composition quantitative et qualitative des déchets (Aina, 2006).

La connaissance de la quantité de déchets produits permet d'optimiser en fonction de la croissance démographique, la capacité des centres de stockage de déchets. Elle permet de planifier le stockage et de définir la durée de vie des centres. [4]

La mise en place des décharges doit être effectuée suivant certaines règles et dispositions qui permettent d'éviter les impacts sur l'environnement, ce qui revient à maîtriser les phénomènes de fermentation en contrôlant la nature de déchets enfouis et le flux de déchets enfouis et les flux liquides et gazeux générés.[4]

En Algérie la quantité annuelle des déchets industriels est estimée à 2 547 000 tonnes (y compris les déchets banals), selon un rapport de l'organisme allemand la GIZ du mois d'avril 2014. Malheureusement, ces décharges sont souvent dans des zones agricoles ou naturelles.

Le risque de pollution de la nappe souterraine est plus probable pour les régions du sud de l'Algérie. Ceci est dû, d'une part à l'augmentation progressive du volume des déchets domestiques (expansion des villes) et industriels (exploitation des hydrocarbures), et d'autre part à l'absence quasi-totale des cours d'eau qui se déversent vers la mer. En conséquence, les substances chimiques générées par ces déchets demeurent dans le sol et seront lessivées par la suite vers les nappes d'eau potable par les processus d'infiltration des eaux pluviales. [4]

## **I.3. Définition déchets :**

D'après le guide Algérien des Techniciens Communaux pour la Gestion des Déchets Ménagers et Assimilés en 2009 la Loi N°01-19 du 12/12/2001 p7 les définitions des différents type de déchets comme suit :

**I.3.1 Déchets** : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.

**I.3.2 Déchets ménagers et assimilés** : tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres qui, par leur nature et leur composition sont assimilables aux déchets ménagers.

Déchets encombrants : tous déchets issus des ménages qui en raison de leur caractère volumineux ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés.

**I.3.3 Déchets spéciaux** : tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes.

**I.3.4 Déchets spéciaux dangereux** : tous déchets spéciaux qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement.

Déchets d'activité de soins : tous déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire.

**I.3.5 Déchets inertes** : tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement.

#### **I.4. Classification des déchets**

Selon le Ministère de l'aménagement du Territoire de l'Environnement et du Tourisme (MATET), les déchets sont classés comme suit :

**I.4.1 Selon leur nature** : La classification des déchets d'après leur nature aboutit à trois catégories essentielles : déchets solides, déchets liquides et déchets gazeux.

**I.4.2 Selon le mode de traitement et d'élimination** : Professionnels et chercheurs s'accordent à regrouper les déchets solides en quatre grandes familles :



**Les déchets inertes** : Généralement constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur incompatibilité avec l'environnement et qui proviennent de certaines activités d'extraction minière ou de déblais de démolition (terre, gravats, sables, stériles, etc.)

**Les déchets banals** : Cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, plastique, cartons, bois produit par des activités industrielles ou commerciales et déchets ménagers.

**Les déchets spéciaux** : Ils peuvent contenir des éléments polluants et sont spécifiquement issus de l'activité industrielle (boues de peintures ou d'hydroxyde métallique, cendres d'incinération, etc.). Certains déchets sont aussi dits spéciaux lorsque leur production importante sur un même site entraîne des effets préjudiciables pour le milieu naturel (mâchefers des centrales thermiques, phosphogypse, ainsi que certains déchets provenant des laboratoires universitaires et hospitaliers, etc.).

**Les déchets dangereux** : Issus de la famille des déchets spéciaux, ils contiennent des quantités de substances toxiques potentiellement plus importantes et présentent de ce fait beaucoup plus de risques pour le milieu naturel (poussières d'aciéries, rejets organiques complexes, bains de traitement de surface contenant soit du chrome, cyanure ou une forte acidité et mercuriels).

**I.4.3 Selon le comportement et les effets sur l'environnement** : A ce titre on distingue :

**Les déchets inertes** : Pouvant être différenciés suivant leur caractère plus ou moins encombrant, en débris plus ou moins volumineux jusqu'aux carcasses d'automobiles, chars, avions, bus, etc.

**Les déchets fermentescibles** : Principalement constitués par la matière organique, animale ou végétale à différents stades de fermentation aérobie ou anaérobie.

**Les déchets toxiques** : Poisons chimiques ou radioactifs qui sont générés soit par des industries, soit par des laboratoires ou tout simplement par des particuliers qui se débarrassent de leurs ordures de certains résidus qui devraient être récupérés séparément (ex. : flacons de médicaments, seringues, piles et autres gadgets électroniques, etc.).

**I.4.4 Selon l'origine** : Pour les besoins de notre travail, nous avons opté pour une classification comprenant seulement deux (02) grandes classes de déchets solides en se basant sur la source des déchets :

#### **Les déchets industriels et déchets urbains.**

**Les déchets industriels** : Hormis les résidus assimilables aux ordures ménagères, tant par leur nature que par leur volume modeste, on distingue dans cette classe :

**Les déchets inertes :** Provenant de chantiers de construction, transformation des combustibles et de l'énergie (gravats, cendre, etc.), métallurgie (scories, laitiers, mâchefers, etc.).

**Les déchets des industries agricoles et alimentaires :** Les déchets pouvant contenir des substances toxiques par des industries variables (ex. : ateliers artisanaux, galvanoplastie, chromage, miroiterie, etc.).

**Les déchets radioactifs :** Le transport et la destruction des déchets industriels posent des problèmes particuliers dont la solution –consentie ou imposée- devra être à la charge des industries polluantes avec si besoin une aide appropriée des gouvernements.

**Les déchets urbains:** A partir de la notion « d'ordure ménagère », vocable par lequel on a longtemps désigné les résidus des ménages correspondant, de par leur origine et leur nature, à une certaine limitation en quantité et en dimensions, on a été conduit du fait de l'évolution du niveau de vie répercuté par les caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets, à passer à la notion plus générale de résidus ou déchets urbains.

#### **I.4.5 Selon le mode d'enlèvement des déchets on distingue quatre catégories :**

- Les déchets constitués par des éléments de faible dimension (ordures ménagères, ordures de marché, déchets artisanaux et commerciaux assimilables aux ordures ménagères).
- Les déchets hospitaliers qui, sans exceptions, font l'objet de collecte séparée.
- Les déchets encombrants appelés aussi « monstres » constitués par des objets volumineux qui ont été réformés et mis au rebus (vielle baignoire, vieux sommier, etc.)
- Les souillures qui proviennent du nettoyage et du balayage des voies publiques (feuilles, branchage, déchets des plages, etc.).

#### **I.5. Production des déchets :**

La production mondiale de déchets représente de 3,4 à 4 milliards de tonnes par an selon les estimations de la Banque Mondiale.

Chaque jour, l'activité humaine produit environ **10 milliards de kilos de déchets** (hors agriculture et construction) ce qui représente une production mondiale d'environ 4000 milliards de kilos de déchets par an

Le volume des déchets dans le monde a décliné au premier semestre 2009 de 5 à 10% sur un volume annuel total de 3,4 à 4 milliards de tonnes dont :

- 1,7 à 1,9 milliards de tonnes de déchets municipaux : en 2012, trois milliards de citoyens produisaient 1,3 milliards de tonnes de déchets solides par an (1,2kg par personne et par jour),

et en 2025, ce volume sera de 2,2 milliards de tonnes (soit 1,42 kg/habitant/jour) générés par 4,3 milliards d'urbains dans le monde. Cela correspond à une hausse de 70 % de déchets solides municipaux d'ici 202

- de 1,2 à 1,67 milliards de tonnes de déchets industriels non dangereux
- 490000 kilos de déchets dangereux

En 2012, la quantité totale de déchets produits par les 28 pays de l'Union Européenne était de 2,5 milliards de tonnes, selon l'étude biannuel d'Eurostar

Un Européen produit en moyenne 600 kg de déchets par an là où un Américain en produit 700 kg/an et un habitant d'une grande ville du tiers monde entre 150 à 200 kg/an.[5]

En Algérie la quantité annuelle des déchets industriels est estimée à 2 547 000 tonnes (y compris les déchets banals), selon un rapport de l'organisme allemand la GIZ du mois d'avril 2014. Ces déchets industriels sont répartis comme suit :

- Les déchets d'emballages et de plastique dont la quantité est estimée à environ 1.2 million de tonnes/an
- Les pneus usagés dont la quantité est estimée à plus de 1 million d'unités/ an –
- Les déchets des huiles et des huiles lubrifiantes dont la quantité est estimée à 110 000 tonnes/an
- Les déchets électroniques, électriques et électroménagers dont la quantité est estimée à 18000 tonnes/an. [6]

#### **I.6. Définition de CET :**

Centre d'Enfouissement Techniques l'appellation utilisée à la place de l'ancienne notion de décharge contrôlée, parce qu'elle reflète mieux les hautes exigences techniques auxquelles sont actuellement soumis tant l'aménagement des sites que la gestion des déchets lors de l'élimination sur ou dans le sol (d'après le Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour C.E.T, (Marcoen et al. 2001).

Plus généralement, on définit les centres d'enfouissement technique comme un site d'élimination des déchets par dépôt des déchets sur ou dans la terre.

## **I.7. Classification de CET :**

Il existe 03 types de décharges (également appelées CET : Centre d'Enfouissement Technique) :

**I.7.1 Classe 01 pour les déchets dangereux :** Les décharges de classe 1 accueillent principalement les "déchets industriels spéciaux" présentant un caractère dangereux reconnu pour le milieu naturel ou les êtres vivants. Elles sont également appelées Centres de stockage de déchets dangereux. Avant d'être enfouis, les déchets sont "stabilisés" par extraction notamment des liquides dangereux pour limiter les réactions chimiques dans la fosse. [7]

**I.7.2 Classe 02 pour les déchets non dangereux :** Les décharges de classe 2 accueillent les déchets ménagers et assimilés (DMA), ainsi que les déchets industriels banals (DIB). Elles sont également appelées Installation de Stockage de Déchets non Dangereux (ISDND) et Centre de Stockage de Déchets Ultimes (CSDU).[7]

Il est interdit d'enfouir autre chose dans ces décharges que du **déchet ultime**, un déchet "qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux".

**I.7.3 Classe 03 pour les déchets inertes :** Les décharges de classe 3 accueillent principalement des déchets du bâtiment et des travaux publics (terres, gravats, déchets de démolition, etc.).[7]

## **I.8. La conception du C.E.T :**

Une attention particulière à la conception du CET évitera des problèmes opérationnels, environnementaux et sociaux. Ainsi la planification d'un ce doit prendre en considération non seulement les aspects environnementaux et techniques mais aussi les aspects communautaires et économiques.

Les éléments clés de la conception d'un CET (ISD) sont :

- types et quantités des déchets.

- propriétés des déchets.

-niveau technique approprié.

- prétraitement des déchets souhaitable.[4]

### **I.9. Réglementation pour les sept :**

Le confinement prévu par les réglementations Algériennes, loi du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets a été établi en réponse à certaines préoccupations liées à l'expérience passée sur les décharges, il a pour objectifs d'assurer :

- la réduction des entrées et sorties d'eaux du site.

- un drainage efficace des lixiviats afin de réduire les percolations à travers le sol.

- la pérennité du système de confinement pendant plusieurs dizaines d'années correspondant à la lente évolution des déchets.[1]

### **I.10. Barrières étanches :**

#### **I.10.1 Composition :**

**Une barrière de sécurité active :** assurant le drainage et la collecte des lixiviats. Elle est constituée par un complexe d'étanchéité drainage associant des géosynthétiques (géomembrane, géotextile) et des matériaux naturels (couche drainante).

**Une barrière de sécurité passive :** Labarrière de sécurité passive constitue la garantie à long terme de l'installation de stockage. L'étanchéité de fond et de paroi doit être optimale afin de garantir la protection de milieu naturel environnant, enempêchant :

- Les lixiviats de polluer les nappes phréatique et le sol environnant (flux sortant du stockage)

-L'arrivée des eaux souterraines dans le site (flux entrant) dans certain cas particuliers de configuration géologique.

Cette fonction principale d'étanchéité est caractérisée par la perméabilité du matériau constituant les barrières de sécurité passive

L'étanchéité de la barrière passive doit être pérenne. Elle devra résister de manière durable :

-aux sollicitations mécaniques lors de la mise en œuvre et en service.

-éventuellement l'action chimique des lixiviats. [8]

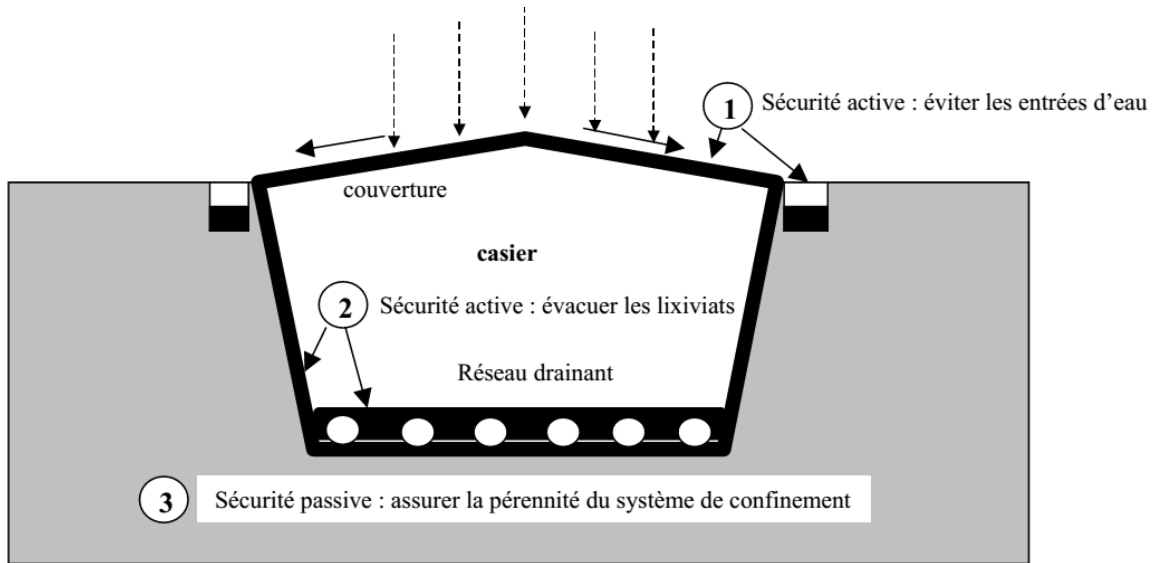


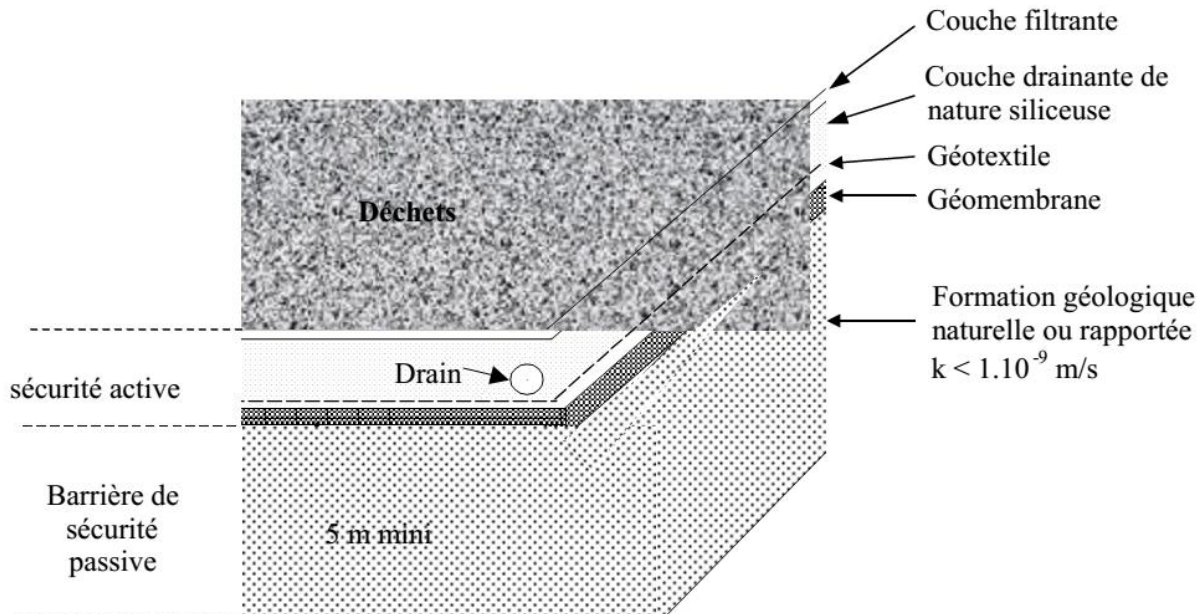
Figure I.01 : principe de confinement [8]

Tableau I.01 : Réglementations pour les installations de stockage des déchets. (Van Impe et Bouazza, 1996 ; Cazeaux, 2001)

pays	Déchets ménagers				Déchets spéciaux			
	fond		Couverture		Fond		Couverture	
	e(m)	k (m/s)	e(m)	k (m/s)	e(m)	k (m/s)	e(m)	k (m/s)
C E	1	1.10-9	nd	nd	5	1.10-9	nd	nd
Allemagne	0,75	5.10-10	0,5	5.10-9	1,5	5.10-10	0,5	5.10-10
Autriche	0,5	5.10-10	0,4	1.10-9	0,5	5.10-10	0,5	1.10-9
Danemark	0,5	1.10-10	0,5	1.10-10	1	nd	nd	nd
France	&1	1.10-10	1	1.10-9	5	1.10-9	1	1.10-9
Portugal	1	nd	nd	nd	1	nd	nd	nd
Suisse	0,8-10	1.10-9	nd	nd	1	nd	nd	nd
USA	0,6	1.10-9	nd	nd	0,9	1.10-9	0,45	1.10-9

Dans le cas des déchets ménagers et assimilés, le guide Algérien pour la conception de CET des déchets ménagers 2005, indique que la sécurité passive doit présenter, un coefficient de perméabilité inférieur à  $10^{-9}$  m/s sur au moins 1m.

Pour les déchets inertes, la réglementation algérienne (2009) indique que la barrière de sécurité passive doit avoir un coefficient de perméabilité inférieur à  $10^{-6}$  m/s sur une épaisseur inférieure ou égale à 1m.



**Figure I.02 : Coupe schématique de la double barrière de sécurité préconisée pour le stockage des déchets [8]**

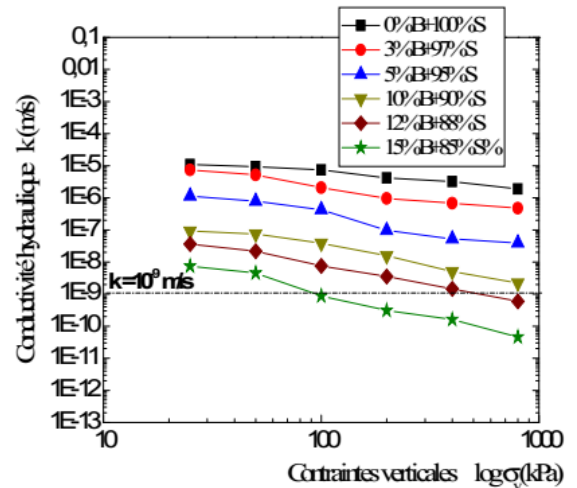
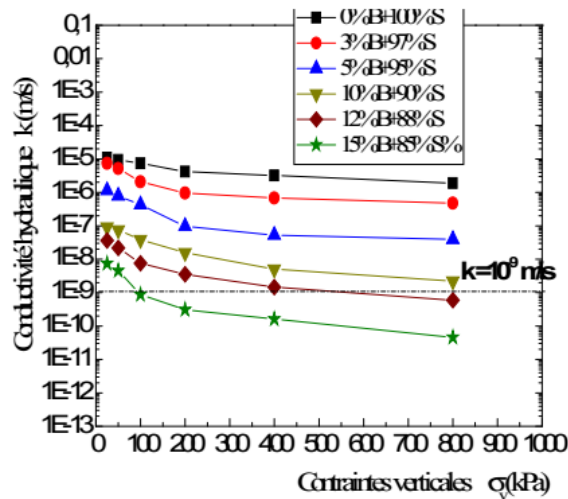
**I.10.2 Les couches sable-bentonite (s/b) :** Lorsque les sols en place sont trop grossiers pour être utilisés comme couche étanche et qu'il n'y a pas d'argile compactable disponible à proximité, une solution consiste à utiliser un mélange sable-bentonite (s/b).

Les expériences technique et scientifique indiquent qu'en mélangeant un matériau granulaire avec une argile active comme la bentonite, on obtient un mélange de faible perméabilité qui est mécaniquement stable et ceci en dépit de la nature contrastée des propriétés des constituants en terme de dimension des grains et de l'activité chimique [1].

Les pourcentages de bentonite utilisés varient généralement entre 3 % et 15 % (**Thériault, 2000**)

Les essais préliminaires basés sur le critère de perméabilité (essais œdométriques) ont fait apparaître que la formulation composée de 85 % de sable de dune et 15 % de bentonite (S85B15) satisfait ce critère pour la conception des barrières ouvragées des fonds d'écet [4].

## Essai de perméabilité



Conductivité hydraulique des mélanges S/B en fonction de la contrainte verticale appliquée [4]

## Essai de cisaillement :

	0 %B	3 %B	5%B	10 %B	12 %B	15 %B
<b>Wopt (%)</b>	9.7	10.5	11.5	12.8	14.0	15.2
<b>C(kpa)</b>	13	18	22	33	41	57
<b>Φ (degré)</b>	43	39	35	31	29	26

## Caractéristiques mécaniques des mélanges sable de dune-bentonite [4]

L'angle de frottement des mélanges diminue avec le pourcentage de bentonite additionné, par contre la cohésion augmente. La diminution continue de l'angle de frottement s'explique par la décroissance de la fraction sableuse (génératrice de frottement) ainsi que par l'augmentation de la quantité d'eau qui réduit les frottements.



### **I.11. Choix de matériaux :**

La bentonite est un matériau de base pour la réalisation des barrières étanches composées de mélange sable – bentonite

Le matériau doit d'abord être identifié et répondre aux critères principaux de nature, d'ouvrabilité et de perméabilité.

Pour cela, les matériaux doivent satisfaire aux conditions suivantes (*d'après le Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour C.E.T, Marcoen et al. 2001*) :

#### **I.11.1 : Critères de nature :**

Granularité :

> 15 % de passant à 2  $\mu\text{m}$  (fraction argileuse)

> 30 % de passant à 60  $\mu\text{m}$

< 10 % de refus à 10 mm

Pas d'élément > 50 mm

-fraction argileuse contenant plus de 10 % de gonflants ;

-CEC / % < 2  $\mu\text{m}$  doit être > 0.3 ;

#### **I.11.2 Critères d'ouvrabilité :**

-limite de liquidité < 80%

-indice de plasticité supérieur à 10% et inférieur à 40%

-courbe Proctor donnant moins de 5% de variation de compacité pour 2.5% de variation de teneur en eau de part et d'autre de l'optimum Proctor

-épaisseur : 5 couches de 20 cm  $\pm$  5 cm après compactage, chacune, épaisseur totale, 1m (guide Algériens pour la conception de C.E.T des déchets ménagers 2005)

### **I.11.3 Critères de perméabilité :**

-Le coefficient de perméabilité, mesuré pour trois compacités dans l'intervalle de  $\pm 2.5\%$  autour de l'optimum Proctor, doit être inférieur ou égal à  $1.10^{-9}$  m/s. Ce chiffre est valable dans le cas d'utilisation du matériau en barrière d'étanchéité.

-Pour les couvertures, le coefficient de perméabilité est fixé pour chaque cas d'application

-Dans le cas où le matériau satisfait à ces premières conditions, les essais de détermination des autres caractéristiques permettent d'établir les corrélations et de caractériser la résistance et la tenue dans le temps.

### **I.12. Caractéristiques des matériaux naturels utilisés pour la mise en œuvre des barrières étanches :**

Un certain nombre d'essais permet de déterminer les paramètres d'état et de nature d'un sol, ainsi que son comportement mécanique et hydraulique. Ces paramètres permettent la classification des matériaux.[8]

**I.12.1 Les paramètre de nature :** Les paramètres de nature correspondent à des caractéristiques intrinsèques du matériau. Ce sont des caractéristiques qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps, ni au cours des différentes manipulations que subit le matériau lors de sa mise en œuvre. Ces paramètres de nature comprennent :

- La granulométrie.
- L'argilosité.
- La teneur en carbonate de calcium.

**I.12.2 Les paramètre d'état :** Les paramètres d'états ne dépendent pas du sol mais de l'environnement et des « manipulations » qu'il aura subies. Les paramètres d'état comprennent :

- La teneur en eau
- Les poids volumiques secs et humides

**I.12.3 Le comportement hydraulique :** Le comportement hydraulique du sol est caractérisé essentiellement par la perméabilité, notée **k** et exprimée en **m/s**. Ce paramètre est obtenu à

l'aide de l'essai de perméabilité qui peut s'effectuer en laboratoire à l'aide de l'appareil triaxial, de l'œdomètre ou du perméamètre à paroi rigide.

### **I.13. Traitements des matériaux constituant la barrière étanche :**

Devant la difficulté à trouver des formations argileuses homogènes, d'extension suffisante et présentant des caractéristiques mécaniques appropriées pour y implanter des sites destinés au stockage des déchets, des solutions de traitements peuvent être envisagées, soit pour le sol naturel, soit pour les matériaux rapportés. [8]

Les traitements visent essentiellement à améliorer :

- Soit les paramètres de comportement hydraulique (perméabilité).
- Soit les paramètres de comportement mécanique (stabilité des talus).
- Voire les deux.

Pour améliorer le comportement hydraulique d'un matériau naturel, la solution de traitement la plus couramment retenue passe par l'adjonction de bentonite (**Haddour, 1993 ; Didier et al. 1996**). L'ajout de quelques pourcents de bentonite améliore nettement les performances hydrauliques du matériau que l'on souhaite traiter .A titre d'information, le gonflement d'une bentonite sodique est de 13,8 fois alors qu'il est limité à 5 fois au maximum pour la bentonite calcique. Cette propriété tient à une capacité d'échange cationique plus élevée qui favorise les processus d'hydratation par gonflement des espaces interfoliaires.

### **I.14. Rappels sur les sols argileux**

#### **I.14.1 Minéralogie et propriétés :**

##### **I.14.1.1 Définition des argiles :**

Les argiles sont des phyllosilicates hydratés formés par l'association de feuillets élémentaires qui s'accrochent entre eux pour former des éléments dénommés empilements par certains auteurs (**Push et al, 1999**), ou cristallites par d'autres (**Tessier & Grimaldi, 1993**). L'espace entre deux feuillets est appelé espace interfoliaire. Ces cristallites se rassemblent par des dispositions face-face pour former une particule argileuse. Dans le cas des smectites calciques, les empilements de cristallites laissent des espaces libres au sein des particules,

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium). Les couches structurales sont à leurs tours formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxyles en disposition hexagonale ou compacte (**figure 03.1**) [4]

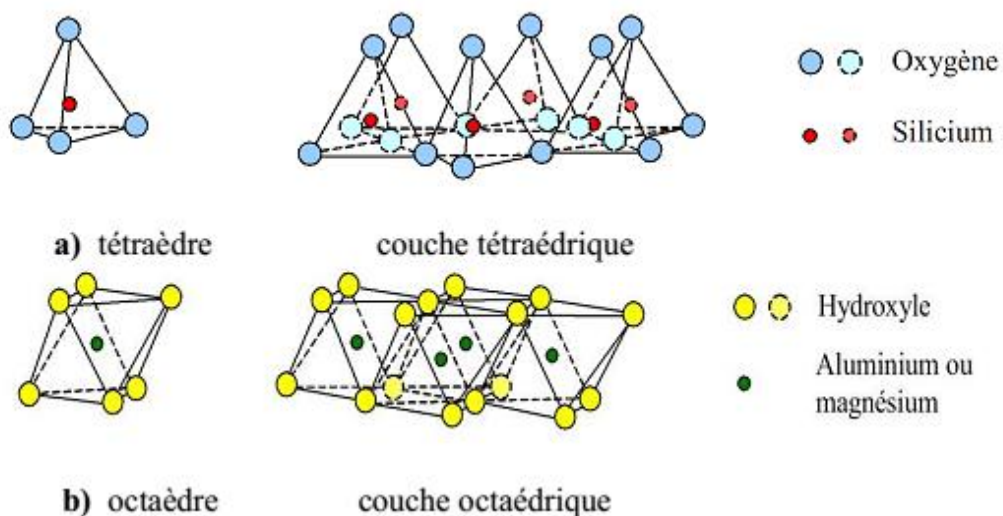
#### I.14.1.2 Structure des argiles :

##### a) Unité structurale tétraédriques

L'unité structurale tétraédrique est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygène ( $O^{2-}$ ) enserrant un ion de silicium ( $Si^{4+}$ ), équidistant de chacun d'eux. Ce tétraèdre est matérialisé par la présence d'une cavité comprise entre trois sphères en contact, d'une couche hexagonale d'oxygène, et une sphère de la couche contiguë d'oxygène. **Figure03.a.I** [9]

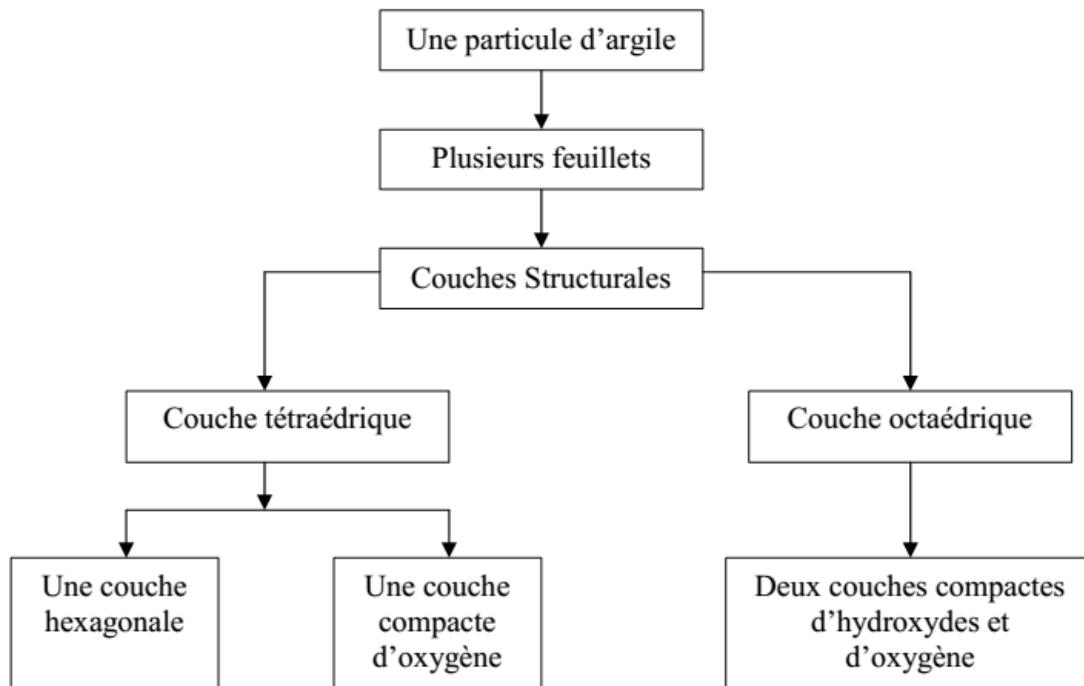
##### b) Unités structurales octaédriques

L'unité structurale octaédrique est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium ( $Al^{3+}$ ) ou de magnésium ( $Mg^{2+}$ ) est équidistant aux six hydroxydes ( $OH^-$ ) aux sommets. Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes. **Figure03.b.I**



**FigureI.03 : Couches tétraédriques et octaédriques [9]**

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant **Figure04.I** :



**Figure I.04 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [10]**

**Principaux groupes de minéraux argileux :**

Parmi les principales argiles monocouches évoquées dans la littérature sont : la Kaolinite, la Montmorillonite et l'Illite.

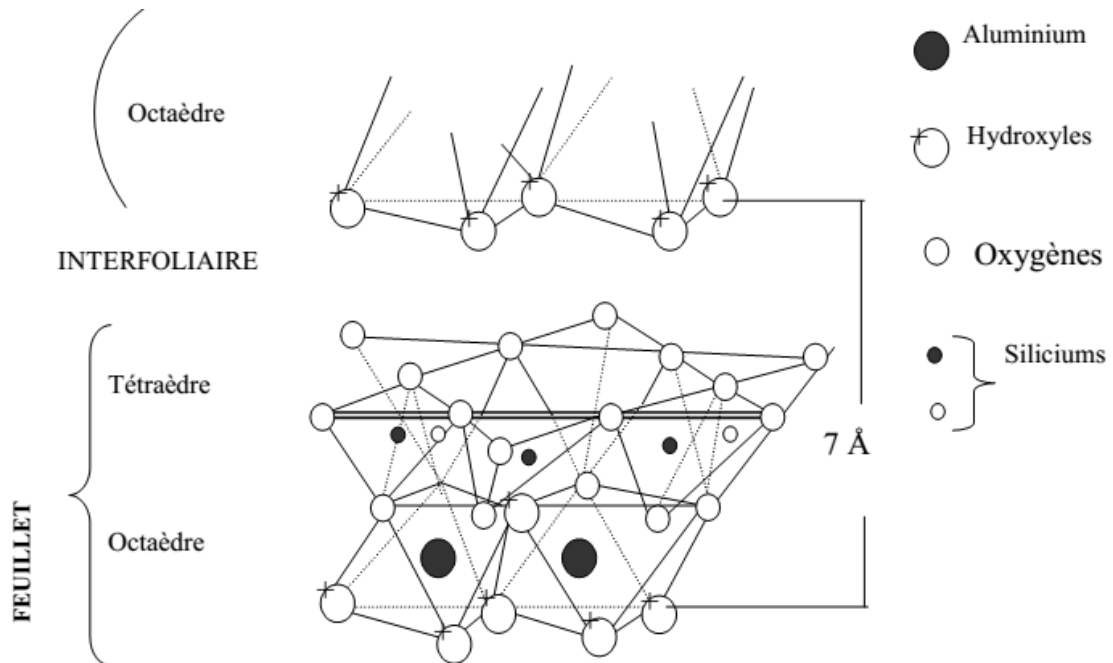
**a) Kaolinite**

La Kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). A cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base, la Kaolinite est considérée comme un minéral argileux **1:1**

La formule générale d'un feuillet de Kaolinite est donnée par la formule suivante (**cité par Hafsi, 1993,**)

Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet octaédrique ne forment qu'une seule couche. Cette couche à une épaisseur d'environ 7 Å (0.72nm), les couches de bases successives sont maintenues ensemble par les liens hydrogène formés entre les hydroxydes du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygènes du feuillet en tétraèdre. Les liens

d'hydrogènes sont très forts, ils empêchent l'hydratation, ce qui permet un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension. Un cristal de Kaolinite peut être constitué d'une succession de 70 à 100 couches (figure05).



**Figure I.05 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite**  
D'après Lambe (1953) [11]

**b) La montmorillonite :**

Le feuillet de la montmorillonite parfois appelée smectite, est un minéral d'argile important composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'aluminium. La montmorillonite est désignée comme un minéral **2:1**, le feuillet octaédrique se trouve entre deux feuillets tétraédriques.

La formule générale de la montmorillonite est la suivante (cité par Hafsi, 1993)

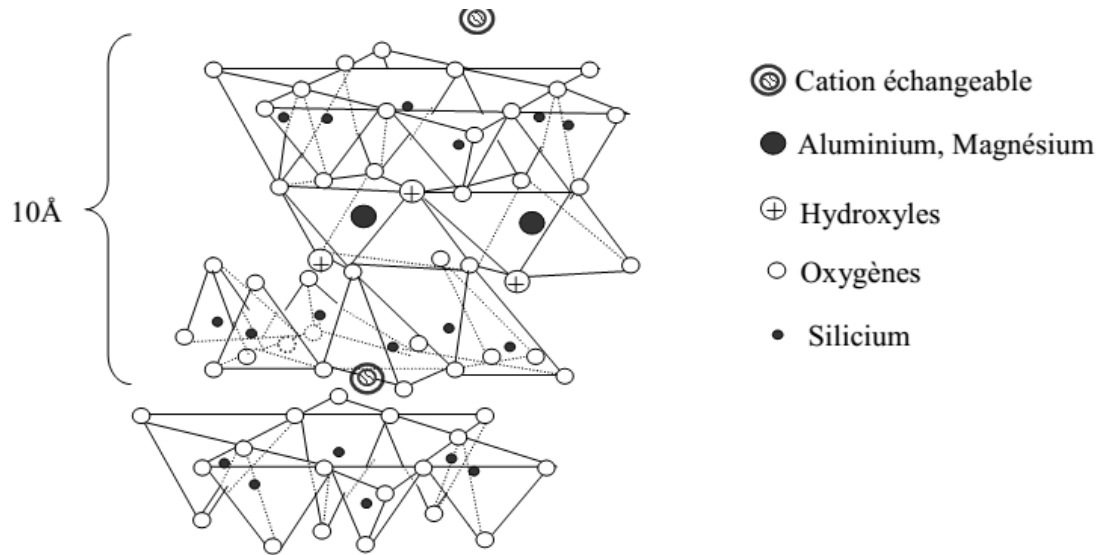
L'épaisseur de chaque couche **2:1** est d'environ 10 Å (0.96nm).

Les forces de Van der Waal qui soudent les sommets des feuillets de silice sont faibles, cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans le feuillet en octaède. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. Bien que les cristaux de montmorillonite soient très petits,

ils ont une grande affinité avec l'eau. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leurs teneurs en eau augmentent ; les pressions de gonflement qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et aux pavages

**Figure 06.I**

$n [(Al_{67.1}Mg_{33.0}Si_{40}O_{10}(OH)_2)^n]$

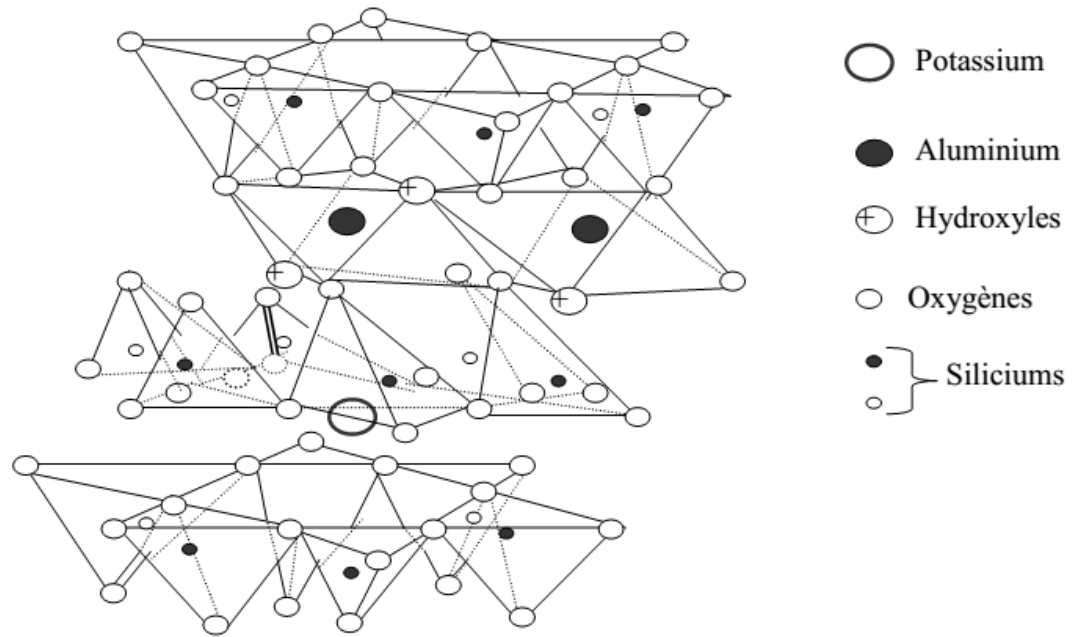


**Figure I.06 : Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite.**

**D'après Grim (1959)[12]**

**c) L'illite :**

C'est une autre composante importante des sols argileux, sa structure est analogue à celle de la montmorillonite **Figure 07.I**, mais des ions de potassium (K<sup>+</sup>) sont intercalés entre les feuillets tétraédriques. Le potassium sert de lien entre deux feuillets. La liaison entre les feuillets de silice est relativement forte, les molécules d'eau ne peuvent plus s'intercaler entre les feuillets.



**Figure I.07 : Vue isométrique de la structure atomique de l'illite (cité par Bengraa, 2004) [13]**

#### **I.14.1.3 Définition de la bentonite :**

La bentonite est une variété d'argile découverte en 1888 dans le Wyoming USA du nom de Fort Béton (Garcia et Parigot, 1968). Selon Van Damme 2002, le mot "Bentonite" est en fait un terme commercial désignant une argile dont la teneur massique en montmorillonite dépasse 50%. Le reste des composants étant du quartz, des feldspaths, de la calcite, d'autres argiles en moindre quantité, etc... Ceci variant bien sûr considérablement d'un site à l'autre. On comprend donc aisément qu'il n'existe pas une bentonite mais des bentonites dont les compositions chimiques et les propriétés diffèrent. C'est ce qui a amené l'ANDRA (agence nationale de gestion des déchets radioactifs) à réaliser une étude poussée afin de sélectionner le matériau qui correspond le mieux à ses exigences (référentiel matériaux 2001). Parmi les bentonites récurrentes de la littérature sur le thème du stockage de déchets, on trouve la MX80 (étudiée par l'ANDRA et l'agence SKB en suède), la bentonite Kunigel (étudiée par les japonais), la bentonite Almería (utilisée par l'ENRESA, homologue espagnol de l'ANDRA). Les bentonites utilisées en Algérie (Bental 2002) sont : bentonite de Roussel (hammam Boughrara, Maghnia) et celle de M'zila (Mostaganem) et de sidi Makhlof (Laghouat). [4]

#### **I.14.1.4 Les type de bentonites :**



Il existe deux types de bentonites : [14]

**La bentonite à base de sodium** : qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau. Cette propriété est mise en valeur dans les mastics pour l'enfouissement de matières polluantes dans le sol. Elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et la recherche géothermique.

**La bentonite à base de calcium** : qui ne possède pas ces propriétés de gonflement, a des applications parapharmaceutiques dont les résultats restent à prouver, notamment dans le domaine du système digestif. Des tribus indigènes d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Australie ont longtemps employé l'argile de bentonite pour cet usage.

## **I.15. Microstructure et comportement avec l'eau :**

### **I.15.1 Le feuillet :**

Les feuillets sont les unités structurales de base définissant la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique. Le feuillet représente la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y. Il est assimilable à un disque ou à une plaquette, possédant des dimensions latérales de l'ordre du micron, et faisant à peu près un nanomètre d'épaisseur. Ces plaquettes sont considérées comme souples et relativement déformables. L'anisotropie des feuillets est très importante. Dans la famille des smectites, la charge d'un feuillet varie de 0,2 à 0,6 électron par maille, selon la localisation des substitutions et le taux d'occupation des couches octaédriques. La montmorillonite possède environ 0,3 à 0,4 électron par maille [Le Pluart(2002)]. Comme nous l'avons dit plus haut, les cations compensateurs à la surface des feuillets de montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium. On emploie généralement les termes de montmorillonite "calcique" et de montmorillonite "sodique" pour faire référence à la nature de ces cations.[1]

#### **La particule primaire :**

Les particules constituent le premier niveau d'organisation. Elles sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet. Si on considère les principales espèces minéralogiques, la structure de la particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets peut se présenter suivant trois grands types d'empilements : (i) *Empilement ordonné* où les feuillets sont empilés les uns sur les autres

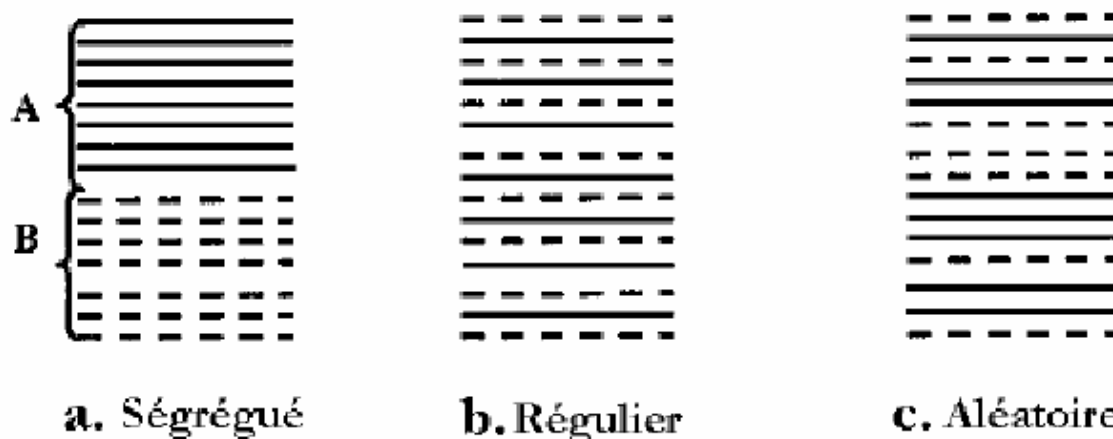
dans un ordre parfait. C'est le cas des phyllosilicates dont l'espace interfoliaire est vide ou anhydre (plutôt pour les kaolinites ou illites). (ii) *Empilement semi-ordonné* (ou désordre translationnel). Dans ce cas, les feuillets successifs présentent des translations "semi définies". Ils sont séparés par quelques molécules d'eau, l'épaisseur de la particule est variable et dépend du degré d'hydratation. Ils peuvent glisser latéralement les uns sur les autres. (iii) *Empilement désordonné* (ou désordre turbostratique). Dans ce cas, des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans tout l'édifice. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule [Pons (1980) ; Pédro (1994)].

Il existe un nombre important de termes pour désigner les particules. Le plus petit élément cristallin (le plus petit volume cohérent) produisant des interférences dans un phénomène de diffraction X a été appelé par Mering et Oberlin (1971) "particule primaire". La particule plus grossière, obtenue après une dispersion dans certaines conditions, constituée par l'association de plusieurs particules primaires, a été désignée par les mêmes auteurs par le terme de "particule libre". La montmorillonite est généralement constituée par l'association de plusieurs particules primaires, dont l'extension latérale est particulièrement importante [Pons *et al.* (1982) ; Ben Rhaiem *et al.* (1986) ; Tessier (1984)]. Ces auteurs avaient été amenés à concevoir une juxtaposition, par les bords, des cristallites présentant une légère désorientation les unes par rapport aux autres. Toujours dans le cas de la montmorillonite, Aylmore et Quirk (1971) avaient introduit la formation, par chevauchement face-face à partir de particules libres ou primaires, d'édifices à extension latérale considérable : les "domaines". Si nous nous limitons à la dimension des particules dans la direction perpendiculaire au plan des feuillets, l'épaisseur de ces particules a été évaluée, par l'analyse classique aux Rayons X des réflexions 001, à une dizaine de feuillets maintenus par les forces électrostatiques attractives entre les ions compensateurs et les feuillets. Elle fait généralement 8 à 10 nanomètres d'épaisseur. La taille des particules est à peu près constante, c'est-à-dire que lorsqu'une montmorillonite est gonflée, l'espace interfoliaire est augmenté et il y a moins de feuillets dans une particule [Mathieu-Sicaud et Mering (1951) ; Le Pluart (2002) ; Jozja (2003)]. D'autre part, la montmorillonite présente des substitutions isomorphes de type d'octaédrique [Luckham et Rossi (1999)]. Ce type de localisation des charges empêche les cavités hexagonales de deux feuillets adjacents de se superposer. L'arrangement global des feuillets, au sein d'une particule primaire de montmorillonite, est donc turbostratique. Ils présentent un désordre dans le plan latéral mais sont tous perpendiculaires à la direction z [Didier

(1972)]. Cela a été bien confirmé dans le cas des montmorillonites calciques fortement hydratées en utilisant l'analyse de la diffusion aux petits angles et la microscopie électronique à transmission [Pons *et al.* (1982) et (1987)]. Ces auteurs ont défini la particule comme étant un empilement parallèle quel que soit le degré d'ordre dans la répétition de ces feuillets à l'intérieur de l'empilement. Comme nous le verrons plus loin, ces particules constituent les "parois" du réseau de pores développé au sein de l'échantillon et ont une épaisseur extrêmement variable en fonction de la teneur en eau de l'échantillon. Dans la littérature, on trouve souvent des travaux sur des bentonites constituées par des minéraux non homogènes dites "inter stratifiées" [Caillère *et al.* (1982) ; Laribiet *al.* (2005)]. Ces particules d'argile sont constituées par la superposition de feuillets qui sont : (i) soit de nature différente (illite-smectite, vermiculite-smectite, etc.), (ii) soit de même nature mais qui diffèrent par leurs remplissages interfoliaires comme le cas de la montmorillonite hydratée où l'espace interfoliaire peut contenir une, deux, trois ou quatre couches d'eau, (iii) ou par la nature et le remplissage interfoliaire à la fois, comme le cas de l'illite-smectite avec des feuillets de smectite dans des états d'hydratation variables [Ben Rhaiem *et al.* (1986) ; Jozja (2003)]. Parmi ces minéraux, les interstratifiés illite/smectite sont les plus étudiés. On les trouve dans des bentonites couramment utilisées dans les boues de forage [Jozja (2003) ; M'bodjet *al.* (2004) ; Laribiet *al.* (2005)]. Dans le cas des minéraux inters stratifiés, l'empilement se caractérise essentiellement par le mode de succession des feuillets de nature différente suivant la normale à leur plan. Ainsi si on considère un minéral interstratifié qui contient deux types de feuillets A et B, on peut envisager essentiellement trois types d'inter stratifiés : (i) *ségrévés* : une particule donnée présente des séquences AAABBB (figure 08.a). Le diagramme de diffraction X est la superposition des diagrammes produits par chacun des constituants, (ii) *Réguliers* : une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB (figure 08.b). Une période de surstructure perpendiculairement au plan des feuillets égale à la somme des épaisseurs des deux feuillets apparaît ( $d_T = d_A + d_B$ ). Le diagramme de diffraction X comporte alors des réflexions basales de surstructure correspondant à  $d_T$ , (iii) *Aléatoires* : tous les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment (figure 08.c). Dans ce cas, les diagrammes de diffraction X présentent des réflexions (001) irrationnelles [Mering (1949) ; Pédro (1994)] et leur interprétation est très délicate. [1]

### I.15.2 L'agrégat :

C'est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions. Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns comme il est montré sur la figure. 1.6 [Le Pluart (2002)]. Il s'agit d'un assemblage de particules dont l'arrangement est gouverné par le type de forces résultant des interactions entre particules (et du degré de compaction). En effet, lorsque les

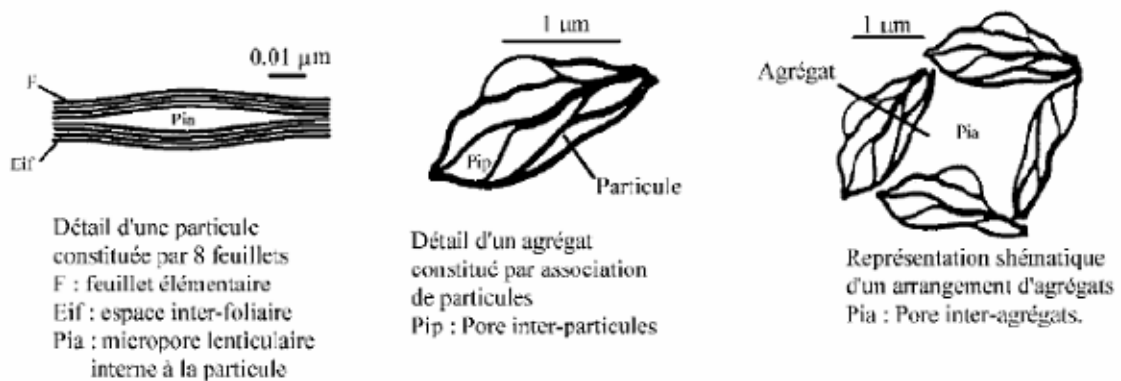


**Figure I.08 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité interstratifiée.**

Forces répulsives sont dominantes, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite dispersée. Ces particules s'assemblent au sein d'agrégats, plus au moins denses selon la texture et le nombre des particules, ainsi que les distances entre celles-ci. Tessier (1975), en prenant pour référence les données de Mering et Oberlin (1971) et de Van Olphen (1963), portant sur les minéraux expansibles, a proposé une nomenclature pour nommer les différents modes d'association des particules (détaillés plus loin) : l'agrégat constitué de plusieurs particules primaires a été nommé *unité morphologique* ; le dernier niveau d'organisation est constitué par les *super-agrégats*, où se regroupent les agrégats. Selon la quantité d'eau présente au sein du système et la nature de l'argile considérée, l'organisation sera plus ou moins variée. Il en résulte différents types de structuration comme, par exemple, dans le cas de la montmorillonite, qui possède des unités morphologiques très déformables. Ces déformations sont probablement plus aisées que dans les autres phyllosilicates, même si elles sont relativement limitées du fait que les particules possèdent une certaine rigidité [Luckham et Rossi (1999) ; Jozja (2003)]. On en conclut que l'organisation de la microstructure de la bentonite (du feuillet à l'assemblage d'agrégats) ne peut être interprétée que si l'organisation de l'espace poral est prise en considération. La dimension, la forme et la distribution des

espaces poraux dépendent de la granulométrie de l'argile, de son caractère gonflant et aussi du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise. Touret *et al.* (1990) ont décrit l'existence de trois types d'espaces liés à l'organisation de la phase solide dans des argiles (Figure 09)

(i) *L'espace interfoliaire* sépare deux feuillets dans un empilement. Il est généralement occupé par les couches d'eau adsorbée (1 à 4) et des actions échangeables, et son épaisseur moyenne est comprise entre 1,5 et 2,5 nm.



**Figure I.09 : Les différents types d'espaces poraux [Touret *et al.* (1990)]**

(ii) *L'espace interparticulaire* séparant les particules argileuses qui forment les agrégats. Il est susceptible de diminuer jusqu'à atteindre la valeur de l'espace interfoliaire pour les argiles fortement compactées [Pusch (1982)]. Dans ce type d'espace, la double couche, qui sera traitée en détail plus loin, peut se développer. Les micropores lenticulaires sont intérieurs aux particules, à l'échelle de quelques nm. (iii) *L'espace interagrégat* a une section moyenne comprise entre 1,6 et 16 nm où l'eau circule librement (eau libre) limitant les effets électrostatiques de la double couche (fig09). [1]

### I.15.3 Le système bentonite-eau :

Les particules de la bentonite présentent une grande affinité pour l'eau qui s'exprime d'une part par la quantité d'eau qu'est susceptible de retenir l'argile et d'autre part par l'énergie avec laquelle cette eau est retenue. Ce phénomène d'ordre capillaire résultant de la granulométrie fine des particules ainsi que de la présence de charges à la surface des feuillets vont contribuer à accentuer les interactions bentonite-eau. Pour comprendre cela, on

s'intéresse à l'échelle des particules où les feuillets sont séparés par un nombre variable de couches d'eau (entre 0 et 4) et des pores lenticulaires de l'ordre de 30 à 50 Å [Touret *et al.* (1990)]. Les particules sont plus ou moins épaisses, selon la nature du cation compensateur et les propriétés physico-chimiques de la bentonite. Les particules sont séparées les unes des autres par une quantité d'eau, relativement importante, mais elles ne sont cependant pas Indépendantes. Du fait de la très grande étendue des feuillets dans leur plan et des forces d'attraction inter feuillet, il se forme des connections entre particules par rapprochement de deux zones de feuillets extérieurs à deux particules adjacentes, ou par interaction entre feuillets que l'on détaillera par la suite [Luckham et Rossi (1999)]. Comme cela a été expliqué plus haut, les particules ainsi connectées forment des agrégats ou des super-agrégats suivant la densité des suspensions. Cette organisation est caractéristique de ce qu'on appelle "*milieu granulaire*". Lorsque l'hydratation se poursuit par le gonflement des particules, on désigne l'état de la bentonite hydratée sous le terme de "*gel*". Ces types de gels sont caractérisés par des particules très lâches constituées d'un nombre faible de feuillets (en moyenne 5), voire des feuillets isolés, situés à des distances allant de 30 à quelques centaines d'Å L'ensemble forme un réseau très souple, aux propriétés importantes de viscosité et de thixotropie [Glaeser (1953) ; Jozja (2003)]. [1]

### **I.16.Conclusion :**

Les CET présentent l'ultime alternative pour prémunir l'environnement des dangers de contamination des eaux souterraines par l'infiltration des lixiviats et des émissions des gaz nocifs.

La réalisation de ces équipements (CET) obéit à des exigences règlementaires relatives à la conception, mode de réalisation, nature des matériaux utilisés et performances hydrauliques de leurs fonds et flancs.

## Chapitre II : Caractéristique des matériaux utilisés

### II.1.Introduction :

Parmi les nouvelles techniques utilisées dans la réalisation de la barrière des centres d'enfouissements techniques c'est l'utilisation des couches d'argiles en fond dès CET pour obtenir une protection des sols contre les déchets pour éviter les contacts entre les deux.

Parmi les couches utilisées c'est les couches à base de sable de dune traitée par la bentonite

Pour obtenir un mélange qui donne une perméabilité parfaite inférieure à  $10^{-9}$  selon la réglementation algérienne, avec une résistance mécanique idéal.

Avant d'étudier le comportement hydrique et mécanique de mélange sable de dune et bentonite pour la barrière étanche nous avons présente une identification totale pour les matériaux utilisé, les matériaux utilise dans ce mélange c'est sable de dune de wilaya de Laghouat (région de sidi makhlouf) et bentonite de la wilaya de Mostaganem.

### II.2. Bentonite de Mostaganem

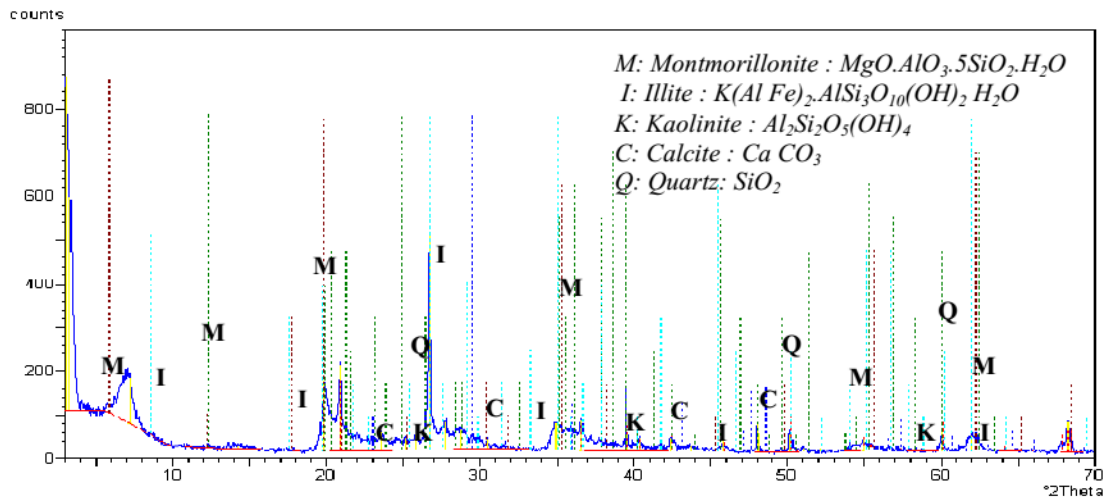
#### II.2.1 Analyses minéralogiques :

Le diffractomètre aux rayons X a été utilisé dans cette analyse afin de déterminer les différentes proportions de minéraux constituant l'échantillon. L'essai est effectué au laboratoire de physique de l'université Amar Teledji de Laghouat. L'appareil utilisé est un diffractomètre X'PERT PRO couple a un système informatique, permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis (**Figure 01.II**).



**Figure II.01 : Diffractomètre X'PERT PRO**

Sur le diffractogramme de l'échantillon de bentonite, le spectre révèle la présence du quartz, de calcite, des traces de kaolinite et d'illite (**Figure 02.II**). Le minéral argileux prédominant étant la montmorillonite, l'échantillon considéré est bien une bentonite.



**FigureII.02 : Diffractogramme aux rayons X (DRX) d'un échantillon de bentonite de Mostaganem.[4]**

**II.2.2 Analyse chimique :**

Les analyses chimiques de la bentonite de Mostaganem ont été réalisées par le laboratoire national d'habitat et construction LNHC (Djelfa). La méthode de ces analyses consiste à prélever une quantité précise de bentonite, l'échantillon est étuvé à 50°C puis incinéré à 1000°C pour transformer les constituants de la bentonite en oxydes dont les teneurs sont évalués en pourcentage massiques. Les résultats sont présentés dans le tableau 1

**Tableau II.01 : Composition chimique de la Bentonite de Mostaganem.[4]**

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF
<b>Bentonite</b>	<b>63.00</b>	<b>16.37</b>	<b>2.52</b>	<b>7.26</b>	<b>1.65</b>	<b>4.1</b>	<b>2.45</b>	<b>2.65</b>



Il ressort de l'examen des résultats de la composition chimique de la bentonite de Mostaganem qu'elle présente un silicate à tendance aluminique avec une forte teneur en SiO<sub>2</sub> (>50 %).

### II.2.3 Analyse granulométrique :

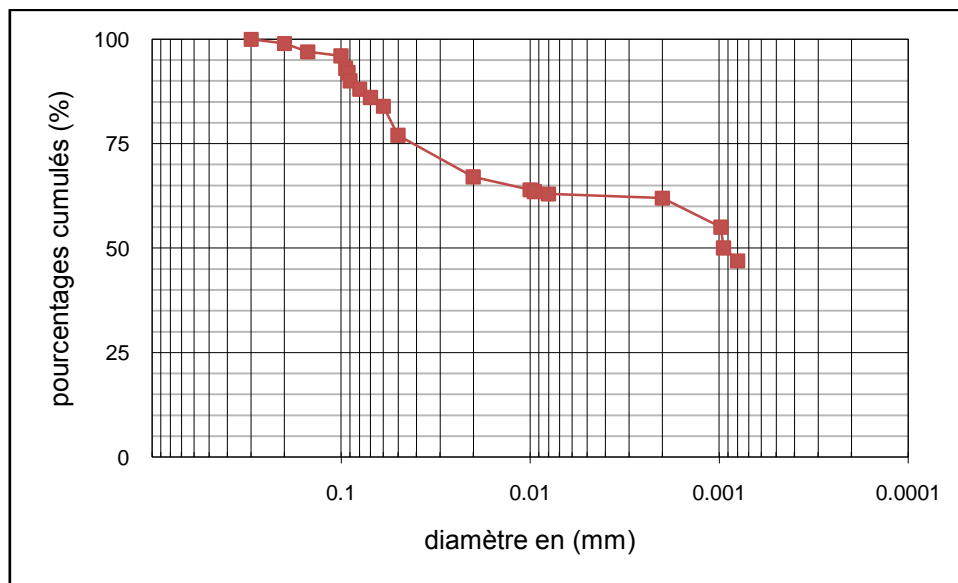
L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométriques s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions  $\geq 80\mu\text{m}$  (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056.

La sedimentometrie pour les particules de dimensions  $< 80\mu\text{m}$  qui complète la première.

Elle est effectuée selon la norme NF P94-057. Les résultats de cette analyse sont traduits par des courbes représentées dans la figure 3. On remarque que le taux des particules inférieures à  $2\mu\text{m}$  est de l'ordre de 62% (>50%) ainsi que le taux des particules inférieures à  $80\mu\text{m}$  est de l'ordre de 88 %, ce que nous indique que la bentonite de Mostaganem est une argile très fine.



FigureII.03 : Courbe granulométrique de la bentonite de Mostaganem

### II.2.4 Densité des grains solides :

Cet essai a pour but de mesurer le poids spécifique des sols au moyen du pycnomètre (condensateur de châtelet). Le poids spécifique d'un sol est le rapport du poids des grains solides à leur volume absolu.

La bentonite de Mostaganem présente une densité des grains solide de l'ordre de  $2,64 \text{ kN/m}^3$  ( $G_s = 2,64$ ). Avec :  $G_s = \gamma_s / \gamma_w$

### II.2.5 Essai Proctor Normal :

Cet essai normalisé (NF P 94-093), permet de reproduire au laboratoire les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactage d'intensités différentes : par l'essai Proctor Modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor

Normal (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette investigation.

Au laboratoire, le matériau est mis à l'étuve pendant 24 heures. On ajoute un poids déterminé d'eau. On compacte l'échantillon dans un moule Proctor ( $h = 11,7 \text{ cm}$  ;  $\phi = 10,2 \text{ cm}$ ) avec une énergie fournie par une dame (25 coups/couche), d'un poids déterminé (2,5 kg), tombant d'une hauteur constante (30,5 cm). On adjoint au moule une hausse mobile pour permettre de compacter jusqu'à 13 cm. On arase ensuite l'échantillon à 11,5 cm après enlèvement de la hausse. On détermine la teneur en eau du matériau, ce qui permet de calculer le poids volumique sec.

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure 7.

La bentonite présente une teneur en eau optimale de l'ordre de 30% et un poids volumique sec maximum de l'ordre de  $12,2 \text{ KN/m}^3$

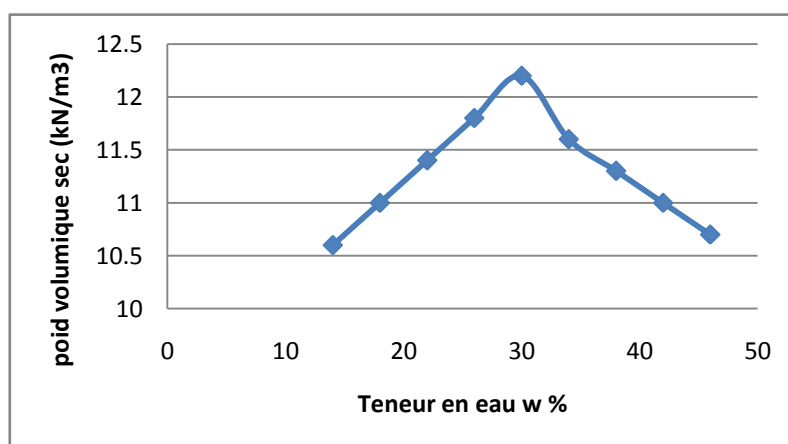


Figure II.04 : Courbe Proctor Normal de la bentonite de Mostaganem

## II.2.6 Essai au bleu de méthylène :

L'essai est réalisé selon la norme (NF P 94-068) et consiste à déterminer la quantité du bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire la surface des particules d'un matériau en suspension dans l'eau.

La capacité d'adsorption du matériau est déterminée à l'aide du test de la tâche. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tâche qui est le dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide en général incolore.

L'excès du bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif.

La valeur du bleu VB = Quantité du bleu adsorbée (cm<sup>3</sup>) / Poids sec de la prise

Une relation entre la surface spécifique totale (Sst) et la valeur de bleu de la phase argileuse VB (0/2 µm) a été mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982) :

$$Sst = 21 \cdot VB$$

Les résultats de la valeur au bleu de méthylène et de la surface spécifique totale de la bentonite sont indiqués dans le tableau 2.

**Tableau II.02 : Surface spécifique totale (Sst) de la bentonite**

	<i>VB</i>	<i>Sst (m<sup>2</sup>/g)</i>
<b>B</b>	20	420

D'après la classification de Lautrin (1987) basée sur la surface spécifique totale, la bentonite de Mostaganem est une argile Montmorillonite **calcique**.

**Tableau II.03 : Surfaces spécifiques totales (Sst) de quelques argiles**

<b>Argiles</b>	<b>Sst (m<sup>2</sup>/g)</b>
<b>Montmorillonite Na<sup>+</sup></b>	800
<b>Montmorillonite Ca<sup>++</sup></b>	300
<b>Illite</b>	40-60
<b>Kaolinite</b>	5-20
<b>Élément non argileux</b>	1-3

## II.2.7 Limites d'Atterberg :

Les limites d'ATTERBERG sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm), car se sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et en observer sa consistance.

### 1. Description :

Déterminer les états de consistance d'un sol. La limite de plasticité, la limite de liquidité et limite de retrait.

### 2. Norme :

Matériel nécessaire : plaque de verre, eau distillée, la coupelle de Casagrande

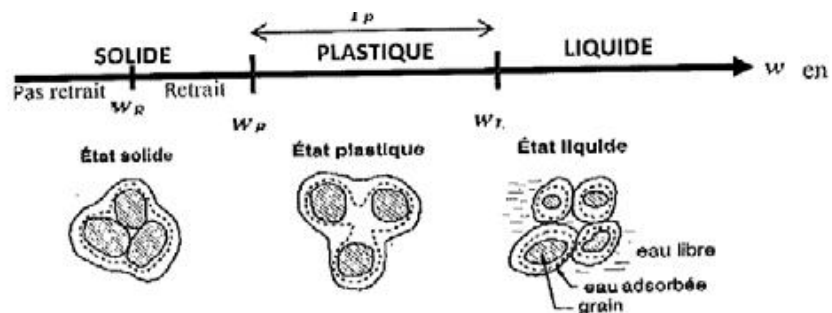


FigureII.05 : La coupelle de Casagrande.

### 3. Principe

La consistance d'un sol varie en fonction de la teneur en eau. Selon la teneur en argile et sable, le sol absorbera plus ou moins vite l'eau ajouté.

Le sol passera successivement de l'état solide à l'état plastique puis liquide.



## Figure II.06 : Etats de consistance d'un sol

### II.4. Limite de plasticité ( $W_p$ )

On prélève un peu le matériau mouillé. En faire une petite boulette, cette boulette, on va l'étirer sous la paume de la main afin de réaliser un cylindre de 3mm de diamètre et une longueur de 100mm. On sèche le matériau sous ventilateur, et on répète l'opération ci-dessus, jusqu'à ne plus obtenir ce cylindre. (Une partie matériau est mise à l'étuve pour en connaître sa teneur en eau.) – réaliser sur trois test.- moyenne arithmétique  $W_p = \text{Somme } (W\%)/3$



Figure II.07 : Essai de micro-poinçonnement

### II.5. Limite de liquidité ( $W_L$ )

A partir de la coupelle de Casagrande, on place du matériau dans celle-ci, on creuse une rigole avec l'outil de Casagrande. Puis on va compter le nombre de coup pour que les lèvres de cette rigole se referment sur 10mm.

On réalise l'essai sur différents séchage du matériau de sorte que le nombre de coup soit compris entre 15 et 35 coups. Il faut au moins 4 points.

A partir de ces limites, et par définition, on peut déterminer l'indice de plasticité noté :  $I_P$ .

$$I_P = w_L - w_p$$

Les mesures de ces limites sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau II.04 : Limites de consistance de la bentonite.

$w_L(\%)$	$w_p(\%)$	$I_P$
138	47	91

Selon le **GTR92** il s'agit bien d'une argile ( $I_p > 40$ ).

Skempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol. Cet auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ( $C < 2 \mu m$ ).

$$A = \frac{I_p}{c} = \frac{91}{60} = 1.52$$

Skempton a proposé la nomenclature suivante (Techniques de l'ingénieur, C.208) :

- Argiles inactives : les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.
- Argiles normales : qui ont une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
- Argiles actives : qui ont une activité comprise entre 1,25 et 2.
- Argiles très actives : qui ont une activité supérieure à 2.

D'après la proposition de skempton la bentonite de Mostaganem est une argile très active

### **II.3. Sable de dune :**

#### **II.3.1 Définition :**

La région de Laghouat est considérée comme une région saharienne située à 400 km au sud de la capitale ; la zone de provenance du sable de dunes est située aux environs de la ville de Laghouat (sidi Makhlouf).



Figure II.08 : Sable de dune de wilaya de Laghouat

### II.3.2 Analyses minéralogiques :

L'analyse par DRX du sable dunaire révèle la présence d'atomes *Si* et *O* ce qui correspond à la présence de l'espèce *SiO<sub>2</sub>* (silice). De plus le pourcentage atomique important de *Si* nous indique que *SiO<sub>2</sub>* est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques nous permettent d'établir que le sable dunaire contient aussi quelques traces, en comparaison avec *SiO<sub>2</sub>*, d'espèces calciques et magnésiques. [4]

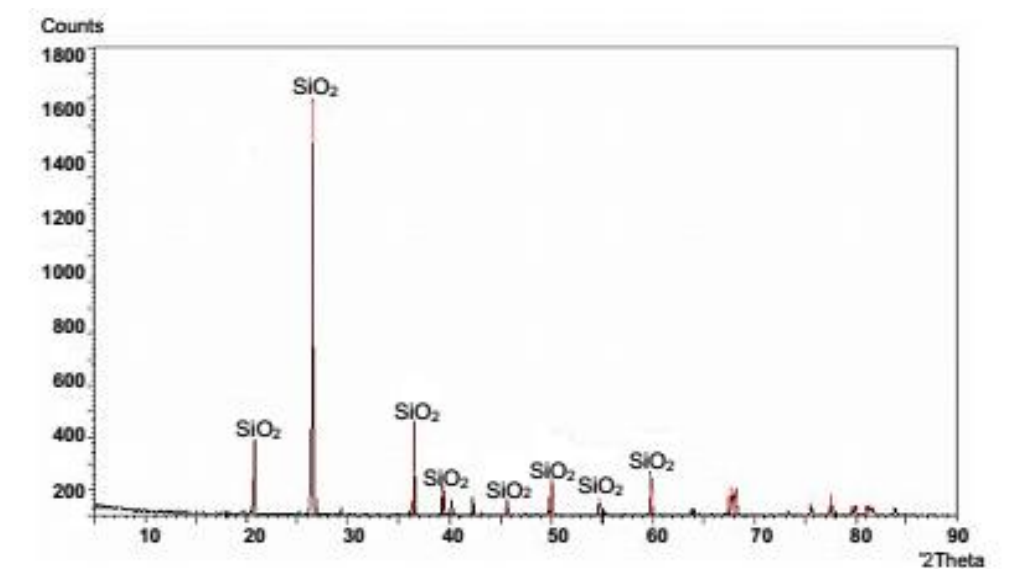


Figure II.09 : DRX du sable de dune[4]

### II.3.3 Analyse chimique :

Tableau II.05 : Analyse chimique de sable de dune[4]

	Symboles	Unite	Sable de dune
Résidu insoluble	SiO <sub>2</sub>	%	95,87
Sulfates	SO <sub>3</sub>	%	0,91
Chlorures	CL <sup>-</sup>	%	0,36
Carbonate de Calcium	CaCO <sub>3</sub>	%	2,5
Matières Organiques	MO	%	-----

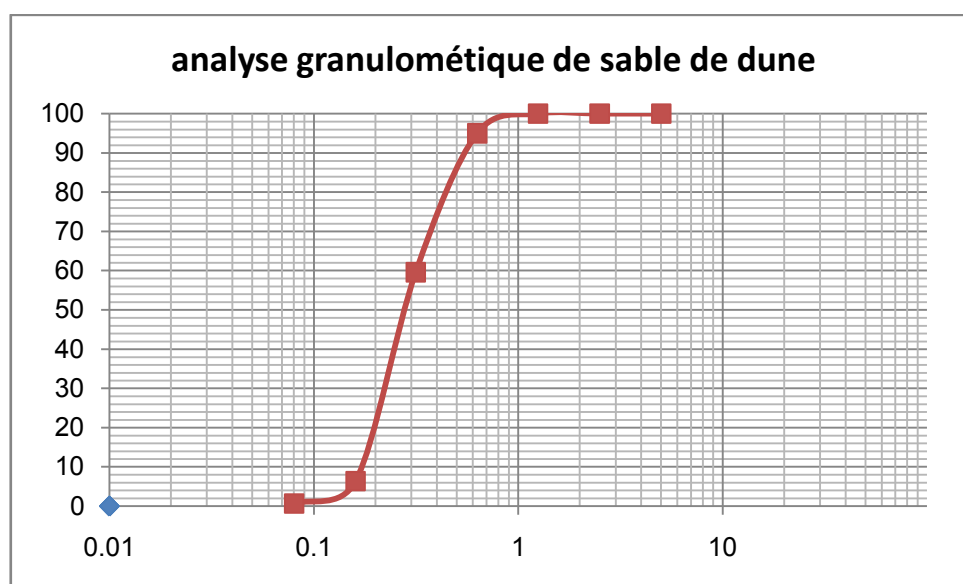
Le tableau II.05 montre que le pourcentage de silice est très élevé, donc il s'agit d'un sable siliceux.

### II.3.4 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique réalisée selon la norme NFP 94-056/1996 permet à déterminer la distribution dimensionnelle des grains de sable, comme s'est présenté sur la figure 3

**Tableau II.06 : l'analyse granulométrique de sable de dune**

tamis(mm)	masse retenu(g)	refus cumulé(g)	refus cumulé%	passant%
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.63	0	0	0	100
0.315	404	404	40	59.6
0.16	532	936	93.6	6.4
0.08	57	993	99.3	0.7
tare	3	996	99.6	0.4





### Figure II.10 : analyse granulométrique de sable de dune

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.35}{0.16} = 2.187$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} - D_{10}} = \frac{(0.22)^2}{0.35 - 0.16} = 0.25$$

$C_u$ : Coefficient d'uniformité.

$C_c$  : Coefficient de courbure.

Selon la Classification GTR92 notre sable est classé comme un **sable mal gradué** (plus de 50% des éléments >2mm,  $C_u < 6$ ).

#### II.3.5 Equivalent de sable :

L'essai réalisé selon la norme (NF P 18-598) l'objectif principale de cet essai c'est pour déterminer la propreté d'un sable. Les résultats sont présents dans le tableau suivant :

Equivalent de sable par vision	Equivalent de sable par piston
67.77%	62.51%

Selon la classification de LCPC le sable de dune est un sable propre.

#### II.3.6 Densité des grains solides :

Cet essai pour déterminer et mesure le poids spécifique des sols.

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} = \frac{500}{189} = 2.645.$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{2.645}{1} = 2.645.$$

$\rho_s$  : La masse volumique des grains.

$G_s$  : La densité des grains solide

La densité des grains solide de sable de dune égale 2.65.

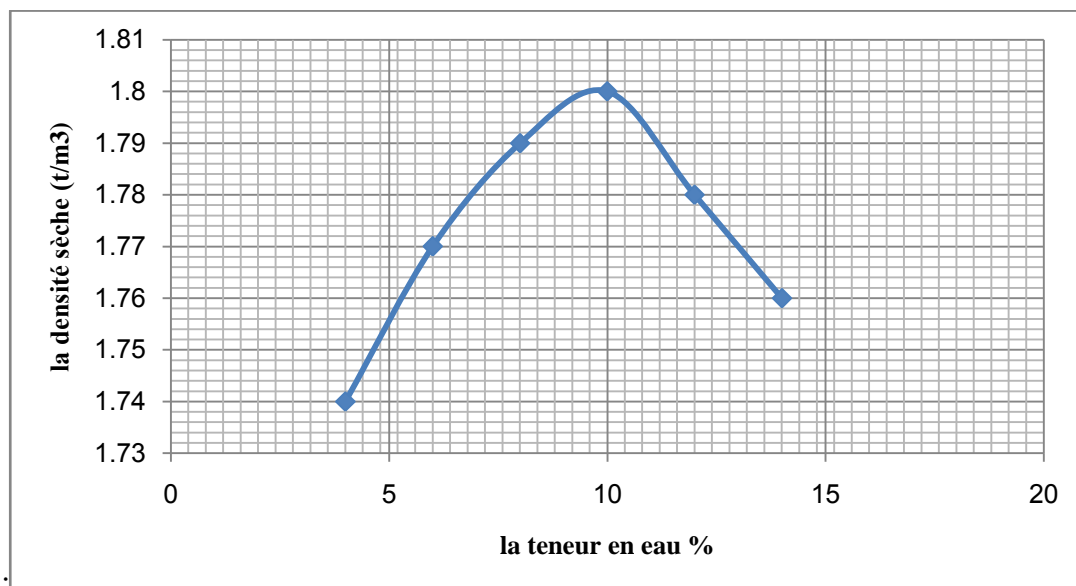
### II.3.7 Essai Proctor Normal :

L'essai Proctor est réalisé selon la norme NF P 94-093 avec un mole de Proctor normal de volume  $V=936 \text{ cm}^3$  de 25 coups.

**Tableau II.07 : essai proctor normal du sable de dune**

W%	4	6	8	10	12	14
$\rho_h$	1594	1638	1673	1705	1725	1745
$\gamma_h$	1.702	1.750	1.787	1.826	1.842	1.864
$\gamma_d$	1.74	1.77	1.79	1.80	1.78	1.76

D'après le tableau nous avons présente la courbe de proctor sur la **FigureII.11**



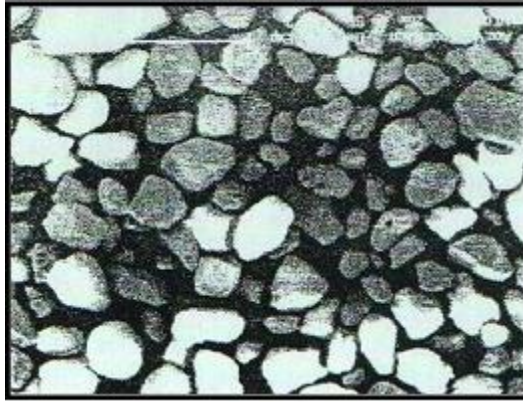
**FigureII.11 : Courbe proctor du sable**

La densité sèche de sable de dune est  $1.80 \text{ t/m}^3$  avec une teneur en eau 10%.

### II.3.8 Essai au bleu de méthylène :

L'essai est déterminé selon la norme (NF P 94-068) la valeur de la surface spécifique de sable de dune égale  $4.2 \text{ m}^2/\text{g}$  le sable de dune est dans la classe des sols non argileux.

### II.3.9 Microscope électronique à balayage (MEB) :



**Figure II.12 : Vue générale (à grande échelle, MEB.) du sable de dune [4]**

Cet essai a été mené avec le microscope électronique à balayage à l'I.U.T d'Amiens en France. La photo présentée à grande échelle par la figure III.12, montre que le sable dunaire visualisé par microscope électronique à balayage (MEB), présente des grains de formes arrondies avec une faible angularité.

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

- La bentonite de Mostaganem est une **argile Montmorillonite calcique active (CH)**.
- Le sable de dunes de la région de Laghouat est un **sable siliceux propre mal gradué**.

## Chapitre 03 : Essais et interprétations

### III.1. Introduction :

Après l'identification des caractéristiques des matériaux utilisés sable de dune et le bentonite dans le chapitre précédent pour la réalisation de la barrière étanche pour les centres d'enfouissements technique dans ce chapitre nous avons étudié expérimentalement des différents mélanges de sable de dune et de bentonite car les aspects importants de la conception de telles barrières sont la conductivité hydraulique, le densité sèche maximum des mélanges compactés de sable /bentonite et la résistance au cisaillement du mélange.

Les mélanges sable de dune- bentonite utilisés dans cette étude sont :

Sable de dune	Bentonite
97%	3%
95%	5%
90%	10%
85%	15%
80%	20%

Les essais étudiés sur les différents mélanges sont :

- ✓ Analyses granulométriques.
- ✓ Essais de Proctor.
- ✓ Les limites d'Atterberg.
- ✓ Essais au bleu de méthylène.
- ✓ Essais de cisaillement direct.
- ✓ Essais œdométriques.

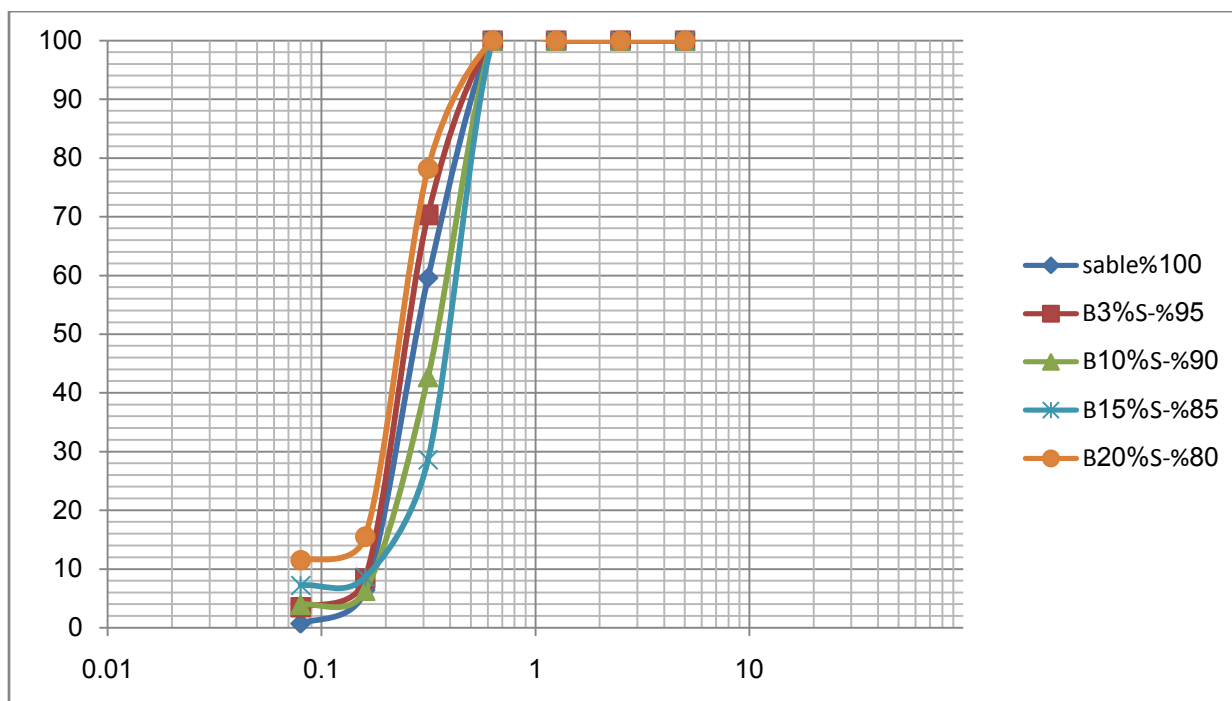
### III.2. Analyse granulométrique :

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présents dans le tableau suivant :

**Tableau III.01 : Analyse granulométriques des différents mélanges.**

	S%	97%S-3%B	95%S-5%B	90%S-10%B	85%S-15%B	80%S-20%B
tamis (mm)	passant %	passant %	passant %	passant %	passant %	passant %
5	100	100	100	100	100	100
2,5	100	100	100	100	100	100
1,25	100	100	100	100	100	100
0,631	100	100	100	100	100	100
0,315	59,6	70,3	42,7	29,2	78,2	67,9
0,16	6,4	8,4	6,3	5,3	15,5	19,8
0,08	0,7	3,5	3,9	4,1	11,5	15,4
t	0,4	1,7	0,5	0,3	1,8	3,3

D'après les données de tableau la représentation graphique dans la figure 01 suivante :



**FigureIII.01 : l'analyse granulométrique des différents mélanges sable de dune/bentonite.**

### III.2.1. Influence du pourcentage de bentonite sur l'analyse granulométrique :

D'après la courbe granulométrique on remarque que les pourcentages %des particules inférieuresà0.08 mm sont relatifs au pourcentage de bentonite ajoutée.

### III.3. Essai Proctor Normal des mélanges :

Les résultats des essais de proctor normale sur les différents mélanges sont présentésdans la figure suivante :

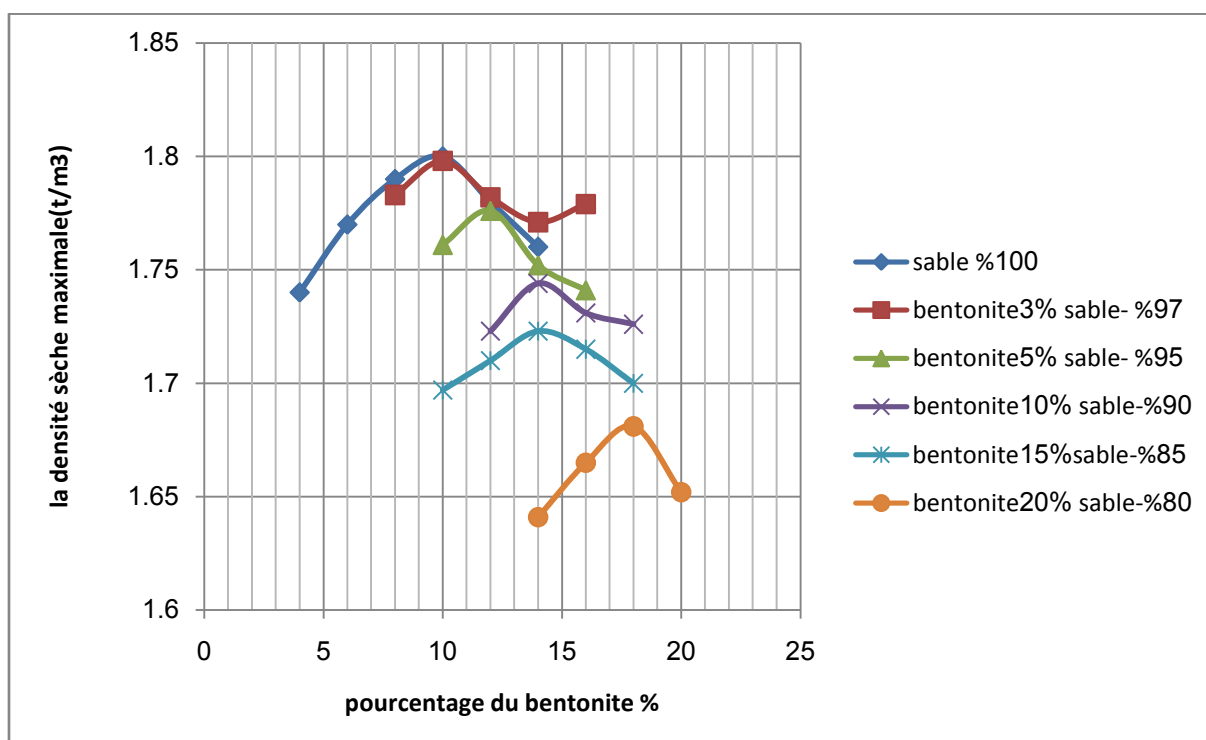


Figure III.02 : courbes proctor normal des différents mélanges sable de dune/bentonite.

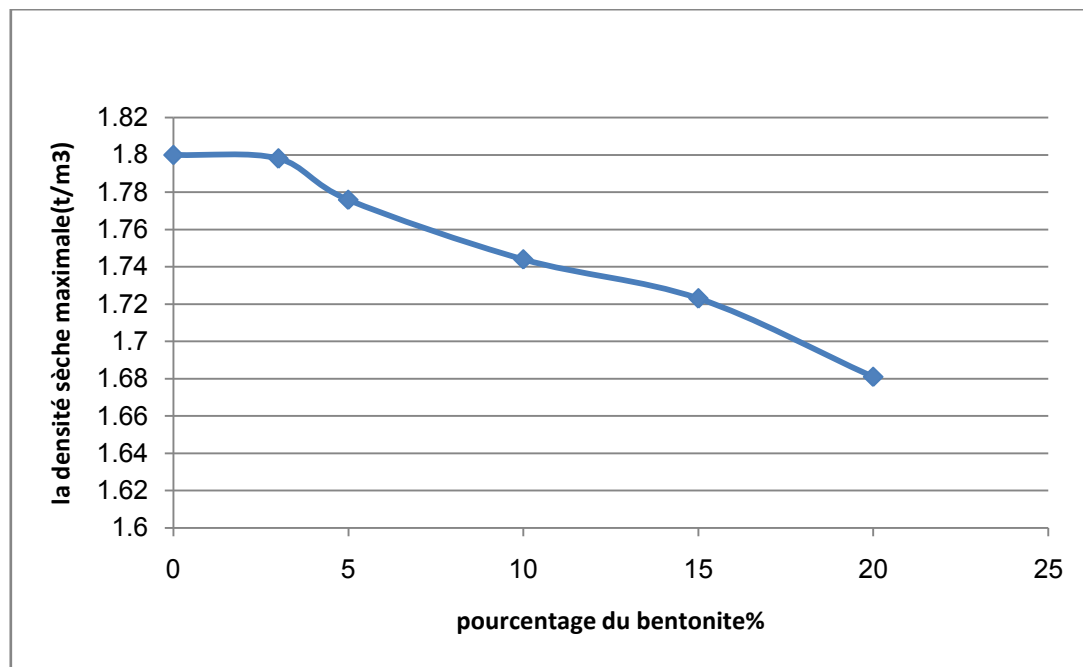
D'après les courbes proctor réalisé sur les différents mélanges du sable de dune bentonite on détermine la densité sèche maximale est la teneur en eau optimale les résultats sont présentés dans le tableau 02 :

Tableau III.02 : Essai proctor des différents mélanges sable de dune-bentonite.

Les pourcentages des mélanges sable/bentonite	La densité sèche maximale (t/m³)	La teneur en eau optimal (%)
100% sable	1.80	10
97% sable-3%bentonite	1.798	10.5
95% sable-5%bentonite	1.776	11

<b>90% sable-10%bentonite</b>	1.744	12.3
<b>85% sable-15%bentonite</b>	1.723	14.4
<b>80% sable-20%bentonite</b>	1.681	19

### III.3.1 Influence du bentonite sur la densité sèche maximale :



**Figure III.03 : courbe sur influence de la bentonite sur la densité sèche maximale.**

D'après la courbe sur la figure 03 nous avons remarqué une diminution sur la densité sèche maximale des mélanges sable de dune/bentonite avec l'augmentation du pourcentage de bentonite la variation de la densité sèche maximale varie entre 1.80 et 1.681 (t/m³) pour un pourcentage de bentonite de 0% à 20%.

### III.3.2. Influence du pourcentage de bentonite sur la teneur en eau :

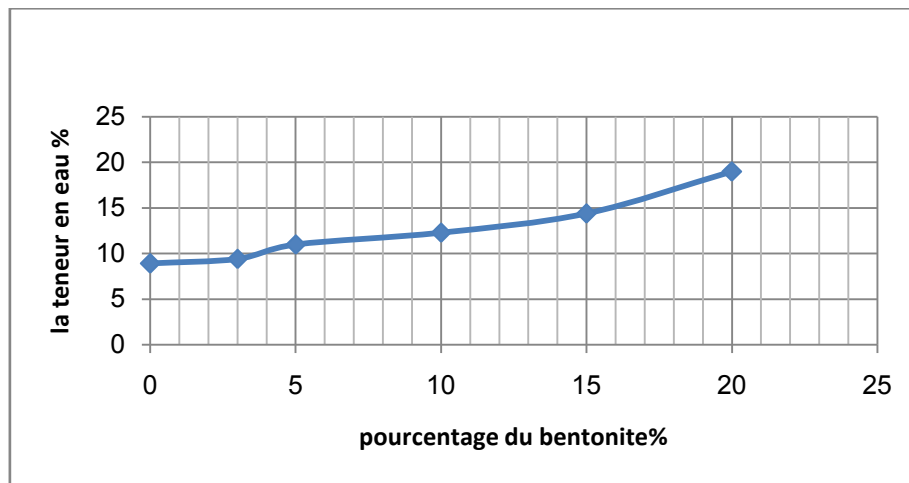


Figure III.04 : influence du pourcentage de la bentonite sur la teneur en eau.

D'après la courbe sur la figure 04 on remarque une croissance sur la teneur en eau optimale des différents mélanges sable de dunes/bentonite varient entre 10% et 19% avec l'augmentation du pourcentage de bentonite résultant de l'absorption de l'eau par la bentonite.

### III.4. la densité des grains solides des mélanges sable de dune/bentonite :

On a la densité des grains solide de sable de dune égale 2.65 et la densité des grains solide de bentonite égale 2.64 la formule de (Montañez, 2002) indique que :

$$G_s = \frac{100}{\frac{\%sable}{G_{ss}} + \frac{\%bentonite}{G_{sb}}}$$

$G_s$  : La densité des grains solide des mélanges.

$G_{ss}$  : La densité des grains solides de sable de dune.

$G_{sb}$  : La densité des grains solides de bentonite.

Les densités des grains solides des différents mélanges de sable de dune/bentonite sont présentes dans le tableau 03 suivant :

Tableau III.03 : la densité des grains solides des mélanges sable de dune/bentonite.

Le mélange sable de dune bentonite.	La densité des grains solide.
100% sable.	2.65
97% sable-3% bentonite.	2.649



<b>95%sable-5%bentonite.</b>	2.649
<b>90%sable-10%bentonite.</b>	2.648
<b>85%sable-15%bentonite.</b>	2.648
<b>80%sable-20%bentonite.</b>	2.647

D'après le tableau 03 on remarque une très faible diminution sur la densité des grains solides des mélanges malgré l'augmentation du pourcentage de bentonite.

### III.5. Essais au bleu de méthylène VBS :

L'essai au bleu de méthylène réalise suivant la norme NF P 94-068 pour déterminer la classification des sols sur les différents mélanges de sable de dune/bentonite.

$$V_{bs} = \frac{\text{la quantité de bleu absorbée (cm}^3\text{)}}{\text{pois sec de mélange}}$$

**Tableau III.04 : classification des sols par la valeur de Vbs.**

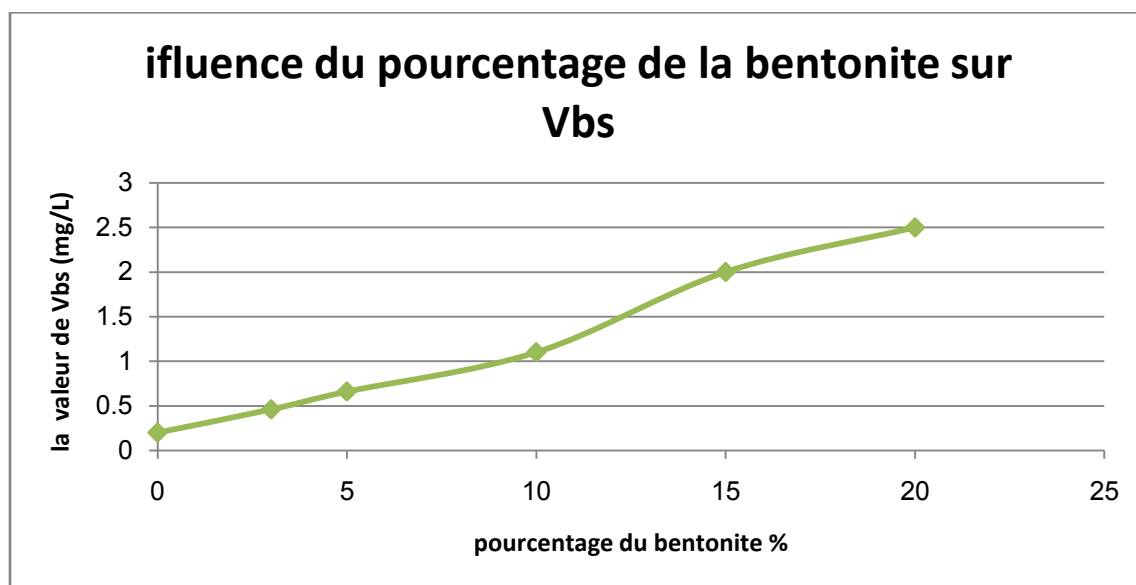
<b>VBS</b>	<b>Nature de sols</b>
<b>0.1</b>	Sol insensible à l'eau
<b>0.2</b>	Apparition de la sensibilité à l'eau
<b>1.5</b>	Sols sablo-limoneux
<b>2.5</b>	Sols limoneux de plasticité moyenne
<b>6</b>	Sols argileux
<b>8</b>	Sols très argileux

D'après le tableau 04 la classification des mélanges sable de dune/bentonite est présentée sur le tableau 05 suivant :

**Tableau III.05 : la classification des différents mélanges sable de dune/bentonite selon vbs.**

<b>Les mélanges sable de dune/bentonite</b>	<b>La valeur de Vbs</b>	<b>La nature de sol</b>
<b>100% sable.</b>	0.2	Apparition de la sensibilité à l'eau
<b>97%sable-3%bentonite.</b>	0.46	Apparition de la sensibilité à l'eau
<b>95%sable-5%bentonite.</b>	0.66	Apparition de la sensibilité à l'eau
<b>90%sable-10%bentonite.</b>	1.1	Apparition de la sensibilité à l'eau
<b>85%sable-15%bentonite.</b>	2	Sols sablo-limoneux
<b>80%sable-20%bentonite.</b>	2.5	Sols sablo-limoneux

### III.5.1 Influence du pourcentage de la bentonite sur la valeur de $V_{bs}$ :



**Figure III.05 : influence du pourcentage de la bentonite sur la valeur de  $V_{bs}$ .**

La Figure III.05 indique que il y'a une variation d'environ 13% ( 0.2 et 2.5 mg/L) dans la valeur de  $V_{bs}$  pour un pourcentage de bentonite variant de 0% à 20% c'est-à-dire qui a conduit au changement de la nature du sol d'un sol peu sensible à l'eau à un sol sableux limoneux.

### III.5.3 La surface spécifique des mélanges sable de dune/bentonite :

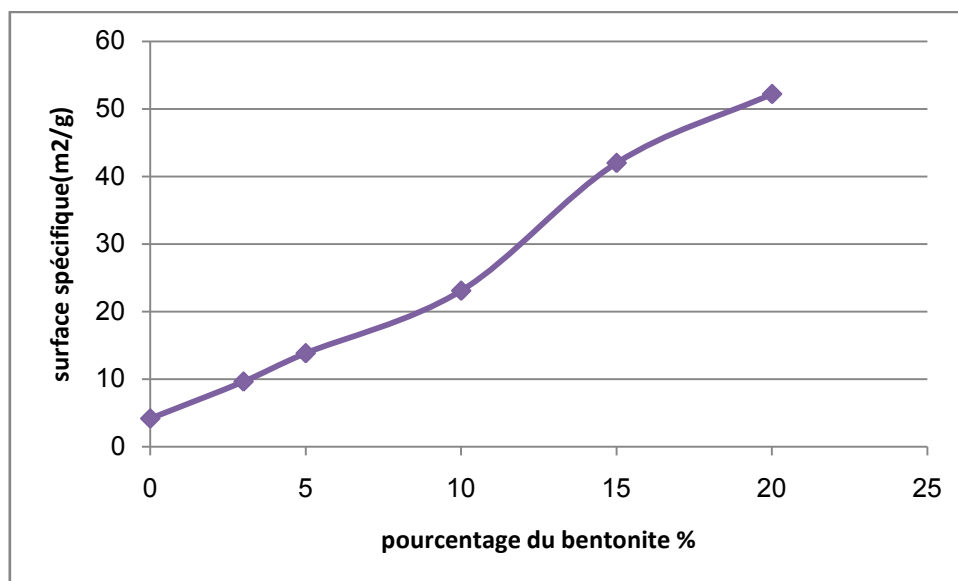
La surface spécifique est très importante pour identifier les minéraux trouvés dans le sol

Les résultats sont présentés dans le tableau 06 suivant :

$$S_s = 21 \times V_{bs}$$

**Tableau III.06 : la surface spécifique des différents mélanges sable de dune/bentonite.**

Les mélanges sable de dune/bentonite	La valeur de $v_{bs}$ (mg/L)	La surface spécifique $S_s$ (m <sup>2</sup> /g)
100% sable.	0.2	4.2
97% sable-3% bentonite.	0.46	9.66
95% sable-5% bentonite.	0.66	13.86
90% sable-10% bentonite.	1.1	23.1
85% sable-15% bentonite.	2	42
80% sable-20% bentonite.	2.5	52.5



**Figure III.06 : influence du pourcentage de la bentonite sur la surface spécifique.**

### III.6. Essai sur les limites d'Atterberg :

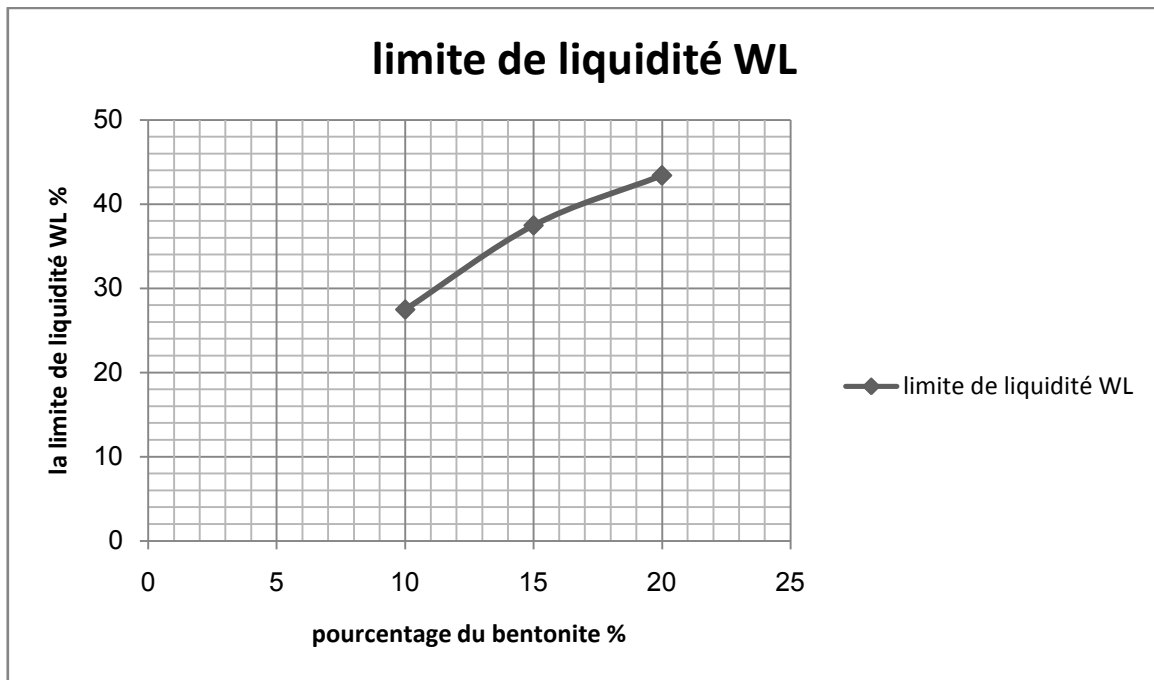
Les essais des limites d'Atterberg ont été réalisés sur les différents mélanges de sable de dune /bentonite suivant la norme NF P 94-051 mars 1993.

A signaler que les limites relatives aux pourcentages inférieurs à 5% étaient très délicates malgré l'utilisation de la coupelle rugueuse et par conséquent sera considéré comme résultats non identifiables.

#### III.6.1. Influence du pourcentage du bentonite sur les limites d'Atterberg :

**Tableau III.07 : la limite de liquidité et l'indice de plasticité des mélanges sable de dune-bentonite.**

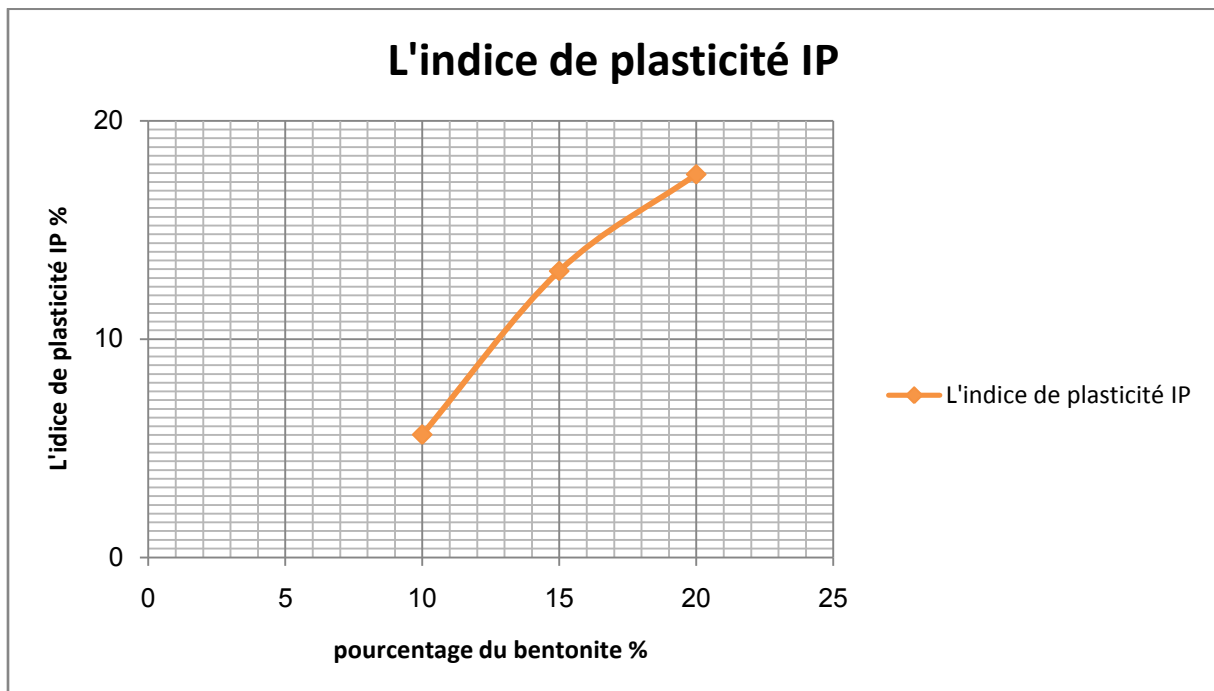
Les mélanges sable de dune-bentonite	La limite de liquidité $W_L$	L'indice de plasticité $I_P$
100% sable.	Non identifiable	Non identifiable
97% sable-3% bentonite.	Non identifiable	Non identifiable
95% sable-5% bentonite.	Non identifiable	Non identifiable
90% sable de dune-10% bentonite	27.5	5.62
85% sable de dune-15% bentonite	37.5	13.12
80% sable de dune-20% bentonite	43.4	17.55



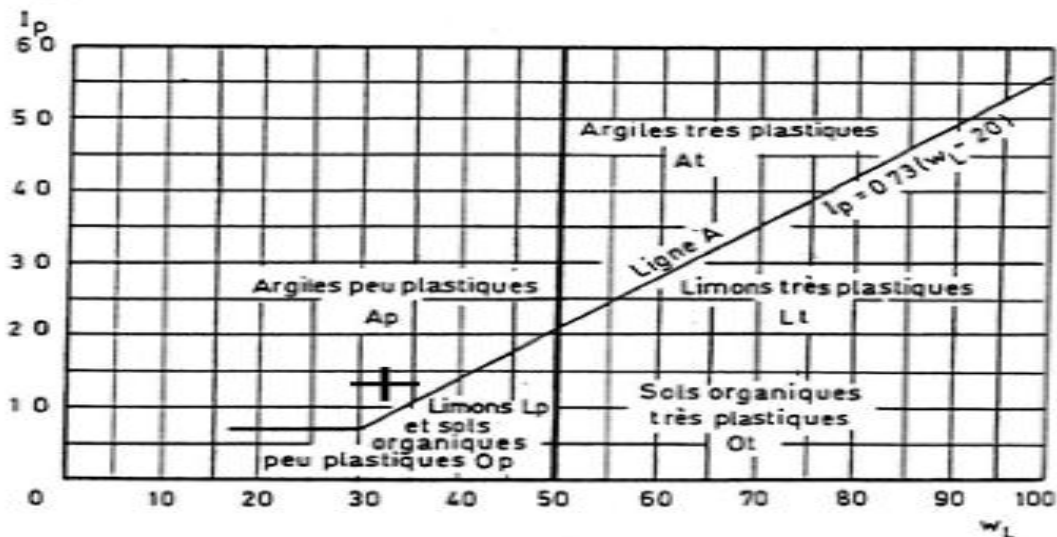
**FigureIII.07 : influence du pourcentage de bentonite sur la limite de liquidité  $W_L$ .**

D'après la figure 07 on remarque il y'a une augmentation sur la valeur de la limite de liquidité  $W_L$  variant de 27.5% à 43.4% avec une croissance du pourcentage de bentonite de 10 à 20% car l'augmentation des fine.

Pour l'indice de plasticité nous avons calculé les indice de plasticité pour chaque mélange de sable de dune-bentonite les résultats sont présenté dans la figure 08 :



**FigureIII.08 : influence du pourcentage de bentonite sur l'indice de plasticité  $I_p$ .**



**Figure III.09 : abaque de Casagrande.**

D'après l'abaque de Casagrande la classification des sols sur les différents mélanges sable de dune bentonite sont présentés dans le tableau 08 suivant :

**Tableau III.08 : classification du sol selon l'abaque de Casagrande.**

Les mélanges sable de dune-bentonite	La nature de sol
90% sable de dune-10% bentonite.	Limons peu plastique.
85% sable de dune-15% bentonite.	Argile peu plastique.
80% sable de dune-20% bentonite.	Argile peu plastique.

### III.7. Essai de cisaillement :

L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon la densité sèche maximale de proctor normal, à une vitesse constante.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette, L'essai consiste à (selon la norme NF P94-071-1).

On obtient ainsi les courbes de cisaillement effort déformation et l'on peut en déduire les droites ( $t ; s_n$ ) pour les valeurs à la rupture et à l'état critique, Il est alors simple de déterminer l'angle de frottement  $f'$  et la cohésion  $c'$ , respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de ces droites.

#### III.7.1. Préparation des échantillons :

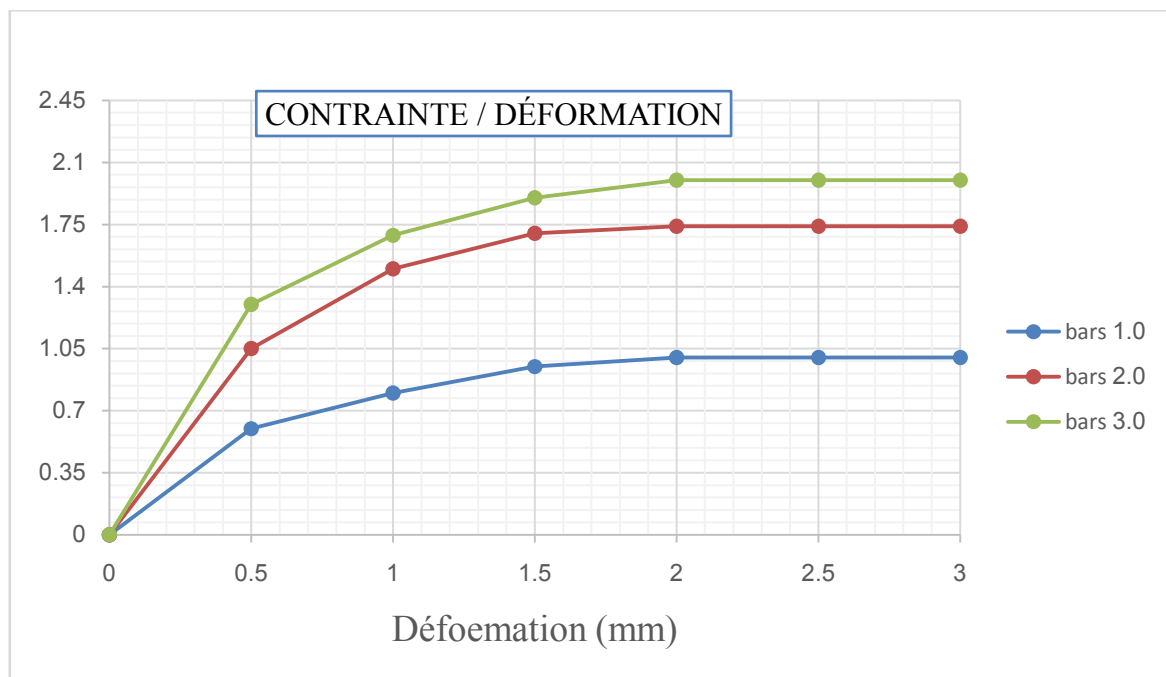
Les échantillons sont préparés de la même manière que pour les essais de gonflement en utilisant le compactage statique. La densité sèche correspond à la densité sèche maximale Proctor Normal pour chaque mélange. Les échantillons des mélanges sable-bentonite sont

cisailés à leurs teneurs en eau de compactage. Les contraintes normales utilisées pour ces essais sont :

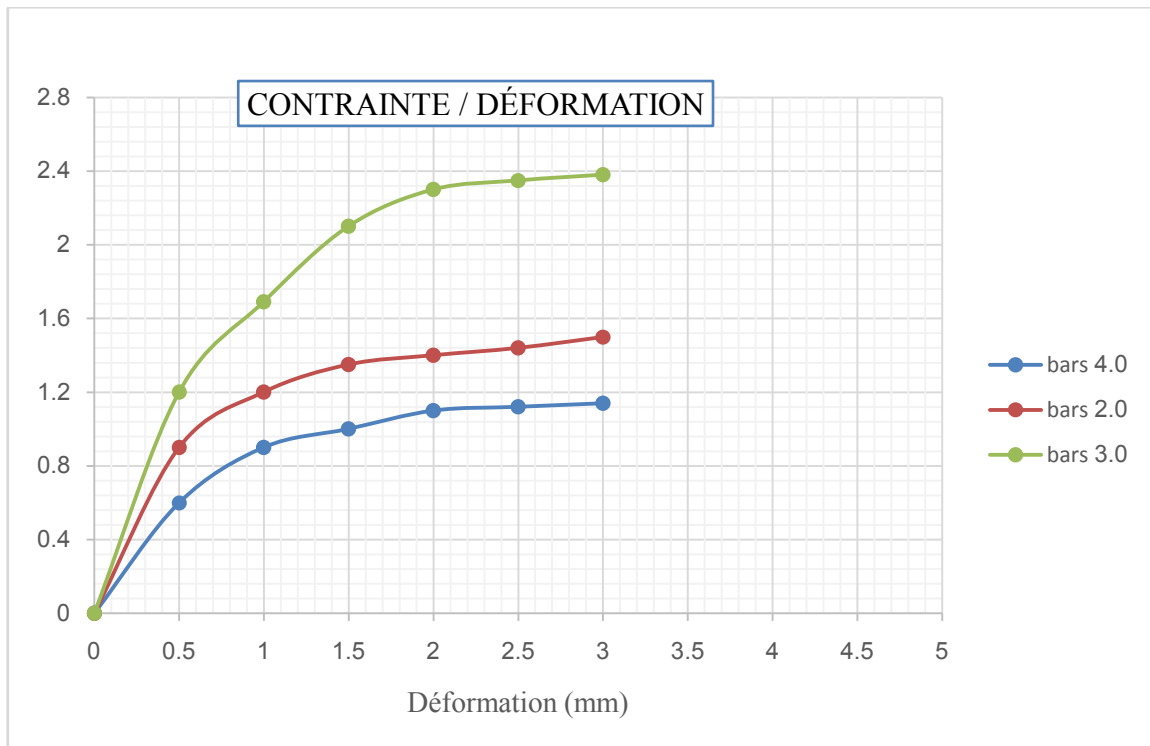
$\sigma=1.0$  bars ;  $\sigma=2.0$  bars ;  $\sigma=3.0$  bars.

La vitesse de cisaillement : 1mm/min.

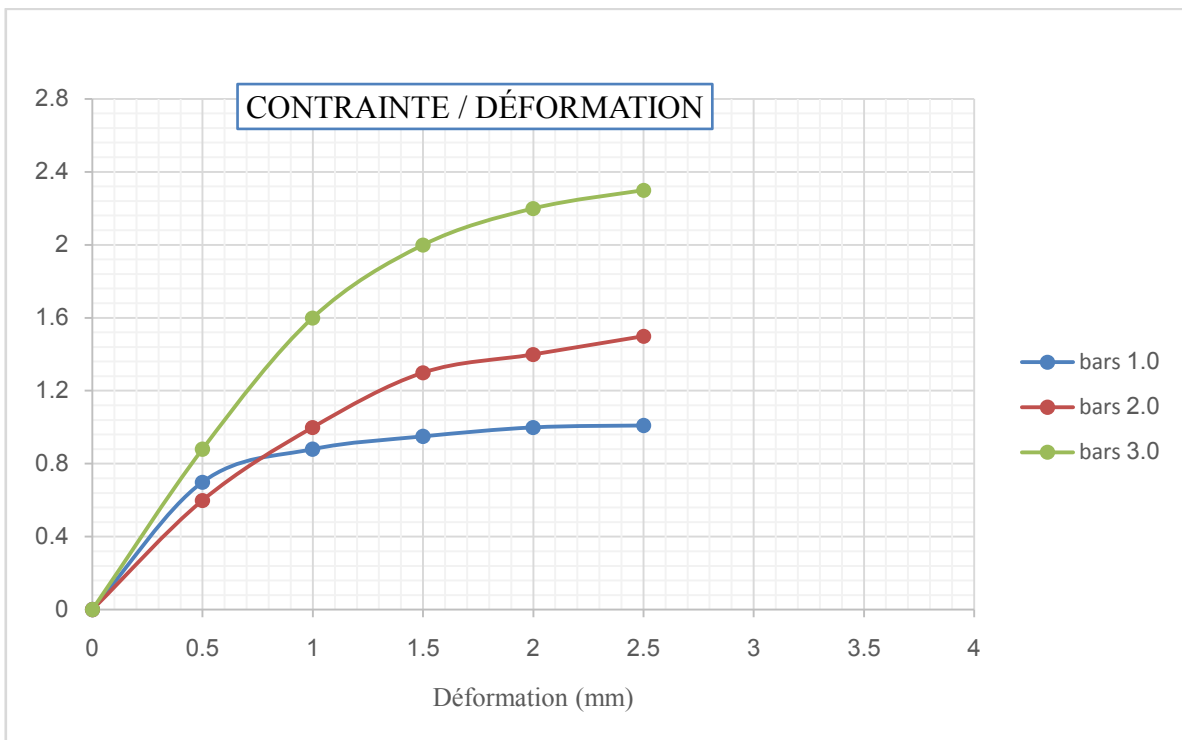
Les paramètres de la résistance des mélanges sable de dune-bentonite sont présentés sur la figure 10, 11, 12, 13,14 suivantes :



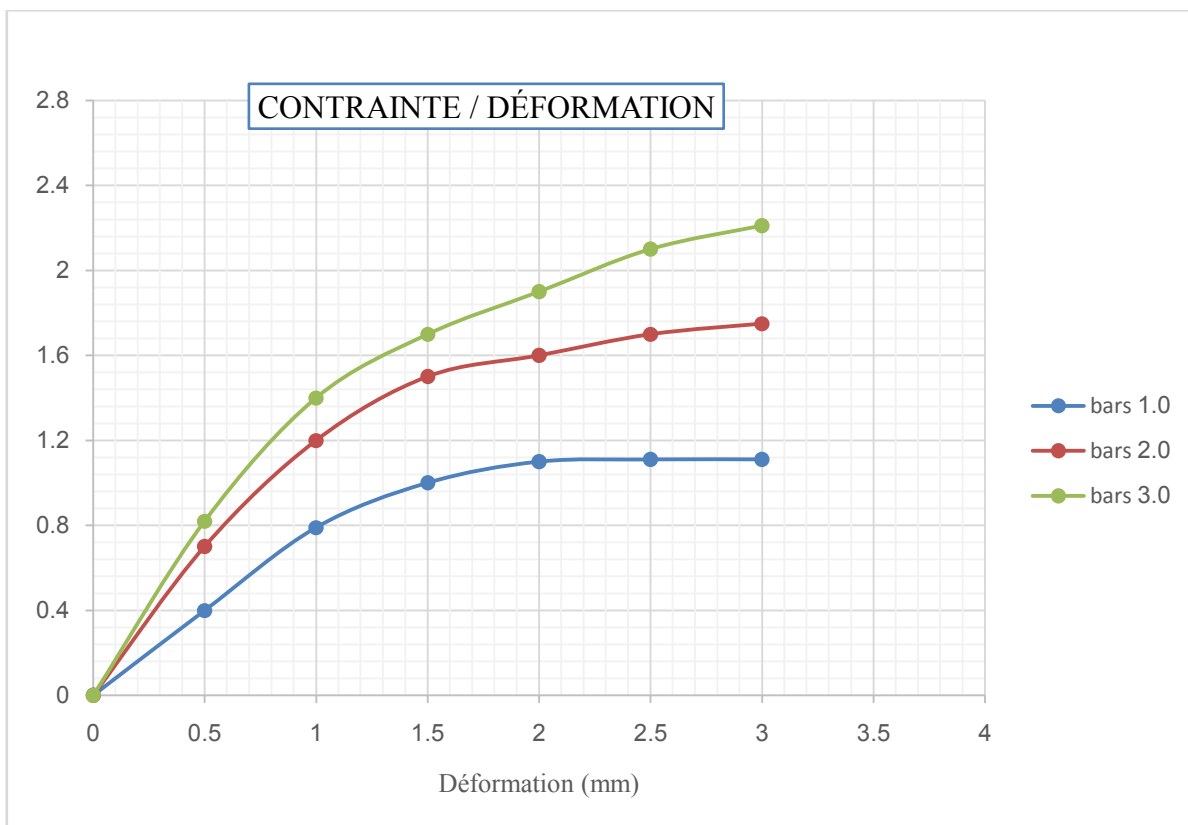
**FigureIII.10 : courbes de déformation de mélange sable de dune 97%-bentonite 03%.**



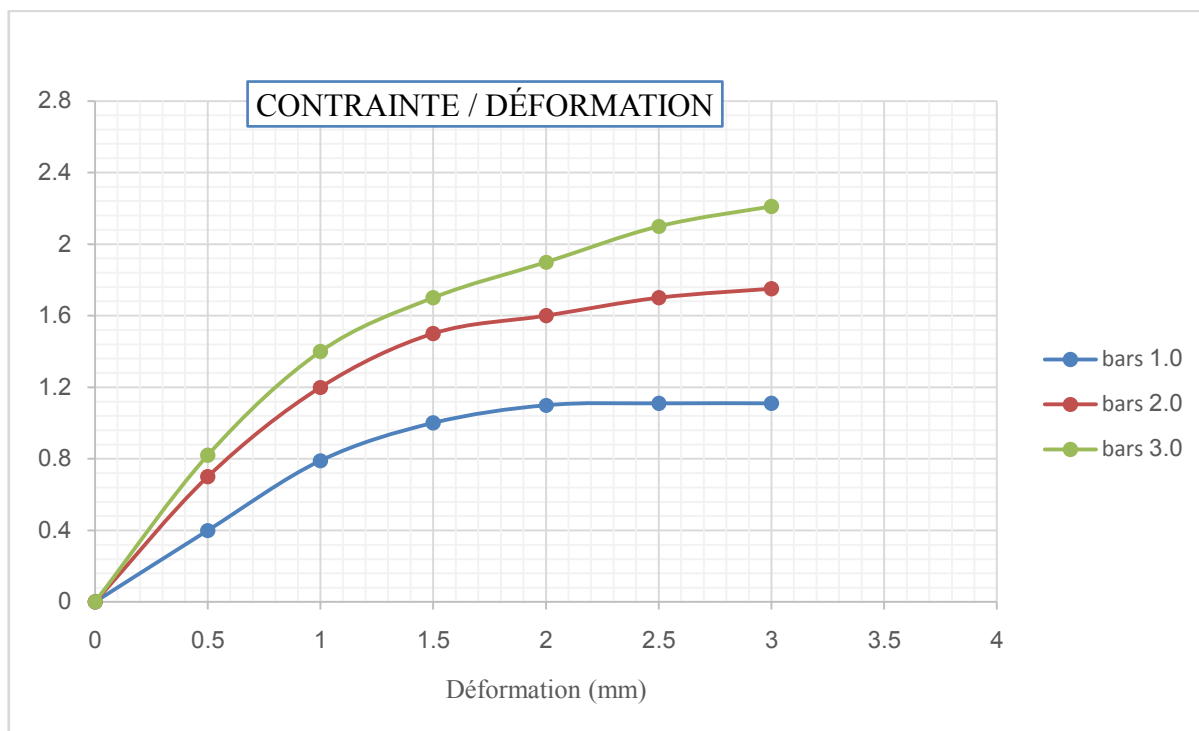
**FigureIII.11 : courbes de déformation de mélange sable de dune 95%-bentonite 05%.**



**FigureIII.12 : courbes de déformation de mélange sable de dune 90%-bentonite 10%.**



**FigureIII.13 : courbes de déformation de mélange sable de dune 85%-bentonite 15%.**





**Figure III.14 : courbes de déformation de mélange sable de dune 80%-bentonite 20%.**

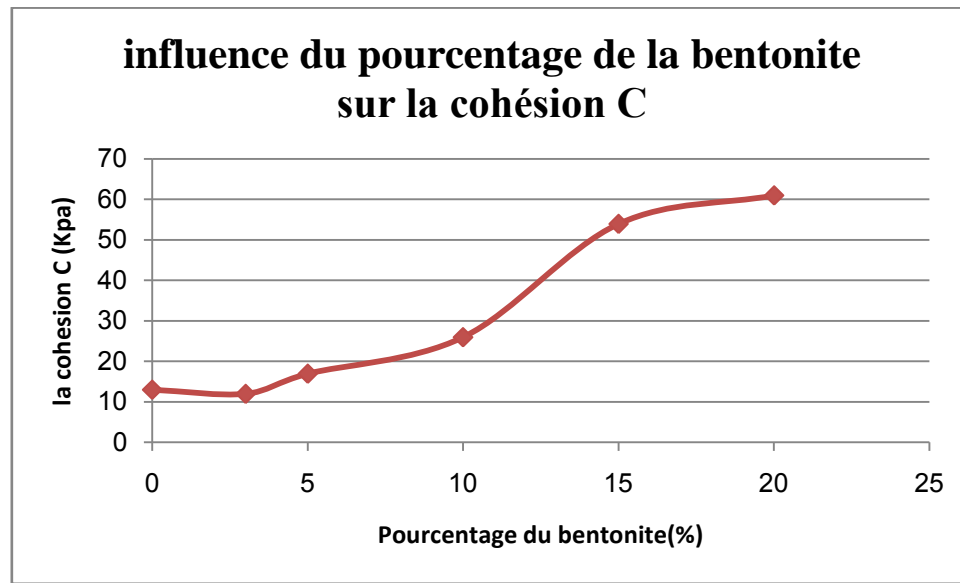
D'après les courbes on remarque la déformation de augmente avec l'augmentation du pourcentage de bentonite.

Les résultats des paramètres mécaniques l'angle de frottement et la cohésion sont présenté dans le tableau 09 :

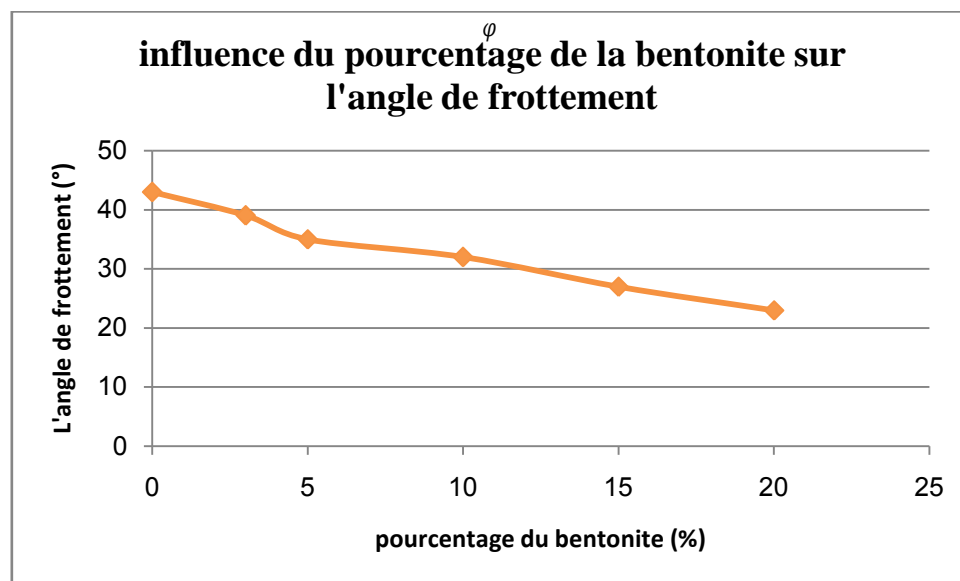
**Tableau III.09 : angle de frottement et la cohésion de mélange sable de dune bentonite.**

<b>Les mélanges sable de dune bentonite</b>	<b>L'Angel de frottement <math>\varphi</math></b>	<b>La cohésion C</b>
<b>100%sable.</b>	43	13
<b>97%sable-3%bentonite.</b>	39.04	12
<b>95%sable-5%bentonite.</b>	35.01	17
<b>90%sable-10%bentonite.</b>	32	26
<b>85%sable-15%bentonite.</b>	27	54
<b>80%sable-20%bentonite.</b>	23	61

### III.7.2. Influence du pourcentage de la bentonite sur les paramètres mécanique des différents mélanges sable de-dune bentonite :



FigureIII.15 : influence du pourcentage de la bentonite sur la cohésion C.



FigureIII.16 : influence du pourcentage de la bentonite sur l'angle de frottement.

On remarque d'après les figures 15 et 16 il y'a une augmentation sur la valeur de la cohésion des différents mélanges de sable de dune-bentonite avec l'augmentation du pourcentage de la bentonite par contre l'angle de frottement diminue par conséquence de la diminution du sable sur les mélanges.

### III.8. Essai œdométrique :

Les essais de consolidation et de compressibilité permettent d'apprécier la déformation verticale du sol.

Le but est de mesurer le tassement au cours du temps d'une éprouvette cylindrique (intacte) type galette placée dans une enceinte sans déformation latérale possible au fur et à mesure de l'application de différentes charges verticales constantes.

L'éprouvette est saturée d'eau au préalable au premier chargement et étant drainée en haut et en bas, elle est maintenue saturée pendant l'essai.

Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes :

**1. les courbes de consolidation :** qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.

**2. La courbe de compressibilité :** qui indique le tassement total en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.

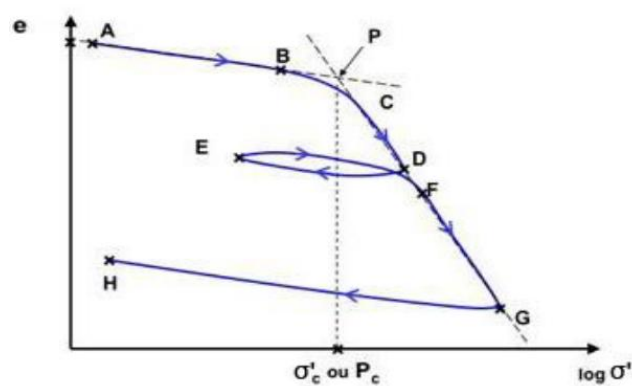
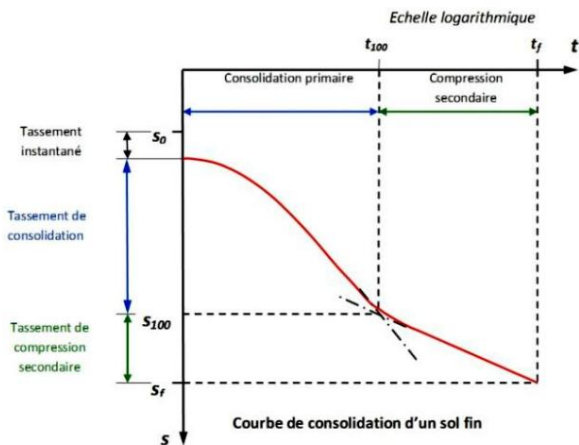


Figure II.17 : courbe de consolidation. Figure III.18 : courbe de compressibilité.

Les essais de consolidation effectués dans cette partie de notre étude ont permis d'estimer les coefficients de perméabilité «  $ksat$  » pour chaque incrément de chargement en suivant la procédure d'essai citée ci-dessous. Cette méthode indirecte consiste à calculer ces coefficients de perméabilité en se basant sur les coefficients de compressibilité volumique  $mv$  et les coefficients de consolidation  $Cv$  de la théorie de Terzaghi.

### III.8.1. Préparation des échantillons :

Les échantillons sont préparés de la même manière que pour les essais de gonflement en utilisant le compactage statique. La densité sèche correspond à la densité sèche maximale Proctor Normal pour chaque mélange.



Figure III.19 : Cellule œdométrique.

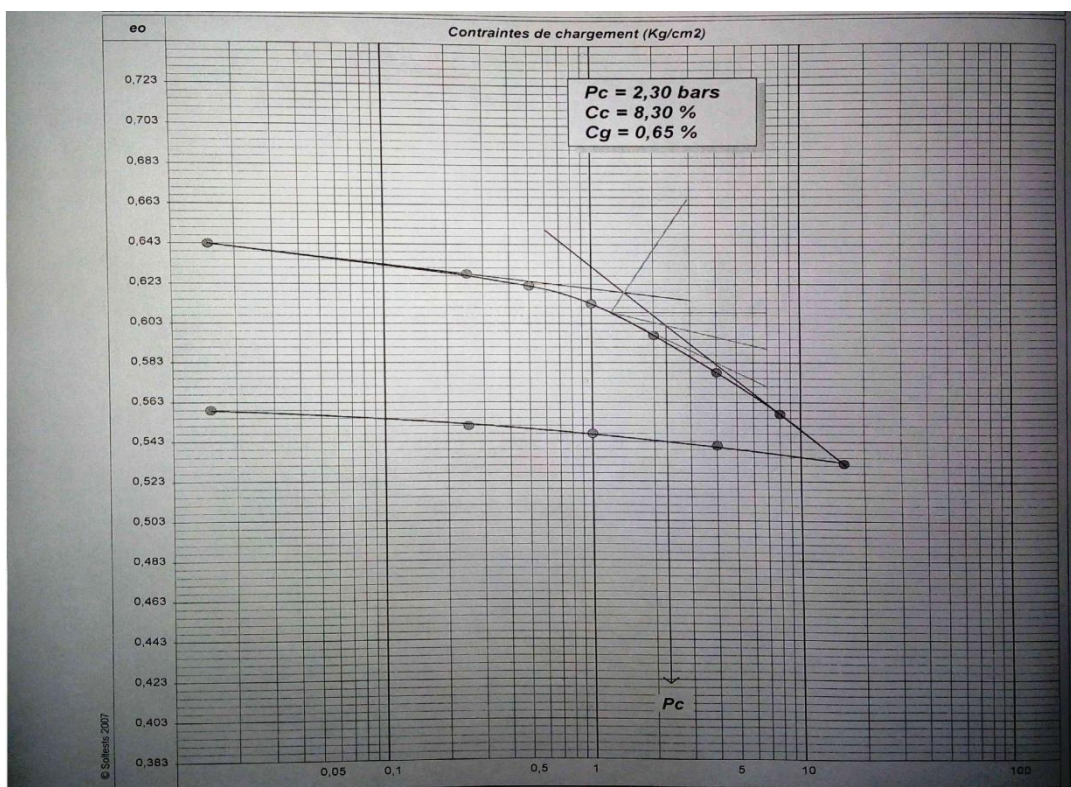


Figure III.20 : courbe de compressibilité pour 90% sable de dune-10% bentonite.



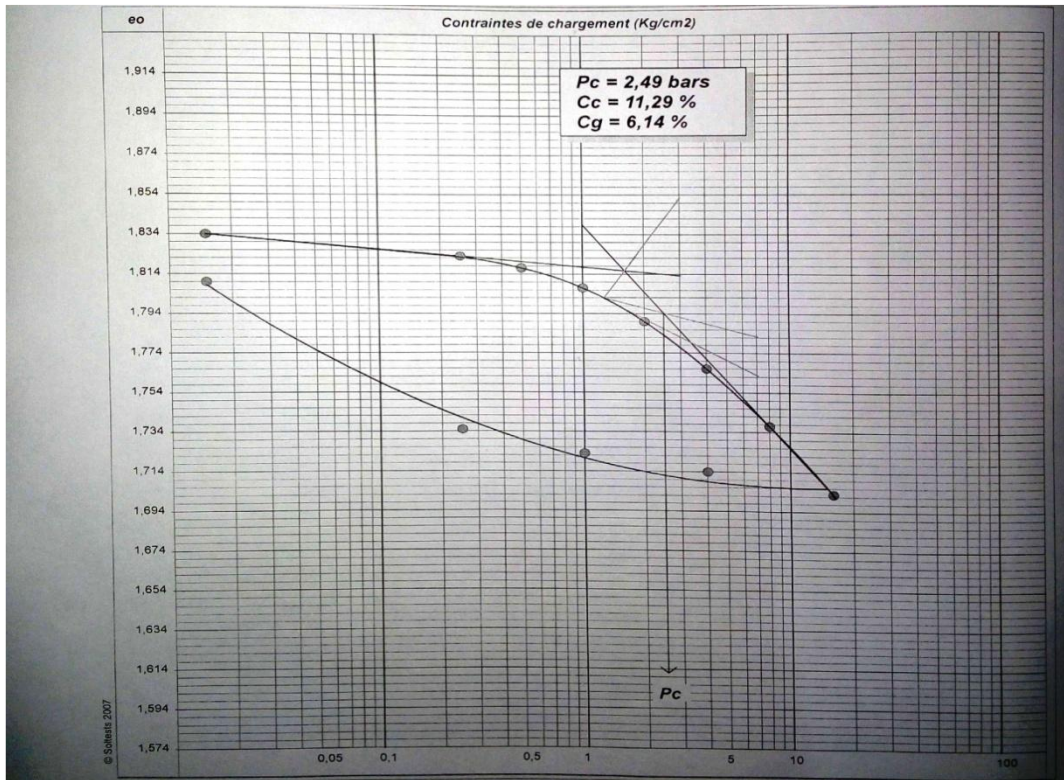
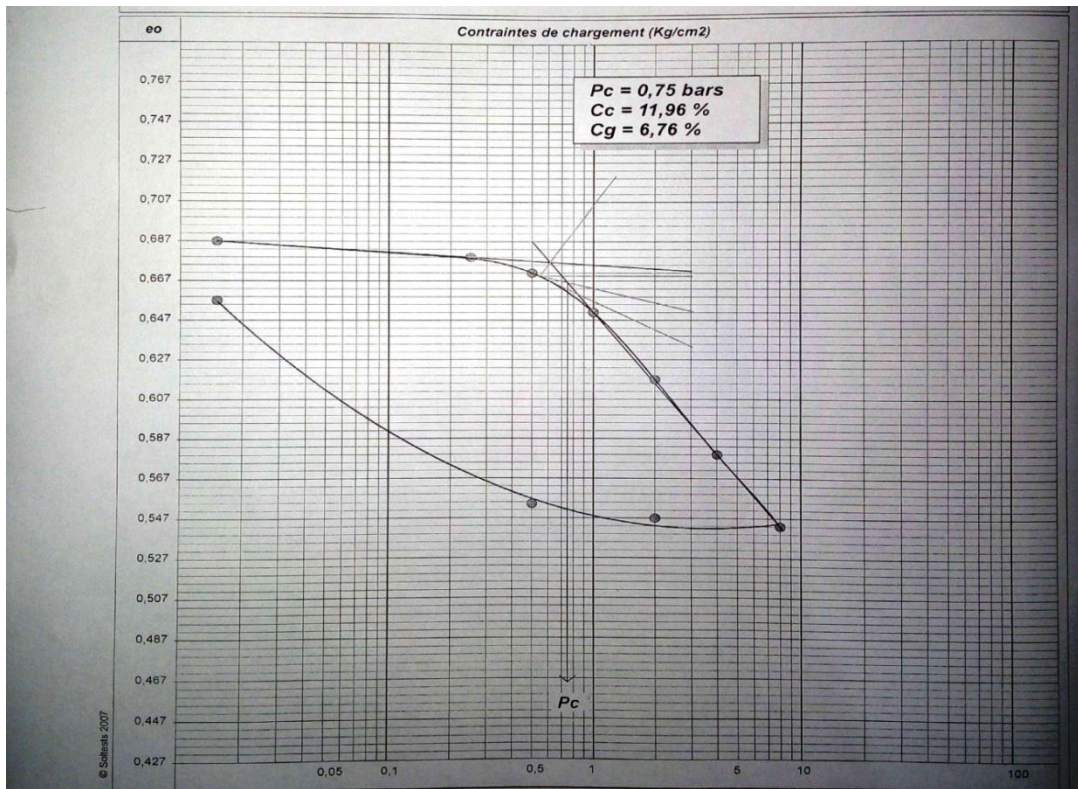


Figure III.21 : courbe de compressibilité pour 85% sable de dune-15%bentonite.



**Figure III.22 : Courbe de compressibilité pour 80% sable de dune-20% bentonite.**

### III.8.2. Coefficient de compressibilité volumique $m_v$ :

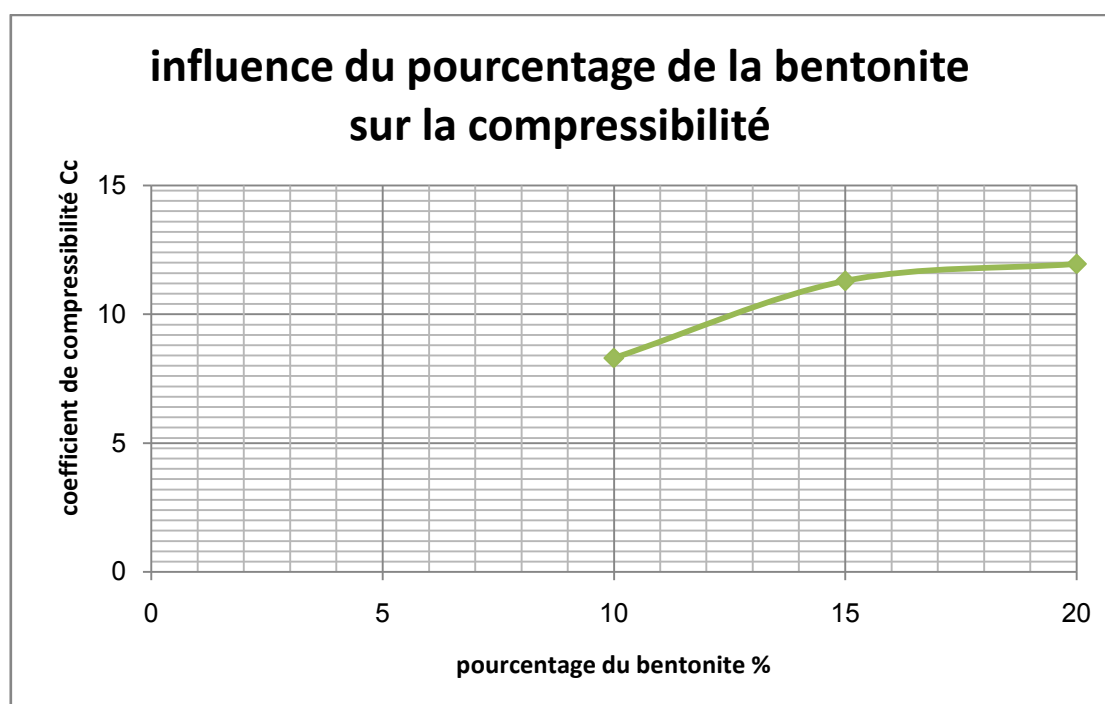
D'après les figures 20, 21, 22 le coefficient de compressibilité volumique  $m_v$  est présenté dans le tableau suivant :

**Tableau III.10 : Coefficient de compressibilité volumique pour les différents mélange sable de dune bentonite**

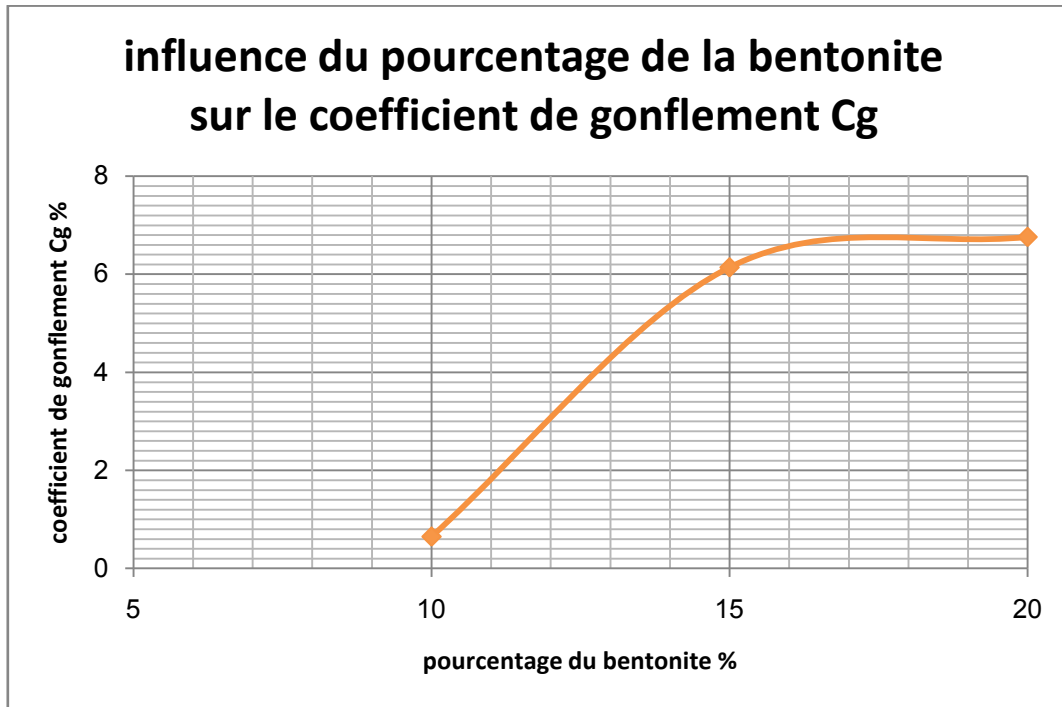
Les mélanges sable de dune-bentonite	les coefficients de compressibilité volumique $m_v$
90% sable de dune-10% bentonite.	2.5E-04
85% sable de dune-15% bentonite.	3.3E-06
80% sable de dune-20% bentonite.	1E-07

### III.8.3. Influence du pourcentage de la bentonite sur la compressibilité et le gonflement des différents mélanges sable de dune bentonite :

A partir des courbes de compressibilité précédentes des différents mélanges sable de dune-bentonite la détermination des coefficients de compressibilité et les coefficients de gonflement en fonction du pourcentage de bentonite sont résumés dans les figures 23 et 24.



**Figure III.23 : Influence du pourcentage de la bentonite sur le coefficient de compressibilité  $C_c$**



**Figure III.24 : Influence du pourcentage de la bentonite sur le coefficient de compressibilité  $C_g$**

D'après les figures 23 et 24 on remarque les coefficients  $C_c$  et  $C_g$  augmentent avec le pourcentage de bentonite ajouté sur les différents mélanges du sable de dune-bentonite.

#### III.8.4. Mesure du coefficient de consolidation $C_v$ :

Le coefficient de la consolidation est un paramètre important est nécessaire pour la détermination de la conductivité hydraulique, il est fonction de la hauteur  $H_0$  le temps  $T_{90}$  (la méthode de Taylor) par la formule suivante :

$$C_v = \frac{0.848 \times H_0}{T_{90}}$$

$H_0$  : Hauteur de l'échantillon.

Les contraintes verticales utilisées pour ces essais sont : 0.25-0.50-1-2-4-8 bar.

Les résultats des coefficients de consolidation  $C_v$  sont résumés dans le tableau 11 suivant :

**Tableau III.11 : Influence du pourcentage de la bentonite sur le coefficient  $C_v$**

Les mélanges sable de dune-bentonite	Coefficient de consolidation $C_v$ ( $m/s^2$ )
90% sable de dune-10% bentonite.	4E-06
85% sable de dune-15% bentonite.	3E-07
80% sable de dune-20% bentonite.	1E-07

D'après le tableau 11 on remarque il y'a une diminution sur le coefficient de consolidation  $C_v$  avec le pourcentage de la bentonite, le coefficient  $C_v$  il reste constant après une contrainte verticale supérieure à 4 bar.

### III.8.5. Mesure de la conductivité hydraulique $K$ :

La détermination de la conductivité hydraulique  $K$  à partir de coefficient de consolidation  $C_v$  et la compressibilité  $M_v$  selon la formule suivante :

$$K = C_v \times m_v \times \gamma_w$$

Les mesures de la conductivité hydraulique sont résume dans le tableau 12 :

**Tableau III. 12 : Influence du pourcentage de la bentonite sur la perméabilité  $K$ .**

Les mélanges sable de dune-bentonite	La conductivité hydraulique $k$ (m/s)
90% sable de dune-10% bentonite.	1E-08
85% sable de dune-15% bentonite.	1E-11
80% sable de dune-20% bentonite.	1E-13

D'après le tableau 12 la conductivité hydraulique  $k$  diminue avec l'augmentation du pourcentage de la bentonite additionnée, après une contrainte verticale supérieure à 4 bars la conductivité hydraulique reste constante.

## 9. Conclusion :

D'après les résultats ci –dessus nous pouvons conclure que ;

- Le pourcentage des fines augmente avec la quantité de bentonite ajoutée.
- La densité sèche est inversement proportionnelle aux pourcentages de l'ajout de bentonite, par contre la teneur en eau optimale est proportionnelle à cette dernière.
- La cohésion augmente avec l'augmentation de la bentonite tenant compte de son plasticité, tandis que l'angle de frottement diminue.
- La conductivité hydraulique diminue avec l'augmentation du pourcentage de la bentonite ajoutée par contre le coefficient de gonflement augmente qui représentent un avantage pour les couches de barrières étanches pour assurer le colmatage des fissures.



## **4. Conclusion générale**

Dans ces deux dernières décennies ,il a été constaté une prise de conscience des pouvoirs publics algériens pour se débarrasser définitivement des milliers de maudites décharges sauvages qui hantent nos villes et conquièrent par l'instauration d'une réglementation relative à la gestion des déchets ,la création de quelques unité de recyclage et des administration de gestion à chaque wilaya ,la réhabilitation des décharges existantes et la réalisation d'un nombre important de CET à travers le territoire .

Le nombre de sites dont les caractéristiques géologiques et hydrauliques du sol répondent aux exigences detel projet s'avère très peu voire introuvables, il y a lieu donc de rechercher à des solutions de substitution qui facilitent le choix de terrain de ces ouvrages qui assurent les critères demandés à moindre cout en utilisant les matériaux locaux.

Notre étude a montré qu'une barrière en mélange de 85% de sable et 15% de bentonite répond bien aux critères relatifs aux matériaux qui peuvent être utilisé en barrières étanches à savoir :

<b>Critère</b>	<b>Observé</b>
<b>&gt; 15 % de passant à 2 µm (fraction argileuse)</b>	OK
<b>&gt; 30 % de passant à 60 µm</b>	OK
<b>&lt; 10 % de refus à 10 mm</b>	OK
<b>Pas d'élément &gt; 50 mm</b>	OK
<b>-fraction argileuse contenant plus de 10 % de gonflants ;</b>	OK
<b>limite de liquidité &lt; 80%</b>	OK
<b>indice de plasticité supérieur à 10% et inférieur à 40%</b>	OK
<b>courbe Proctor donnant moins de 5% de variation de</b>	OK
<b>compacité pour 2.5% de variation de teneur en eau de part</b>	
<b>et d'autre de l'optimum Proctor</b>	
<b>Perméabilité K &lt; 1X10<sup>-9</sup></b>	OK
<b>Angle de frottement F &gt; 26°</b>	OK

## Référence bibliographique

[1] : Thèse doctorat, KOULOUGHLI SALIM, ETUDE EXPERIMENTALE DES MELANGES SABLE BENTONITE.

[2] : Thèse doctorat, GUEDDOUDA Mohamed Kamel, Comportement hydro-mécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune bentonite »

[3] : Programme National de Gestion des Déchets Ménagers (PNGDM). Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Alger.

[4] : Thèse doctorat, GUEDDOUDA Mohamed Kamel, Comportement hydromécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune bentonite »

[5] : [www.planetoscope.com/production des déchets](http://www.planetoscope.com/production-des-dechets).

[6] : Salon International de la Récupération et la Valorisation des Déchets Industriels

1<sup>ère</sup> Edition du 05 au 08 octobre 2016-lieu de salon : Pavillon B, Palais des Expositions des Pins Maritimes – Alger.

[7] : Site d'internet [www.cniid.fr](http://www.cniid.fr) Centre nationale d'information indépendante sur les déchets.

[8] : Thèse présentée devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon-Par Lotfi AIT SAADI Ingénieur de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger-Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses-Soutenue le 13 octobre 2003 devant la Commission d'examen

[9] : Gras, R. « Physique des sols pour l'aménagement ». Edition Masson .Paris. 1988.

[10] : Holtz.W.G, et Gibbs .H.J. (1991). « Introduction à la géotechnique ».Traduit par Lafleur, édition de l'école de polytechnique de Montréal, Canada, 794p.

[11] : Hafsi, A. (1993). « Théorie de la double couche et gonflement des argiles non saturées ».Euromarché colloquium N°209 : Mechanics of swelling, Rhodos, Greece, August 23-27 .1993.

[12]:Grim.R.E. (1959). «Physico-chemical properties of soils clay minerals». Journal of the Soil Mecanics and Foundations Division, ASCE, Vol 85, N° SM 2, pp1-17.

[13] : Bengraa, L (2004). « Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran ». Mémoire de magistère .U.S.T.Oran, soutenue le 21.06.2004,p102

[14] : [www.wikipedia1994.com](http://www.wikipedia1994.com)

## Annexe

**Les tableaux des résultats (essai proctor) :**

**Tableau III.01 : essai proctor de 100% sable de dune.**

W%	4	6	8	10	12	14
$\rho_h$	1684.8	1755.9	1809.2	1853.2	1865.4	1872
$\gamma_h$	1.80	1.876	1.933	1.98	1.993	2.00
$\gamma_d$	1.74	1.77	1.79	1.80	1.78	1.76

**Tableau III.02 : essai proctor de 97% sable de dune-3%bentonite.**

W%	8	10	12	14	16
$\rho_h$	1802.3	1851.2	1868.10	1889.72	1931.56
$\gamma_h$	1.925	1.977	1.995	2.018	2.06
$\gamma_d$	1.783	1.798	1.782	1.771	1.779

**Tableau III.03 : essai proctor de 95% sable de dune-5%bentonite.**

W%	10	12	14	16
$\rho_h$	1813.1	1861.81	1869.4	1890.3
$\gamma_h$	1.937	1.989	1.997	2.019
$\gamma_d$	1.761	1.776	1.752	1.741

**Tableau III.04 : essai proctor de 90% sable de dune-10%bentonite.**

W%	12	14	16	18
$\rho_h$	1806	1860.91	1872	1906.3
$\gamma_h$	1.929	1.988	2.00	2.03
$\gamma_d$	1.723	1.744	1.731	1.726

**Tableau III.05 : essai proctor de 85% sable de dune-15%bentonite.**

W%	10	12	14	16	18
$\rho_h$	1838	1886	1951	1973	1945
$\gamma_h$	1.963	2.014	2.084	2.107	2.077
$\gamma_d$	1.697	1.710	1.723	1.715	1.70

**Tableau III.06 : essai proctor de 80% sable de dune-20%bentonite.**

W%	14	16	18	20
$\rho_h$	1751	1807.7	1856.6	1855.5
$\gamma_h$	1.870	1.931	1.983	1.982
$\gamma_d$	1.641	1.665	1.681	1.652

**Les tableaux des résultats (limite de liquidité) :**

**Tableau III.07 : limite de liquidité pour mélange 90% sable de dune -10% bentonite.**

Nombre de coups	1er essai		2éme essai		3éme essai	
	16		23		36	
N° Tare	88	41	12	97	42	35
Ph+Tare(g)	15,961	18,072	20,345	18,323	19,253	19,149
PS+tare (g)	14,325	16,229	18,22	16,383	17,176	17,066
P tare (g)	9,505	9,717	10,46	9,502	9,413	9,328
P eau (g)	1,366	1,843	2,125	1,94	2,077	2,083
P du sol sec (g)	4,82	6,512	7,76	6,881	7,763	7,738
teneur en eau (%)	28,3	28,3	27,4	28,2	26,8	26,9
moyen (%)	28,3		27,8		26,8	

**Tableau III.08 : limite de liquidité pour mélange 85% sable de dune -15% bentonite.**

Nombre de coups	1er essai		3éme essai		3éme essai	
	16		25		37	
N° Tare	79	68	51	78	58	73
Ph+Tare(g)	15,893	18,092	18,231	18,01	16,96	18,548
PS+tare (g)	14,017	15,875	16,005	15,71	14,95	16,171
P tare (g)	9,136	10,124	10,148	9,608	9,491	9,464

P eau (g)	1,876	2,217	2,226	2,3	2,01	2,377
P du sol sec (g)	4,881	5,571	5,857	6,102	5,459	6,707
teneur en eau (%)	38,4	38,5	38	37,7	36,8	35,4
moyen (%)	38,5		37,8		36,1	

**Tableau III.09 : limite de liquidité pour mélange 80% sable de dune -20% bentonite.**

Nombre de coups	1er essai		2éme essai		3éme essai	
	16		25		35	
N° Tare	86	10	89	59	35	98
Ph+Tare(g)	17,814	16,716	15,592	16,922	16,508	17,66
PS+tare (g)	15,168	14,341	13,831	14,317	14,317	15,216
P tare (g)	10,033	9,344	9,245	8,86	9,328	9,606
P eau (g)	2,646	2,376	2,121	2,598	2,191	2,444
P du sol sec (g)	5,135	4,997	4,586	5,644	4,989	5,61
teneur en eau (%)	51,5	47,5	38	46	43,9	43,6
moyen (%)	49,5		46,1		43,7	

**Tableau III.10 : préparation d'échantillons (CISAILLEMENT DIRECT) :**

**CISAILLEMENT DIRECT**

	Echantillon %	$\gamma_{opt}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ %	V (CM <sup>3</sup> ) (cm <sup>3</sup> )	Poids Sec T (g)	Pds Sable (g)	Pds Bentonite (g)	Pds Eau (g)
Les mélanges S-B	0%B-100%S	1,800	8,9%	62,172	111.90	111.90	0,00	9.95
	3%B-%S	1.790	9.4%	62,172	111.28	107.94	3.34	10.46
	5%B-95%S	1,776	11%	62,172	110.04	104.53	5.50	12.10
	10%B-90%S	1,744	12.3%	62,172	108.17	97.35	10.81	13.30
	15%B-85%S	1,723	14.4%	62,172	106.93	90.89	16.03	15.39
	20%B-80%S	1.681	19	62,172	104.50	83.6	20.9	19.85

**Tableau III.11 : préparation d'échantillons (Essais eodométrique) :**

**Essais eodométrique**

	Echantillon %	$\gamma_{opt}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ %	V (CM <sup>3</sup> ) (cm <sup>3</sup> )	Poids Sec T (g)	Pds Sable (g)	Pds Bentonite (g)	Pds Eau (g)
Les mélanges S-B	0%B-100%S	1,800	8,9%	76.93	138.47	138.47	0,00	12.32
	3%B-%S	1.790	9.4%	76.93	137.70	133.56	4.13	12.94
	5%B-95%S	1,776	11%	76.93	136.63	129.80	6.83	15.03
	10%B-90%S	1,744	12.3%	76.93	134.17	120.75	13.42	16.50
	15%B-85%S	1,723	14.4%	76.93	132.55	112.67	19.88	19.09
	20%B-80%S	1.681	19	76.93	129.32	103.46	25.86	24.57