

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique**



**Université de Ghardaïa**  
**Faculté des Sciences et Technologies**  
**Département Génie civil**



**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Génie civil**

**Spécialité : structures**

**Par :**

**CHAMKHA Abdelhakim**

**MOSBAH Siham**

**Thème**

**Comportement hydromécanique d'un mélange  
tuf/bentonite traité au ciment**

**Déposé le : 09/06/2022**

**Au jury composé de :**

**Mme. AZZOUZ Fatima Zohra**

**Maitre Assistante A**

**Evaluateur**

**M. DEMDOUM Abdellah**

**Docteur**

**Evaluateur**

**M. DAHEUR Elhadj Guesmia**

**Maître de conférences**

**Encadreur**

**Année universitaire : 2021/2022**

## *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné l'envie, le courage et la patience tout le long de nos études.*

*Au terme de ce travail, nous exprimons :*

*Toutes nos remerciements à nos encadreurs Mr. DAHÉUR Elhadj Guesmia Maître de Conférences et Mr. DEMDOUM Abdellah, enseignant à l'université de Ghardaïa pour avoir assuré la direction et le suivi de cette mémoire.*

*Nos remerciements à tous les enseignants de département de génie civil Ghardaïa pour leurs temps, leurs conseils, et leurs orientations tous le long de nos études.*

*Nous remercions également l'ensemble du personnel du laboratoire LTPS, pour leurs accueils chaleureux, pour leurs aides et leurs soutiens.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire de Master à :*

*Mes chers parents pour leurs sacrifices ;*

*Mes sœurs et frère ;*

*Sans oublier Ma deuxième maman*

*Qui m'a beaucoup aidé et m'a guidé*

*"Pr.Chennini Kelthoum"*

*et tous les professeurs de notre faculté*

*Tous mes proches et amis fidèles ;*

*Tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

*Que ces chères personnes trouvent dans ce travail le fruit de leurs efforts et leurs Sacrifices*

*Abdelhakim*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à*

*Mes chers parents*

*Merci et que dieu vous garde*

*A mes sœurs*

*A mes frères*

*Tous mes proches et amis fidèles*

*Tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin...*

*Síham*

## ملخص :

هذا العمل هو جزء من استغلال المواد المحلية من منطقة غرداية بهدف استخدامها كحاجز سلبي في مراكز ردم النفايات التقنية بتكلفة أقل. تم إجراء سلسلة من اختبارات بروكتور العادية ، قوة الضغط والشد ، قوة القص المباشرة واختبارات نفاذية الحمل المتغيرة على خلانط التيف-بنتونيت مع وبدون معالجة بالأسمنت الأسود والأبيض.

أظهرت النتائج أن معالجة الأسمنت تزيد من محتوى الماء الأمثل وتقلل من أقصى كثافة جافة. كما أن زيادة نسبة الأسمنت ، الأسود أو الأبيض ، يؤدي إلى زيادة قوة الانضغاط والشد والتماسك بينما زاوية الاحتكاك لا تتأثر فعلاً. كما أظهرت العينات المعالجة معامل نفاذية منخفض للغاية أكبر من  $10^{-12}$  م / ثا.

أخيراً ، تسلط النتائج التي تم الحصول عليها الضوء على إمكانية تقييم المواد المحلية بناءً على الأسمنت التيف-بنتونيت لتطوير مادة حاجزة في مراكز المكب في منطقة الدراسة ، فعالة ميكانيكياً ، مقاومة للماء ، اقتصادية وتفي بمتطلبات سياسة التنمية المستدامة.

**كلمات مفتاحية :** مراكز ردم النفايات التقنية ، حاجز هيدروليكي ، تيف ، بنتونيت ، نفاذية ، مقاومة ميكانيكية.

**Résumé :**

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des matériaux locaux de la région de la wilaya de Ghardaïa en vue de leur utilisation comme barrière passive dans centres d'enfouissement techniques à moindre cout. Une série d'essais de Proctor normal, résistance à la compression et à la traction, résistance au cisaillement direct et de perméabilité par charge variable, ont été menées sur des mélanges tuf- bentonite avec et sans traitement au ciment noir et blanc. Les résultats montrent que le traitement au ciment augmente la teneur en eau optimale et diminue la densité sèche maximale. Également, l'augmentation du pourcentage de ciment, noir ou blanc, conduit à une augmentation de la résistance à la compression et à la traction et la cohésion tandis que l'angle de frottement n'est pas vraiment affecté. Aussi, les échantillons traités montrent un très faible coefficient de perméabilité supérieur à  $10^{-12}$  m/s.

Enfin, les résultats obtenus mettent en évidence la possibilité de valorisation des matériaux locaux à base de tuf- bentonite-ciment pour la mise au point d'un matériau de barrière dans les centres d'enfouissement dans la zone d'étude, mécaniquement performant, imperméable, économique et répondant aux exigences de la politique du développement durable.

**Mots-clés** Centres d'enfouissement techniques, Barrière hydraulique, Tuf, Bentonite, Perméabilité, Résistance mécanique.

**ABSTRACT:**

This work is part of the exploitation of local materials from the region of Ghardaïa with a view to their use as a passive barrier in technical landfills at a lower cost. A series of normal Proctor, compressive and tensile strength, direct shear strength and variable load permeability tests were conducted on tuff bentonite mixtures with and without black and white cement treatment. The results show that the cement treatment increases the optimum water content and decreases the maximum dry density. Also, increasing the percentage of cement, black or white, leads to an increase in compressive and tensile strength and cohesion while the angle of friction is not really affected. Also, the treated samples show a very low coefficient of permeability greater than  $10^{-12}$  m/s.

Finally, the results obtained highlight the possibility of valuing local materials based on tuff-bentonite-cement for the development of a barrier material in landfill centers in the study area, mechanically efficient, waterproof, economical and meeting the requirements of the sustainable development policy.

**Keywords :** Technical landfills, Hydraulic barrier, Tuff, Bentonite, Permeability, Mechanical resistance.

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure 1:1</b> : Schéma général d'un CET avec des barrières d'étanchéités .....	09
<b>Figure I:2</b> Barrière en couverture des ISD Classe II.....	12
<b>Figure 1:3</b> :Dérivant couches d'une barrière passive.....	13
<b>Figure 1:4</b> : Structure multiéchelle de la montmorillonite .....	17
<b>Figure 1:5</b> : Structure de la montmorillonite.....	17
<b>Figure I:6</b> : Mécanisme de gonflement sur les surfaces de la montmorillonite.....	19
<b>Figure 1:7</b> : Courbe de compactage illustrée par Chalermyanont et Arrykul.....	20
<b>Figure 1:8</b> : Courbe de tassement en fonction du temps pendant la consolidation pour une charge donnée.....	21
<b>Figure 1:9</b> : (a) Conductivité hydraulique en fonction de la proportion de sable ; (b) Conductivité hydraulique en fonction de la densité sèche de la bentonite.....	24
<b>Figure I:10</b> : Compression non confinée en fonction d'âge de durcissement des échantillons : (a) Sable-bentonite (S-B) et (b) sable-bentonite-ciment (SBC) ; (c) Résistance à la traction en fonction d'âge de durcissement (Koerner, R. M., et Daniel, D. E. 1997).....	27

### Chapitre II

<b>Figure II:1</b> (a) Formation géologique (d'âge du Miocène) de la vallée de Chelif, 5 km au nord de Bellevue dans la région de Mostaganem, (b) Dépôt d'argile au nord-est de Maghnia dans la région de Nemours, Tlem-cen (Grim et Guren, 1978), (c) Affleurement des formations magmatiques et bentonitiques.....	33
<b>Photo II:2</b> Bentonite de Maghnia.....	33
<b>Figure II:3</b> : Courbe granulométrique de la bentonite de Maghnia (Gueddouda, 2011)....	32
<b>Photo II:4</b> : Moule Proctor Normal.....	35
<b>Figure II:5</b> : Courbe Proctor normal de la bentonite de Maghnia.....	36
<b>Figure II:6</b> : État de teneur en eau.....	37
<b>Figure II:7</b> : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat, G., et Hubert, B. 1997). .....	38
<b>Figure II:8</b> : Essai de limite de plasticité.....	38
<b>Figure II:9</b> : Le cas positif et négatif de l'essai de bleu.....	40
	39

**Chapitre III**

<b>Figure III-1</b> : Localisation de tuf utilisés de la wilaya de Ghardaïa.....	47
<b>Figure III-2</b> : Tuf.....	47
<b>Photo III-3</b> : Bentonite ENOF de Maghnia.....	47
<b>Graphe III-4</b> : Courbes granulométriques de 92% tuf +8% Bentonite.....	50
<b>Figure III-5</b> : Localisation de tuf + bentonite sur le diagramme de Casagrande.....	52
<b>Figure III-6</b> : Courbes Proctor du mélange 92% tuf+ 8% bentonite.....	53
<b>Photo III-7</b> : (a) Moules de confection ; (b) Préparation des éprouvettes; (c) Presse hydraulique (d)Ecrasement d'éprouvette par la presse CBR ; (e) éprouvette écrasé.....	55
<b>Graphe III-8</b> : Courbe contrainte- déformation de notre échantillon.....	56

**Chapitre IV**

<b>Photo IV- 1</b> : Ciment AWTED NA 442-CEM II/A-L 42.5 N.....	61
<b>Photo IV-2</b> : Malaki /B-L 42,5 N.....	62
<b>Graphe IV-3</b> : Courbe Proctor Normal des mélanges TB-Ciments.....	63
<b>Figure IV-4</b> : Influence de la teneur en ciment sur les caractéristiques de compactage : (a) le poids volumique sec maximal, (b) la teneur en eau optimal.....	64
<b>Photo IV-5</b> : Essai de perméabilité à charge variable.....	65
<b>Graphe IV -6</b> : Influence de traitement au ciment sur la résistance au cisaillement : (a)courbe contraintes – déplacement (b) chemins de contrainte dans le plan [t, s].....	68
<b>GrapheIV-7</b> : Variation de la cohésion et l'angle de frottement en fonction de pourcentage du ciment.....	69
<b>Figure IV-8</b> : Courbes contrainte-déformation des déferents mélange sans et avec traitement.....	71
<b>Figure IV-9</b> : Principe de détermination des modules sécant $E_{50}$ .....	72
<b>Figure IV-10</b> : courbes précédentes, et le module sécant $E_{50}$ en fonction des dosages du ciment.....	72
<b>Figure IV-11</b> : Schéma de principe d'écrasement par fendage.....	73

## Liste des tableaux

### Chapitre I

**Tableau I:1** Identification des sols pour les barrières passives..... 14

**Tableau 1:2** Réglementations pour l'étanchéité des fonds des installations de stockage des déchets (ISD)..... 15

### Chapitre II

**Tableau II:1** : Résultats granulométriques des argiles étudiées..... 34

**Tableau II:2:**Classification de Casagrande pour les sols fins..... 37

**Tableau II .3:** Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992). ..... 37

**Tableau II.4** : Limites de consistance de la bentonite..... 39

**Tableau II.5** : Classification des argiles selon la surface spécifique (Sst)..... 40

**Tableau II.6:** Surface spécifique totale (Sst) de la bentonite..... 40

**Tableau II.7** : La plage de valeur de variation des paramètres Proctor en fonction du type d'encroûtement ..... 43

### Chapitre III

**Tableau III-1** : Quelques valeurs des éléments climatologiques de la Wilaya de GHARDAIA (*SMO 2021*)..... 49

**Tableau III-2** : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique de mélange 92% tuf +8% bentonite ..... 51

**Tableau III-3** : Valeur de limites d'Atterberg..... 51

**Tableau III-4** : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (*SETRA-LCPC 1992*)..... 52

**Tableau III-5** : Valeurs de l'équivalent de sable ES..... 53

**Tableau III-6:** Caractéristiques optimales de Proctor Normal..... 54

**Tableau III-7** : Propriétés géotechnique du mélange 92% tuf + 8% bentonite ..... 56

**Tableau III-8** : Classification USCS des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm)..... 57

### Chapitre IV

**Tableau IV-1** : Résultats des analyses chimique du ciment AWTED (Fiche technique)..... 61

**Tableau IV-2** : Résultats des analyses chimique du ciment Malaki, (Fiche technique)..... 62

**Tableau IV-3** : Gains de la cohésion ..... 70

<b>Tableau IV-4</b> : Variation des gains de la résistance à la compression et le module sécant $E_{50}$ .....	72
<b>Tableau IV-5</b> : Résultats des essais de traction.....	74

# Sommaire

DÉDICACES Abdelhakim.....	I
DÉDICACES Siham.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
ملخص.....	IV
كلمات مفتاحية.....	IV
RÉSUMÉ.....	IV
Mots-clés.....	IV
ABSTRACT.....	V
KEYWORDS.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
<b>Introduction générale</b> .....	<b>02</b>
<b>Chapitre 01</b>	
1.1 Introduction.....	05
1.2 Généralités sur les Installations de Stockage de Déchets (ISD).....	05
1.3 Définition de déchet.....	06
1.3.1. Différents types de déchets.....	06
1.4. Classification des déchets.....	07
1.4. 1.Selon leur nature.....	07
1.4.2. Selon le mode de traitement et d'élimination.....	07
1.4.3. Selon le comportement et les effets sur l'environnement.....	08
1.4.4. Selon l'origine.....	08
1.4.5. Selon le mode d'enlèvement des déchets.....	08
1.5. Centres d'enfouissement techniques CET.....	09
1.5.1. CET de Classe I : Déchets spéciaux.....	10
1.5.2. CET de Classe II : Déchets Ménagers et Assimilés.....	10
1.5.3 CET de Classe III : Déchets Inertes.....	10
1.6. Critères d'étanchéité des ISD.....	11
1.6.1 Barrière en couverture des ISD.....	11
1.6.2 Barrière active (en fond et en talus).....	12
1.6.3 Barrières passives .....	13

---

1.6.4 Critères Des Barrières Naturelles.....	13
1.7 Détails Fondamentaux des Mélanges Sol grenu-Bentonite.....	15
1.7.1 Bentonite.....	16
1.7.1.1 Microstructure de la bentonite.....	16
1.7.1.1 Interaction eau-bentonite.....	18
1.7.2 Caractéristiques Hydromécaniques Des Mélanges Sol Grenu-Bentonite.....	20
1.7.2.1 Caractéristique de compactage.....	20
1.7.2.2 Caractéristique de compressibilité.....	21
1.7.2.3 Caractéristique de gonflement.....	22
1.7.2.4 Caractéristiques de perméabilité saturée.....	22
1.7.2.5 Caractéristiques de résistance.....	25
1.8. Caractéristiques hydromécaniques des mélanges sol grenu-bentonite améliorés au ciment.....	27
1.9 Réalisation De La Barrière.....	28
1.10 Conclusion.....	30
<b>Chapitre 02</b>	
2.1 Introduction.....	32
2.2 Caractéristique des matériaux utilisés.....	32
2.2.1 Bentonite.....	32
2.2.1.1 Définition.....	32
2.2.1.2 Géologie du gisement de bentonite en Algérie.....	32
2.2.1.3 Essais de caractérisation.....	33
2.2.2 Le Tuf.....	40
2.2.2.1 Définition.....	40
2.2.2.2 Les encroûtements calcaire.....	40
2.2.2.3 Les encroûtements gypseux.....	41
2.2.2.4 Les encroûtements mixtes.....	41
2.2.2.5 Essais de caractérisation.....	41
2.3 Conclusion.....	44
<b>Chapitre 03</b>	
3.1 INTRODUCTION.....	46
3.2 PRESENTATION ET LOCALISATION DES MATERIAUX.....	46
3.2.1 Présentation de la Wilaya De GHARDAIA.....	46

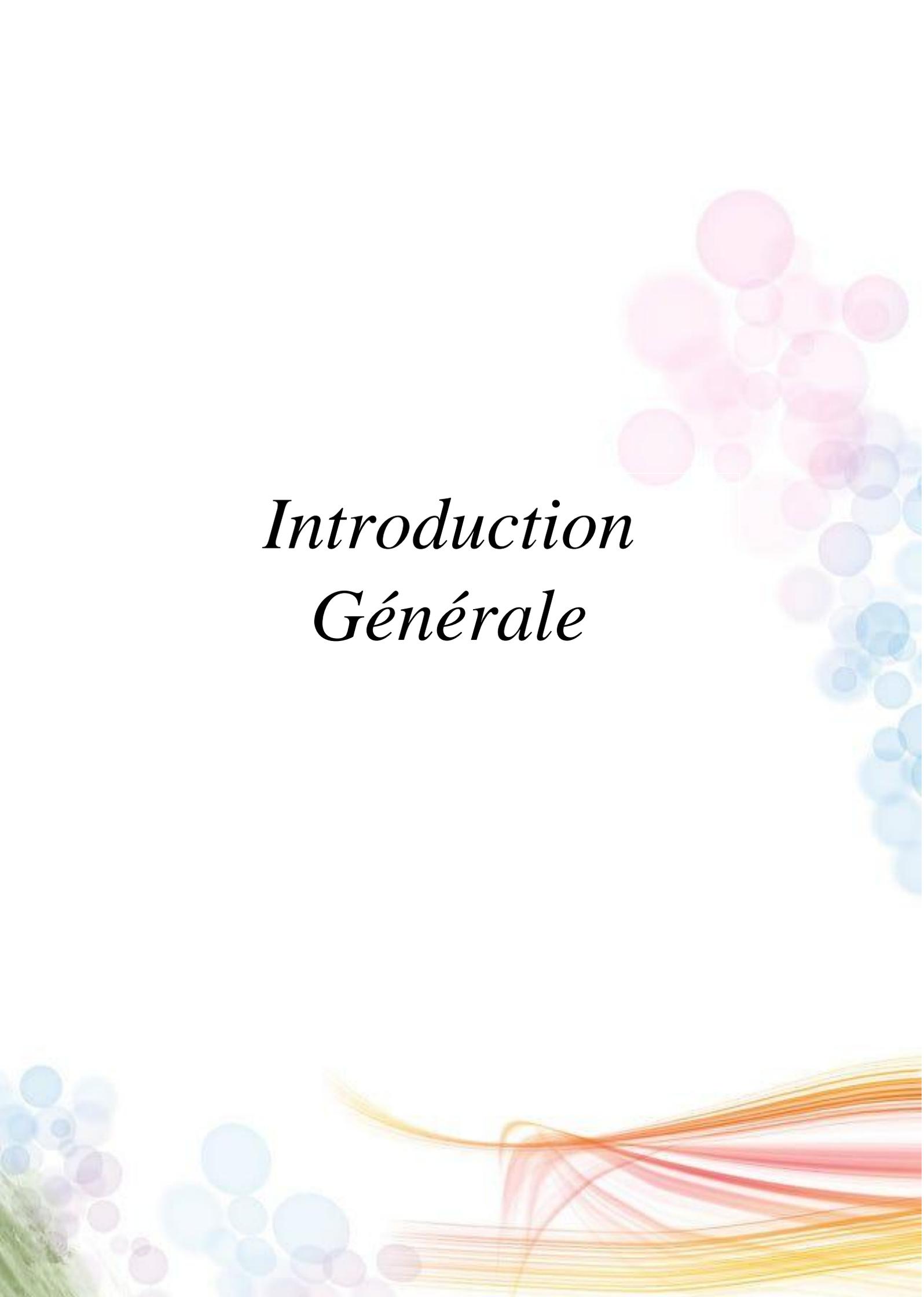
---

3.2.2 Climatologie de GHARDAIA.....	47
3.2.2.1 Température .....	48
3.2.2.2 L'humidité .....	48
3.2.2.3 Les vents .....	48
3.2.2.4 Pluviométrie .....	48
3.2.2.5 Evaporation .....	48
3.2.2.6 Insolation .....	48
3.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES.....	49
3.3.1 Analyse granulométrique .....	50
3.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage .....	50
3.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie .....	50
3.3.2 Qualité des fines.....	51
3.3.2.1 Les limites d'Atterberg .....	51
3.3.2.2 Essai d'équivalent de sable .....	52
3.4 Essai de compactage et de portance .....	53
3.4.1 Essai Proctor normal.....	53
3.3.5 Essai de compression simple .....	54
3.5.1 Préparation des échantillons.....	55
3.4 RECAPITULATIF DES ESSAIS D'IDENTIFICATION .....	56
3.5 CONCLUSION .....	58
<b>Chapitre 04</b>	
4.1 Introduction.....	60
4.2 Protocole expérimentale .....	60
4.3 Présentation des ciments utilisés .....	61
4.4 Influence de traitement sur les caractéristiques de compactage .....	62
4.5 Comportement Hydraulique Des Mélanges Bentonite-Tuf et Bentonite-Tuf-ciment	64
4.6 Influence de traitement au ciment sur le Comportement mécanique du mélange Tuf-bentonite .....	65
4.6.1 Résistance au cisaillement directe des mélanges (AFNOR NF P 94-071-1).....	65
4.6.2 La résistance à la compression non confinée (NF P 98-230-2) .....	70
4.6.3 La résistance à la traction (essai de brésilien).....	72
4.7 Conclusion.....	74
<b>Conclusion générale</b> .....	76
<b>Référence bibliographique</b> .....	78

---

---

**Annexes**..... 83

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily located in the upper right and lower left corners. At the bottom, there are several overlapping, wavy lines in shades of orange, red, and yellow, creating a sense of motion and depth.

# *Introduction Générale*

## Introduction générale

La croissance d'état d'urbanisation rapide et non contrôlée des villes algérienne conduit à la génération de volumes de déchets de plus en plus importants. Cette urbanisation est une préoccupation majeure pour les collectivités locales dans les problèmes de gestion des déchets, en particulier dans les zones en dehors de son contrôle (DEMDOUM,A 2019).

La solution actuelle dans la plupart des pays en développement est de contenir ces déchets dans des lieux spécifiques appelés les centres d'enfouissements techniques (CET) ceinturés d'une barrière étanche protectrice. La migration des lixiviats produits en réaction de biodégradation à l'intérieur des déchets solides enfouis dans ces unités de traitement peut polluer le sol et les eaux souterraines par plusieurs processus de transport des contaminants, causant ainsi de graves problèmes de santé pour les êtres humains. Ainsi, une barrière imperméable est établie en vertu de chaque lieu d'enfouissement pour empêcher la fuite du lixiviat. L'efficacité de ces barrières dépend de leur comportement mécanique, hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination (DEMDOUM,A 2019) .

Les barrières de sécurité des installations de stockages de déchets (ISD) ou les centres d'enfouissements techniques sont conçus avec des géomatériaux composites (Géosynthétique bentonitique, géomembranes, sol traité à la bentonite et argile). Le choix entre ces solutions sera guidé par des considérations économiques et pratiques comme la disponibilité de matériaux, la facilité de mise en œuvre, le savoir-faire local, etc.

Les textes législatifs imposent qu'en fond d'CET de classe II (pour déchets ménagers), le dispositif d'étanchéité soit formé d'une barrière de sécurité passive (naturelle) surmontée d'un niveau de sécurité actif (artificiel) dont la complémentarité constitue, en théorie, une technique capable d'assurer un niveau de protection maximal vis-à-vis de l'environnement. (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020)

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  $30^\circ$  (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020)

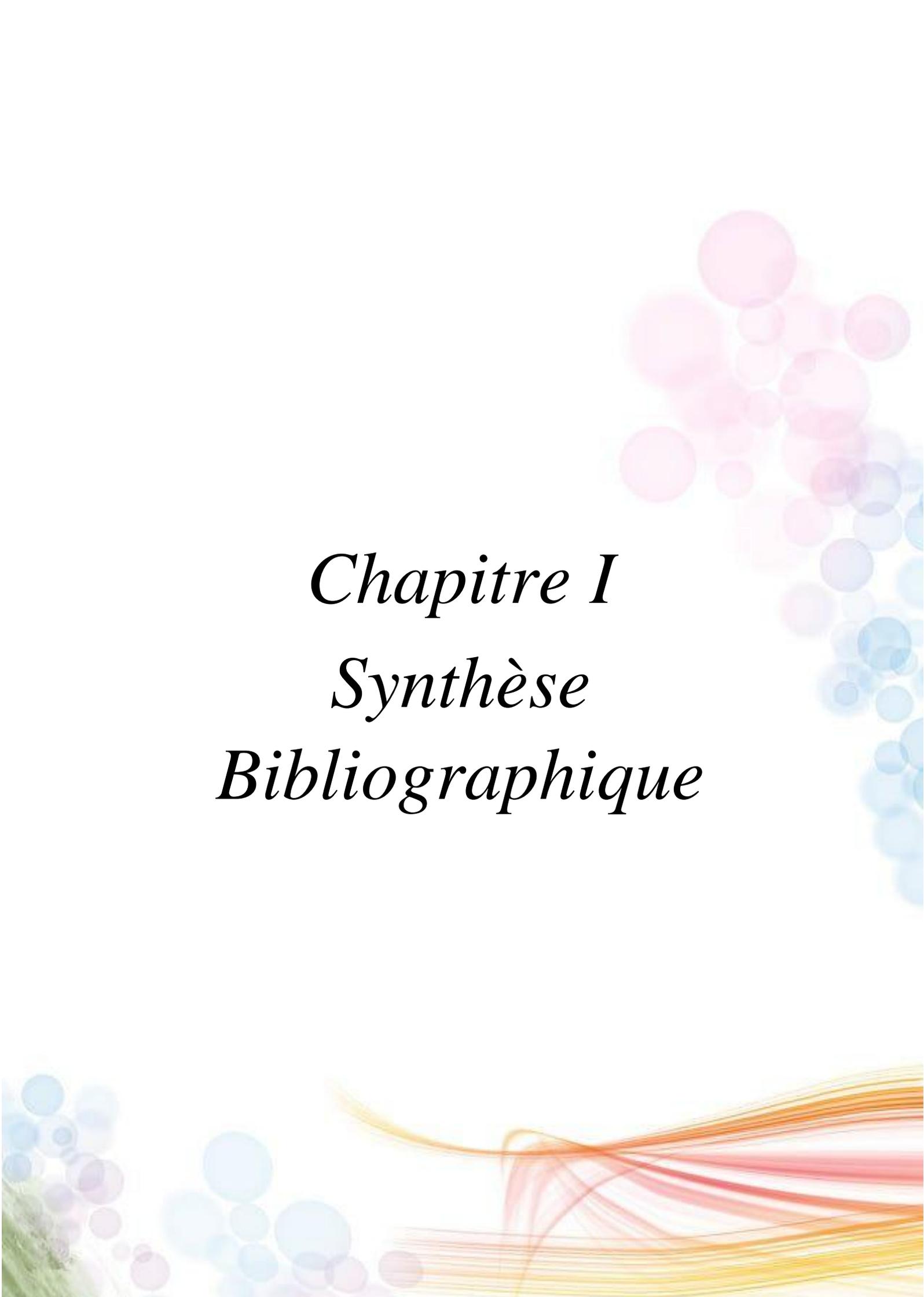
On se propose dans ce travail, et dans le but de valoriser les matériaux locaux, d'investiguer la possibilité d'utiliser une barrière de stockage des déchets ménagers et spéciaux constituée d'un mélange de tuf d'encrouement de la région de Ghardaïa et la bentonite de Maghnia avec ciment noir AWTED de la cimenterie AMOUDA de Laghouat, et ciment blanc Malaki de la cimenterie LAFARGE.

### *Organisation du mémoire*

L'étude présente quatre chapitres différents.

- **Le chapitre 1** donne une généralité sur le centre d'enfouissement technique (CET) et la revue de littérature précédente qui couvre différentes caractéristiques hydromécaniques des mélange sol grenu-bentonite et sol grenu-bentonite-ciment.
- **Le chapitre 2** est consacré aux matériaux et mélanges utilisés dans l'étude ainsi qu'aux tests qui sont effectués pour déterminer leurs caractéristiques géotechniques.
- **Le chapitre 3** présente les résultats des essais de caractérisation chimiques, physiques et mécaniques de mélange composé de 92% tuf + 8% bentonite de Maghnia.
- **Le chapitre 4** est consacré à l'étude de l'effet de l'ajout de ciment sur le comportement hydromécanique du mélange tuf-bentonite. Le but est de choisir une formule optimale Tuf-bentonite-ciment qui représente le meilleur choix technique et économique.

Finalement, Cette étude est clôturée par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus lors de travail et des recommandations concernant les travaux futurs.

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily located in the upper right and lower left corners. At the bottom, there are several flowing, abstract lines in warm tones of orange, red, and yellow, creating a sense of movement and depth.

*Chapitre I*  
*Synthèse*  
*Bibliographique*

## **1.1 Introduction :**

Le progrès économique et social, en même temps que les multiples avantages que nous lui connaissons, a amené son lot de problèmes dont l'augmentation continuelle de la quantité de déchets ménagers et la brusque apparition des déchets industriels toxiques. Cette véritable rançon payée pour améliorer nos conditions d'existence s'accompagne d'un sérieux danger pour la santé publique, les écosystèmes, le cadre de vie et l'économie.

Dans la stratégie environnementale développée par le MATE, la prise en charge du volet gestion des déchets solides constitue une priorité juridique et institutionnelle. C'est dans ce cadre qu'une loi relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets a été promulguée en décembre 2001. Cette loi définit clairement les responsabilités, fixe les principes d'une gestion écologiquement rationnelle des déchets y compris la réduction à la source, le recyclage et les traitements valorisants. Cette loi ouvre aussi la voie à la délégation du service public et, par là, à la privatisation partielle ou totale des activités liées à la gestion des déchets solides. (DERRAS A 2011).

## **1.2 Généralités sur les Installations de Stockage de Déchets (ISD) :**

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. (GUEDDOUDA M K 2011).

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. (GUEDDOUDA M K 2011).

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.

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.

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. (Baouassa D Zakouki M 2020).

### 1.3 Définition de déchet :

Un déchet peut être défini de différentes manières selon le domaine et l'intérêt d'étude et parfois l'origine et l'état des déchets.

La loi N° 01-19 du 12/12/ 2001 articles 3 du journal officiel de la république algérienne N° 77en 2001, définit le déchet comme : Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit et tout bien Meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a Obligation de se défaire ou de l'éliminer. La diversité des produits de consommation excède maintenant la biodiversité. (Baouassa D Zakouki M 2020).

Ce sont des restes résultant d'opération diverses, dont la production, le transfert ou l'utilisation, en général des biens meubles abandonnés par son propriétaire sous l'obligation de les retirer ou de les éliminer.

#### 1.3.1. Différents types de déchets:

✓ *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 ou à l'environnement. (Demdoum,A 2019)

✓ *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 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.

✓ **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 ou à l'environnement.

Les déchets classés interdits sont susceptibles de générer des risques pour la santé et la sécurité publique. On cite parmi eux :

- ✓ Les déchets contaminés provenant des hôpitaux ;
- ✓ Les déchets infectieux ou anatomiques ;
- ✓ Les matières non refroidies qui peuvent provoquer des incendies ;
- ✓ Les déchets liquides mêmes en récipient clos ;
- ✓ Les déchets radioactifs ou explosifs.

#### **1.4. Classification des déchets (MATE 2013) :**

Sur le plan réglementaire, les déchets sont classés en fonction de leurs origines et de leurs toxicités. Le type et la structure de stockage dépendent de la nature et des caractéristiques des déchets. Les textes réglementaires actuels différencient cinq (5) grands types de déchets.

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

##### **1.4. 1.Selon leur nature :**

Les déchets peuvent être classés selon leur nature et leur composition en trois catégories de base : déchets solides, déchets liquides et déchets gazeux.

**1.4.2. Selon le mode de traitement et d'élimination :** Chercheurs et Professionnels ont convenu de limiter les déchets solides en quatre familles principales :

**Les déchets inertes** : ce type de déchets est constitué d'éléments minéraux stables et inertes, c'est-à-dire leur incompatibilité avec l'environnement, qui résulte de certaines activités de démolition (sable, déchets rocheux, déchets terrestres etc.).

**Les déchets banals** : Ce type de déchets comprend principalement les déchets de papier, de plastique, de carton et de bois provenant des activités commerciales et industrielles, ainsi que les déchets ménagers.

**Les déchets spéciaux** : Ce type de déchets peut contenir des éléments polluants spécialement issu de l'activité industrielle (peinture, cendres, incinération... etc.).

Certains déchets spéciaux peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement naturel lors de leur production tels que les déchets de laboratoires universitaires et hospitaliers, le gypse et les phosphates.

**Les déchets dangereux :** C'est un type de déchets spécial qui contient plus de quantités de substances toxiques et présente donc des risques et plus importants pour l'environnement naturel.

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

Les déchets inertes : les déchets inertes distinguent par leur nature plutôt volumineux jusqu'aux carcasses avions, d'automobiles, chars, bus, etc.

**Les déchets fermentescibles :** Ce type de déchets est principalement constitué de matières organiques, animales ou végétales, ces matières passent donc par différentes étapes de fermentation aérobie et anaérobie.

**Les déchets toxiques :** Ce sont des toxines chimiques ou radioactives qui sont produites par des industries ou laboratoires, telles que (ex : flacons de médicaments, seringues, piles ou médicaments électroniques).

**1.4.4. Selon l'origine :**

Les déchets industriels : Hormis les résidus assimilables aux ordures ménagères, tant par leur nature que par leur volume modeste, on distingue dans cette classe : (DERRAS A 2011)

**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 :** Ce sont des déchets qui contiennent des matières toxiques issues de différentes industries (comme les ateliers d'artisans, le placage par électro-réflexion, etc.).

**Les déchets radioactifs :** Les déchets radioactifs posent des problèmes particuliers lors du transport et de la destruction des déchets industriels que les industries polluantes doivent supporter pour les résoudre avec l'approbation de l'aide gouvernementale avec des solutions appropriées.

**Les déchets urbains :** Il fait partie des déchets ménagers à lui correspondre en quantité et en volume du fait de l'évolution du niveau de vie, qui se traduit par les caractéristiques de quantité et de qualité des déchets.

**1.4.5. Selon le mode d'enlèvement des déchets** on distingue quatre catégories :

- Ce sont des déchets de petite taille (déchets ménagers, déchets du marché, déchets artisanaux et commerciaux).
- Déchets hospitaliers qui font l'objet d'une collecte sélective.
- Déchets encombrants aussi appelés monstres, et il s'agit de gros objets qui ont été réparés et éliminés (une vieille baignoire, un vieux sommier...ect).
- Les souillures qui proviennent du nettoyage et du balayage des voies publiques (feuilles, branchage, déchets des plages, etc.). (Baouassa D Zakouki M 2020).

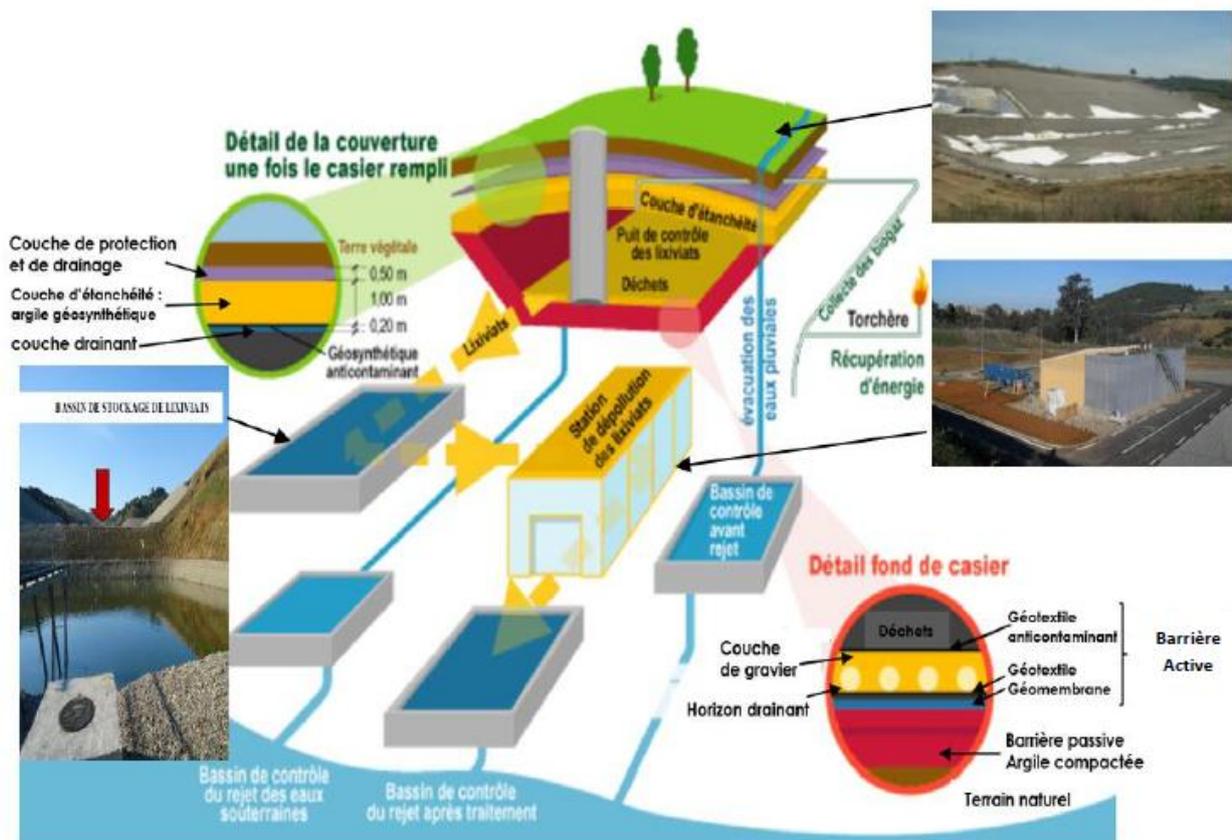
### 1.5. Centres d'enfouissement techniques CET :

D'après le Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement MATE (2013), un CET est une installation (classée) qui réceptionne les déchets pour les enfouir dans des fosses appelées « Casiers d'enfouissement »

- ✓ Le CET est composé de :

Une zone de service où le contrôle, l'admission et la pesée des déchets se font. Cette zone abrite également les bureaux, vestiaires et autres locaux ;

- ✓ La zone d'enfouissement qui comporte les casiers d'enfouissement et la station de traitement des lixiviats (liquides émanant des déchets) (Demdoun,A 2019).



**Figure 1:1** : Schéma général d'un CET avec des barrières d'étanchéités (Demdoun,A 2019).

En Algérie, au sens de l'article 3 du décret exécutif n° 04-410 correspondant au 14 décembre 2004 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations. Sont qualifiées d'installations de traitement des déchets toutes installations destinées à la valorisation, au stockage et à l'élimination des déchets.

### 1.5.1. CET de Classe I : Déchets spéciaux

**Catégories de déchets admissibles** : En plus des déchets urbains et banals, ces décharges sont habilitées à recevoir certains déchets industriels spéciaux. Ainsi sont admis dans ces CET de **Classe I** :

- ✓ Les déchets industriels spéciaux de *catégories A* qui sont : les résidus de l'incinération ; les résidus de la sidérurgie : poussières, bous d'usinage ; les résidus de forages ; les déchets minéraux de traitement chimique : sels métalliques, sels minéraux, oxydes métalliques (Demdoum,A 2019).
- ✓ Les déchets de *catégories B* qui sont : Les résidus de traitement d'effluents industriels et d'eaux industrielles, de déchets ou de sols pollués ; les résidus de peinture : déchets de peinture solide, de résine de vernis ; les résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries : par exemple les résidus d'amiante ; les réfractaires et autres matériaux minéraux usés et souillés.

### 1.5.2. CET de Classe II : Déchets Ménagers et Assimilés

**Catégories de déchets admissibles** : qui sont acceptés sur ces centres les déchets ménagers et assimilés (Demdoum,A 2019). Les déchets admissibles dans ces décharges sont :

- ✓ Ordures ménagères ;
- ✓ Déchets ménagers encombrants ;
- ✓ Déblais et gravats ;
- ✓ Déchets commerciaux, artisanaux et industriels banals assimilables aux ordures ménagères ;
- ✓ Déchets d'origine agricole ne présentant pas de danger pour la santé humaine et l'environnement ;
- ✓ Pneumatiques ;
- ✓ Cendres et produits d'épuration refroidis résultants de l'incinération des ordures ménagères ;
- ✓ Boues en provenance de l'assainissement urbain.

### 1.5.3 CET de Classe III : Déchets Inertes

Ce sont les installations de stockage recevant essentiellement des déchets inertes (Demdoum,A 2019).. Ces décharges de la classe III, ne reçoivent que les déchets inertes d'origine domestique comme les déchets issus du bricolage familial qui peuvent également être stockés dans les décharges de classe II et les déblais et gravats qui peuvent également être stockés dans les décharges de classe II. Ils reçoivent aussi les déchets de chantiers et les déchets de carrière. (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020)

## 1.6. Critères d'étanchéité des ISD

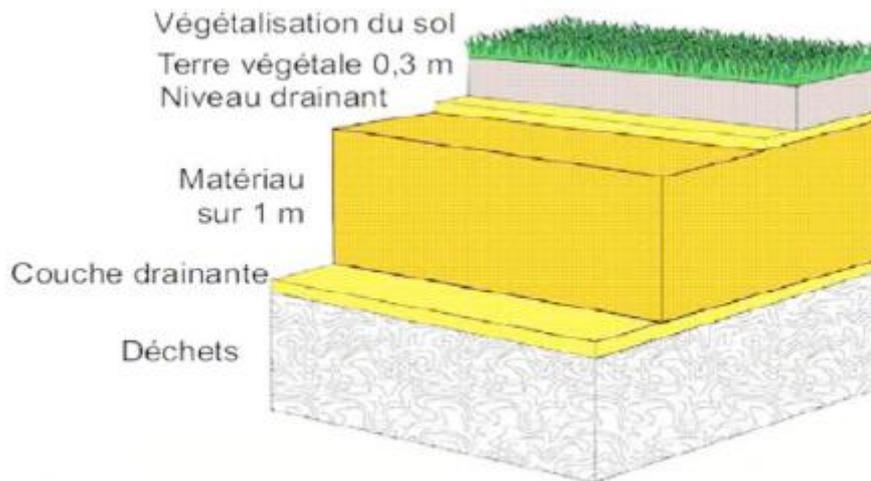
Le perfectionnement de la sécurité des installations de stockage des déchets passe nécessairement par l'optimisation de l'aménagement du fond et des flancs. Ainsi, une couche imperméable est établie en vertu de chaque site d'enfouissement pour empêcher la fuite de lixiviat hors des sites d'enfouissement (Demdoum,A 2019).

Le confinement des déchets dans l'ISD est réalisé au moyen de deux barrières, l'une passive (naturel) et l'autre active (artificielle). Les aménagements (couches drainantes, imperméabilisation du fond et des flancs...etc) permettent la collecte des flux en vue de leur traitement. Généralement, il n'y a pas d'isolation totale par rapport aux précipitations météoriques afin de permettre l'évolution du déchet et l'atteinte d'un objectif d'un flux résiduel.

### 1.6.1 Barrière en couverture des ISD

Les couvertures des installations de stockage de déchets dangereux ou non sont réalisées par la méthode du multicouche associant des fonctions d'étanchéité et de drainage. La couverture des ISD classe II dépend du type de confinement et la norme du pays. En effet dans le cas du stockage de déchets biodégradables, une couverture dite "semi-perméable" sera généralement mise en place. Dans cette barrière, la capacité au champ des déchets serait atteinte rapidement et permettrait ainsi l'évacuation d'une grande proportion de contaminant par le biais du système de drainage des lixiviats. Ce type de couverture se compose de haut en bas par (Figure I:2) :

- ✓ Une couche de terre végétale permettant de favoriser l'évapotranspiration ;
- ✓ Une couche drainante collectant les eaux de ruissellement ;
- ✓ Une couche d'au moins un mètre de matériau ayant une conductivité hydraulique  $k \approx 10^{-9}$  m/s, permettant de limiter l'infiltration de l'eau dans les déchets sans l'empêcher totalement (Bar-ral, 2008) ;
- ✓ Une couche drainante munie de collecteurs permettant de collecter les biogaz produits par la biodégradation des déchets. (Demdoum,A 2019)



**Figure I:2** Barrière en couverture des ISD Classe II (Demdoum,A 2019).

En Algérie, pour les ISD classe I, une couverture imperméable devra être mise systématiquement en œuvre empêchant les infiltrations d'eau dans le massif de déchets à l'aide d'une géomembrane d'une conductivité hydraulique  $k < 10^{-11}$  m/s, munie de son système de protection (géotextiles anti-poinçonnant) et une couche d'au moins un mètre d'argile compactée ou sol sableux-bentonite compacté dont la conductivité hydraulique  $k$  est inférieure à  $10^{-9}$  m/s.

### 1.6.2 Barrière active (en fond et en talus)

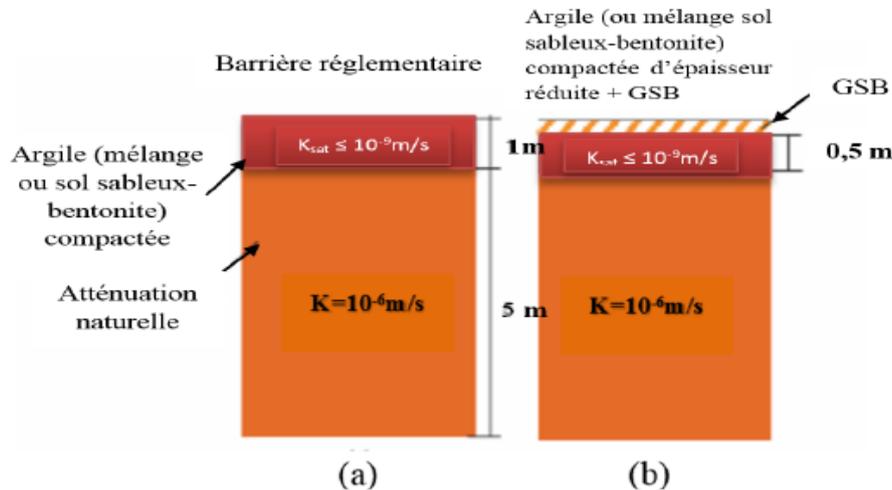
Dans l'ISD classe I et II, une barrière de sécurité active assure son indépendance hydraulique, le drainage et la collecte des lixiviats (MATE, 2005). La barrière de sécurité active est constituée d'un dispositif d'étanchéité-drainage par géosynthétique comprenant de bas :

- Un géotextile de protection de la géomembrane ;
- Une géomembrane en PEHD de 2 mm d'épaisseur ;
- Un géotextile de protection de la géomembrane,
- Un réseau de drains de collecte des lixiviats,
- Une couche drainant de 0,50 m d'épaisseur en matériau granulaire siliceux naturel, de conductivité hydraulique supérieure ou égale à  $10^{-4}$  m/s.

La géomembrane doit être étanche, compatible avec les déchets stockés et mécaniquement acceptables au regard du projet de la géotechnique. Sa mise en place doit en particulier conduire à limiter autant que possible toute sollicitation mécanique en traction et en compression dans le plan de pose, notamment après stockage des déchets.

### 1.6.3 Barrières passives

Généralement constituée d'une couche d'argile compactée (ou mélange sable/bentonite) imperméable plus ou moins épaisse selon la nature des déchets, qui est l'écran, non sollicité pendant la vie normale de l'exploitation, mais qui sert de « rempart extrême » et qui minimise les effets sur l'environnement (l'eau souterraine) en cas de défaillance des dispositifs d'étanchéité active et de drainage (d'où l'appellation de système passif) (Figure I:3) (Demdoum,A 2019).



**Figure I:3** Dépliant couches d'une barrière passive (Demdoum,A 2019).

(a) Argile compactée ou un mélange sol sableux-bentonite compacté,

(b) un géosynthétique bentonitique (GSB) sur une argile (ou un sol sableux-bentonite) compactée (DEMDOUM A 2019).

Les géosynthétique bentonitique (GSB) sont formées d'une couche d'environ 5 kg/m<sup>2</sup> de bentonite sèche (répartie sur 1m<sup>2</sup>), contenant ou pas une colle soluble à l'eau, qui est placée sur un support constitué d'un géotextile (géotextiles bentonitiques) ou d'un géofilm (géofilms bentonitiques) (épaisseur  $e \leq 1$ mm) (Comité français des Géosynthétique, 2011).

Dans la plupart des cas, les GSB ne remplaçant pas les systèmes de barrière passive complets, mais ils sont installés comme ajout ou remplacement d'une partie d'un système de barrière (c'est-à-dire des composants dans un système de barrière doublée ou non) (Sarsby, 2013).

### 1.6.4 Critères Des Barrières Naturelles :

Le souci d'obtenir un remblai très imperméable à l'aide d'un géomatériau d'une excellente stabilité à long terme a conduit à choisir les argiles comme constituants de base des barrières étanches. Cependant, les argiles (imperméables) naturelles ne sont pas toujours disponibles sur place et d'autres matériaux doivent être considérés. Dans de telles circonstances, l'utilisation constructive d'un mélange de bentonite et matériaux sableux locaux peut générer d'importants avantages économiques et environnementaux (DEMDOUM A 2019).

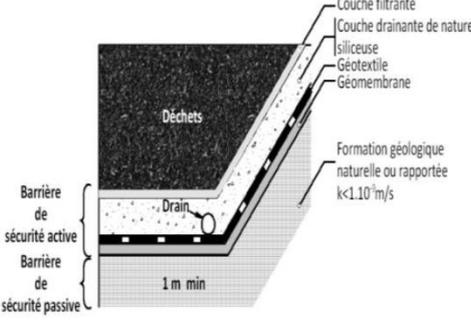
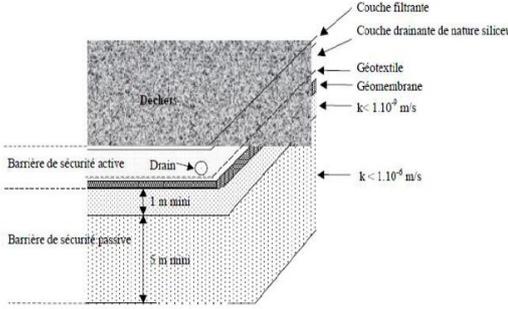
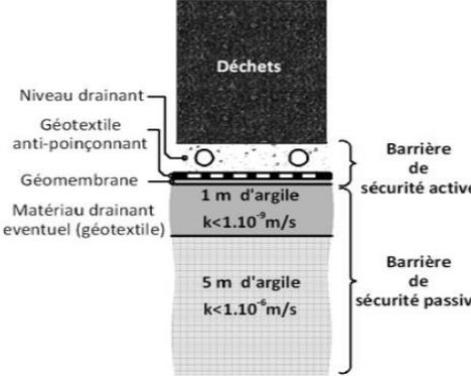
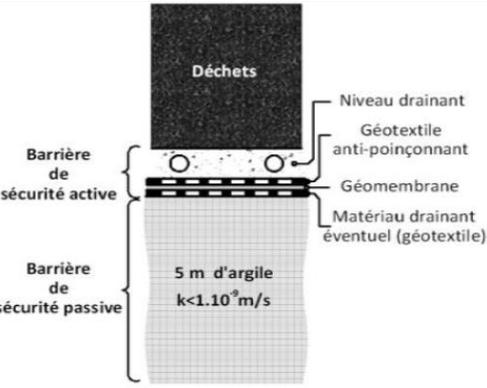
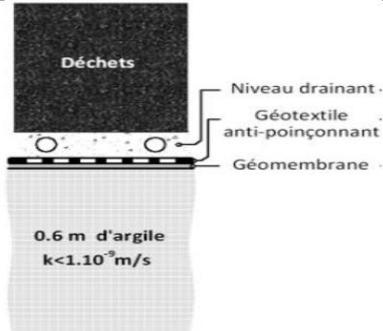
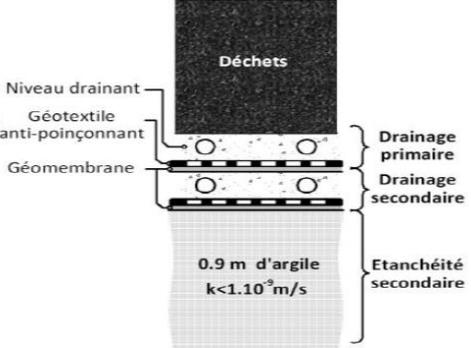
Le matériau doit d'abord être identifié et répondre aux critères principaux de nature, d'ouvrabilité et de perméabilité. Les critères géotechniques imposés par les réglementations algériennes (MATE, 2013) et européennes (Agency Environment, 2011) pour les barrières passives sont présentés dans le tableau I:1.

**Tableau I:1** Identification des sols pour les barrières passives (Demdoun, 2019)

Critères	Réglementation Algérienne	Réglementation Européenne	Norme Américaine
<b>Nature</b>	Teneur en argile > 10% Teneur en gravier (20mm) ≤ 15 %	Teneur en argile entre 10 et 20 % Teneur en gravier (25-30mm) entre 20 et 30%	Teneur en argile ou limon entre 15 et 20% Teneur en gravier ≤ 10%.
<b>Ouvrabilité</b>	$10\% \leq I_p \leq 65\%$ $W_L \leq 90\%$	$11\% \leq I_p \leq 30\%$ $w_L \leq 80\%$	$10\% \leq I_p \leq 30\%$
<b>Perméabilité</b>	$k_{sat} \leq 10^{-9}$ m/s	$k_{sat} \leq 10^{-9}$ m/s	$k_{sat} \leq 10^{-9}$ m/s
<b>Cisaillement</b>	$C_u \geq 40$ kPa et $\phi \approx 30^\circ$		

Les réglementations algérienne, française et américaine intègrent des seuils de perméabilité pour les différentes installations de stockage de déchets dangereux et non dangereux. Le tableau I:2 présente les grandes lignes de ces réglementations (Derras, 2011) et montre la diversité qui existe entre les différents pays. Les sols présentant un  $I_p$  très élevé ( $\geq 30$  à 40 %) sont collants et difficiles à travailler in situ. De plus, ils forment des mottes dures, lorsqu'ils sont secs et difficiles à décomposer pendant le compactage. (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020)

**Tableau I:2** Réglementations pour l'étanchéité des fonds des installations de stockage des déchets (ISD) (Derras, 2011)

Normes	Fond des ISD classe I	Fond des ISD classe II
<p><b>Norme Algérienne</b></p> <p><b>Guide pour La conception de CET</b></p>		
<p><b>Norme Française</b></p> <p><b>- Arrêté du 18 décembre 1992 ;</b></p> <p><b>- Arrêté du 9 septembre 1997</b></p>		
<p><b>Norme Américaine</b></p> <p><b>Environnement Protection Agency (EPA, 2008)</b></p>		

### 1.7 Détails Fondamentaux des Mélanges Sol grenu-Bentonite

Les barrières d'étanchéités peuvent être constitués de différents matériaux tels que l'argile compactée, le mélange sol grenu/bentonite, le géotextile, la géomembrane plastique et le ciment ,Ce système de protection consiste en un ou plusieurs de ces types de matériaux qui ont un

comportement différent en termes de mouvement des contaminants. (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020).

Le mélange sol grenu-bentonite est une combinaison de deux matériaux différents en termes de distribution granulométrique et d'activité chimique pour produire un matériau de faible perméabilité, de faible compressibilité et de résistance appropriée. Les caractéristiques physiques de la bentonite sont basées sur les caractéristiques des minéraux de type smectite. Ces caractéristiques comprennent : un gonflement élevé, une grande capacité d'échange cationique, une faible conductivité hydraulique, et une grande surface spécifique.

Puisque le comportement hydraulique et mécanique des sols à grande échelle est contrôlé par les mécanismes agissant à l'échelle microscopique, il est important de bien comprendre les mécanismes agissant sur les constituants des mélanges sol grenu-bentonite. Ainsi, les principales caractéristiques minéralogiques de la bentonite sont présentées dans ce qui suit, avec une emphase sur les interactions entre les particules de bentonite et l'eau.

### **1.7.1 Bentonite :**

La bentonite est une argile ductile très colloïdale formée par l'altération des cendres volcaniques in situ. Elle est largement distribuée dans les sédiments du Crétacé et du Tertiaire, comme dans la région du Golfe et les États des Hautes Plaines en Amérique du Nord, en Europe centrale et méridionale, en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie de l'Est.

Les bentonites sont majoritairement composées de smectite (de type 2:1 ( $\text{SiO}_4 \text{AlO}_6 \text{SiO}_4$ )) et plus particulièrement de montmorillonite, ayant une taille de  $\leq 20 \mu\text{m}$ . Dans leur état naturel, la plupart des gisements de bentonite sont hétérogènes ; ils sont constitués de montmorillonite mélangée (ou dite "interstratifiées") avec l'illite et/ou la kaolinite et d'autres minéraux.

Les bentonites de haute qualité peuvent contenir jusqu'à 80% de montmorillonite. La part restante étant constituée d'autres minéraux tels que le quartz, les feldspaths, les carbonates ...etc. La surface spécifique de la montmorillonite est 749 m<sup>2</sup>/g (Tournassat et Appelo, 2011). En bentonite, la surface spécifique est moins et peut être évaluée sur la base du contenu de montmorillonite. (DEMDOUM, A 2019).

#### **1.7.1.1 Microstructure de la bentonite**

Différents auteurs ont mis en évidence trois niveaux d'organisation dans les systèmes structuraux des montmorillonites. Nous avons repris sur la figure 1:4 la présentation des différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation proposée par Pluart (2002). Le composant le plus dominant dans toutes les argiles c'est 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.

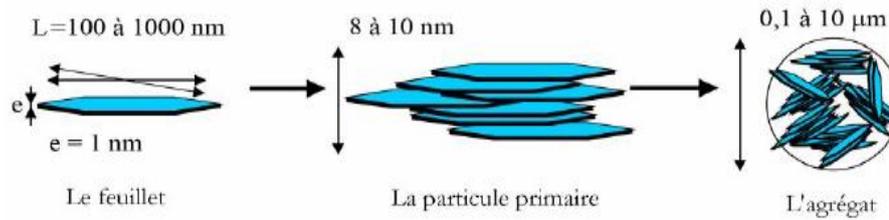


Figure I:4 Structure multiéchelle de la montmorillonite (Pluart, 2002).

Les minéraux argileux présents dans la montmorillonite sont des aluminosilicates, présentant une structure en feuillets de cristal (Figure I:4a). Sa structure cristalline est constituée d’une seule couche octaédrique (O) et deux couches de tétraédrique (S), qui sont symétriquement entourées de sorte qu’à la forme des feuilles de cristal (Figure I:4c). Les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxydes du feuillet octaèdre pour former la couche élémentaire de la montmorillonite (T-O-T)

(Figure I:4b). La couche élémentaire à une épaisseur d’environ 10 Å (Mitchell, 1993). Une seule feuille de cristal de montmorillonite est constituée de 15 à 20 couches élémentaires (Demdoum, 2019).

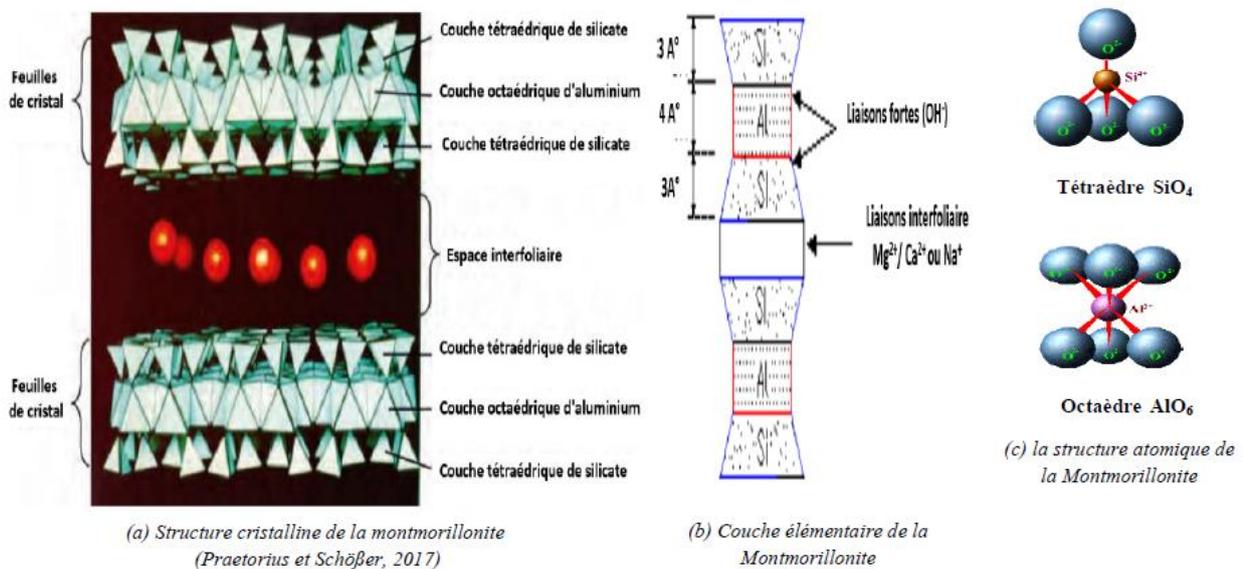


Figure I:5 Structure de la montmorillonite (DEMDOUM,A 2019).

Dans l’état naturel, les cations comme le magnésium, calcium (Mg<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) et le sodium (Na<sup>+</sup>) sont liés dans les positions de l’espace interfoliaire, et neutralise la charge négative de surface extérieure des feuilles de cristal ainsi qu’entre les particules. Selon le type de cations attachés, la bentonite est différenciée en bentonites sodiques et calciques. Ces cations peuvent être échangés par d’autres cations présents dans le système et on peut ainsi définir une capacité d’échange cationique pour un échantillon donné. Cette capacité d’échange cationique dépendant du pH de

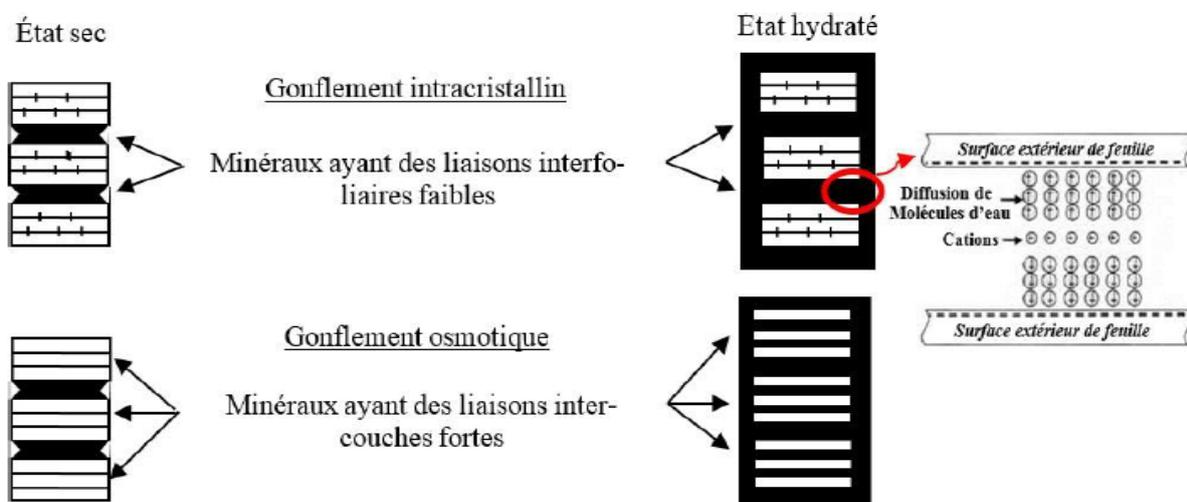
la solution, elle est en général mesurée à pH neutre, ce qui permet une comparaison fiable des différentes données expérimentales. Dans le cas des montmorillonites, la littérature rapporte des valeurs comprises entre 85 et 160 milliéquivalents pour 100 grammes de bentonite (Viallis-Terrisse, 2000). La formule générale de la montmorillonite est  $(\text{Na,Ca})_0,3(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot\text{H}_2\text{O}$ .

### 1.7.1.1 Interaction eau-bentonite :

Les liaisons qui unissent les couches élémentaires sont faibles, facilement brisées et en présence d'humidité, l'eau peut incorporer l'espace interfeuillet. Lors de son hydratation, la montmorillonite gonfle en raison de l'incorporation de molécules d'eau entre les feuillets T-O- T, en association avec les cations entre feuillets  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ .

Les principaux mécanismes contrôlant l'hydratation et le gonflement de la bentonite sont discutés dans plusieurs ouvrages ; Deux types de gonflement dû à l'hydratation sont différenciés (Figure I :6)

- ✓ Le gonflement intracristallin (ou interfoliaires) : l'absorption d'excès d'eau au niveau des cations interfoliaires et des surfaces minérales de montmorillonite provoque un élargissement des couches élémentaires. Ce processus est réversible intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse et peut présenter un potentiel de gonflement très importante. Ce premier processus est associé avec l'écoulement de l'eau au sens de la loi de Darcy (DEMDOUM,A 2019);
- ✓ Le gonflement osmotique ou le gonflement interparticulaire (le gonflement de double couche) : des couches d'ions diffusés forment à la surface du minéral de montmorillonite et de la solution des pores interstitiels en raison des différences de concentration des cations, ce qui provoque une répulsion électrostatique des particules. Ce gonflement dépend des caractéristiques des minéraux argileux, mais également du chimisme de la solution hydratante, et est influencé principalement par la pression de confinement (DEMDOUM,A 2019)..



**Figure I:6 :** Mécanisme de gonflement sur les surfaces de la montmorillonite (Mitchell,1993)

Dans la pratique, trois grandeurs sont utilisées pour caractériser l'aptitude de gonflement de la bentonite :

- ✓ Le potentiel (ou taux) de gonflement  $\Delta G$ , correspond à la variation relative de volume ( $\Delta v/v_0$  en %) d'un échantillon soumis à une surcharge nulle ou très faible (généralement le poids du piston dans un oedomètre) lorsque l'on le met en contact avec de l'eau à pression atmosphérique ;
- ✓ La pression de gonflement  $P_G$ , qui peut être définie comme étant la pression générée lors de l'hydratation d'un échantillon en condition confinée (essai à volume constant,  $\Delta v = 0$ ) ; elle peut être également définie par la pression qu'il faut appliquer pour ramener un échantillon à son volume initial avant l'adsorption d'eau (essai à gonflement libre) (DEMDOUM, A 2019) ;
- ✓ L'indice de gonflement  $C_g$ , qui traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné ; il est défini par la pente de la courbe  $e=f(\sigma)$  obtenue en déchargement lors d'un essai oedométrique classique, il est comparé à l'indice de compression  $C_c$ .

En général, il y a une différence significative entre la bentonite sodique et la bentonite calcique dans leur comportement d'hydratation dû à la nature différente des cations interfoliaires. La bentonite de sodium est plus utilisée dans les pratiques d'ingénierie que la bentonite de calcium parce que la bentonite de sodium a une conductivité hydraulique plus faible et un gonflement plus important. La bentonite sodique a pour cette raison un potentiel de gonflement entre 600 et 700%, et la bentonite calcique seulement 200-300% (Praetorius et Schöber 2017).

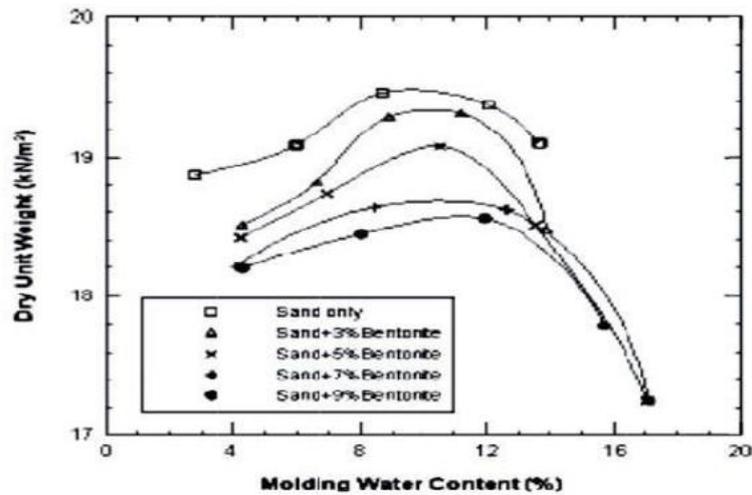
## 1.7.2 Caractéristiques Hydromécaniques Des Mélanges Sol Grenu-Bentonite :

### 1.7.2.1 Caractéristique de compactage :

Le compactage du sol peut être défini comme la méthode permettant d'augmenter la densité du sol en appliquant une énergie mécanique pour réduire les vides entre les particules du sol. Lorsqu'on augmente l'énergie de compactage, la tendance est à la diminution de la valeur de  $w_{opt}$ , quant à la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ), elle est une fonction croissante de l'énergie de compactage.

Une quantité importante de données a été présentée sur le compactage du mélange sol- bentonite. Ces données ont examiné l'effet de la teneur en bentonite, des périodes de durcissement, des efforts de compactage et des procédures de mélange sur la densité sèche maximale (ou poids) et la teneur en eau optimale décrites dans la littérature suivante (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020).

Chalermyanont et Arrykul (2005) ont indiqué que lorsque la teneur en bentonite augmente, les valeurs de densité sèche maximale diminuent et la teneur en humidité optimale augmente (Figure I:7).



*Figure I:7 : Courbe de compactage illustrée par Chalermyanont et Arrykul (2005).*

Kenney et al. (1992) ont effectué une série d'essais de compactage normal sur des mélanges de sable et de bentonite contenant une teneur en bentonite de 4 %, 8 %, 12 %, 16 % et 22 % en envisageant d'utiliser de l'eau potable dans les essais. La première méthode consiste à mélanger le sable et la bentonite à l'état sec avant d'ajouter de l'eau. La deuxième méthode consiste à mélanger du sable humide avec de la bentonite sèche, puis à ajouter de l'eau. Ils ont déclaré que l'ajout de bentonite jusqu'à 20% provoque une augmentation des valeurs de la densité sèche maximale et une diminution de la densité sèche maximale. La valeur de la densité sèche maximale a été estimée entre 1,70 et 1,85 Mg/m<sup>3</sup>, tandis que les valeurs correspondantes de la teneur optimale en eau étaient d'environ 12 à 15 %. Kenney et al. (1992) ont constaté que les deux méthodes de malaxage aboutissaient aux mêmes résultats.

### 1.7.2.2 Caractéristique de compressibilité :

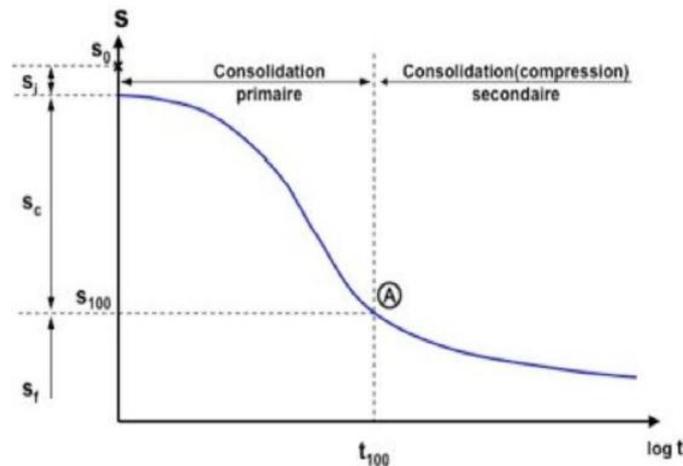
En général, la compressibilité d'un sol est le rapport entre l'indice de vides ( $e$ ) du sol et la charge appliquée ( $\sigma_v$ ). La compressibilité d'un sol comprend trois étapes différentes. Ces étapes sont le tassement initial, la consolidation primaire et la consolidation (compression) secondaire, comme le montre la figure 1 :8 (datant de 2013). L'examen de la courbe de la consolidation de la figure permet de noter :

✓ La compression initiale (noté  $S_i$ ) se produit immédiatement dès l'application d'une nouvelle charge ( $t_i=0$ ), mais avant que ne commence le drainage causé par la compression du gaz à l'intérieur des vides et par la compression élastique des particules du sol ;

La consolidation primaire (noté  $S_c$ ) est un tassement dépendant du temps causé par l'expulsion de l'eau interstitielle. Au début de la consolidation correspondant à des faibles dissipations de l'eau interstitielle, la courbe présente un palier sensiblement horizontal, puis la courbe, à concavité tournée vers le bas, décroît plus rapidement au fur à mesure que l'eau s'évacue jusqu'à la fin de

la consolidation primaire (point d'inflexion (A)) caractérisée par l'évacuation totale, à  $t=t_{100}$ , de l'eau interstitielle ( $\Delta U = 0$ ), et où s'achève le tassement de consolidation primaire  $S_c$  (noté aussi  $S_{100}$ ) ;

La compression secondaire (noté  $S_s$ ) est également un tassement dépendant du temps qui est causé par le réajustement plastique du tissu du sol et qui se produit après l'activité de dissipation de la pression d'eau interstitielle excessive. Le temps nécessaire à la dissipation de l'eau du sol pendant le processus de consolidation dépend de la perméabilité du sol. Dans les sols sans cohésion, qui ont une perméabilité élevée, le temps requis pour la dissipation de l'eau est inférieur à celui des sols cohésifs.



**Figure 1:8 :** Courbe de tassement en fonction du temps pendant la consolidation pour une charge donnée (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020).

Watabe et al. (2011) ont étudié l'effet des fractions de sable et de bentonite sur la propriété de compressibilité de leurs mélanges. Ils ont effectué une série des tests d'oedomètre et d'observations microscopiques sur différents types de sols (sable-argile et sable-bentonite). Ils ont signalé que la compressibilité diminue avec l'augmentation de la fraction de sable dès que les particules de sable flottent dans le mélange. Cependant, lorsque la structure du squelette est formée par des particules de sable ayant une grande fraction de sable, la compressibilité reste presque constante même si la fraction additive du sable augmente.

Faan et al. (2014) ont réalisé une série d'essais de consolidation unidimensionnelle sur des mélanges sol argileux (Kaolin)-bentonite et sable-bentonite destinés à être utilisés comme remblai aux murs de séparation verticaux. L'objectif de cette étude était de découvrir l'effet de la fracturation du sable et de la teneur en eau sur la compressibilité de ces mélanges. La granulométrie du sable était entre 0,075 et 1mm. Les teneurs en bentonite utilisées dans le mélange sol (kaolin)-bentonite et le mélange sable-bentonite étaient respectivement de (5, 10 et 15%) et (3, 5, 8 et 11%). Ils ont indiqué que la compressibilité est affectée de manière significative par la teneur en bentonite

et par la teneur en eau. Cependant, la granulométrie du sable n'a pas eu d'effet significatif sur la compressibilité.

### 1.7.2.3 Caractéristique de gonflement :

Dans les mélanges sol grenu-bentonite, les propriétés hydrogéologiques du milieu sont principalement dictées par la capacité de la bentonite à combler les macropores lors de son hydratation. Le potentiel de gonflement (G) d'une bentonite correspond à l'augmentation de volume maximale lors de son hydratation. Le gonflement maximum d'un mélange sol grenu-bentonite est atteint une fois la bentonite complètement hydratée.

Il a été déterminé que l'amplitude du gonflement des mélanges sol grenu-bentonite est significativement influencée par la densité initiale, la contrainte verticale et la quantité de bentonite contenue dans le mélange ; Wong et Haug (1991) expliquent que les mélanges sable-bentonite peuvent augmenter de volume lors de la saturation et que le gonflement est limité à moins de 1,0% pour des spécimens à 8,3% bentonite. Par contre, pour des spécimens contenant 13,0 et 25,0% bentonite, l'augmentation de volume des mélanges est de l'ordre de 3,47 et 8,82% respectivement. Des valeurs de gonflement entre 0,22 et 11,70% sont relevées pour des sols de granulométrie variable (0,25 mm à 2,00 mm) à teneur en bentonite variant de 15 à 30%. (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020).

### 1.7.2.4 Caractéristiques de perméabilité saturée

La perméabilité saturée (appelée aussi : conductivité hydraulique,  $k_{sat}$ ) décrit la capacité d'un sol saturé à conduire l'eau libre et est l'une des propriétés des sols les plus importantes à déterminer lors de la conception des barrières passives (BOUHAMIDA F Z YAGOUB Z 2020).

Dans la plupart des sols saturés, l'écoulement à travers les espaces poreux peut être considéré comme laminaire (c'est-à-dire non turbulent), mais coulant d'une manière « rationalisée » régulière. Basé sur des données obtenues à partir des essais en laboratoire, Darcy a proposé une équation linéaire pour l'écoulement de l'eau à travers un milieu  $v$ -poreux (écoulement laminaire). Cette équation indique que la vitesse de flux à travers une unité de surface d'un sol est proportionnelle au gradient hydraulique  $i$  :

$$V=Qt=A.v=A.K.i \quad (\text{loi Darcy})$$

Où

$V$  : Volume de l'eau transvasant l'unité d'air normal à la direction de l'écoulement pendant l'unité de temps [ $m^3/s$ ]

$Q$  : Flux ou débit sortant ou entrant [ $m^3/sec$ ]

$v$  : vitesse superficielle de l'écoulement [ $m/s$ ].

$K$  : Conductivité hydraulique [ $m/s$ ].

Pour la détermination de la conductivité hydraulique saturée des sols en laboratoire, deux méthodes, applications directes de la loi de Darcy, sont utilisées en laboratoire (par perméamètre à paroi rigide) :

- ✓ La mesure sous charge constante pour les sols très perméables (comme les sols sableux)
- ✓ La mesure sous charge variable pour les sols peu perméables (comme les sols argileux).

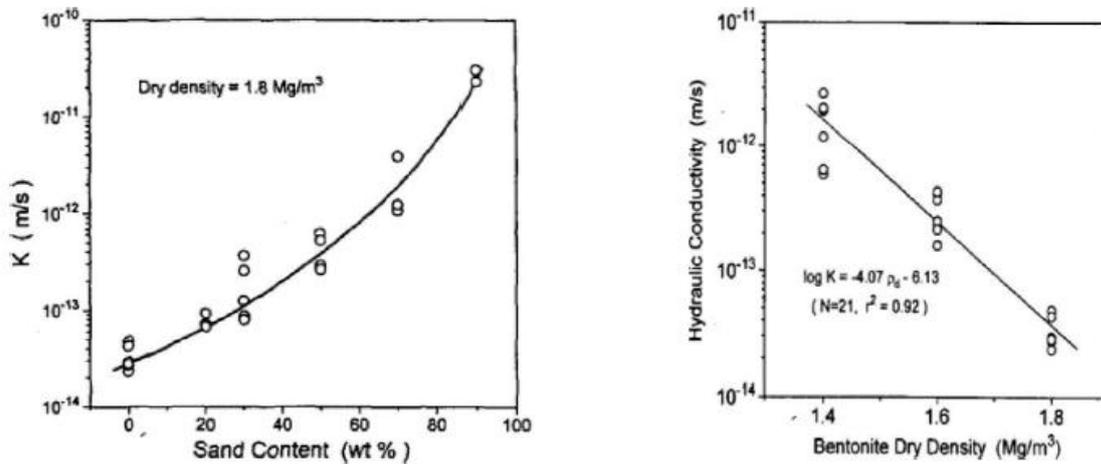
La validité de la loi de Darcy a été également vérifiée pour les bentonites compactées, à partir des essais de perméabilité [29]. Les caractéristiques de la perméabilité des mélanges sol grenu-bentonite ont été étudiées dans plusieurs ouvrages. Dans ces ouvrages, on a tenté d'examiner la perméabilité des mélanges sable-bentonite ainsi que certains facteurs susceptibles d'affecter leur perméabilité. Ces facteurs sont les suivants : type de bentonite, teneur en bentonite, type de perméation, indice de vides [28], teneur en eau de compactage, degré de saturation, comportement de gonflement, distribution granulométrique (en particulier la teneur en fines) et gradient hydraulique. Les plus importants facteurs sont recensés ci-dessous :

#### **a) Influence de la densité sèche et de la teneur en bentonite**

Globalement, l'augmentation de la teneur en bentonite et de la densité sèche conduit à la diminution significative de la conductivité hydraulique. Par exemple, dans l'étude de Cho et al. (2000), pour une bentonite de densité sèche 1,80 g/m<sup>3</sup>, la conductivité hydraulique chute de trois ordres de grandeur lorsque la proportion de sable passe de 90 à 0% (bentonite seule) (Figure 1 :9a).

Dans cette étude, la bentonite seule a une conductivité hydraulique de l'ordre de  $2 \times 10^{-14}$  m/s. La dépendance de la conductivité hydraulique à la densité sèche est illustrée à la figure I :9b pour la même étude : elle chute de deux ordres de grandeur lorsque la densité sèche augmente de 1,4 Mg/m<sup>3</sup> à 1,8 Mg/m<sup>3</sup>.

**b) La diminution de la conductivité hydraulique** avec l'augmentation de la proportion de bentonite ou de la densité sèche est attribuée à l'influence croissante du gonflement, qui induit une réduction de la surface disponible pour l'écoulement.



**Figure I.9 :** (a) Conductivité hydraulique en fonction de la proportion de sable ; (b) Conductivité hydraulique en fonction de la densité sèche de la bentonite (Cho, W 2000)

### c) Influence de la distribution granulométrique du sol de base

Dans le cas des mélanges graviers-bentonite, des conductivités hydrauliques saturées entre 10<sup>-10</sup> m/s et 10<sup>-8</sup> m/s sont retrouvées pour des mélanges entre 5 et 10% bentonite. Avec l'ajout de 20 à 30% cm/s bentonite, des valeurs de  $k_{sat}$  de l'ordre de 10<sup>-13</sup> m/s et 10<sup>-12</sup> m/s peuvent être obtenues. Dans le cas des sables propres bien étalés (SW), les conductivités hydrauliques saturées retrouvées dans la littérature varient typiquement de 10<sup>-9</sup> m/s à 10<sup>-10</sup> m/s pour des teneurs en bentonite entre 4 et 13 %. Certaines valeurs inférieures à 10 ont été observées à faible teneur en bentonite. Pour les sables uniformes ou serrés (SP), les valeurs de  $k_{sat}$  sont habituellement situées entre 10<sup>-11</sup> m/s et 10<sup>-8</sup> m/s pour des teneurs en bentonite entre 4 et 33 %. Les conductivités hydrauliques saturées sont plutôt de l'ordre de 10<sup>-12</sup> m/s entre 50 et 80% bentonite pour ces matériaux.

En général, Koerner et Daniel (1997) ont montré que les sols avec une granulométrie étalée requièrent une plus faible proportion de bentonite que les sols uniformes pour atteindre une même conductivité hydraulique saturée. D'Appolonia (1980) a évalué les effets des fins (< 200 μm) sur la perméabilité de sol sableux-bentonite et il a constaté que pour les fines plastiques et les fines à faible plasticité, la perméabilité diminue à mesure que le pourcentage des fines a augmenté. Les valeurs de perméabilité pour les fines plastiques étaient généralement inférieures à celles des fines à faible plasticité.

### d) Influence de l'indice des vides

L'indice de vide (e) est défini comme le rapport entre le volume de vides et le volume de solides (Demers, 2008). La densité et l'indice de vide sont inversement liés. La perméabilité diminue à mesure que la densité augmente ou que l'indice de vide diminue. Il a été démontré par plusieurs

auteurs que, pour une teneur en bentonite donnée, il existe une relation où le log ( $k_{sat}$ ) diminue linéairement avec l'indice des vides des mélanges sol grenu-bentonite.

#### e) Influence de la composition chimique du fluide interstitiel

En général, la conductivité hydraulique saturée de la bentonite est jusqu'à trois ordres de grandeur plus élevée avec de l'eau salée que de l'eau fraîche (Kenney et al. 1992); Studds et al. (1998) ont mesuré la conductivité hydraulique saturée d'échantillons de bentonite en contact avec des eaux salées à différentes concentrations. Une relation linéaire a été observée entre le logarithme de la conductivité hydraulique saturée et l'indice des vides pour chaque concentration. Ces résultats montrent aussi que pour un indice des vides donné, la conductivité hydraulique saturée augmente avec la concentration de sels en solution. Une différence de conductivité hydraulique saturée de deux ordres de grandeur est observée entre un essai réalisé avec de l'eau distillée et avec une solution saline à 0,1 mol/l. La même tendance a été observée pour des mélanges sable-bentonite par plusieurs auteurs (p. ex. Kenney et al. 1992 ; Alston et al., 1997).

#### 1.4.2.5 Caractéristiques de résistance

Le comportement mécanique des mélanges sol grenu-bentonite est devenu un sujet de recherche important en géotechnique à cause du besoin de structures d'intégrité à long terme. La charge normale de déchets peut provoquer des contraintes de cisaillement (ou écrasement) dans le système d'étanchéité et conduire à la formation de fissures et donc provoquer une augmentation de la conductivité hydraulique du matériau d'étanchéité. Les changements dans les caractéristiques chimiques de ce matériau dus à la contamination par les lixiviats peuvent affecter les sols compactés (p. ex., une diminution des argiles contaminées a été observée). Donc, il est essentiel d'évaluer les propriétés mécaniques des mélanges de sol grenu-bentonite compactés.

##### a. Résistance au cisaillement

En général, le critère de rupture le plus souvent appliqué aux sols est le critère de Mohr- Coulomb. Ce critère délimite deux domaines bien distincts, un domaine interne où le matériau reste stable et résistant, et un domaine externe où le matériau se met en rupture. Cette courbe est appelée « courbe intrinsèque ». L'expression de la courbe s'écrit habituellement :

$$\tau = C' + \sigma V \tan(\varphi') \quad (\text{La loi de Mohr -Coulomb}).$$

C : représente un paramètre de résistance appelé Cohésion ;

$\varphi'$  : est l'angle de frottement interne ;

$\sigma V$  : est la contrainte normale appliquée au plan de rupture ;  $\tau$  est la résistance au cisaillement.

Le comportement contrainte-déformation des sols est généralement déterminé à partir d'essais de compression triaxial et des essais de cisaillement direct.

La bentonite est un matériau hautement cohésif et a des valeurs plus faibles d'angle de frottement interne. Concernant le mélange de sable-bentonite, Shafiee et al. (2008) ont rapporté que la résistance au cisaillement non drainé augmente avec l'augmentation de la teneur en sable. De même, Vallejo et Mawby (2000) ont démontré que la résistance au cisaillement est régie par la phase granulaire lorsque la teneur en sable est supérieure à 75% et par la phase cohésive lorsque la teneur en argile est supérieure à 40%. La prédominance de la matrice argileuse se produit lorsque la teneur en argile est supérieure à 40%, comme l'ont confirmé (Wood et Kumar 2000).

(Elkady et al. 2014) ont effectué un test de cisaillement direct sur les mélanges de sable-sol argileux compacté et de ciment (gamme de bentonite de 0 à 60%) afin de trouver le mélange le plus économique à utiliser pour les noyaux d'argile des barrages en terre et les barrières passives. La principale enquête consiste à déterminer l'influence des conditions initiales de la teneur en argile, des contraintes verticales et des conditions de saturation sur le comportement de la résistance au cisaillement. Ils ont indiqué que le mélange sable-argile, qui comprend de la bentonite à 10 % et du sable à 90 %, était le plus économique.

#### **b. Résistance à la compression non confinée**

Cho et al. (2002) ont passé en revue certains documents relatifs à l'étude de la résistance à la compression non confinée et du module d'élasticité de Young des mélanges sable-bentonite compactés. Ils ont constaté que la résistance à la compression non confinée et le module de Young diminuent à mesure que la teneur en sable augmente. Ils ont également noté que le logarithme de la résistance à la compression et du module d'Young augmentait de manière linéaire avec l'augmentation de la densité sèche.

Iravanian et Bilsela (2014) ont montré que la résistance à la compression non confinée atteint sa valeur maximale en 90 jours dans les mélanges de 85% sable- 15% bentonite (S-B) et de 80% sable-10% bentonite-5% ciment, dont 90% (S-B-C) des résistances sont obtenues en 28 jours de durcissement. La valeur maximale en 90 jours était d'environ 300 kPa et 1900 kPa pour le mélange sable-bentonite et le mélange sable bentonite-ciment, respectivement (Figure I :10a et 10b). Les valeurs de traction étaient d'environ 25kPa et 170kPa en 28 jours pour le mélange sable-bentonite et le mélange sable bentonite-ciment, respectivement (Figure I :10c).

Le vieillissement a fait que les échantillons de S-B sont devenus plus fragiles, avec une réduction de 47% de la déformation de rupture, tandis que les échantillons de S-B-C deviennent plus ductiles avec un double incrément de résistance à la rupture.

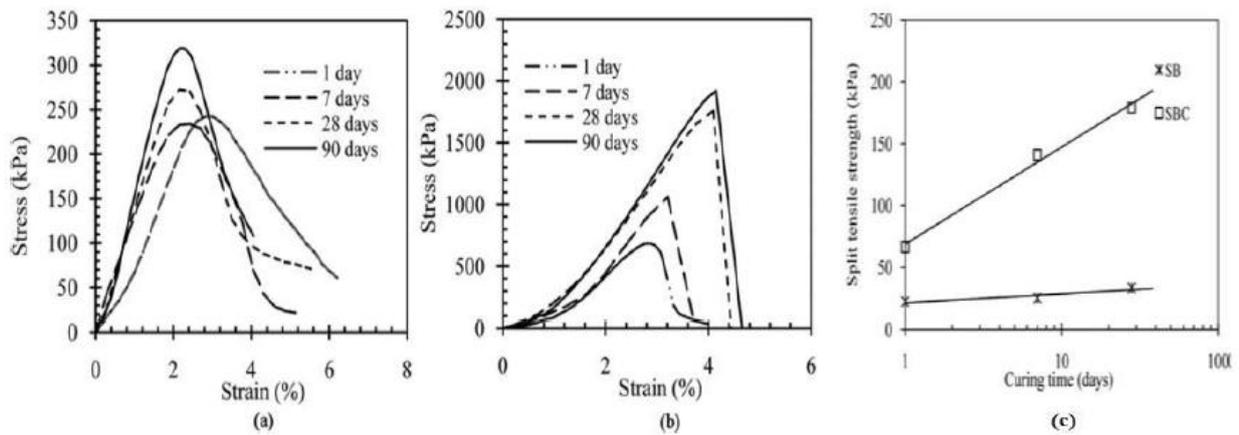


Figure I:10 : Compression non confinée en fonction d'âge de durcissement des échantillons : (a) Sable-bentonite (S-B) et (b) sable-bentonite-ciment (SBC) ; (c) Résistance à la traction en fonction d'âge de durcissement (Koerner, R. M., et Daniel, D. E. 1997)

### 1.8. Caractéristiques hydromécaniques des mélanges sol grenu-bentonite améliorés au ciment :

La stabilisation des sols par l'ajout de ciment est une pratique économique courante dans de nombreuses applications d'ingénierie pour améliorer les propriétés techniques des sols. La majorité des sols peuvent être stabilisés par l'ajout de 3 à 16 % de ciment en volume. Les sols granulaires ont besoin de moins de stabilisateur, tandis que les sols plastiques comme le limon et l'argile ont besoin de plus de stabilisateur. Bien que pour certains sols, des proportions supérieures à 16 % puissent être nécessaires pour satisfaire aux exigences des critères de conception (Laguros, 1962). Généralement, si le matériau de barrière ouvragée n'est pas répondu le critère de résistance à la compression et/ou de résistance au cisaillement et/ou de faible potentiel de retrait/gonflement (présente un changement significatif du volume) nombreux auteurs ajoutent une quantité de ciment au mélange sol grenu-bentonite. De plus, les systèmes de barrière compactée peuvent être exposés aux attaques chimiques des déchets (lixiviats) et aux produits chimiques organiques concentrés, ce qui affecte la stabilité volumique des matériaux utilisés. Dans ce sens, le ciment peut être utilisé en petites quantités comme additif au mélange sol grenu-bentonite compacté pour améliorer sa résistance chimique et réduire sa conductivité hydraulique (Nilo Cesar Consoli, Marcel Antonio Arcari Bassani, Lucas Festugato, 2013). La compatibilité avec les déchets stockés est un facteur important à prendre en compte pour la barrière passive, en sol-ciment, des décharges de déchets dangereux ou non dangereux. Alaska (1985), lors d'essais sur une barrière hydraulique à échelle réelle, indiqua qu'après une exposition aux lixiviats des déchets solides municipaux tels que les préparations de pesticides toxiques, les boues de raffinerie de pétrole, les déchets pharmaceutiques toxiques et les déchets de caoutchouc et de plastique, le sol-ciment durcisse considérablement et

se carotte comme le béton de ciment Portland. En outre, il est devenu moins perméable pendant la période d'exposition.

Bellezza et Fratolocchi (2006) ont présenté les résultats d'une étude expérimentale sur l'efficacité de 5 % de ciment dans des mélanges sol-ciment compactés en considérant un temps de durcissement de 28 jours. Ils ont indiqué que pour les sols ayant une fraction fine supérieure à 20 % et un indice de plasticité supérieur à 7 %, la conductivité hydraulique est toujours inférieure à  $1 \times 10^{-9}$  m/s, ce qui est la valeur minimale requise pour le confinement des déchets. Ils ont conclu que l'ajout de 5 % de ciment peut être suffisant pour garantir une faible conductivité hydraulique, à condition que le mélange in situ, la procédure de compactage et les conditions de durcissement soient proches des conditions d'essai en laboratoire. Après une semaine de durcissement, le processus d'hydratation du ciment dans le sol conduit à la formation de gels allongés de type tobermorite (silicate de calcium hydraté (CSH) est principalement responsable de la résistance des matériaux à base de ciment) autour des bords des particules du sol et, avec un durcissement supplémentaire pouvant aller jusqu'à 28 jours, les fibres de CSH augmentent et donnent une structure homogène qui combine les particules de sol et de ciment ensemble. La modification de la structure et du tissu du sol développée par ce processus se reflète dans les propriétés mécaniques du sol en termes d'augmentation de la résistance et de la durabilité. Le processus d'hydratation se déroule sur une longue période mais à un rythme qui diminue continuellement. La liaison entre les grains de sol adjacents et la cimentation est l'autre effet de l'ajout de ciment aux sols cohésifs.

### **1.9 Réalisation De La Barrière :**

La réalisation d'une barrière en sol grenu-bentonite d'une manière réussie passe nécessairement par l'obtention et le maintien d'un mélange homogène en évitant la ségrégation avant et durant le placement, un bon compactage et un bon contrôle de la teneur en eau (Kenney et al. 1992) et des couches uniformes lors de la pose.

Cette technique n'est pas très éloignée à celle de construction de routes. Donc, la réalisation in situ nécessite certaines procédures importantes, parmi elles, on cite :

- ✓ Pour chaque couche, il est procédé au dépôt et régalinge du matériau et au compactage avec mesure de la densité après chaque passe jusqu'à obtenir une compacité constante ;
- ✓ Des mesures d'épaisseur doivent être réalisées régulièrement : après chaque couche, l'épaisseur totale est mesurée en 5 points ;
- ✓ Par couche, des échantillons doivent être prélevés pour mesurer la teneur en eau, la masse volumique et la perméabilité ;
- ✓ La mise en place des matériaux argileux doit permettre un comportement convenable de l'ensemble de la barrière et en particulier une liaison correcte avec les autres constituants ;

- ✓ Les surfaces finies devront présenter une pente suffisante pour assurer le drainage des liquides. En aucun cas cette pente, vers l'exutoire prévu, ne sera inférieure à 1,5%.

En général, dans le cas des barrières de fond et latérales :

- ✓ Le compactage sera réalisé avec un engin permettant d'assurer une liaison correcte entre les couches successives de la barrière sol grenu-bentonite. Pour cela, les engins de type "pied-de-mouton" seront préférés aux compacteurs lisses (avec une force centrifuge de 180 kN, ou plus). Dans tous les cas, il est nécessaire de réaliser une scarification de la surface de la couche avant le dépôt de la suivante. L'épaisseur de la couche mise en place avant compactage tiendra compte des caractéristiques de l'engin (longueur des pieds-de-mouton par exemple) afin d'assurer d'une part l'épaisseur finale voulue et d'autre part la non-détérioration des couches sous-jacentes. Le compactage à un minimum de 95% du Proctor Normal. L'épaisseur de chaque compacté est de 25 cm.
- ✓ L'état de surface de la dernière couche sera réalisé de manière que la géomembrane puisse être posée sans risque de détérioration. Pour cela :
- ✓ La dernière couche, une fois compactée, sera achevée par un ou plusieurs passages au compacteur lisse. Si la géomembrane ne peut être posée immédiatement après la mise en forme de la dernière couche, il faudra prévoir une surépaisseur de 10 cm qui sera arasée et lissée avant la pose de la géomembrane.
- ✓ La géomembrane sera posée de manière à adhérer parfaitement au support argileux. Ceci sera réalisé par le saupoudrage d'une couche de bentonite, de 0.5cm d'épaisseur minimum sur la surface finie de la barrière argileuse juste avant la pose de la géomembrane.
- ✓ La surface supérieure de la géomembrane sera protégée par un géotextile anti perforant de façon à la protéger des matériaux constituant la couche drainante destinée à reprendre les lixiviats.

## 1.10 Conclusion :

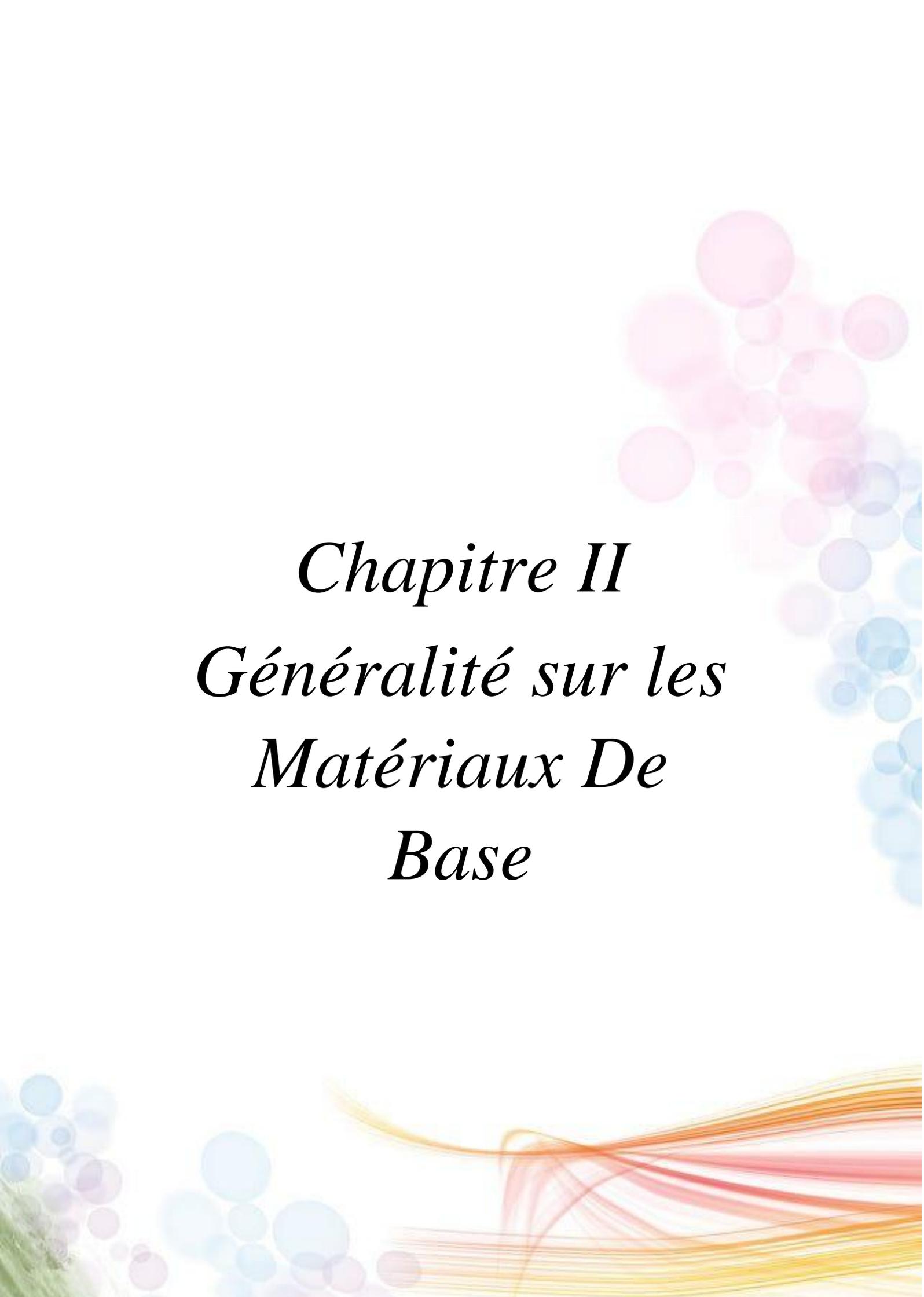
La législation sur les déchets a conduit le ministère de l'Aménagement du territoire, de l'Environnement et du Tourisme algérien à rédiger des arrêtés définissant les prescriptions techniques à adopter lors du stockage. Tous ces textes incluent plus ou moins directement des instructions techniques relatives aux dispositifs d'étanchéité et fixent des seuils de perméabilité.

La conception et l'étude du comportement hydromécanique du mélange sol grenu-bentonite compacté dans certaines applications géoenvironnementales doivent examiner les propriétés suivantes : perméabilité, compressibilité et résistance de ces mélanges, qui nécessitent un temps et des efforts très importants. Par conséquent, de nombreux chercheurs ont étudié ce mélange en

tenant compte de certains facteurs qui ont un effet considérable sur le mélange sol grenu-bentonite économique à faible perméabilité et à résistance appropriée. Ces facteurs sont la teneur en bentonite, le gonflement de bentonite, le gradient hydraulique, la distribution granulométrique et le liquide perméable. Dans cette étude, les propriétés de perméabilité, de compressibilité et de résistance des mélanges composés de bentonite et de tuf ont été examinées. Des études ont prouvé que le contact prolongé des géomatériaux avec du lixiviat engendre une dégradation de certaines des propriétés du matériau à long terme (p. ex. le gonflement de la bentonite et la conductivité hydraulique). En outre, l'effet de deux facteurs, à savoir la teneur en ciment et la teneur en bentonite sur certaines de ces propriétés a été examiné.

Enfin, des techniques réglementaires algériennes pour la réalisation des barrières pour les CET ont été présentées. Après cela. Des dispositions techniques très importantes, et radicales, doivent être prises :

Choix de sites imperméables pour le confinement des déchets ; Étanchéité et drainage des fonds, des côtés et de la couverture des sites ; Forte sélection dans les catégories de déchets admis.

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily concentrated on the right side. At the bottom, there are several flowing, abstract lines in warm tones of orange, red, and yellow, creating a sense of movement and depth.

*Chapitre II*  
*Généralité sur les*  
*Matériaux De*  
*Base*

## 2.1 Introduction

Une quantité volumineuse de littératures en faveur de l'utilisation de couche minérale utilisant des matériaux disponibles localement pour la réalisation des barrières étanches. Si le matériau local ne satisfait pas aux exigences de conductivité hydraulique, il est possible d'améliorer ses performances hydrauliques par traitement à la bentonite. Ceci nécessite des connaissances géotechniques pour trouver dans la région un bon matériau qui peut être compacté, avec une densité élevée et une perméabilité faible.

Un autre point est d'avoir une bonne disponibilité locale de matériaux en terre pour couvrir les travaux ou les différentes étapes de la décharge. Les ISD nécessitent un grand volume de ces matériaux pour couvrir les déchets. Pour cela, il est possible d'utiliser des matériaux de construction inertes. (Demdoum, A 2019)

L'abondance des tufs et des rochers calcaires dans notre pays couvre une superficie d'environ 300 000 km<sup>2</sup>. Particulièrement dans les régions arides et semi-arides, le tuf et le sable concassé présentent une alternative bon marché au sable comme additif à la bentonite pour être utilisés comme une barrière passive en satisfaisant les recommandations de conception des installations de stockage des déchets (ISD). (Demdoum et al. A 2016)

Dans ce chapitre on présente une caractérisation de matériaux locaux à base de tuf (de la région de Ghardaïa) et de bentonite de carrière de Maghnia pour la conception des barrières ouvrages destinées à la réalisation des fonds des ISD dans les régions arides (sud de l'Algérie). Les mélanges tuf-bentonite ont été choisis dans un but géotechnique, environnemental régional et économique, vu la disponibilité de ces matériaux dans les régions de GHARDAIA.

## 2.2 Caractéristique des matériaux utilisés :

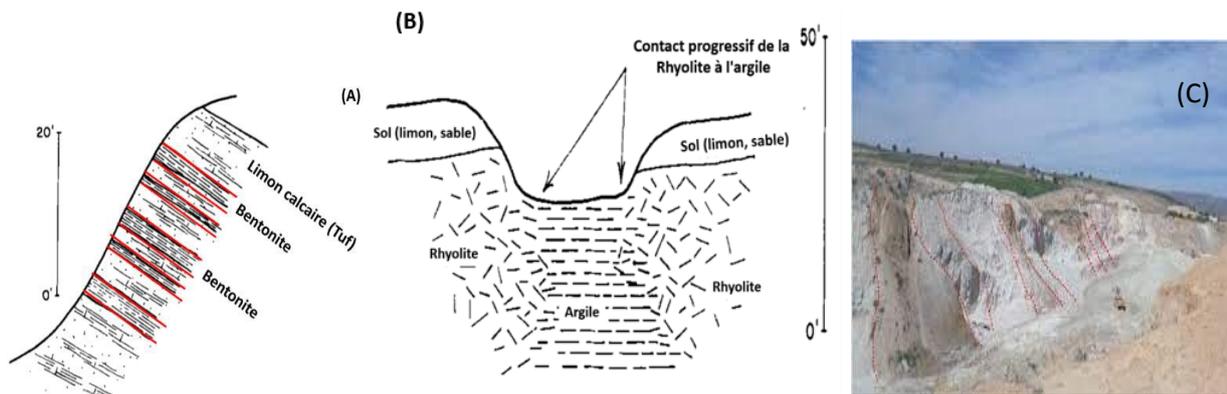
### 2.2.1 Bentonite :

#### 2.2.1.1 Définition :

Les bentonites se forment généralement dans un environnement sédimentaire marin à basse énergie, à partir de cendres volcaniques qui se sont accumulées dans l'eau et ont formé des couches argileuses. (Bouhamida F Z Yagoub Z. A 2020).

#### 2.2.1.2 Géologie du gisement de bentonite en Algérie

Généralement, les zones contenant les bentonites se situent dans la partie nord-ouest de l'Algérie. Elles sont composées d'une série de sédiments du Crétacé-Tertiaire (C-320T) avec des coulées pyroclastiques et des coulées de lave en couches intercalées où se sont introduites des roches volcaniques de différentes compositions.



**Figure II:1** (a) Formation géologique (d'âge du Miocène) de la vallée de Chelif, 5 km au nord de Bellevue dans la région de Mostaganem, (b) Dépôt d'argile au nord-est de Maghnia dans la région de Nemours, Tlem-cen (Grim et Guren, 1978), (c) Affleurement des formations magmatiques et bentonitiques.

Les bentonites de Maghnia d'âge Miocène sont également fréquentes sous la forme de couches de quelques mètres d'épaisseur (entre 0,5 et 9 mètres). Elles proviennent de cendres volcaniques. Les structures de cendres sont conservées dans la bentonite indiquant son mode d'origine. Hammam Boughrara, dans la région de Maghnia, est connu pour sa bentonite riche en montmorillonite de haute qualité (Grim et Guren, 1978).



**Photo II:2** Bentonite de Maghnia.

### 2.2.1.3 Essais de caractérisation

#### a) Analyse granulométrique NFP94-056 :

Les résultats des analyses granulométriques de bentonite sont représentés graphiquement dans la figure II:3.

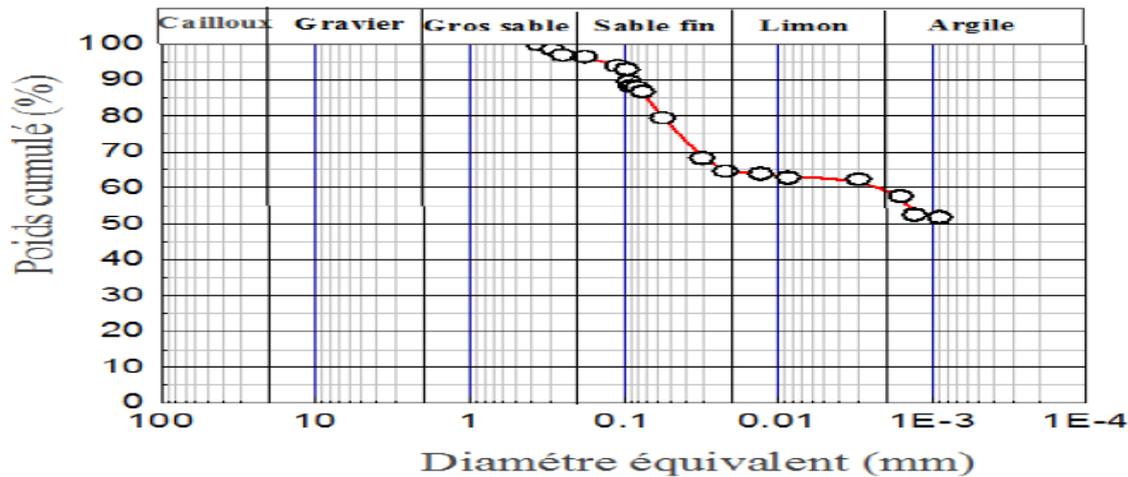


Figure II.3 : Courbe granulométrique de la bentonite de Maghnia (Gueddouda m, 2011).

Les renseignements à tirer de cette analyse pour un sol gonflant sont :

- Le pourcentage des particules fines ( $C_1 < 1 \mu\text{m}$ )
- Le pourcentage des particules fines ( $C_2 < 2 \mu\text{m}$ )
- Le pourcentage des éléments fins ( $\varnothing < 80 \mu\text{m}$ )

Le tableau résume les résultats qui sont des paramètres pour la classification des sols gonflants.

Tableau II.1 : Résultats granulométriques des argiles étudiées (Gueddouda m, 2011).

$\varnothing < 80\mu\text{m}$	$C_2 < 2 \mu\text{m}$	$C_1 < 1 \mu\text{m}$
95%	65%	60%

**b) Densité des grains solides (Gueddouda m, 2011) :**

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, et les résultats sont comme suite :

$$\gamma_s = 4.62 \frac{KN}{m^2} \rightarrow G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{4.62}{1.00} = 4.62$$

**c) Essai Proctor Normal**

➤ **Le but de l'essai**

Cet essai permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau en évaluant la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette, on distingue l'essai Proctor normal et modifié, qui conduit à des valeurs de couple différentes.

Cet essai s'applique sur la fraction granulaire des matériaux testés avec un  $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ .

### ➤ Principe

Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la densité sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette densité en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la densité sèche du matériau  $\gamma_{dmax}$  qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau  $W_{opt}$ . Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie.

- **Essai Proctor Normal (NF P 94-093)** : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé, voir figure II :4;
- **Essai Proctor Modifié (NF P 98-231-1)**: Forte résistance souhaitée, du type chaussé autoroutière;

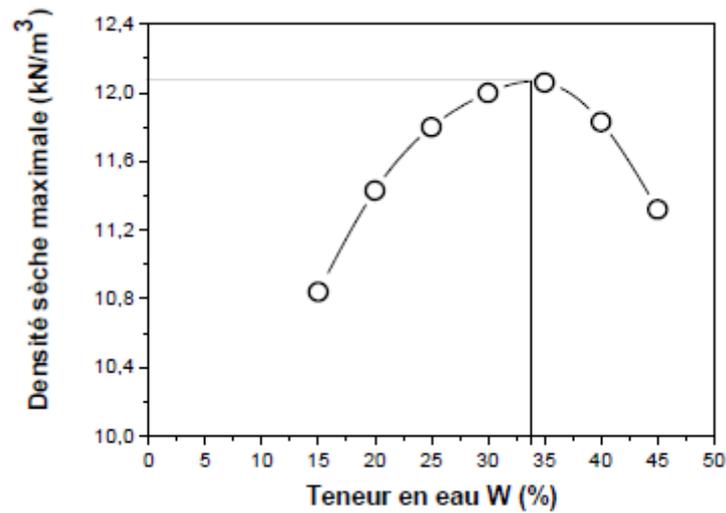
### ➤ Appareillage utilisé



*Photo II:4: Moule Proctor Normal.*

### ➤ Résultats

Les résultats de l'essai Proctor normal de bentonite sont présentés sur la figure II :6



**Figure II:5:** Courbe Proctor normale de la bentonite de Maghnia. (Bouhamida F Z Yagoub Z. A 2020).

La bentonite présente une teneur en eau optimale de l'ordre de 33% et un poids volumique sec maximum de l'ordre de 12,2 kN/m<sup>3</sup>.

#### d) Limites d'Atterberg ou limites de consistance (NF P 94-051)

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eaux pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers, sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400µm. Ces limites séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre.

##### ➤ Principe de détermination des limites de consistance

###### • La limite de liquidité WL

La limite de liquidité se détermine en utilisant l'appareil de Casagrande. On étend sur une coupelle une couche d'argile dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. on imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte, bien entendu, tout l'appareillage est rigoureusement normalisé, WL correspond à 25 coups. (Voir la figure II :6).

###### • La limite de plasticité W<sub>p</sub>

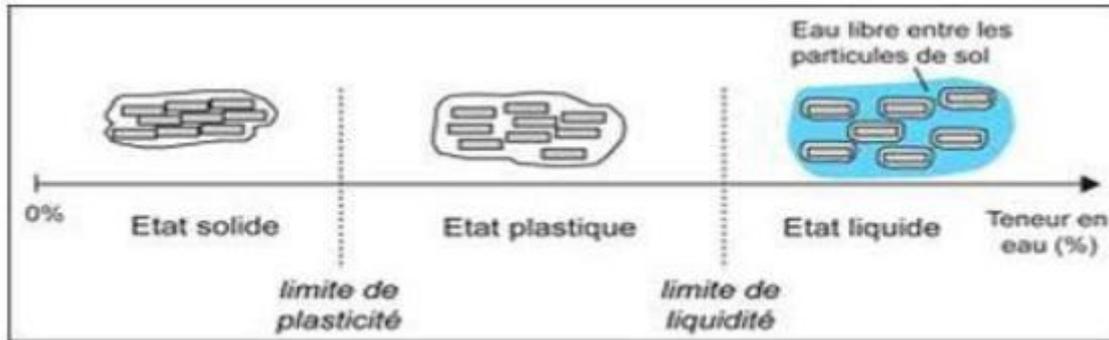
Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 cm. On exécute en général, 2 essais pour déterminer cette limite. (Voir figure II :6).

• **Indice de plasticité  $I_p$**

L'indice de plasticité  $I_p$  est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$I_p = W_L - W_P.$$

La figure II 7 présente l'état de sol, la limite de plasticité et de liquidité en fonction de la teneur en eau.



**Figure II:6:** État de teneur en eau

La classification des sols selon la limite de liquidité et l'indice de plasticité présenté sur le tableau II:4

**Tableau II.2:** Classification de Casagrande pour les sols fins (Bouhamida F Z Yagoub Z. A 2020).

Sols	Limite de liquidité ( $W_L$ )	Indice de plasticité
Sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$15 < I_p < 25$
Argile	$W_L \geq 60$	$I_p \geq 25$

La classification des sols en fonction de l'inde de plasticité est présentée dans le tableau II :3

**Tableau II 3:** Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).

Indice de plasticité	Caractéristique
$I_p \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < I_p \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < I_p \leq 40$	Argileux
$I_p > 40$	Très argileux

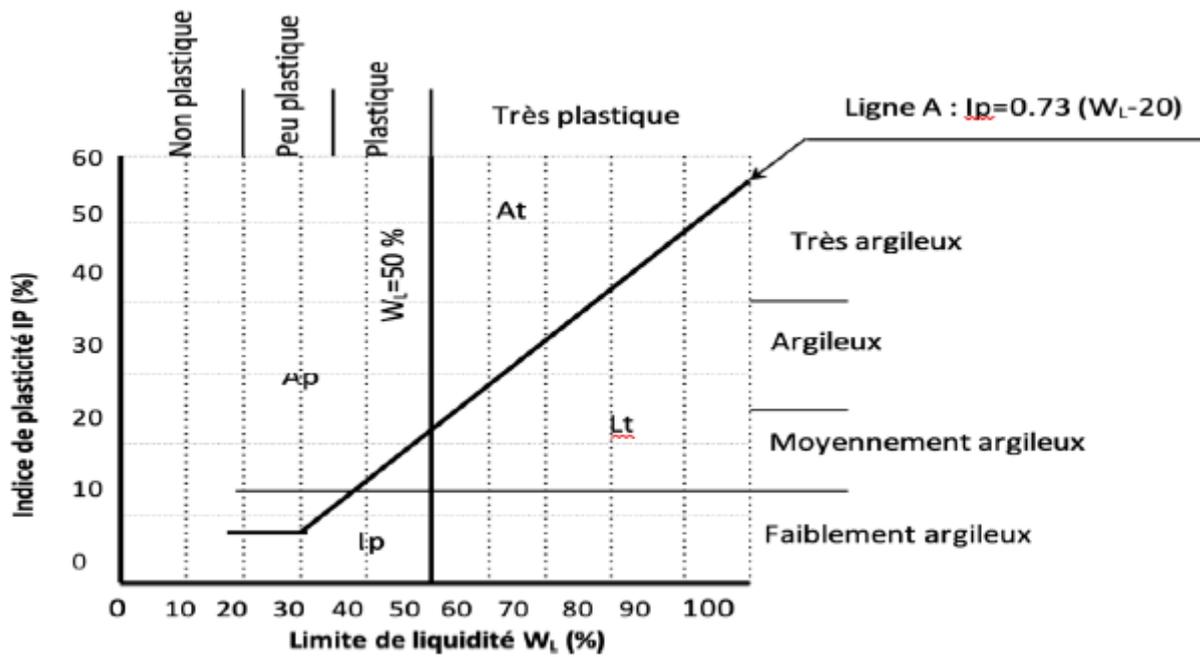


Figure II:7 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande(Philipponnat, G., et Hubert, B. 1997).

Avec :

At : argiles très plastiques. AP : argiles peu plastiques.

Lt : limons très plastiques. Lp : limons peu plastiques.

#### ➤ Appareillage

- Appareil de Casagrande.
- Coupelle, spatule et l'outil à rainure en V.
- Balance électronique
- Four électrique.



Photo II:8: Essai de limite de plasticité.

### ➤ Résultats

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

**Tableau II.4 :** Limites de consistance de la bentonite (Bouhamida F Z Yagoub Z. A 2020).

W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub>
141	48	93

La connaissance de  $W_L$  et  $I_P$  permet de situer les sols dans le diagramme de plasticité de Casagrande. D'après les mesurées de ces paramètres, la bentonite de Maghnia apparaît comme une argile très plastique.

### e) Essais Bleu Méthylène (NF P 94-068)

#### ➤ Principe

Consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau.

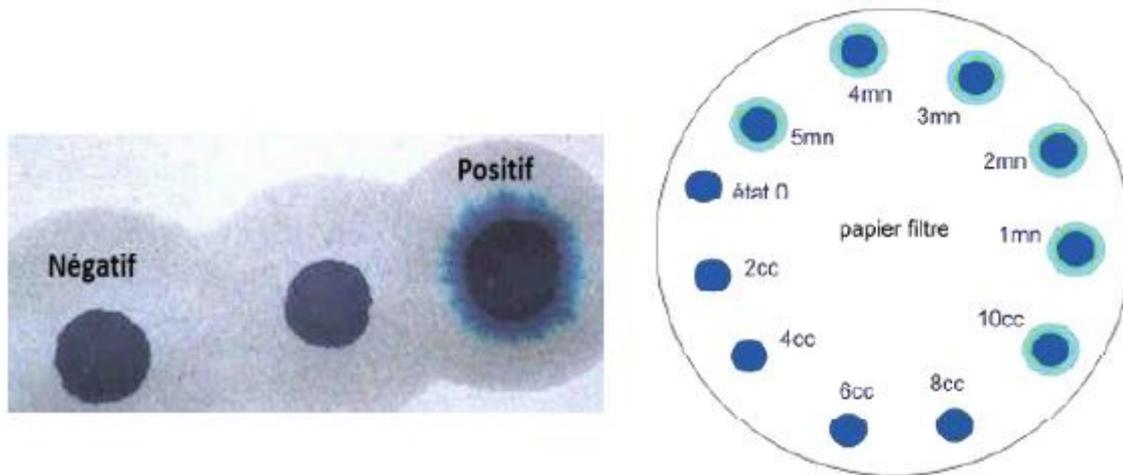
#### ➤ But de l'essai

Mesure la capacité d'adsorption d'un sol, déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.

#### ➤ Mode opératoire

Verser un échantillon de 30 gr de sol sec dans le Bécher et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur.

- Ajouter 5 cm<sup>3</sup> de bleu de méthylène dans le Bécher.
- Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre.
- Si la tâche est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm<sup>3</sup> jusqu'à ce que le test soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.
- Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer. (Voir figure II:9).



**Figure II.9:** Le cas positif et négatif de l'essai de bleu (GTR).

Pour calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante :

Une relation entre la surface spécifique totale ( $S_{st}$ ) et la valeur de bleu de la phase argileuse VB ( $0/2 \mu\text{m}$ ) a été mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982)

**Tableau II.5 :** Classification des argiles selon la surface spécifique ( $S_{st}$ ) (Lautrin, 1987)

Argile	$S_{st}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
Montmorillonite	700 - 840
Illite	65 - 100
Kaolinite	10 - 20

### ➤ Résultats

Les résultats de la valeur au bleu de méthylène et de la surface spécifique totale de la bentonite sont indiqués dans le tableau II.6

**Tableau II.6:** Surface spécifique totale ( $S_{st}$ ) de la bentonite (Demdoum,A 2019).

VBS	$S_{st}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
22	462

D'après la classification de Tran (1981) basée sur la valeur de bleu de méthylène et la surface spécifique, la bentonite de Maghnia contient un fort pourcentage en Montmorillonite.

## 2.2.2 Le Tuf :

### 2.2.2.1 Les encroûtements calcaires

De nombreuses définitions ont été données aux encroûtements calcaires. Nous pouvons les résumer comme suit :

Les tufs calcaires sont des roches sédimentaires calcaires continentales, de couleurs blanches quand elles sont pures, mais tirant vers le gris ou jaunâtre ou rougeâtre ou marron, selon les impuretés. Ils sont composés essentiellement mais pas exclusivement de carbonate de calcium ;

existent à l'état poudreux, nodulaire ou indurés et sont dus à une dissolution puis une précipitation du calcaire (Daheur E G 2011).

### **2.2.2.2 Les encroûtements gypseux**

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat aride où le gypse existe déjà dans les formations géologiques anciennes (Alloul, 1981 ; Frenkel, et al. 1986). Ce sont des sols caractérisés par une forte teneur en gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ). Ils sont répandus dans des régions où les précipitations sont inférieures à 400 mm/an, quantité insuffisante pour lixivier le gypse.

Les encroûtements gypseux se dressent généralement en couches horizontales affleurantes à subaffleurantes. En Algérie, ils occupent la grande surface au Sud et Sudouest de Biskra jusqu'en Tunisie (Alloul, 1981 ; Morsli, 2007).

### **2.2.2.4 Les encroûtements mixtes**

Les encroûtements mixtes sont des formations de tufs calcaires gypsifiés à prédominance carbonatée ou de tufs gypseux calcifiés à prédominance sulfatée ; trouvés dans des zones climatiques subhumides, semi-arides et évoluent en formation gypseuse en zone aride. En effet, au-delà d'une certaine aridité, le développement des encroûtements calcaires est arrêté à la source, à cause de l'insuffisance des précipitations pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques ; et inversement, lorsqu'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable, les encroûtements gypseux sont relayés alors par les encroûtements calcaires.

Les tufs gypso-calcaires et calcaire-gypseux qui en résultent sont déconseillés en zones sub-humides et semi-arides à cause de la solubilisation du gypse ; par contre ils sont utilisés dans les régions arides (Améraoui, 2002).

### **2.2.2.5 Essais de caractérisation de tuf :**

#### ***a. Analyse granulométrique :***

La granulométrie des tufs calcaires est très variable selon les caractéristiques du matériau d'origine et selon les processus d'extraction et d'élaboration, néanmoins leurs courbes sont généralement continues avec une granulométrie s'approchant de celles des sables (Colombier G. 1988).

#### ***b. Essais de pollution des fines argileuses :***

##### **➤ Les limites d'Atterberg :**

Actuellement c'est l'essai le plus souvent réalisé et le plus universel sur les tufs d'encroûtements calcaires. Pour évaluer la pollution argileuse, on fait souvent référence {la valeur de l'indice de

plasticité. La valeur IP est très variable, elle varie entre 5 (non mesurable) et 25 % (non mesurable < IP < 25%) (Colombier G. 1988).

➤ **L'équivalent de sable à 10% des fines :**

Les valeurs de l'équivalent de sable obtenues pour les tufs calcaires varient entre 10 et 60% (Colombier G. 1988). Cet essai n'a pas signification lorsqu'il est réalisé sur la totalité de la fraction 0/5 mm du matériau, la teneur en éléments inférieurs à 0,08 mm peut varier de 10 à 80%, ce qui influe considérablement sur la valeur de l'équivalent de sable ES et renseigne peu sur la qualité des fines.

➤ **Essai au bleu de méthylène :**

L'essai au bleu a pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse.

Cet essai, peu appliqué aux tufs, pourrait être le mieux adapté pour évaluer l'activité des fines et détermine la présence d'argile plastique.

Les valeurs de bleu de méthylène obtenues sur les tufs calcaires sont comprises entre 0,2 et 1,5 (Colombier G. 1988).

A titre d'indication, les spécifications actuelles pour les couches de chaussées sont (Boukazzi Z. 1997) :

- VB < 1 : pour les enrobés bitumineux ;
- VB < 1,5 : pour les graves non traitées ;
- VB < 0,5 : pour les sables non traités et traités.

**Essai de compactage:**

➤ **Essai Proctor normal (NF P 94-093) :**

Il est réalisé à la base de la norme NF P 94-093 Sept.97, L'essai Proctor a pour objet la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale d'un matériau soumis à un compactage normalisé d'intensité donnée. Il est utilisé dans le domaine de la géotechnique routière, et dans le contrôle de la mise en œuvre des matériaux de remblais.

Les différents auteurs ayant réalisé des essais de ce type s'accordent sur les constatations suivantes (Colombier G. 1988) :

- Les densités sèches maximales sont en général comprises entre 1,7 et 2 t/m<sup>3</sup>, les valeurs inférieures à 1,6 t/m<sup>3</sup> dénotent d'une altération de l'encroûtement, et d'un matériau calcaire trop fin;
- Les teneurs en eau optimales sont très variables, mais en général élevées, et comprises entre 8 et 15% elles peuvent atteindre ou dépasser parfois 20%;
- Les densités les plus faibles correspondent aux teneurs en eau les plus élevées ;

- Les courbes OPM sont relativement plates pour les tufs non plastiques ( $I_p < 5$ ); la densité optimale est peu influencée par la variation de la teneur en eau;
- La présence d'argile ( $I_p > 10$ ) conduit { des courbes pointues, la densité chute fortement lorsque l'on s'écarte de la teneur en eau optimale.

**Tableau II.8 :** La plage de valeur de variation des paramètres Proctor en fonction du type d'encroûtement. (Morsli, 2007).

Encroûtement	Calcaire	Gypso- calcaire	Gypseux
Densité sèche	$1.7 < W_{opm} < 2$	$1.7 < W_{opm} < 2$	$1.6 < W_{opm} < 1.9$
Teneur eau optimale	$8\% < W_{opm} < 20\%$	$8\% < W_{opm} < 20\%$	$8\% < W_{opm} < 20\%$

➤ **Essai Los Angeles :**

Pour les matériaux suffisamment résistants provenant de gisements feuilletés ou issus de croûte ou de dalle, la résistance aux chocs sera appréciée par l'essai Los Angeles.

Pour les tufs d'encroûtements calcaires, les valeurs de coefficient Los Angeles varient entre 30 (pour les dalles les plus compactes) et 70 à 80% (pour les croûtes les plus friables). Au-delà de ces valeurs, l'essai est sans intérêt. (Daheur E G 2011).

Les résultats de cet essai sont pris en compte pour classer ces tufs en trois catégories :

- Tufs à squelette : Coefficient Los Angeles  $< 35\%$ ,
- Tufs friables :  $35\% < LA < 55\%$ ,
- Tufs pulvérulents :  $LA \geq 55\%$ .

➤ **Analyse chimique :**

L'analyse chimique porte essentiellement sur la détermination du taux de carbonate  $CaCO_3$  et de sulfate  $SiO_2$ . Généralement, la teneur en carbonate  $CaCO_3$  varie pour les tufs calcaires entre 50 et 95%.

Un bon pourcentage, assez fort en carbonate et sulfate dans la fraction fine, dénote un matériau qui contient peu d'argile, donc qui sera peu plastique (Daheur E G 2011).

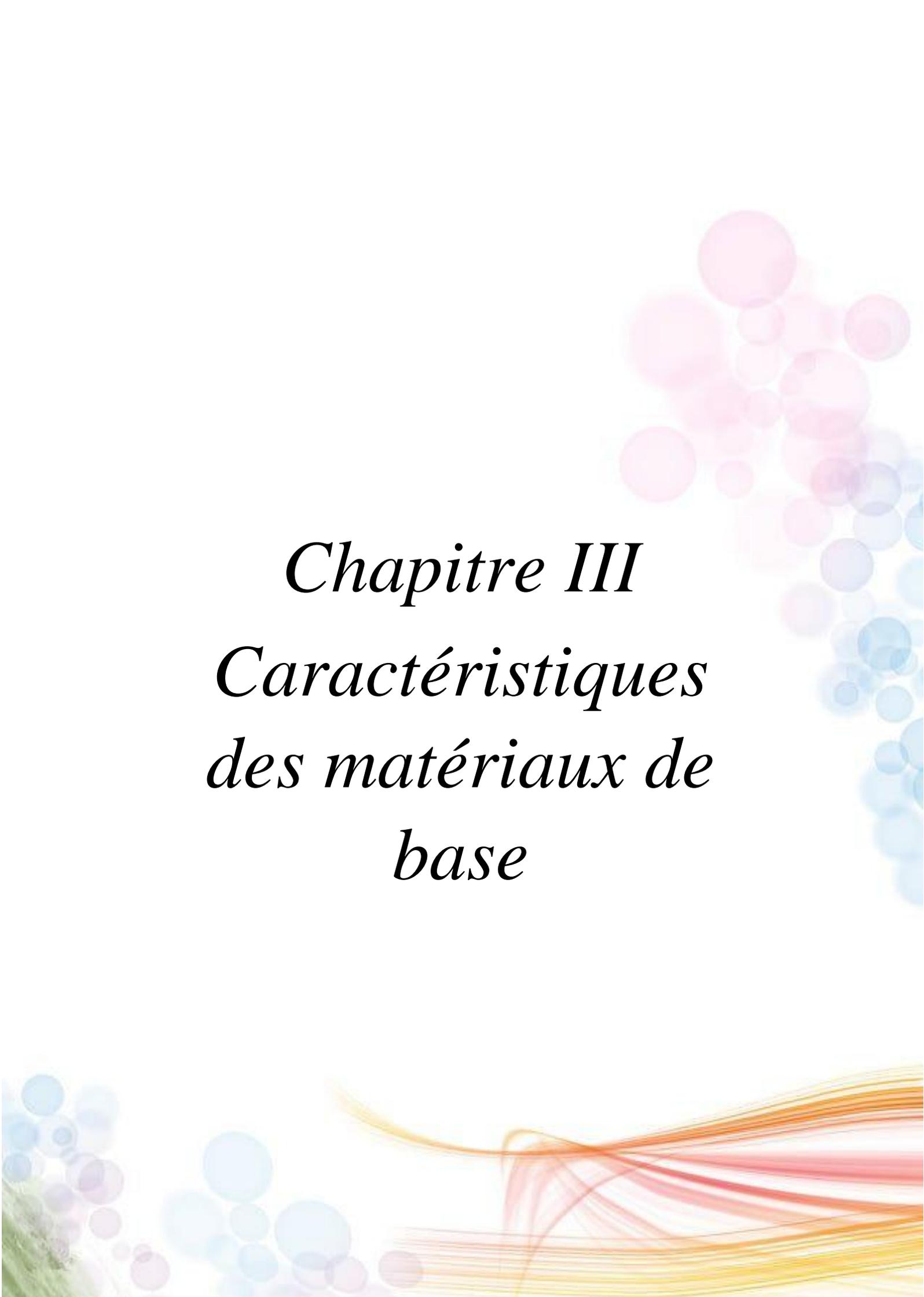
➤ **Essai de compression simple :**

Cet essai nous a permis d'estimer la cohésion du matériau. L'essai est effectué par moulage et serrage du matériau { la presse aux conditions de l'optimum Proctor dans des moules de dimensions ( $\varnothing=5cm$  et  $H=10cm$ ) et conservés { l'étuve {  $60^\circ c$  pendant 48h. DAHEUR ,E G 2011).

### 2.3 Conclusion :

Une série des essais suivants : essai Granulométrique, essai Proctor Normal, essai de Limites d'Atterberg essai Bleu Méthylène ont été réalisées sur la bentonite, le tuf afin d'étudier leurs caractéristiques géotechniques. Le mélange est constitué de tuf de Ghardaïa mélangés à 8 % de bentonite provenant de la carrière de Maghnia, en Tlemcen.

Selon l'étude de (BOUHAMIDA f z YAGOUB z 2020) et les essais préliminaires montrent que les mélanges optimaux satisfont l'exigence de l'indice de plasticité des barrières passives. Ils ont également montré un gonflement faible, indiquant un changement de volume négligeable, ce qui constitue un comportement souhaitable en ce qui concerne les barrières passives dans les climats semi-arides et arides. La suite du travail consiste à mesurer la conductivité hydraulique saturée (par des méthodes directe et indirecte), la compressibilité, la résistance au cisaillement, la résistance à la compression et choisir la formulation optimale avec le ciment noir et blanc.

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily concentrated on the right side. At the bottom, there are several flowing, abstract lines in warm tones of orange, red, and yellow, creating a sense of movement and depth.

*Chapitre III*  
*Caractéristiques*  
*des matériaux de*  
*base*

### 3.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre se propose de présenter l'étude entreprise pour caractériser les matériaux de base utilisés, à l'aide des essais géotechniques conventionnels de laboratoire.

Les matériaux concernés par cette étude sont des matériaux locaux (le tuf) et la bentonite de la carrière de Maghnia, destinés pour la conception des barrières pour les CET (sud de l'Algérie).

L'étude précédente réalisée par (Bouhamida F Z. et Yagoub Z. 2020) montre d'une quantité de 8% de bentonite ajoutée au tuf confère les meilleures caractéristiques hydrique et mécanique parmi les mélanges tuf-bentonite étudiés. Ce chapitre consiste à identifier ce mélange.

L'objectif de ce chapitre est de comparer les résultats des essais avec les seuils préconisés par des spécifications et des normes retenues pour leurs emplois dans les barrières pour les CET.

### 3.2 PRESENTATION ET LOCALISATION DES MATERIAUX

L'objectif de mélanger le tuf et la bentonite est d'améliorer les propriétés hydriques et mécaniques du tuf et cela pour répondre aux exigences des réglementations.

Ce chapitre présente les résultats des essais appliqués sur les différentes mélanges (tuf-bentonite)

**Le tuf (T) :** Le tuf est un matériau pulvérulent poudreux de couleur jaune clair, composés des particules fines, d'agglomérats et grains solides calcaires (photo III-1).

**Bentonite (B) :** Désigne les matériaux argileux à usage industriel, tendre de couleur blanche, avec reflet grisâtre quelquefois bleuté, rose, rose rouge, éventuellement verte. Sa plasticité est une propriété fondamentale, elle lui permet d'être utilisée dans les boues de forage (d'où son nom commercial bentonite de forage) et dans le domaine du génie civil (barrage en terre, barrière étanche ...etc). Son pouvoir gonflant est considérable, il varie de trois à trente fois son volume initial.

Le tuf provient de la région de BOUHRAOUA, située à 13 km au nord du centre-ville de la wilaya de GHARDAIA (Sud de l'Algérie). La figure III-1 illustre la provenance de matériau.

#### 3.2.1 Présentation de la Wilaya De GHARDAIA

La wilaya de Ghardaïa située au centre de l'Algérie dans le Nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger, à 190 km au sud de Laghouat, à 270 km d'El Menia et à 190 km à l'ouest de Ouargla. Elle considérée l'une des wilayas les plus importantes du pays, tant par son emplacement géographique et stratégique, sa densité de population (plus de 93 000 habitants).

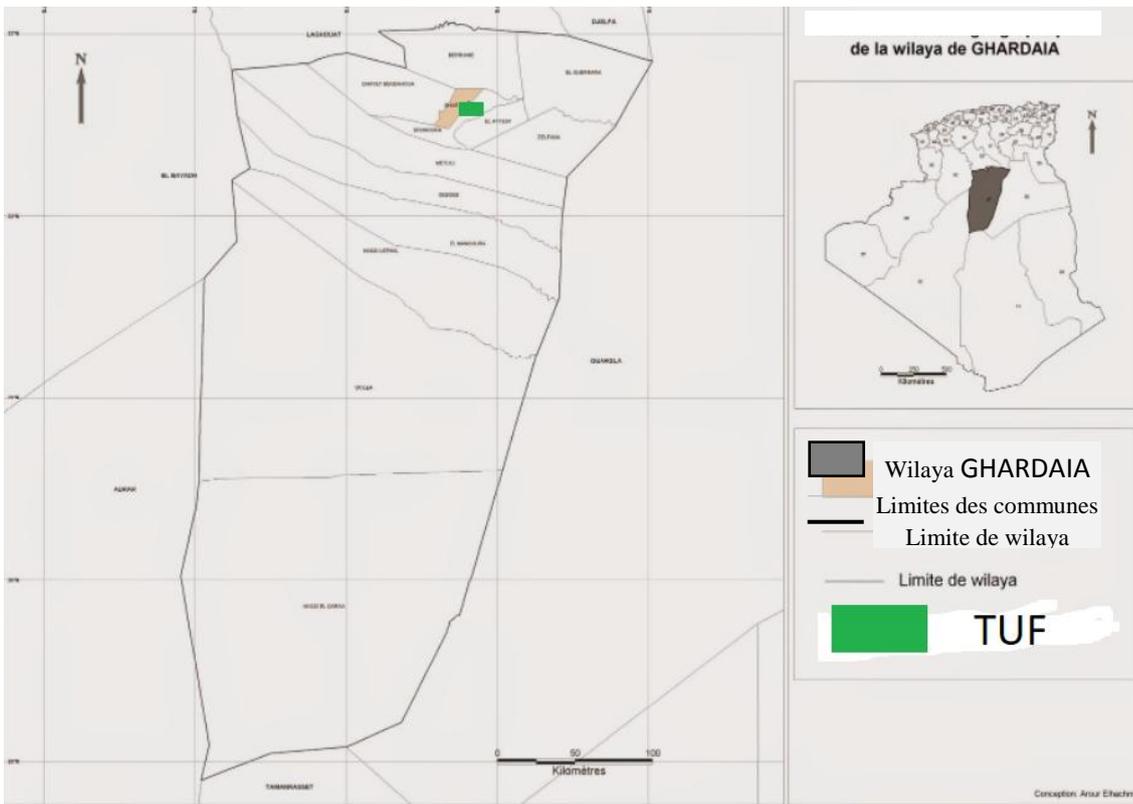


Figure III-1 : Localisation de tuf utilisés de la wilaya de Ghardaïa.



Photo III-2 : Tuf



Photo III-3 : Bentonite ENOF de Maghnia

### 3.2.2 Climatologie de GHARDAIA

Le climat, de type saharien, se caractérise par des étés aux chaleurs torrides et des hivers doux surtout pendant la journée. Il est marqué par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, à l’été et l’hiver. La période chaude commence au mois de mai et dure jusqu’au mois de septembre.(OPVM GHARDAIA)

### **3.2.2.1 Température**

La température moyenne mensuelle enregistrée par la station de GHARDAIA durant la période 2012 – 2022 varie entre un minimum de 5 °C en janvier 2012 et un maximum de 45 °C en juillet 2018.

### **3.2.2.2 L'humidité**

L'humidité relative est en relation très étroite avec la nébulosité qui est faible dans cette région. Elle atteint son maximum (entre 80 et 90%) en janvier, et peut descendre jusqu'à 10 % en juillet. D'une manière générale, l'humidité relative dépasse les 50 % durant la période octobre – avril.

### **3.2.2.3 Les vents**

La fréquence des vents est très grande durant toute l'année est notamment les vents dont la vitesse est supérieure à 5m/s qui peuvent provoquer des vents de sable. Les vents dont la vitesse est comprise entre 1 et 5m/s sont moins fréquents.

### **3.2.2.4 Pluviométrie**

La pluviométrie est très faible, la moyenne annuelle des dix dernières années (2008 – 2022) est de 37,7mm.

Selon la carte pluviométrique de l'Algérie, la wilaya GHARDAIA est classée dans la zone climatique IV ( $H < 100$  mm/an) comme étant une région aride ou désertique.

### **3.2.2.5 Evaporation**

La moyenne mensuelle de l'évaporation durant la période (2008-2022) est de 234,51 mm, et le total annuel durant cette période varie entre 2417 et 3522mm.

L'évaporation est donc très élevée durant l'année avec un maximum estival très marqué et un minimum hivernal soit respectivement 566,6 et 61,6 mm.

### **3.2.2.6 Insolation**

D'une manière générale, l'insolation journalière à GHARDAIA est forte de 7 à 8 heures en hiver et de 10 à 11 heures en été.

Le tableau III-1 présente quelques éléments climatologiques de la période (2008-20218) de la wilaya GHARDAIA

**Tableau III-1 : Quelques valeurs des éléments climatologiques de la Wilaya de GHARDAIA (SMO 2021)**

Année	T	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
<a href="#">2011</a>	22,2	28	16,4	153,94	11,8	22	0	16	0	0	0
<a href="#">2012</a>	22,9	29	16,8	39,89	-	31	1	5	0	0	0
<a href="#">2013</a>	22,6	28,7	16,6	62,21	14,7	28	0	10	0	0	0
<a href="#">2014</a>	23,3	29,5	17,3	35,29	14,6	24	0	10	0	0	0
<a href="#">2015</a>	22,5	28,6	16,4	47,49	13,9	31	0	19	0	0	0
<a href="#">2016</a>	23,2	29,3	17,1	17,51	14,2	21	0	12	0	0	0
<a href="#">2017</a>	22,5	28,1	16,5	-	13,5	22	0	10	0	0	0
<a href="#">2018</a>	22,5	28	16,6	51,31	14,1	25	1	23	0	0	0
<a href="#">2019</a>	22,8	28,5	16,5	70,6	11,4	26	0	15	0	0	0
<a href="#">2020</a>	23	28,8	16,7	22,86	12,1	19	0	15	0	0	1
<a href="#">2021</a>	23,8	29,4	17,7	35,56	13	25	0	10	0	0	0

(**T**)Température moyenne annuelle , (**TM**)Température maximale moyenne annuelle, (**Tm**)Température minimale moyenne annuelle, (**PP**)Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm),(**V**)Vitesse moyenne annuelle du vent (Km/h), (**RA**)Total jours de pluie durant l'année , (**SN**)Total jours de neige durant l'année, (**TS**)Total jours de tempête durant l'année, (**FG**)Total jours de brouillard durant l'année, (**TN**)Total jours de tornades ou nuages en entonnoir durant l'année, (**GR**)Total jours de grêle durant l'année

### 3.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Les essais de caractérisation ont pour but de déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices afin de classer les matériaux et de les situer par rapport aux spécifications et normes retenues pour leur emploi dans la conception des barrières pour les CET.

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais réalisés selon des modes opératoires établis par la norme française avec néanmoins certaines modifications. Il comprend les analyses et les essais suivants :

- Analyses granulométriques (tuf + bentonite).
- Les limites d'Atterberg (tuf+ bentonite).
- L'équivalent de sable (tuf + bentonite).
- Essais de Proctor normal (tuf + bentonite).

- Résistance à la compression (tuf + bentonite).
- Analyses chimiques (tuf + bentonite).

### 3.3.1 Analyse granulométrique

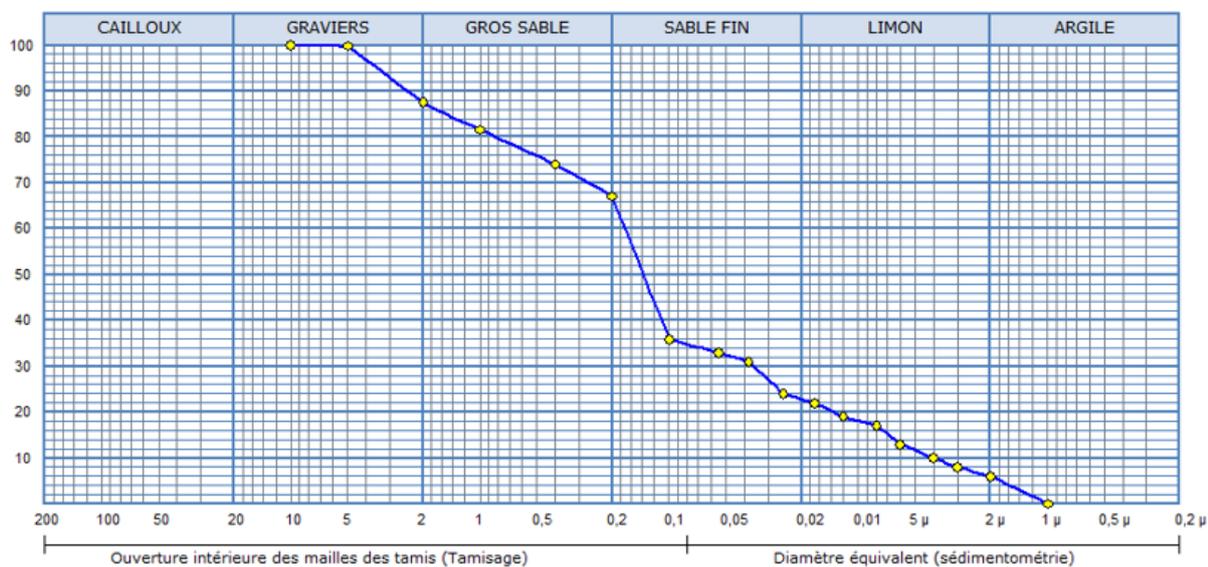
#### 3.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage (NFP 94-056) :

L'essai se fait selon la norme NFP 94-056. Nous avons effectué cette analyse par voie humide pour le tuf. Etant donné la sensibilité du tuf à l'eau, nous avons imbibé notre échantillon pendant 24h avant l'essai, cette opération permet aux mottes de se désagréger afin d'arriver aux conditions les plus défavorables de friabilité.

#### 3.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie (NFP 94-057)

L'analyse granulométrique des éléments inférieurs à 63  $\mu\text{m}$  est effectuée par sédimentation selon la norme NFP 94-057, où il n'est pas possible d'utiliser des tamis, et complète, donc, l'analyse granulométrique par tamisage.

Il faut signaler qu'en raison de l'hétérogénéité du tuf, constitué de grains solides calcaires et d'agglomérats de grains fins, sa courbe granulométrique est donc instable, elle change suivant le mode d'échantillonnage et varie dans un fuseau. La figure III-2, présente la la courbe granulométrique de mélange 92% tuf + 8% bentonite. D'après ces résultats, on constate que notre mélange a une courbe granulométrique très étalée ( $C_u > 20$ ), avec une grande fraction de sable ( $< 2 \text{ mm}$ ) de l'ordre de 65% et un taux de fines ( $< 80\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 13%.



**Graphe III-4 : Courbes granulométriques de 92% tuf + 8% Bentonite.**

**Tableau III-2 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique de mélange 92% tuf +8% bentonite**

<i>D<sub>max</sub> (mm)</i>	5
<i>Argile (%)</i>	6
<i>Limon (%)</i>	17
<i>Sable fin (%)</i>	44
<i>Sable gros (%)</i>	20
<i>Gravier (%)</i>	13
<i>Cailloux (%)</i>	00
<i>% &lt; 0,425 mm</i>	75
<i>% &lt; 80µm</i>	35
<i>D<sub>10</sub></i>	0,004
<i>D<sub>30</sub></i>	0,035
<i>D<sub>60</sub></i>	0,18
<i>C<sub>u</sub></i>	45
<i>C<sub>c</sub></i>	1.7

*C<sub>u</sub>* : coefficient d'uniformité dit de Hazzen.  $C_u = D_{60}/D_{10}$

*C<sub>c</sub>* : coefficient de courbure.  $C_c = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

### 3.3.2 Qualité des fines

Ce sont surtout les fines argileuses qui posent des problèmes aux ingénieurs. Elles peuvent être caractérisées moyennant les essais de laboratoire suivants :

- Les limites d'Atterberg ;
- L'équivalent de sable.

#### 3.3.2.1 Les limites d'Atterberg (NFP 94-051)

L'essai est réalisé selon la norme NFP 94-051, sur la fraction inférieure à 0,4 mm. Pour la limite de liquidité nous avons utilisé la coupelle rugueuse.

Le tableau III-4 présente les résultats de l'essai de limites d'Atterberg. A partir de ces résultats et selon la classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992) (tableau III-3), le tuf est classé comme matériaux Faiblement argileux.

**Tableau III-3 : Valeur de limites d'Atterberg**

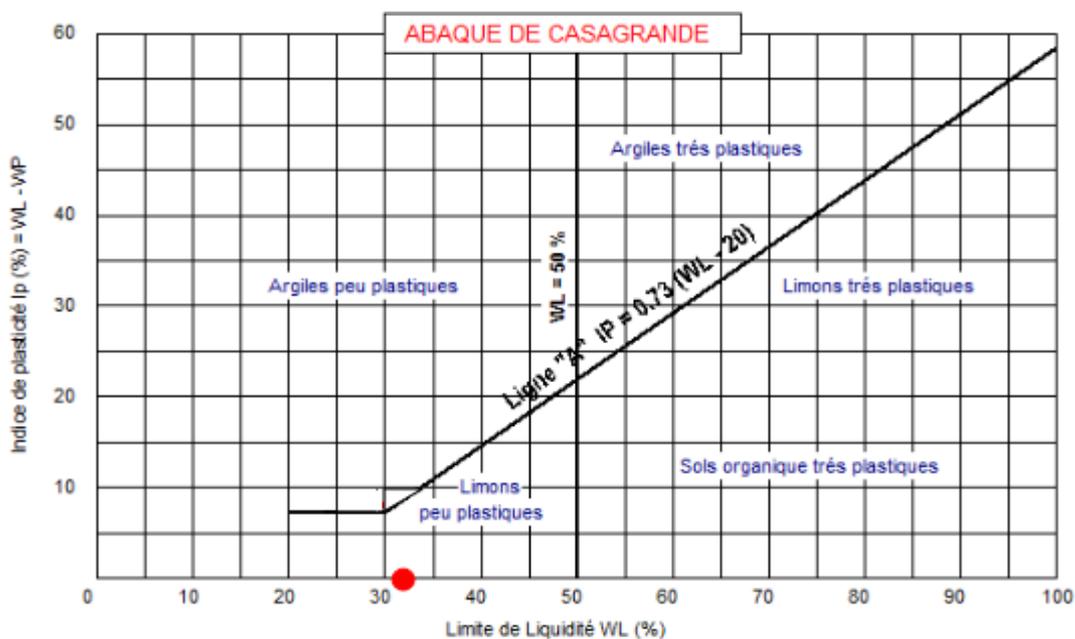
<i>Limite de liquidité: w<sub>l</sub> (%)</i>	31.50
<i>Limite de plasticité: w<sub>p</sub> (%)</i>	NM*
<i>Indice de plasticité: IP (%)</i>	NM*

\*N.M : Non mesurable.

**Tableau III-4 :** Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).

<i>Indice de plasticité</i>	<i>Caractéristique</i>
$IP \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < IP \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < IP \leq 40$	Argileux
$IP > 40$	Très argileux

La positionnement du mélange par rapport au diagramme de Casagrande (figure III-3) montre que notre matériau est positionné au-dessus de la ligne A (zone d'argile), se classe comme limons peu plastiques faiblement argileux.

**Figure III-5 :** Localisation de tuf + bentonite sur le diagramme de Casagrande.

### 3.3.2.2 Essai d'équivalent de sable (NFP 18-598)

L'essai est réalisé selon la norme NFP 18-598. Il consiste à séparer, dans une éprouvette, au moyen d'une solution lavant, les grosses particules qui sédimentent et les éléments fins qui restent en suspension. Le tableau III-5 présente les valeurs de d'équivalent de sable (ES) des deux matériaux. Ce résultat montre une valeur insignifiante de ES, cela montre la nature polluante de la fraction fines existantes. Ce sont peut-être les fine gypseuses ou calcaire qui ont causés la faiblesse de cette valeur.

**Tableau III-5 : Valeurs de l'équivalent de sable ES.**

Matériaux	Es (%)
Tuf +bentonite	11.53

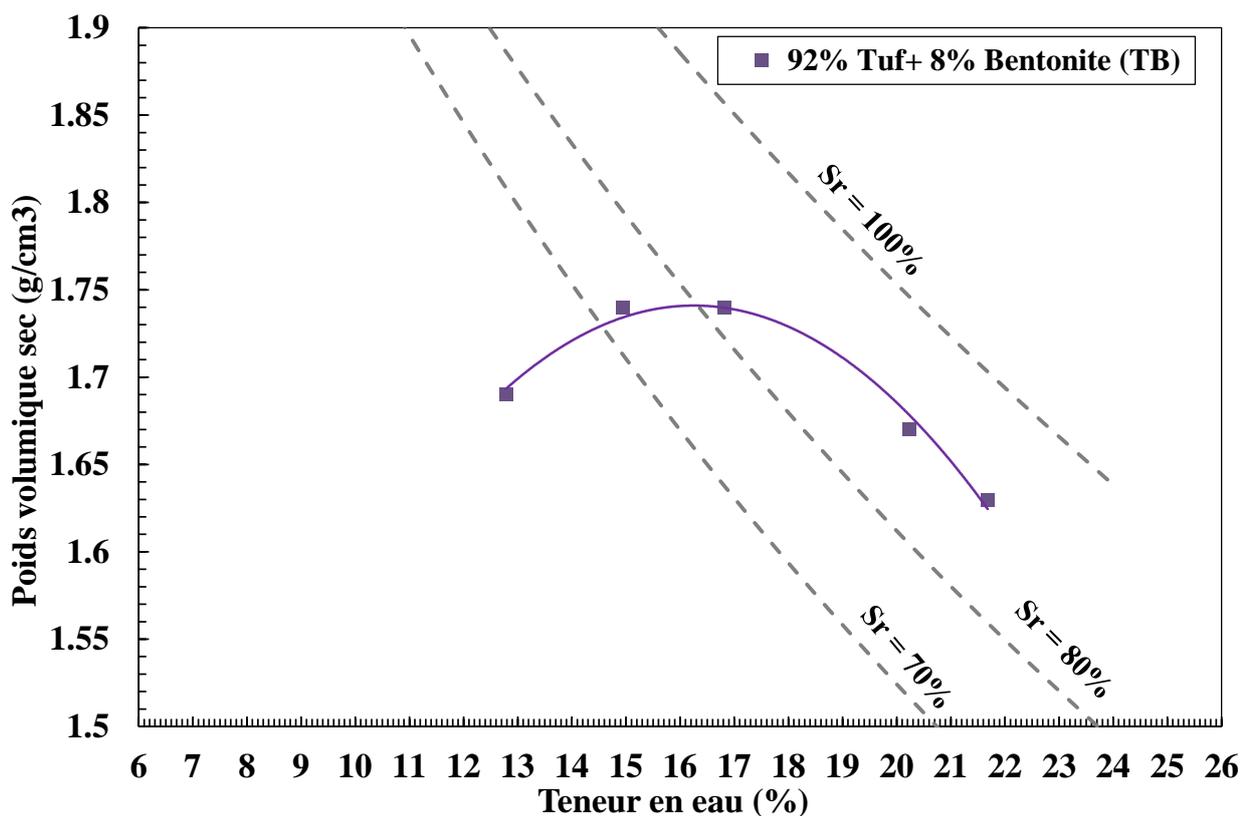
### 3.4 Essai de compactage

#### 3.4.1 Essai Proctor normal NF P 94-093

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme NF P 94-093. Il a pour but de déterminer les conditions optimums de compactage des sols, pour obtenir la meilleure compacité, la meilleure cohésion et la meilleure stabilité avec une énergie d'intensité normalisée.

Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure III-5, et les caractéristiques optimales déduites de cette courbe sont présentés dans le tableau III-6.

D'après ces résultats on remarque que la courbe représente une grande pente, ceci explique la sensibilité de la densité sèche de notre échantillon à la teneur en eau lorsque celle-ci varie jusqu'à l'optimum de Proctor. Ce qui explique bien l'influence de l'eau sur les fines existantes.



**Figure III-6 : Courbes Proctor du mélange 92% tuf+ 8% bentonite.**

**Tableau III-6: Caractéristiques optimales de Proctor Normal.**

<b>Poids volumique sec maximal (<math>g/cm^3</math>)</b>	1,74
<b>Teneur en eau optimale <math>w_{opt}</math> (%)</b>	16.20

### 3.3.5 Essai de compression simple

Les tufs d'encroûtements acquièrent, après compactage puis dessiccation prolongée, une forte cohésion, ce phénomène est appelé autostabilisation ou durcissement ou encore effet de prise. Toutefois cette cohésion du tuf compacté ne doit pas être considérée comme une stabilisation permanente du matériau, car elle baisse considérablement quand le degré de saturation augmente et disparaît quasi totalement par saturation totale (Goual, 2012 ; Daheur, 2015). C'est ainsi l'évolution des caractéristiques mécaniques avec l'âge des tufs compactés qui laisse penser à l'existence d'une prise, évidemment pas comme celle des liants tels que le ciment, la chaux et le plâtre, où se produisent des liaisons rigides, souvent irréversibles et durables.

Ce phénomène de prise (autostabilisation) a été attribué par les premiers ingénieurs qui ont utilisé ces matériaux, à une dissolution partielle du calcaire et/ou du gypse dans l'eau de compactage, puis sa recristallisation lorsque l'eau s'évapore.

En effet, plusieurs travaux de recherches réalisés sont tentés d'expliquer ce phénomène, chacun par sa méthode et selon les moyens disponibles (Alloul, 1981 ; Ben Dhia 1983 ; Morsli, 2007) ; nous citons :

- **Poton :** *Le durcissement est dû à une dissolution possible d'une partie de Calcite lors de l'imbibition et du compactage et recristallisation après séchage.* (Cité par Boukezzi, 1997).
- **Alloul :** *Le durcissement constaté est dû uniquement à un arrangement des grains lors de l'imbibition et du compactage.* (Alloul, 1981).
- **Ben Dhia :** *L'auto stabilisation des tufs calcaires est due à une dissolution partielle du carbonate de calcium sous l'action d'eau et du  $CO_2$  et à sa recristallisation après dessiccation.* (Ben Dhia M. 1983).

L'essai le plus courant pour produire ce phénomène consiste à mesurer les résistances à la compression en fonction du temps sur des éprouvettes de tufs compactées.

Cet essai est un indice permettant d'évaluer la cohésion des matériaux compactés (Fenzy, 1966, Ben Dhia 1983 ; Morsli, et al. 2007 ; Goual, et al. 2012 ; Daheur, et al. 2015), introduit pour les matériaux locaux la première fois par FENZY (1957), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction < 5mm. Le compactage à l'OPM est effectué à la presse et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 55°C pendant 48h (éprouvettes de 5cm de diamètre et de hauteur).

### 3.3.5.1 Préparation des échantillons

Les principales étapes de préparation des échantillons sont :

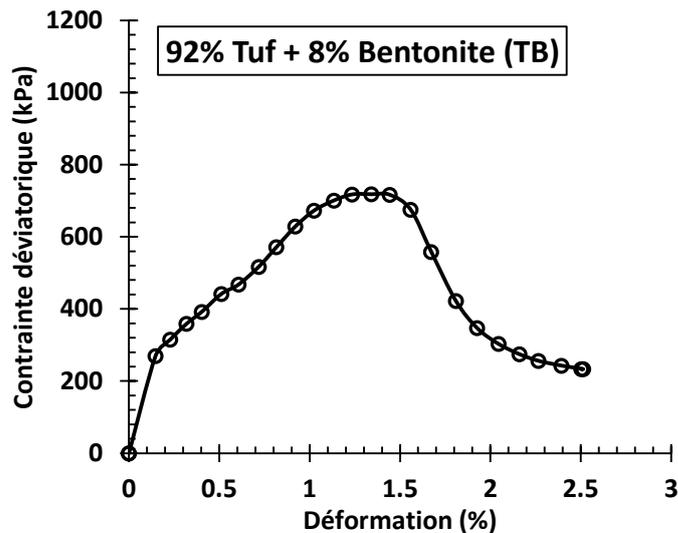
1. Après le séchage de nos échantillons à l'air, le tuf a été passé sur un tamis de 5 mm pour éliminer les grosses particules ;
2. Une quantité d'eau correspondant à l'OPM, a été ajoutée au tuf, en les mélangeant soigneusement à la main pour obtenir un mélange homogène ;
3. Stockage du tuf dans un sac en plastique scellé pendant au moins 24 h pour obtenir des conditions d'humidité uniformes ;
4. Compactage statique selon la norme NFP 98- 230-2, à l'aide d'une presse CBR à une vitesse de 1,27 mm/mn et des moules à double piston ( ) (Figure III-5). Le matériau est compacté en une seule fois dans le moule. Cette méthode de compactage conduit à une répartition homogène de la contrainte de compactage (Romero 1999; Ghembaza et al. 2007; Gueddouda et al. 2010).
5. Lors de la fabrication de l'échantillon, une attention particulière est portée à la formation des grumeaux. Pour cela, le malaxage a été réalisé manuellement en plusieurs fois par criblage dans un tamis de 5 mm de diamètre, dans le but d'avoir un Mélange homogène.



**Photo III-7 :** (a) Moules de confection ; (b) Préparation des éprouvettes ; (c) Presse hydraulique ; (d) Ecrasement d'éprouvette par la presse CBR ; (e) éprouvette écrasée.

Une fois le temps de conservation est atteint, les éprouvettes sont soumises à un effort de compression appliqué parallèlement à l'axe du cylindre à l'aide d'une presse CBR à une vitesse constante de 1,27 mm/mn jusqu'à la rupture, et on prend les lectures.

La courbe de variation de la contrainte en fonction des déformations axiales pour notre échantillon est représenté sur la figure III-7. On remarque que la contrainte axiale augmente avec la déformation axiale jusqu'à atteindre un pic, ensuite elle diminue progressivement. La contrainte axiale maximale  $\sigma_{\max}$  est de l'ordre de 720 kPa.



Graph III-8 : Courbe contrainte- déformation de notre échantillon

### 3.4 RECAPITULATIF DES ESSAIS D'IDENTIFICATION

Le tableau englobe les caractéristiques géotechniques de notre mélange.

Tableau III-7 Propriétés géotechnique du mélange 92% tuf + 8% bentonite.

<b>Analyse granulométrique</b>	
$D_{max}$ (mm)	5
% < 0.425 mm	75
% < 80 $\mu$ m	35
$C_u$	45
$C_c$	1.701
<b>Les limites d'Atterberg</b>	
$w_L$ (%)	31.50
$w_p$ (%)	NM
$I_p$ (%)	NM

<b>Equivalent de sable Es (%)</b>	11.53
<b>Compactage</b> $\gamma_{dmax}$ ( $T/m^3$ ) ( $w_{opt}\%$ )	1.74 16.20
<b>Essai de compression simple à 95% de (MPa)</b>	1,7
<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	64

D’après la classification USCS (*Unified Soil Classification System*) (tableau III-8 notre mélange est classé comme grave argileuse « GA (GC) ».

**Tableau III-8 : Classification USCS des sols grenus (plus de 50 % d’éléments > 0,08 mm).**

Définitions		Symbole	Conditions	Appellations
<b>Graves</b>	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm	moins de 5% d’éléments < 0,08 mm	Gb (GW) $Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
		plus de 12% d’éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Une des conditions de Gb n’est pas satisfaite
	GL (GM)		Limites d’Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse
	GA (GC)	Limites d’Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse	
<b>Sable</b>	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm	moins de 5% d’éléments < 0,08 mm	Sb (SW) $Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
		plus de 12% d’éléments < 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions de Sb n’est pas satisfaite
	SL (SM)		Limites d’Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux
	SA (SC)	Limites d’Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileux	

### 3.5 CONCLUSION

Les essais d'identification géotechnique ont pour but de situer les matériaux par rapport aux spécifications et normes retenues pour leurs emplois dans la conception des barrières pour les CET, pour une éventuelle sélection.

Le mélange (92% tuf + 8% Bentonite) est classé selon *Unified Soil Classification System* (USCS) comme grave argileuse GA (GC).

Les essais préliminaires ont permis de conclure que le mélange sélectionné satisfait l'exigence de la résistance, mais avec l'augmentation de la teneur en eau, cette résistance chute considérablement et atteint une valeur négligeable. Le chapitre suivant est consacré à la correction de ce défaut par le traitement de notre matériau au ciment, en améliorant leur résistance mécanique (résistance à la compression, à la traction et au cisaillement).

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily on the right side. At the bottom, there are several wavy, horizontal lines in shades of orange, red, and yellow, creating a sense of motion or energy.

*Chapitre IV*  
*Comportement*  
*mécanique et*  
*hydrique du*  
*mélange Tuf-*  
*bentonite-ciments*

## 4.1 Introduction :

Le ciment peut être utilisé en petites quantités comme additif au mélange sol sableux-bentonite compacté pour augmenter la résistance, réduire la conductivité hydraulique, réduire la possibilité de formation de fissures et augmenter la durabilité vis-à-vis l'attaque chimique (Nilo Cesar Consoli, et al. 2013).

La présent chapitre consiste à traité le mélange 92% tuf + 8% bentonite par différents pourcentages du ciment noir ou blanc.

Les propriétés hydromécaniques des mélanges tuf-bentonite (TB) et tuf-bentonite-ciment (TBC) sont étudiées et comparées en effectuant des essais de perméabilité à charge variable, de résistance à la compression, à la traction et au cisaillement.

L'objectif de ce traitement est :

- Amélioration des caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, à la traction et au cisaillement) ;
- Conférer au matériau une insensibilité à l'eau.
- Diminuer la perméabilité du matériau.

Dans la pratique, l'ajout d'une petite quantité du ciment (entre 1 et 5%) au mélange tuf bentonite est suffisant pour répondre aux paramètres de construction, à long terme, des barrières passives. À cet égard, le mélange optimale (92% tuf +8% bentonite) est traité par 3 teneurs massiques en ciment (noir ou blanc) 1.5% ; 3% et 5%. Dorénavant les nominations des différents formules tuf-bentonite-ciment est comme suit :

- 92% tuf + 8% bentonite noir nommé TB
- 92% tuf +8% bentonite + 1.5% ciment noir nommé TB1.5CN ;
- 92% tuf +8% bentonite + 3% ciment noir nommé TB3CN ;
- 92% tuf +8% bentonite + 5% ciment noir nommé TB5CN ;
- 92% tuf +8% bentonite + 1.5% ciment blanc nommé TB1.5CB ;
- 92% tuf +8% bentonite + 3% ciment blanc nommé TB3CB ;
- 92% tuf +8% bentonite + 5% ciment blanc nommé TB5CB ;

## 4.2 Protocole expérimentale :

Notre étude au laboratoire est composée des investigations suivantes :

- Influence du traitement sur les caractéristiques immédiates (densité sèche, teneur en eau optimale) ;
- Influence du traitement sur les caractéristiques mécaniques :

- Essais de compression simple et à la traction après conservation à l'étuve à 55° pendant 48heurs ;
- Essais de cisaillement direct immédiatement après compactage dans les conditions de l'optimum Proctor.
- Influence de traitement sur la perméabilité du matériau.

### 4.3 Présentation des ciments utilisés :

Les produits cimentaires utilisés pour le traitement des sols se présentent sous deux formes : soit, i) des liants hydrauliques routiers (NF P15-108), soit, ii) sous forme de ciment (CEM I à V) (NF EN 197-1, 2001). La classification des ciments (CEM I à V) dépend de la proportion de leurs composantes principales. Ces composantes peuvent être : le clinker, les laitiers des hauts-fourneaux, les cendres volantes, la pouzzolane naturelle, le calcaire, les schistes calcinés et la fumée de silice (Mehenni A2015).

#### ➤ Le Ciment noir utilisé :

Le ciment noir utilisé dans cette étude est un ciment de nom commercial AWTED, il est conforme à la norme algérienne NA 442 ainsi que la norme européenne EN 197-1 (Figure 01).



*Photo IV- 1: Ciment AWTED NA 442-CEM II/A-L 42.5 N.*

*Tableau IV :1 : Résultats des analyses chimique du ciment AWTED (Voir la fiche technique en annexes).*

<b>Teneur en (SO<sub>3</sub>) (%)</b>	≤ 3,5
<b>Teneur en chlorures (%)</b>	< 0,1

➤ **Ciment blanc utilisé :**

Le non commercial du ciment Blanc utilisé est MALAKI (NA 442 CEMII/B-L 42,5 N), il est conforme à la norme Algérienne (NA442-2013), Européenne (EN197-1).



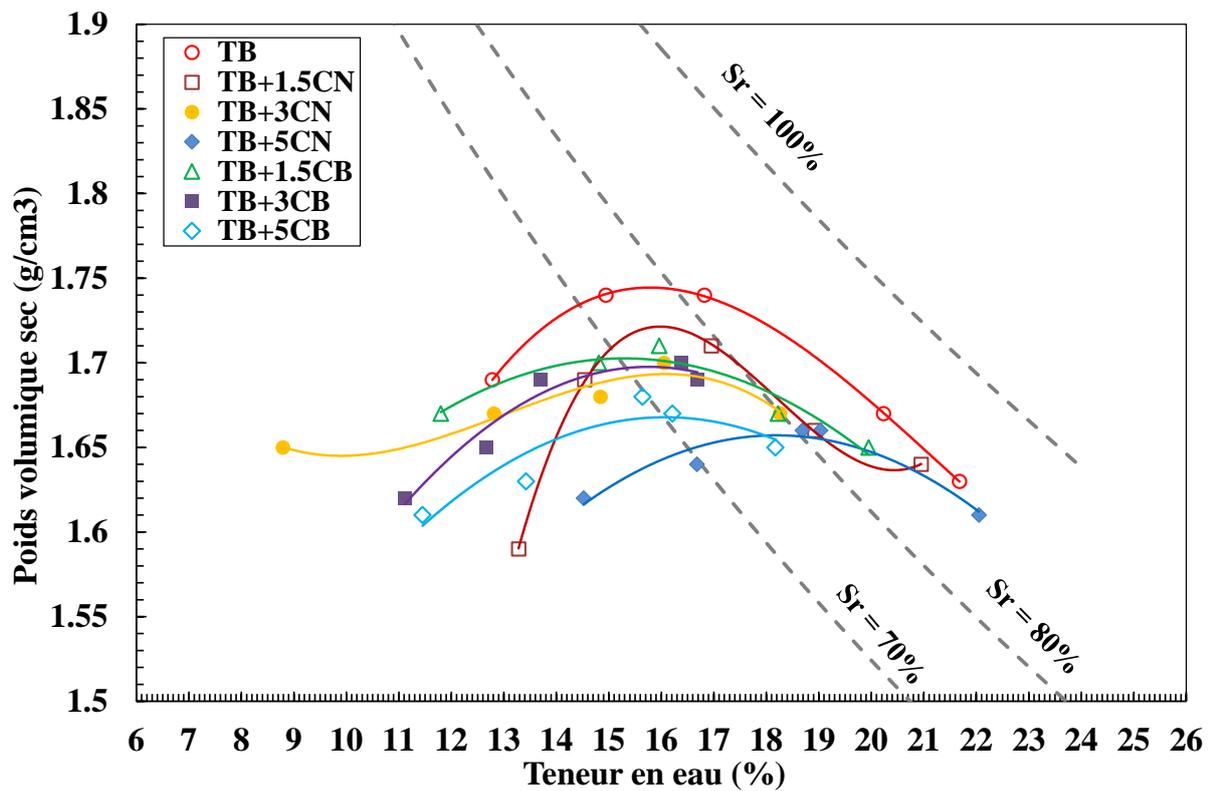
*Photo IV-2 : Malaki /B-L 42,5 N.*

*Tableau IV :2 : Résultats des analyses chimique du ciment Malaki, (Voir la fiche technique en annexes).*

<b>Perte au feu (%)</b>	11,5 ±1
<b>Teneur en (SO<sub>3</sub>) (%)</b>	2,6±0,6
<b>Teneur en (MGO) (%)</b>	2,5±0,8
<b>Teneur en chlorures (%)</b>	<0,1

#### **4.4 Influence de traitement sur les caractéristiques de compactage :**

L'effet du traitement au ciment sur les caractéristiques de compactage à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale est représenté sur la photo IV-03. Les différentes caractéristiques de compactage sont représentés sur la photo IV-3

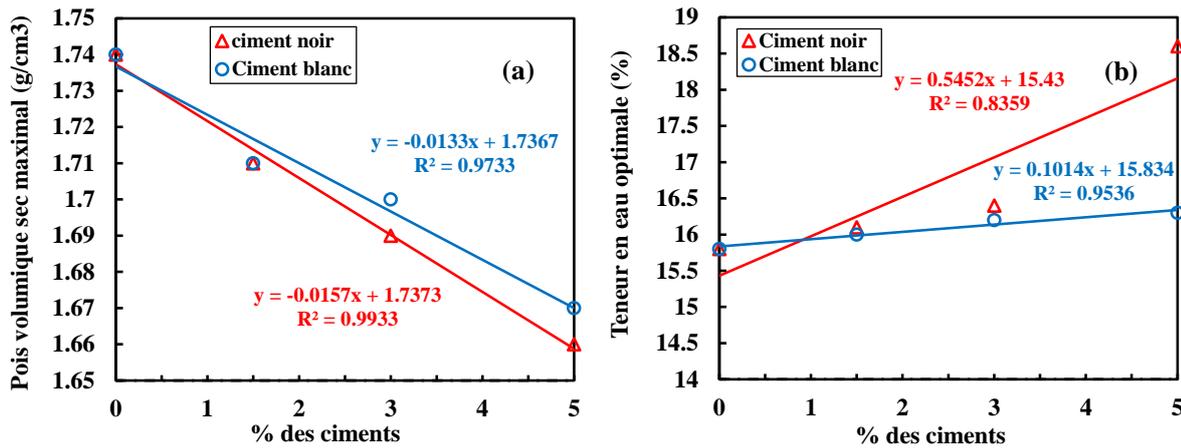


*Graphie IV-3 : Courbe Proctor Normal des mélanges TB-Ciments.*

D'après ces résultats, le traitement aux ciments conduit à :

- Une augmentation de la teneur en eau optimale. Cette augmentation est proportionnelle avec le dosage des ciments, elle atteint son maximum (18%) dans le cas du traitement avec 5% de ciment noir. Ainsi les courbes sont décalées vers la droite ;
- Abaissement de la densité sèche maximale (5% pour le traitement avec 5% de ciment noir), cette diminution est linéaire avec la teneur en ciments (voir les équations des pentes sur la Figure IV-4
- Aplatissement de la courbe Proctor, elle est très remarquable pour le traitement avec le ciment blanc (diminution de la sensibilité de la densité sèche maximale vis-à-vis de la teneur en eau optimale).

Ces constatations coïncident bien avec ce que nous avons vu dans la bibliographie.



**Graphe IV-4 :** Influence de la teneur en ciment sur les caractéristiques de compactage : (a) le poids volumique sec maximal, (b) la teneur en eau optimal.

## 4.5 Comportement Hydraulique Des Mélanges Bentonite-Tuf et Bentonite-Tuf-ciment

### 4.5.1 Essai de perméabilité à charge variable (AFNOR NFX 30-441)

Cet essai est généralement employé pour les sols fins qui présentent des coefficients de perméabilité assez faibles ( $10^{-7}$  m/s). Le dispositif expérimental est constitué d'une bague en acier inoxydable de diamètre intérieur 101,6 mm et d'une hauteur de 116 mm (Photo IV-5). Cette bague permet une mise en place du sol argileux par compactage statique direct dans la bague à l'aide d'une presse hydraulique ou par compactage dynamique (selon les conditions Proctor). Elle est comprise entre une embase et un couvercle avec deux pierres poreuses de 101,5 mm de diamètre. Après le compactage, on immerge le moule dans l'eau pendant 48h pour permettre la saturation de l'échantillon, puis, il est soumis un gradient hydraulique de 22kPa pendant 24 heures afin d'assurer la saturation. Après la saturation, le moule est plein d'eau et relie au tube gradue. L'essai est réalisé à charge hydraulique variable sous une pression initiale définie. On refaire l'opération pour plusieurs hauteurs.

On mesure le temps nécessaire pour que le niveau de l'eau descende du niveau  $h_1$  au niveau  $h_2$ . On se trouve bien dans le cas d'un écoulement à une dimension, et on peut appliquer la loi de Darcy modifiée pour chaque intervalle élémentaire de temps ( $t, t + dt$ ). La perméabilité est donnée par l'expression suivante :

$$K_v = 2,3 \text{ a.L. A.T Log } h_1 / h_2$$

Où :

$d$  : diamètre du tuyau= $2.01\text{ cm}$

$a$  : section du tuyau;  $a=3.17\text{ cm}^2$  ;

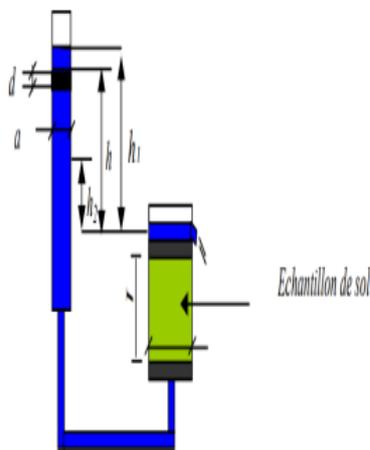
$D$  : diamètre de l'échantillon= $10.1\text{ cm}$  ;

$A$  : section de l'échantillon ;  $A=80.07\text{ cm}^2$  ;

$T$  : l'intervalle de temps entre  $h_1$  et  $h_2$ ;

$L$  : longueur de l'échantillon.

Les résultats de cet essai montrent que nos échantillons traités avec le ciment présentent une très faible perméabilité  $> 10^{-12}\text{ m/s}$ .



*Photo IV-5: Essai de perméabilité à charge variable.*

## 4.6 Influence de traitement au ciment sur le Comportement mécanique du mélange Tuf-bentonite :

### 4.6.1 Résistance au cisaillement directe des mélanges (AFNOR NF P 94-071-1) :

L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol. En supposant les contraintes uniformément réparties sur la surface de rupture, on détermine la contrainte de cisaillement à la rupture  $\tau$  (ou résistance au cisaillement) pour une contrainte normale donnée  $\sigma$ .

Dans notre cas, nous avons réalisé cet essai sur une série des échantillons traités avec les différents dosages des ciments et préparés initialement à l'OPN.

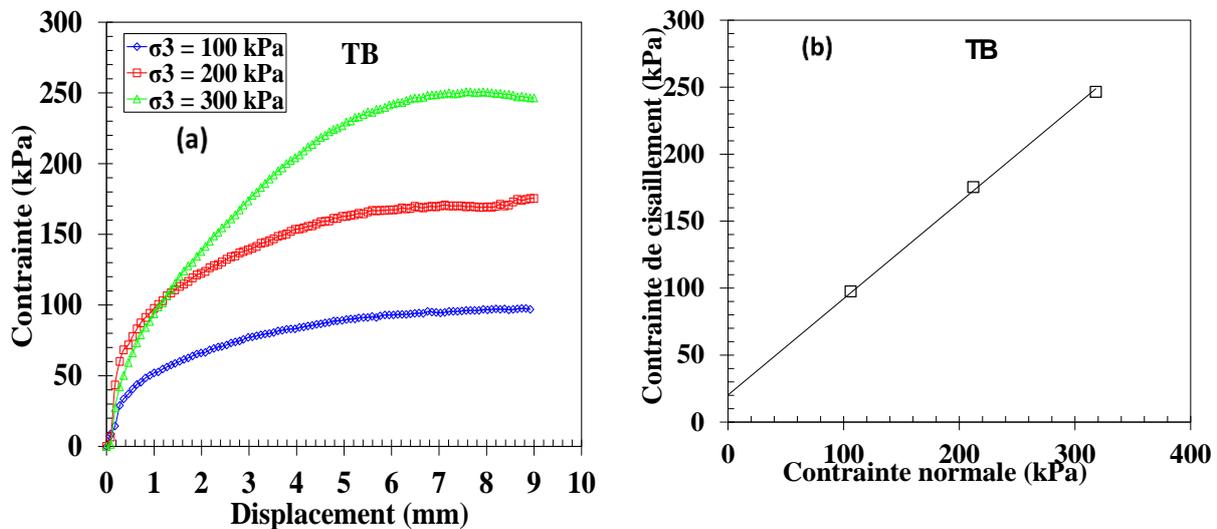
### ➤ Préparation des échantillons

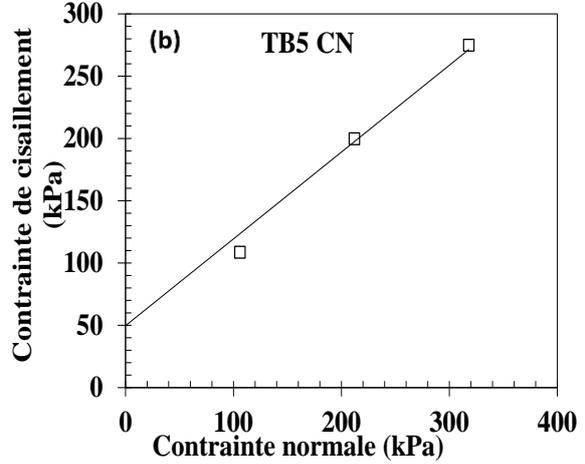
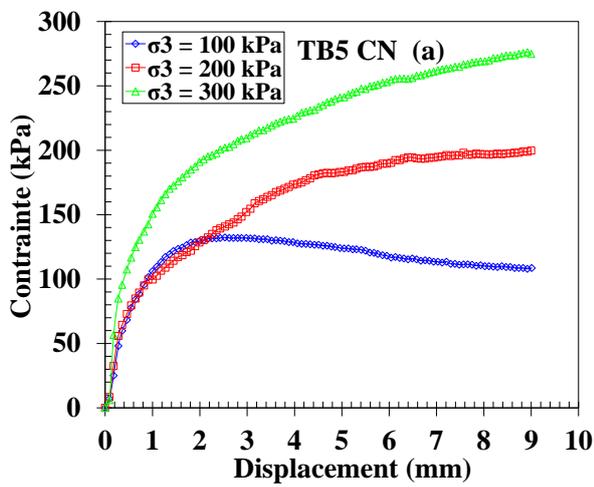
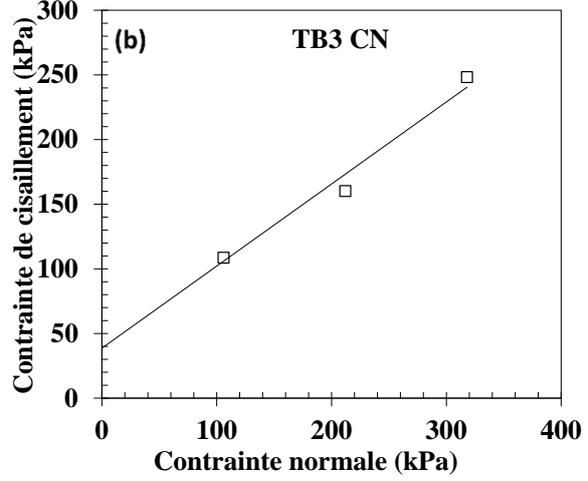
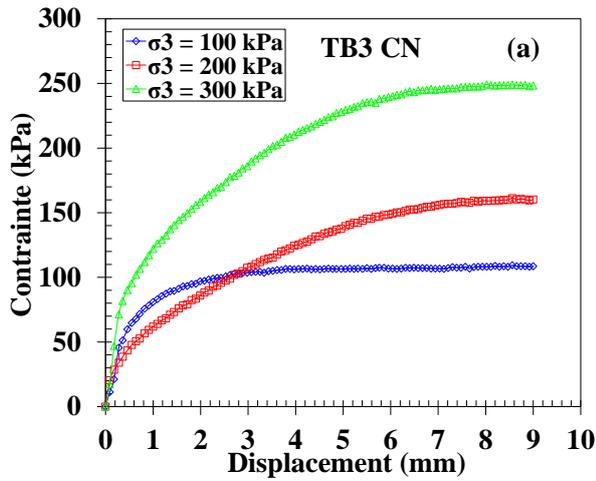
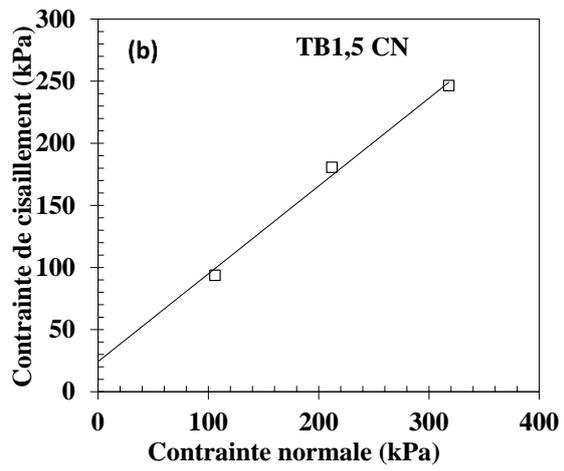
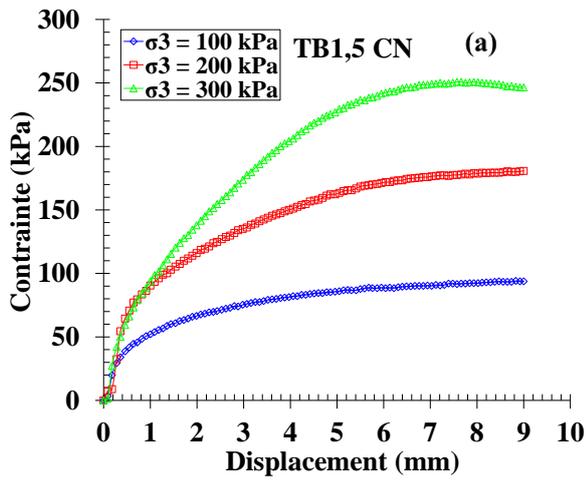
Après passage des deux constituants (Tuf-bentonite) à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, les différents pourcentages des ciments sont mélangés manuellement avant d'ajouter la quantité d'eau de gâchage correspond l'OPN. Le malaxage est fait en plusieurs fois par criblage dans un tamis de 5 mm de diamètre dans le but d'avoir un mélange homogène et d'éviter la formation des grumeaux. Le mélange humide est soumis par la suite à un compactage statique dans le moule de dimension (forme cylindrique, de diamètre 6 cm et de hauteur 2,5 cm).

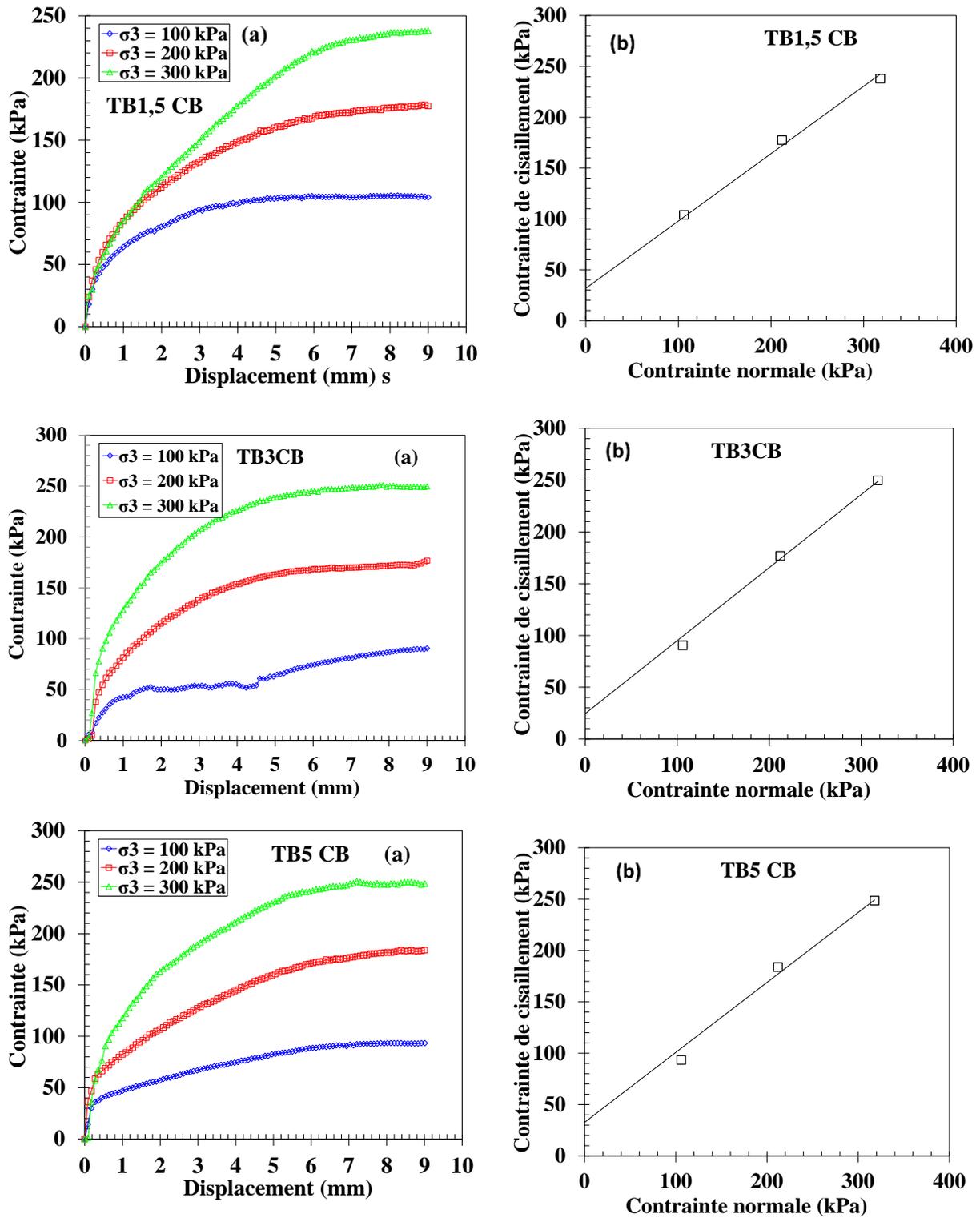
Pour s'assurer que la surface de contact est plane, on procède au rasage et au lissage de l'échantillon dans les deux côtés, supérieur et inférieur, avec remplissage des vides.

Après la préparation, les échantillons sont immédiatement mis dans la boîte de cisaillement appelée aussi boîte de Casagrande. Ces échantillons sont cisailés en appliquant trois contraintes normales (100, 200 et 300kPa) avec un taux de déformation de 0,5 mm/min appliqué pour tous les échantillons.

Les figures IV-3 présentent la variation de la contrainte en fonction de la déformation (courbes contraintes-déplacement) et les chemins de contrainte dans le plan  $[\tau, \sigma]$  pour les mélanges tuf-bentonite traité avec différents pourcentages du ciment.







*Graphe IV -6 : Influence de traitement au ciment sur la résistance au cisaillement : (a) courbe contraintes – déplacement (b) chemins de contrainte dans le plan [  $\tau$ ,  $\sigma$  ].*

D'après la figure IV-6, on remarque que pour tous les échantillons :

- Les graphes contraintes-déplacement n'ont pas linéaire, on a une déformation élastique non linéaire et une déformation plastique, ce qui nous permet d'attribuer un comportement élasto-plastique aux mélanges tuf-bentonite et tuf-bentonite-ciment.
- La contrainte augmente avec le déplacement jusqu'à atteindre un pic pour un déplacement de l'ordre de 7 à 9 mm ; ensuite la rupture se propage et la contrainte diminue progressivement et tend vers un palier ;
- La contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  augmente avec la contrainte normale ;
- La contrainte tangentielle augmente d'une manière linéaire avec la contrainte normale.

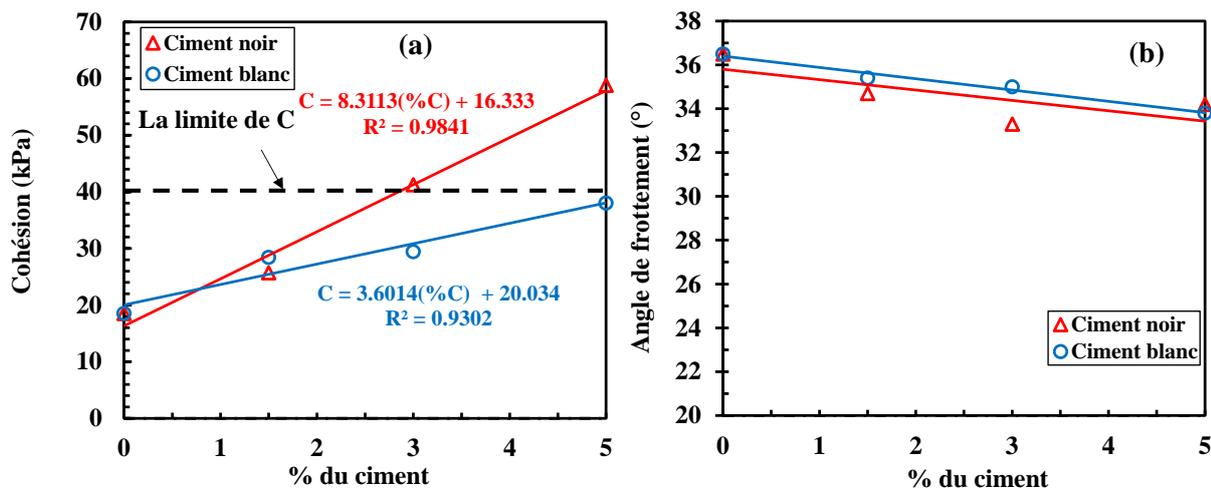
Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Ajorloo et al. (2012).

Les gains de la cohésion calculés, sont représentés dans le tableau IV-3 Sachant que les gains s'expriment par la relation  $(C_{ap} - C_{av})/C_{av}$

Où :  $C_{av}$  : la cohésion avant le traitement ;

$C_{ap}$  : la cohésion après le traitement.

Les résultats obtenus montrent que la cohésion est améliorée considérablement suite au traitement (linéairement avec des pentes figurées dans la figure IV-7). Concernant l'angles de frottement n'est pas vraiment affecté par l'ajout de ciment et varie entre  $33^\circ$  et  $36^\circ$ . Par exemple, dans le cas du traitement avec 5% de ciment noir, la cohésion augmente de 18.51 kPa à 58.83 kPa (un gain de 218%) et l'angle de frottement passe de  $36.5^\circ$  à  $34.2^\circ$ . Un pourcentage de ciment noir supérieur ou égale à 3% satisfait l'exigence du tableau I :1 page12



**Graphes IV-7 :** Variation de la cohésion et l'angle de frottement en fonction de pourcentage du ciment.

**Tableau IV :3 : Gains de la cohésion.**

Nom	TB	TB1,5CN	TB3CN	TB5CN	TB1,5CB	TB3CB	TB5CB
Gains de la cohésion (%)	0	38,9	122,9	217,82	53,6	58,9	105,4

#### 4.6.2 La résistance à la compression (NF P 98-230-2) :

La résistance à la compression de  $R_c \geq 200$  kPa est requise dans la conception des barrières ouvragées par différentes littératures dans le monde entier (Güney, Y., Koparal, S., et Aydilek, A. H). Si le sol est lentement drainé, un essai de compression (triaxial) non drainé peut être entrepris sans utiliser de membrane environnante ou de pression de confinement si le chargement est appliqué rapidement (Sarsby, R. W. 2013). Cet essai est rapide, simple et peu coûteux.

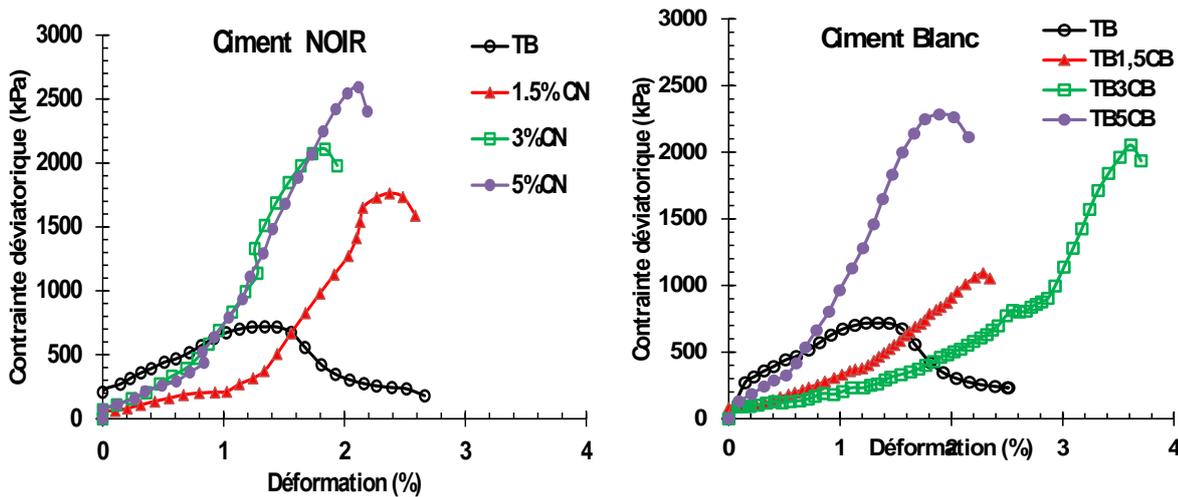
La résistance à la compression non confinée a été déterminée selon la méthode d'essai standard pour la résistance à la compression non confinée du sol (NF P 98-230-2, 1993).

##### 4.6.2.1 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons traité et non traité se fait en quatre étapes principales :

1. Elimination des grosses particules du tuf par tamisage au tamis de 5mm ;
2. Les mélanges (tuf-bentonite) sont séchés à l'air, puis les différentes fractions de ciment ont été mélangées (jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme) pour obtenir différents mélanges TBC.
3. Une quantité d'eau correspondante à la teneur en eau optimale de chaque mélange, est ajoutée. Puis, le mélange est malaxé soigneusement manuellement à travers un tamis ( $\phi=5$ cm), afin d'éviter la formation de grumeaux et d'obtenir un mélange homogène. Ensuite, le mélange a été stocké dans un sac en plastique scellé pendant au moins 24 h pour obtenir des conditions d'humidité uniformes.
4. En fin, les mélanges TBC est compacté statiquement à l'aide des moules cylindrique à double piston ( $\phi=5$ cm et  $H=10$ cm) à une compacité théorique égale à 100%, à une vitesse de 1,27 mm/min.

Les courbes de variation de la contrainte en fonction des déformations axiales pour tous les échantillons sont représentés sur la figure IV-8.



Graphe IV-8 : Courbes contrainte-déformation des déferents mélange sans et avec traitement.

La variation des résistances à la compression qui correspondent au pic des courbes précédentes, et le module sécant  $E_{50}$  en fonction des dosages du ciment, sont présenté Figure IV-9. Les gains de la résistance à la compression et le module sécant  $E_{50}$  sont représentés dans le tableau IV-4.

$E_{50}$  est défini comme le module sécant pour un niveau de déformation  $\epsilon_{(50)}$  correspondant à 50% de la force maximale graphe IV-10.

D’après ces résultats, on remarque que :

- La contrainte axiale augmente avec la déformation axiale jusqu'à atteindre un pic, ensuite elle diminue progressivement ;
- La contrainte axiale maximale  $\sigma_{max}$  augmente avec le pourcentage de ciment ajouté ;
- Une augmentation significative de la contrainte axiale maximale est enregistrée pour un faible pourcentage du ciment ;
- Pour le même pourcentage, le ciment noir présente la meilleure résistance à la compression par rapport au ciment blanc ;
- Le traitement de notre échantillon avec 5% de ciment noir acquière la bonne résistance à la compression avec une valeur dépasse 2500 kPa soit un gain de 171% par rapport au matériau sans traitement.

#### 4.6.2.1.1 Modules sécants :

A partir des courbes contraintes-déformations, on a pu estimer les valeurs des modules sécant.

$E_{50}$  est défini comme le module sécant pour un niveau de déformation  $\epsilon_{(50)}$  correspondant à 50% de la force maximale.( DAHEUR E G 2019)

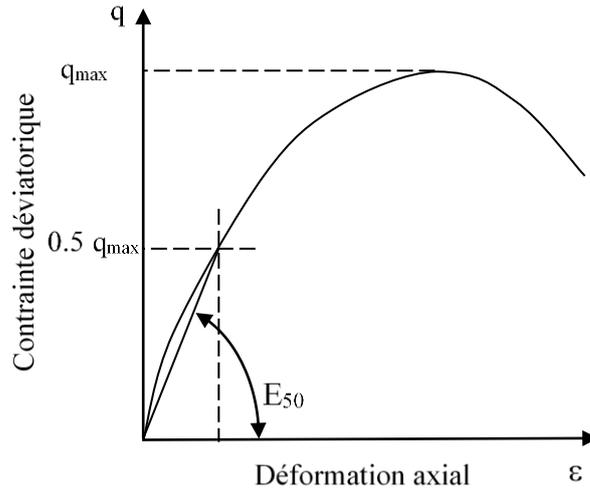
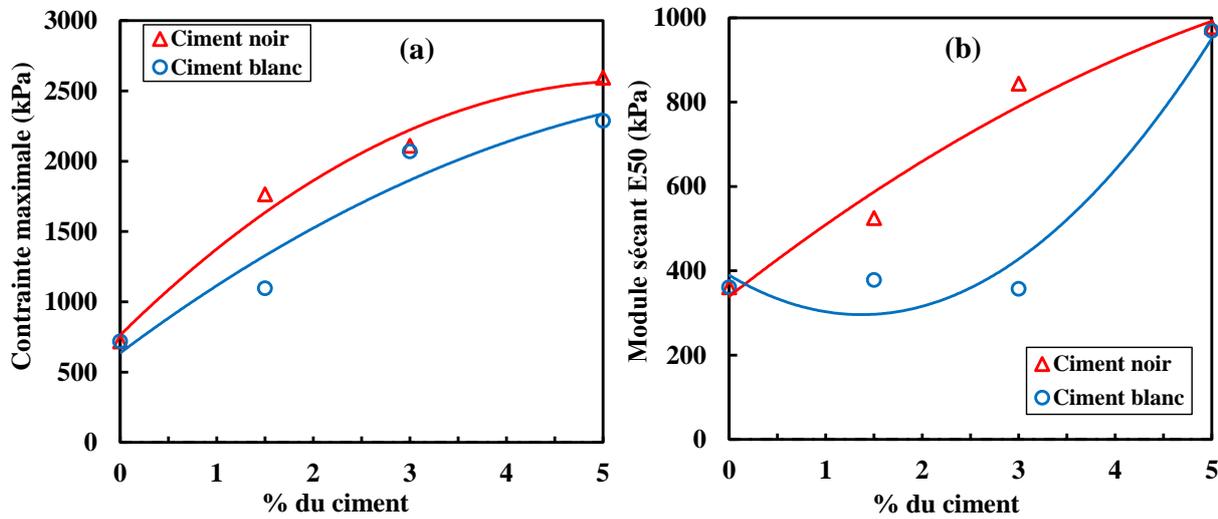


Figure IV-9 : Principe de détermination des modules sécant  $E_{50}$ . ( DAHEUR E G 2019)



Graphe IV-10 : courbes précédentes, et le module sécant  $E_{50}$  en fonction des dosages du ciment

Tableau IV-4 : Variation des gains de la résistance à la compression et le module sécant  $E_{50}$ .

	TB1,5CN	TB3CN	TB5CN	TB1,5CB	TB3CB	TB5CB
Gains de $R_c$ (%)	145,60	193,68	261,27	52,5	188,1	218,30
Gains de $E_{50}$ (%)	45	133	171	5	0	168

### 4.6.3 La résistance à la traction (essai de brésilien)

L'état des contraintes dans l'éprouvette, durant l'essai brésilien, a été déterminé avec l'hypothèse de l'élasticité linéaire pour des matériaux isotropes par Holtz (Holtz, R. D., et Kovacs, W. D. (1991). Ainsi, pour déterminer la résistance à la traction par fendage d'un matériau à partir des

équations d'Hertz, il faut satisfaire aux hypothèses d'un comportement élastique linéaire fragile et d'un chargement uniforme appliqué sur une génératrice du cylindre (Figure IV-11).

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques normalisées (NF P 98-230-2, 1993b). Grâce à deux plateaux, on applique un effort le long des deux génératrices diamétralement opposées (Figure 2 :35). En pratique, il est préférable de commencer par cet essai (avant l'essai de compression non confiné), car il nous permet d'avoir une information sur la résistance à la compression  $R_c$ , sachant que le  $R_c$  varie entre 8 et 15 fois le  $R_t$  (moyenne de  $\times 10$ ).

Des d'éprouvettes cylindriques (de dimensions, diamètre = 50 mm et longueur = 50 mm) ont été préparées pour tous les mélange. Pour tenir compte de l'hypothèse de continuité du matériau, autrement dit, la plus petite dimension de l'éprouvette doit être supérieure ou égale à 10 fois la plus grande dimension des particules constituant l'éprouvette (Biarez et Hicher, 1990). Le mélange est compacté statiquement à l'OPN ( $v=1,27$  mm/min) dans un moule à double piston permettant d'homogénéiser la contrainte sur toute la hauteur de l'éprouvette.

On applique un effort progressivement jusqu'à la rupture de l'échantillon. Ceci permet d'obtenir la résistance à la traction  $R_t$ . La relation de la résistance à la traction par fendage donnée comme suite :

$$R_t = 2F / \pi D l$$

A. Où,  $R_t$  : Résistance à la traction ;  $l$  : Longueur de l'éprouvette ;  $F$  : Pression axiale (presse hydraulique) ;  $D$  : Diamètre de l'éprouvette.



*Photo IV-11 : Schéma de principe d'écrasement par fendage.*

Les courbes de variation de la contrainte déviatorique en fonction des déformations axiales pour tous les échantillons sont représentés sur la photoIV-11. La variation des résistances à la traction et les gains correspondantes, en fonction des dosages du ciment, sont présentés dans le tableau IV-5.

Généralement, on remarque que :

- La résistance à la traction augmente avec le pourcentage de ciment ajouté ;
- Le traitement de notre échantillon avec 5% de ciment noir acquiert la bonne résistance à la traction avec une valeur de 1297 kPa soit un gain de 261.3% par rapport au matériau sans traitement.

*Tableau IV-5 : Résultats des essais de traction*

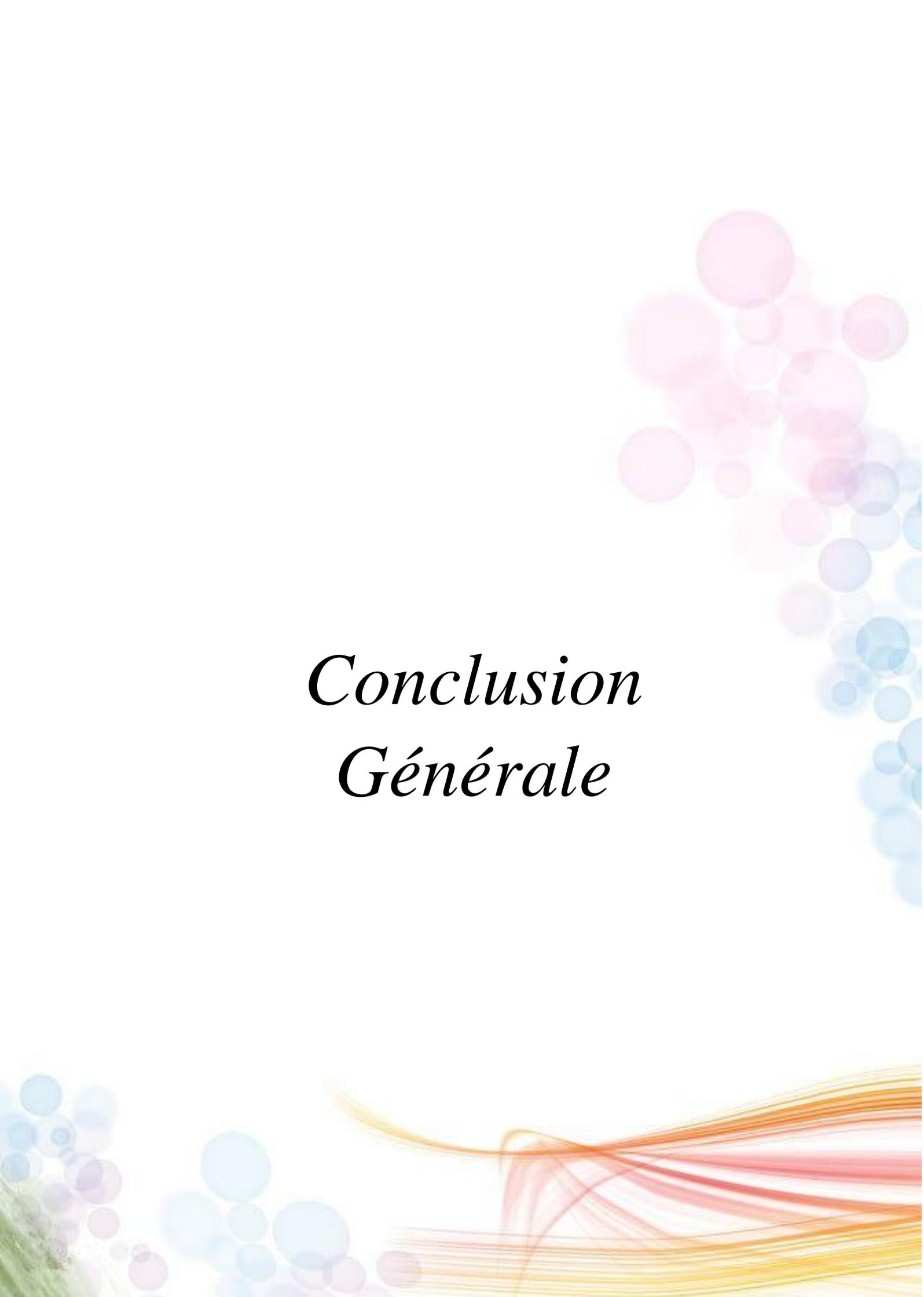
Nom	TB	TB1,5CN	TB3CN	TB5CN	TB1,5CB	TB3CB	TB5CB
<b>R<sub>T</sub> (kPa)</b>	359	882	1054	1297	547	1034	1142
<b>Gain de R<sub>T</sub> (%)</b>	/	145.6	193.5	261.3	52.4	188	218.1

## 4.7 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons vu l'influence du traitement au ciment (ciment blanc ou noir), sur les caractéristiques de compactage, l'évolution de la résistance à la compression, à la traction, au cisaillement et sur la perméabilité.

Au cours de cette étude, nous avons vu que le traitement au ciment conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et diminution de la densité sèche maximale.

L'étude de l'effet des traitements sur les performances mécaniques montrent que le ciment améliore considérablement les performances mécaniques. Le traitement de votre échantillon avec 5% ciment noir acquiert les bonnes performances avec une cohésion de 58kPa, une résistance à la compression de 2500kPa et une résistance à la traction de 1297kPa.

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily located in the upper right and lower left corners. At the bottom, there are several flowing, wavy lines in warm tones of orange, red, and yellow, creating a sense of movement and depth.

# *Conclusion Générale*

## *Conclusion générale*

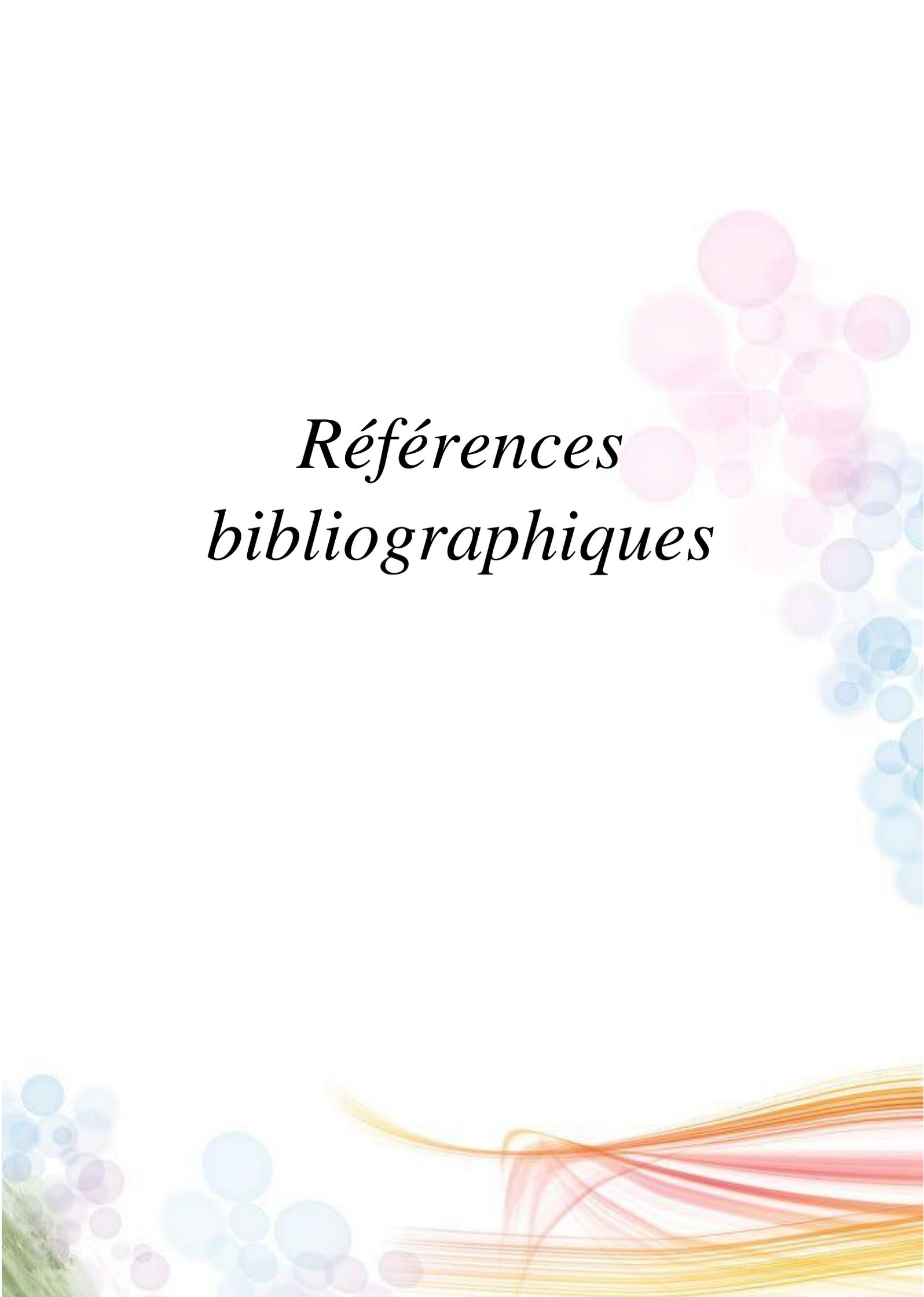
Une étude sur le comportement hydromécanique du mélange bentonite-tuf destiné à être utilisé comme matériau de barrière passive de CET dans les régions aride et semi-aride, avec ajout de ciment noir et blanc (1.5%,3% et 5%), a été présentée. Sur la base des résultats précédente réalisée par BOUHAMIDA F Z, YAGOUB Z, le pourcentage de bentonite utilisés est 8%. Les conclusions suivantes sont basées sur les résultats et les discussions obtenus à partir des essais de compactage Proctor normal, de perméabilité, de résistance à la compression et à la traction et de cisaillement direct.

Le traitement aux ciments conduit à :

- Une augmentation de la teneur en eau optimale et un abaissement de la densité sèche maximale, ces variations sont linéaires avec la teneur en ciments.
- Aplatissement de la courbe Proctor, elle est très remarquable pour le traitement avec le ciment blanc (diminution de la sensibilité de la densité sèche maximale vis-à-vis de la teneur en eau optimale).
- Une amélioration considérable de la cohésion ;
- Une augmentation de la résistance à la compression, elle est significative pour un faible pourcentage du ciment ;
- Pour le même pourcentage, le ciment noir présente la meilleure résistance à la compression par rapport au ciment blanc ;
- La résistance à la traction est également améliorée suite au traitement.
- Les échantillons traités montrent un coefficient  $k > 10^{-12}$  m/s, soit des matériaux imperméables

Ont conclu qu'un pourcentage du ciment noir supérieur ou égale à 3% satisfait toutes les exigences des critères.

Par conséquent, il est plus que nécessaire que des études complémentaires doivent être réalisées sur un échantillon de tuf-bentonite et 3%ciment pour déterminer l'épaisseur minimal de la barrière étanche, avec l'étude de comportement de ce mélange dans les milieux agressifs et les liquides toxiques due au ces centres d'enfouissement technique.

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily concentrated on the right side. At the bottom, there are several overlapping, wavy lines in warm tones of orange, red, and yellow, creating a sense of movement and depth.

*Références  
bibliographiques*

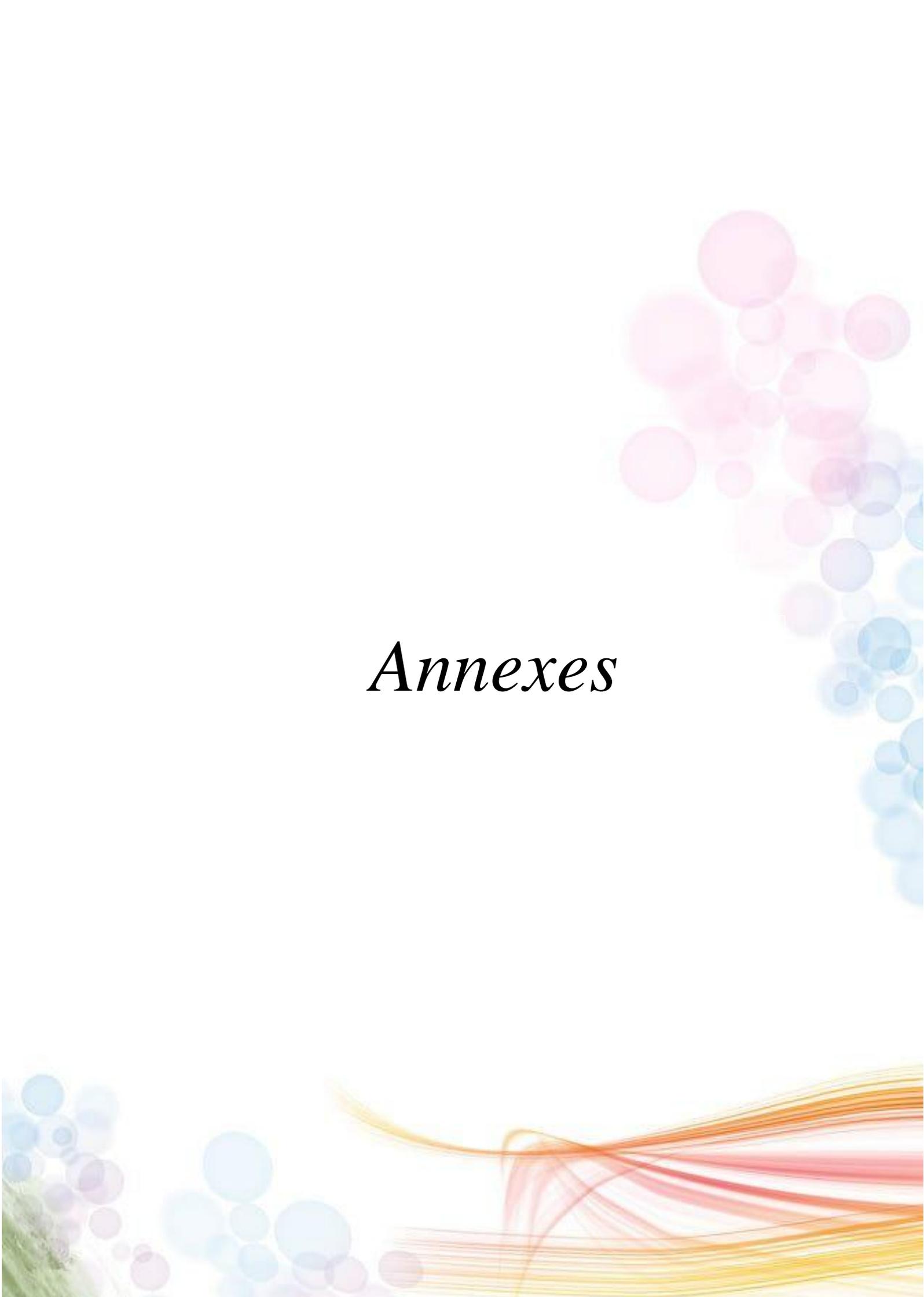
## Références bibliographiques

- AFNOR NF EN 933-8+A1. (2015).** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable.
- AFNOR NF P 94-051. (1993a).** Détermination des limites d'Atterberg—Limite de liquidité à la coupelle—Limite de plasticité au rouleau. AFNOR, 15 p.
- AFNOR NF P 94-056. (1996b).** Sols : reconnaissance et essais—Analyse granulométrique—Méthode par tamisage à sec après lavage. AFNOR, 16 p.
- AFNOR NF P 94-057. (1992).** Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. AFNOR, 16 p.
- AFNOR NF P 94-068. (1998).** Sols : reconnaissance et essais—mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux—Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche. AFNOR 7p.
- AFNOR NF P 94-071-1. (1994b).** Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct.
- AFNOR NF P94-420. (2000).** Roches - Détermination de la résistance à la compression uniaxiale.
- AFNOR NF P94-093. (1997a).** Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.
- NF X30-441 ( 2008)** Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau - Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant/variable.
- Alloul B (1981).** Etude géologique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière. Thèse de docteur 3ème cycle de l'Université de paris, juillet 1981.
- Améraoui, Z, (2002).** Les tufs d'encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière. Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Akacem Mustapha (2008).** Contribution à l'étude de la stabilisation aux liants hydrauliques des tufs de la région d'Adrar. Thèse de magister, USTO.
- Alston et al, 1997).**

- BOUHAMIDA Fatima Zohra YAGOUB Z 2020.** Effet de L'ajoute de la Bentonite et du Ciment sur les Propriétés Hydromécaniques d'un Tuf d'encroûtement : Application pour les Centres d'Enfouissement Techniques université de Ghardaïa.
- Baouassa Djamilia Zakouki Madjida2019-2020.** Comportement des Barrières ouvragées dans les centres de stockage des déchets ; Application à la région d'Adrar.
- Ben Dhia, M. H. (1983).** Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière. Thèse de doctorat, Université de Paris VI.
- Ben Dhia, M., Colombier, G., Paute, J. L. (1984).** Tufs et encroûtements calcaires -utilisation routière. Colloque international Routes et Développement, Paris.
- b. l. d'appolonia, (1989)** structure and importance of nonstarchy polysaccharides of wheat flour1.
- Chalermyanont et Arrykul (2005).**
- Cho, W. J., Lee, J. O., et Kang, C. H. (2000).** Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository. *Annals of Nuclear Energy*, 27(14) : 1271-1284.
- Colombier, G. (1988).** Tufs et encroûtements calcaires. Utilisations routières. Synthèse, ISTED.
- Daheur Elhadj Gesmia (2011).** Contribution à l'étude de traitements des tufs. d'encroûtements dans le domaine de la géotechnique routière. Thèse de magistère, Université de Amar Telidji Laghouat.
- Daheur Elhadj Gesmia (2019).** Comportement d'un mélange Tuf-Sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques Thèse de doctorat Ecole Nationale Polytechnique.
- DERRAS Abdelkader (2011).** Comportement des barrières ouvragées dans les centres de stockage de déchet. Thèse de magister université Abou bak Belkaid, Tlemcen.
- Demdoun, A(2019).** Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite - Sable Calcaire – Tuf :Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD) . Thèse de doctorat ,Université de Amar Telidji Laghouat.
- Demdoun, A., Gueddouda, M. K., Goual, I., et Benabed, B. (2016a).** Geotechnical characterization of geo-material blends with Bentonite of Maghnia for use as landfill liners. *Journal of Materials, Processes and Environment*, 4(2): 48-54.

- E. Fratolocchi, Ivo Bellezza,(2006).** Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of compacted soil–cement mixtures, January 2006, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement.
- Elkady et al. 2014.** Adsorption of 15 different pesticides on untreated and phosphoric acid treated biochar and charcoal from water.
- Gerard DEGOUTTE ,Paul ROYET.** Aide mémoire de mécanique de sol , école nationale de génie rural des eaux et des forêts.
- GUEDDOUDA Mohamed Kamel.** Comportement hydro-mécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée« sable de dune –bentonite ».
- GTR.** Guide technique , Réalisation des remblais et des couches de forme Ministère de l'Équipement du Logement et des Transports
- Holtz, R. D., et Kovacs, W. D. (1991).** Introduction à la géotechnique (Traduit de l'anglais par J. Lafleur). Éditions de l'École Polytechnique de Montréal : 794p.
- Iravanian, HuriyeBilsel (2014).** Strength Characterization of Sand-Bentonite Mixtures and the Effect of Cement Additive, Article in Marine Georesources and Geotechnology · December 2014.
- Kenney et al. (1992).** Hydraulic conductivity of compacted bentonite–sand mixtures  
Publication: Canadian Geotechnical Journal June 1992.
- Koerner, R. M., et Daniel, D. E. (1997).** Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps. American Society of Civil Engineers.
- Komine, H. (2004).** Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand–bentonite mixture backfills. Applied Clay Science, 26 (1–4): 13–19.
- Lautrin. D.** «Une procédure rapide d'identification des argiles». Bulletin L.C.P.C, N° 152, 1987. p.76.
- MATE :** Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme Algérien, (2013). Guide technique Algériens de la gestion des déchets ménagers.
- Mitchell, J. K. (1993).** Fundamentals of soil behavior, 2nd edn. Wiley, New York, 437p.
- Morsli, M. (2007).** Contribution à la valorisation des tufs d'encroustement en technique routière saharienne. Thèse de doctorat, école Nationale Polytechnique, Alger.

- Nilo Cesar Consoli, Marcel Antonio Arcari Bassani, Lucas Festugato, (2013).** Effet du renforcement des fibres sur la résistance des sols cimentés, Géotextiles et géomembranes.
- Philipponnat, G., et Hubert, B. (1997).** Fondations et Ouvrages en Terre. Editeur Eyrolles.
- Pluart, L. Le. (2002).** Nanocomposites epoxyde/amine/montmorillonite : rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux. PhD thesis, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 252 p.
- Praetorius, S., et Schöber, B. (2017).** Bentonite Handbook: Lubrication for Pipe Jacking. Deutsche National-bibliothek, 213p.
- Sällfors, G., et Öberg-Högsta, A. L. (2002).** Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. Geotechnical & Geological Engineering, 20: 65-80.
- Sarsby, R. W. (2013).** Environmental Geotechnics, 2nd edn. ICE Publishing, Westminster, London, pp 231– 284.
- Shafiee, A., Tavakoli, H. R., et Jafari, M. K. (2008).** Undrained behavior of compacted sand-clay mixtures under monotonic loading paths,” Journal of Applied Sciences, 8(18):3108–3118. Studds, DI Stewart, TW Cousens - Clay Minerals The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures.
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., et Stalin, V. K. (2000).** Hydraulic conductivity of bentonite sand mixtures. Can. Geotech. J, 37: 406–413.
- Tran N. L. (1981).** Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassements routiers. Bulletin de Liaison. Labo.P. et Ch. 111. pp 5-16.
- Watanabe D, et al. (2011).** Ethanol fermentation driven by elevated expression of the G1 cyclin gene CLN3 in sake yeast. J BiosciBioeng 112(6):577-82.
- Wasti, Y. and Alyanak, I., 1968.** kil muhtevasının zeminin davranışına tesiri. *İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye İnşaat Mühendisliği, Teknik Kongresi.* Ankara, Turkey.
- Wood, D. M., et Kumar, G. V. (2000).** Experimental observations of behaviour of heterogeneous soils. Mechanics of Cohesive- Frictional Materials, 5(5): 373–398.

The background features a collection of semi-transparent, overlapping circles in shades of pink, light blue, and purple, primarily located in the upper right and lower left corners. At the bottom, there are several flowing, wavy lines in warm tones of orange, red, and yellow, creating a sense of movement and depth.

# *Annexes*

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS

( Méthode par tamisage à sec après lavage )

NF P 94-056 Mars 1996

( Méthode de tamisage par voie humide )

XP P 94-041 Dec. 1995

Structure : Unite Ghardaia Echantillon TUF  
 Lieu de travail : S<sup>ce</sup> ID Date : 06/11/2021  
 N° Dossier interne : PROJET FIN D'ETUDE Operateur : CHAMKHA+MOSE  
 Equipements Utilisés : Balance / Etuve N° D'inventaire : L21.09.15 / 1

Poid De l'Echantillon (g)	Tamis (mm)	Poid Refus Partiels (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complémen à 100	Tamisat (%)
	200					
	100					
	<b>80</b>					
	<b>50</b>					
	<b>31.5</b>					
	<b>20</b>					
	<b>10</b>	0,00	<b>0,00</b>	0,00	0,00	<b>100</b>
<b>1000</b>	<b>5</b>	1,16	<b>1,16</b>	0,12	99,88	<b>100</b>
	<b>2</b>	124,30	<b>125,46</b>	12,55	87,45	<b>87</b>
	<b>1</b>	59,00	<b>184,46</b>	18,45	81,55	<b>82</b>
	<b>0,4</b>	75,10	<b>259,56</b>	25,96	74,04	<b>74</b>
	<b>0,2</b>	70,00	<b>329,56</b>	32,96	67,04	<b>67</b>
	<b>0,1</b>	312,00	<b>641,56</b>	64,16	35,84	<b>36</b>
	<b>0,08</b>	3,80	<b>645,36</b>	64,54	35,46	<b>35</b>

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5a-03

Projet : APC / 11/ 2021

Client :

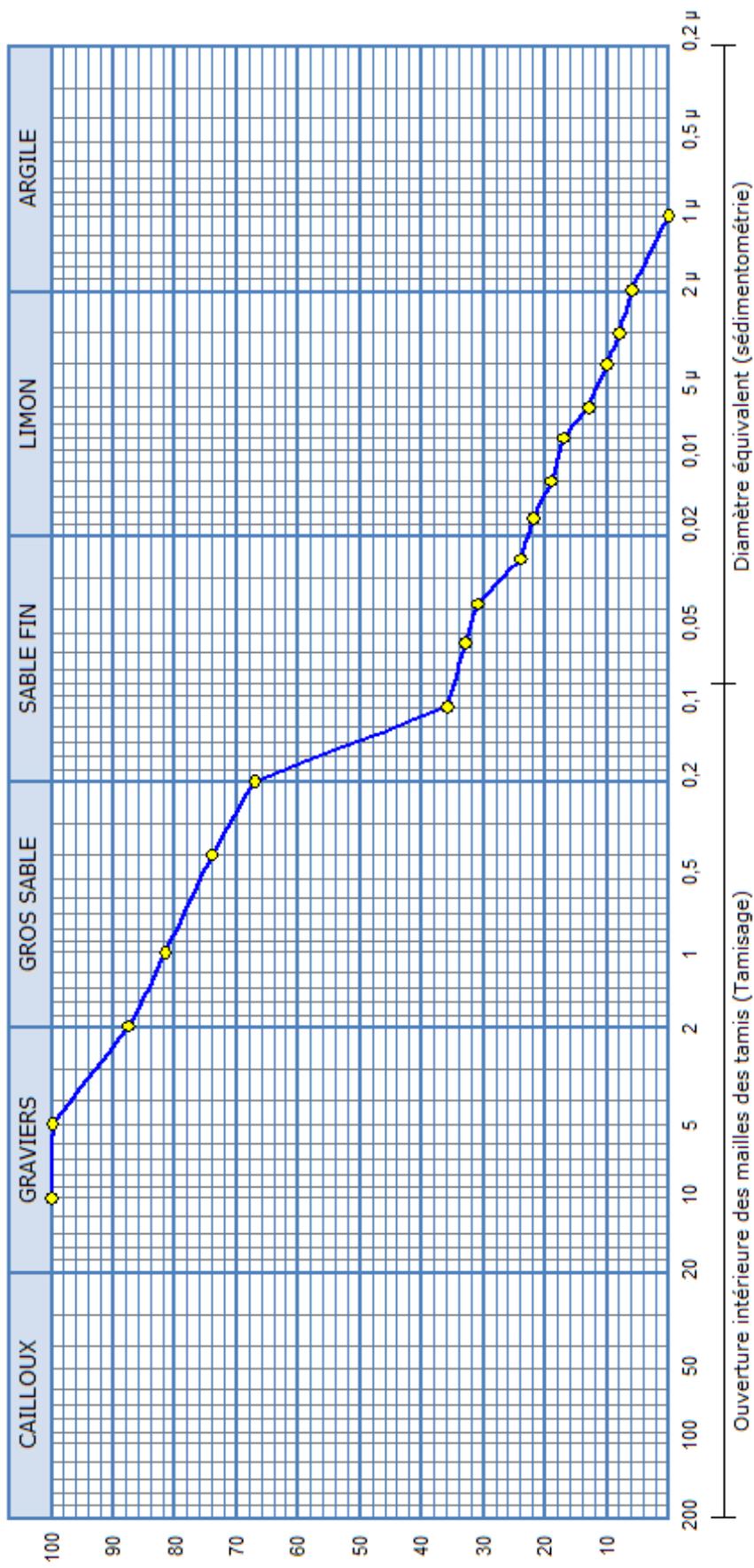
Localisation :

Date essai : 30 . 12. 2021

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Selon NFP 94-056

TUF: 



# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**LIMITES D'ATTERBERG**  
**NFP 94-051 Mars 1993**

Structure : ..... **U/G**.....

Lieu de Travail : ..... **S<sup>CE</sup> ID**....

Date : **23.01.2022**

N° Dossier interne **PROJET FIN**  
**D'ETUDE**

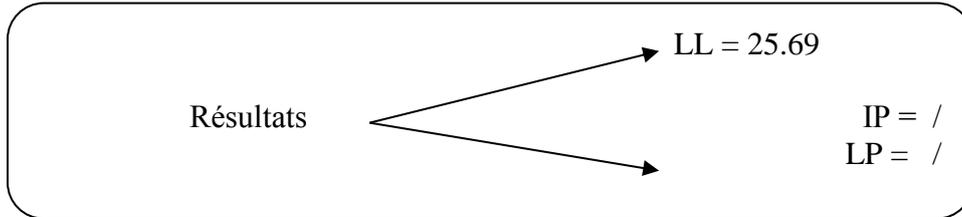
Température de Séchage : ...**50C°**...

Opérateur :  
**CHAMKHA+MOSBAH**

Echantillon : **TUF**

Équipements utilisés :  
**BALANCE/ETUVE**

N°D'inventaire :  
**L21.09.15/L49.01.91**



**LIMITE DE PLASTICITE**

	1 <sup>er</sup> Essai		2 <sup>ème</sup> Essai		3 <sup>ème</sup> Essai	
<b>N° de la tare</b>						
<b>Poids total humide</b>						
<b>Poids total sec</b>						
<b>Poids de la tare</b>			NON MESURABLE			
<b>Poids de l'eau</b>						
<b>Poids du sol sec</b>						
<b>Teneur en eau (%)</b>						
<b>Moyenne</b>						

LP = /

L'Opérateur

Visa du Responsable

# RAPPORT D'ESSAI

## Limites d'Atterberg

NF P 94 - 51

Client :  
 Projet : PROJET FIN D'ETUDE  
 Endroit :

N° Projet :  
 Réf. Client :  
 N° rapport : Rév :

Echantillon n° :  
 Sondage n° : TUF SEUL  
 Profondeur :  
 Matériaux :

Provenance :  
 Endroit de prélèvement :  
 Prélevé par :  
 Date prélèvement :

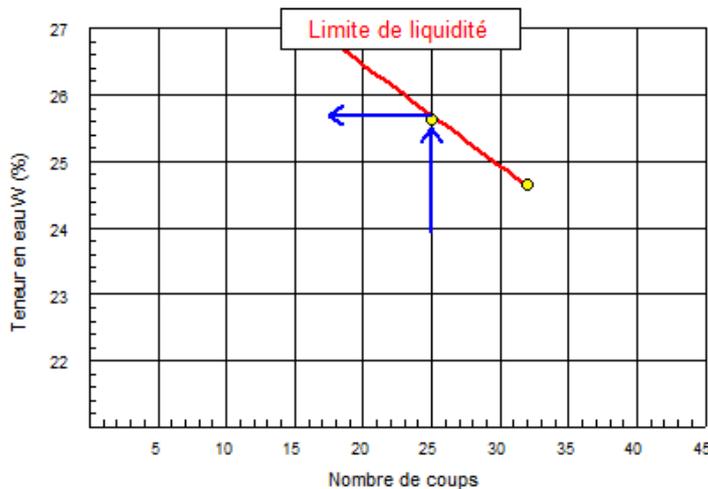
Reçu le :  
 Date essais : 23.01.2022

Limite de Liquidité (%) : WL = 25,69

Teneur en eau naturelle (%) : Weau =

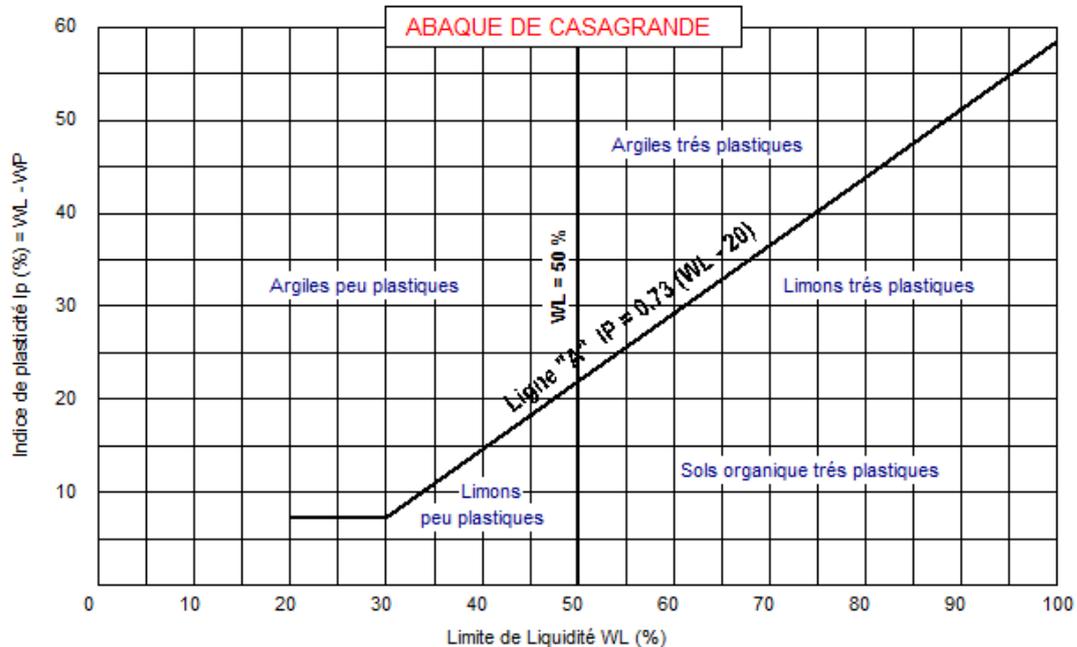
Limite de Plasticité (%) : WP =

Indice de Plasticité (%) : IP =



### Limite de plasticité

Ech N°	W (%)



© Soltekis 2007

Remarque :

Préparé par :  
 CHAMKHA HAKIM+MOSBAH SIHAM

Date :

Approuvé par :  
 OULED YAHIA -M

Date :

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**LIMITES D'ATTERBERG**  
**NFP 94-051 Mars 1993**

Structure : ..... **U/G**.....

Lieu de Travail : ..... **S<sup>CE</sup> ID**....

Date : **23.01.2022**

N° Dossier interne **PROJET FIN**  
**D'ETUDE**

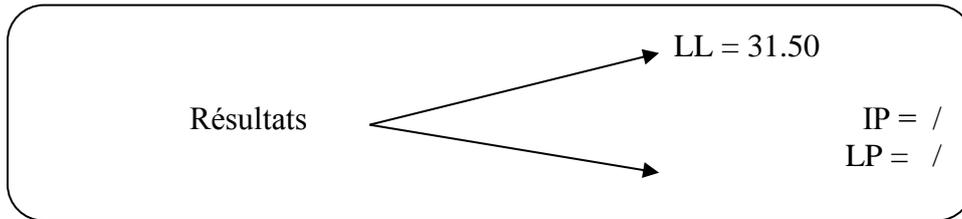
Température de Séchage : ...**50C°**...

Opérateur :  
**CHAMKHA+MOSBAH**

Echantillon : **TUF +8% BT**

Équipements utilisés :  
**BALANCE/ETUVE**

N°D'inventaire :  
**L21.09.15/L49.01.91**



**LIMITE DE PLASTICITE**

	1 <sup>er</sup> Essai		2 <sup>ème</sup> Essai		3 <sup>ème</sup> Essai	
<b>N° de la tare</b>						
<b>Poids total humide</b>						
<b>Poids total sec</b>						
<b>Poids de la tare</b>			NON MESURABLE			
<b>Poids de l'eau</b>						
<b>Poids du sol sec</b>						
<b>Teneur en eau (%)</b>						
<b>Moyenne</b>						

LP = /

L'Opérateur

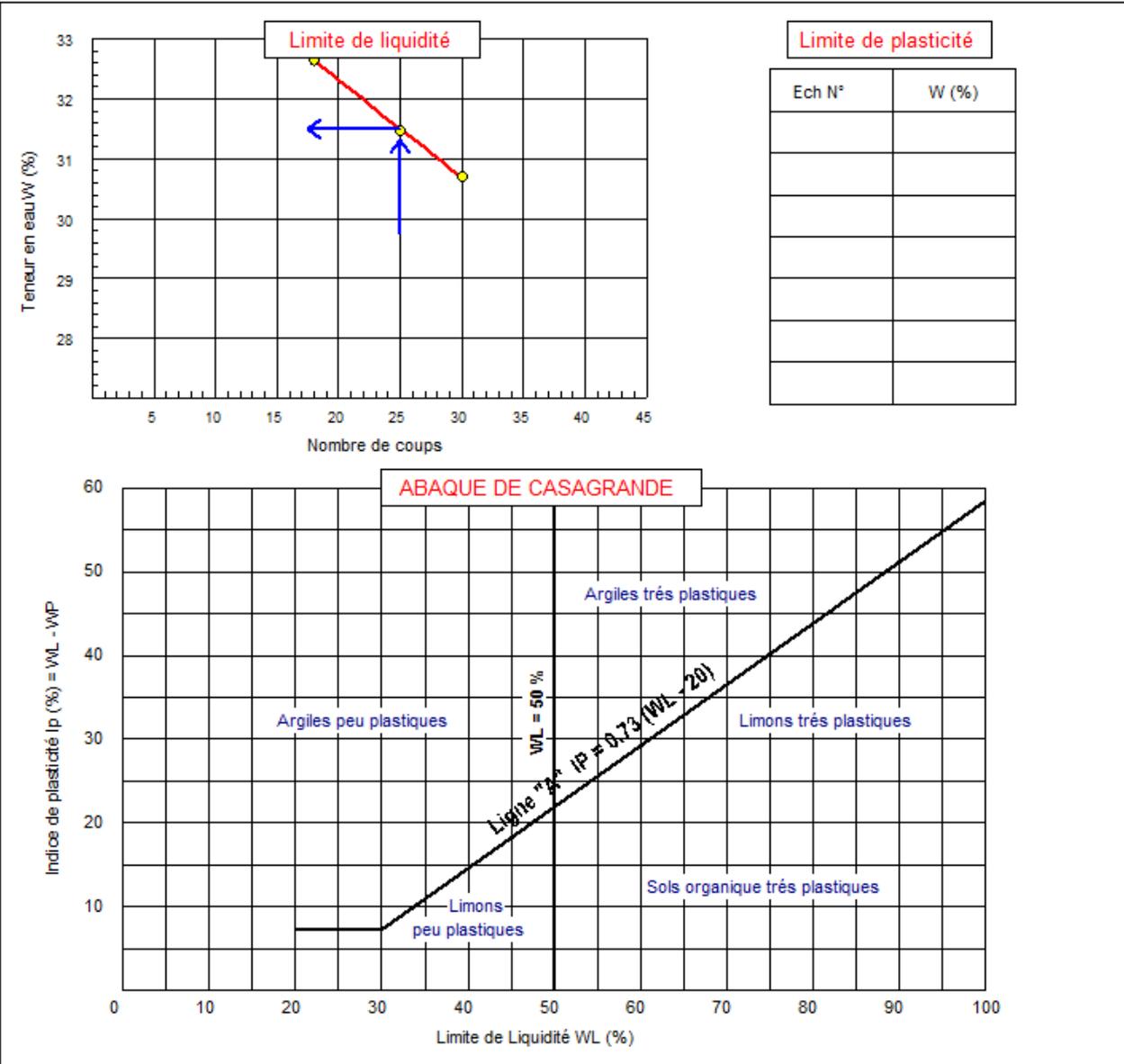
Visa du Responsable

**RAPPORT D'ESSAI**  
**Limites d'Atterberg**  
 NF P 94 - 51

Client : N° Projet :  
 Projet : PROJET FIN D'ETUDE Réf. Client :  
 Endroit : N° rapport : Rév :

Echantillon n° : Provenance :  
 Sondage n° : TUF+ 8% BT Endroit de prélèvement :  
 Profondeur : Prélevé par : Reçu le :  
 Matériaux : Date prélèvement : Date essais : 23.01.2022

Limite de Liquidité (%) : WL = 31,50 Teneur en eau naturelle (%) : Weau =  
 Limite de Plasticité (%) : WP =  
 Indice de Plasticité (%) : IP =



© Soltekis 2007

Remarque :

Préparé par : CHAMKHA HAKIM+MOSBAH SIHAM Date :  
 Approuvé par : OULED YAHIA -M Date :

Projet : APC / 11/ 2021

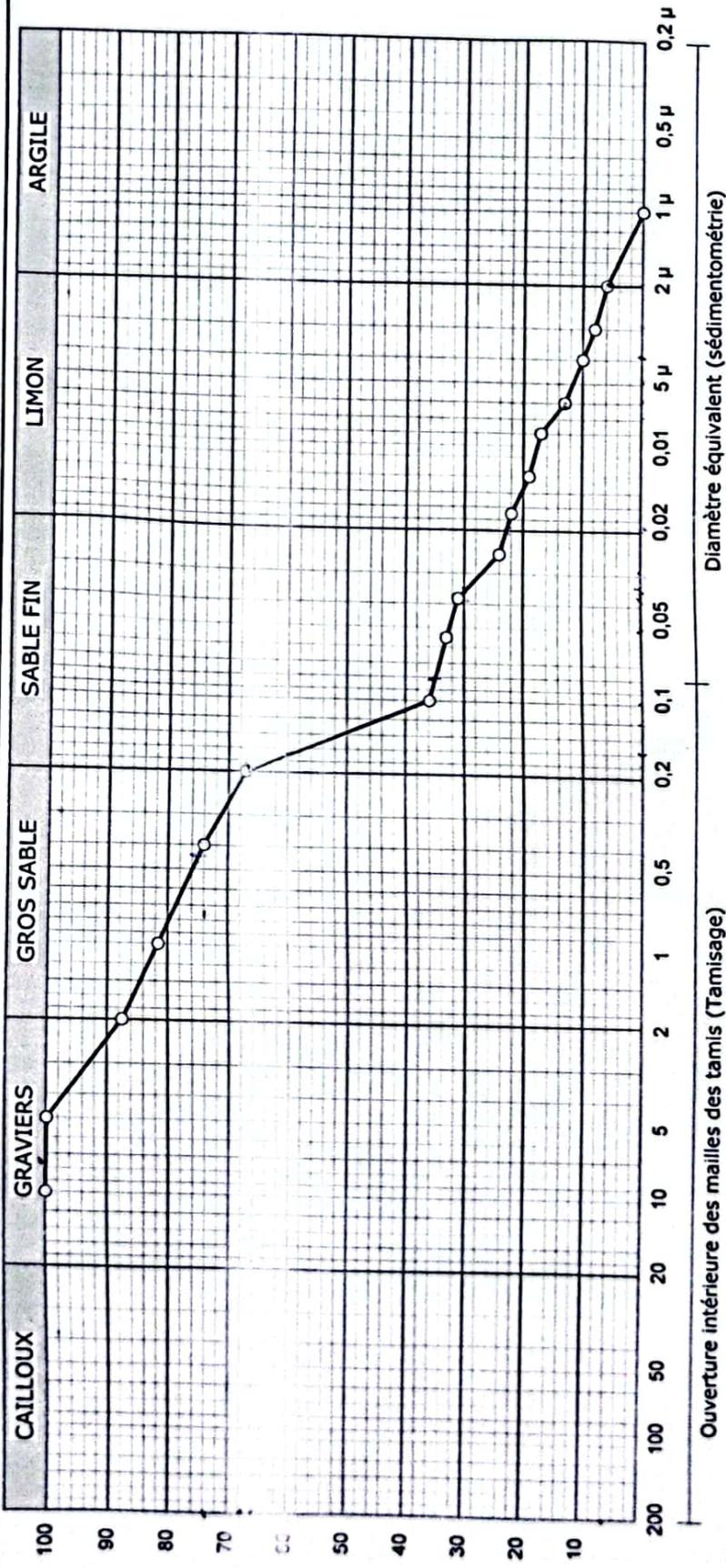
Client :

Localisation :

Date essai : 30 . 12. 2021

# ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

○ — TUF:



**LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD**  
**ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS**

( Méthode par tamisage à sec après lavage )  
 NF P 94-056 Mars 1996  
 ( Méthode de tamisage par voie humide )  
 XP P 94-041 Dec. 1995

**Structure :** Unite Ghardaia  
**Lieu de travail :** S<sup>ce</sup> ID  
**N° Dossier interne :** PROJET FIN D'ETUDE  
**Equipements Utilisés :** Balance / Etuve

**Echantillon TUF**  
**Date :** 06/11/2021  
**Operateur :** CHAMKHA+MOSBAH  
**N° D'inventaire :** L21.09.15 / L49.01.91

Poid De L'Echantillon (g)	Tamis (mm)	Poid Refus Particls (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisé (%)
1000	200					
	100					
	80					
	50					
	31.5					
	20					
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	100
	5	1,16	1,16	0,12	99,88	100
	2	124,30	125,46	12,55	87,45	87
	1	59,00	184,46	18,45	81,55	82
0,4	75,10	259,56	25,96	74,04	74	
0,2	70,00	329,56	32,96	67,04	67	
0,1	312,00	641,56	64,16	35,84	36	
0,08	3,80	645,36	64,54	35,46	35	

L'Opérateur

Visa du responsable

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**ANALYSE  
SEDIMENTOMETRIQUE**  
~~NFP 94-057~~ Mai 1992

Structure : U/G

Lieu de travail : S<sup>CE</sup> ID

N° Dossier interne : ~~PROJET FIN~~

Date : 12.11.2021

**D'ETUDE**

Échantillon : TUF

Opérateur : ~~CHAMKHA~~ MOSBAH

Équipements utilisés : ~~BALANCE~~ ETUVE

N° D'inventaire: L21.09.15/L49.01.91

Température °C	Temps	Durée de chute	R = R - 1000 R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée R1 = R' + C Ou R1 = R' - C	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
17.2C°	8h25	30 "	20	-0.470	19.530	0.075	35
17.2C°	8h26	01'	19	-0.470	18.530	0.055	33
17.2C°	8h27	02'	18	-0.470	17.530	0.038	31
17.2C°	8h30	05'	14	-0.470	13.530	0.025	24
17.2C°	8h35	10'	13	-0.470	12.530	0.017	22
17.2C°	8h45	20'	11	-0.470	10.530	0.012	19
17C°	9h05	40'	10	-0.500	9.500	0.008	17
16.8C°	9h45	80'	08	-0.528	7.472	0.006	13
16.8C°	11h05	160'	06	-0.528	5.472	0.004	10
17.2C°	13h45	320'	05	-0.470	4.530	0.003	08
16.6C°	24 h	1440'	04	-0.556	3.444	0.002	06
-	48h	-	0	-	-	0.001	00
-	72 h	-	-	-	-	0.0005	-

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} \times p \quad \text{avec } y = \% \text{ du passant à } 0.080 \text{ mm} = 35$$

R1 = R' + C    Si T° > à 20 ° C  
R1 = R' - C    Si T° < à 20 ° C

L'Opérateur

Visa du responsable

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

NORMAL    
**ESSAI PROCTOR**   
 MODIFIE    
 NF P 94-093 Septembre 1997

Structure: U.GHARDAIA  
 N° Dossier interne: Etude Recherche  
 Echantillon: Sol témoin  
 Prise d'essai: g

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX  
 Température de séchage: 55C°  
 Teneur en eau Opm:.....  
 Densité sèche Max:.....

Date:  
 Opérateur: Chamkha.a.h/Mesbah.s  
 Equipements utilisés: balance – etuve – dame p  
 N° D'inventaire: L21.51.15 /L49.10.15 /L54.03.15

	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>	<b>20%</b>
Poids d'eau ajoutée : .....					
Poids total humide : .....	3598,0	3687,6	3715,1	3694,0	3670
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793
Poids du sol humide : .....	1805	1895	1922	1901	1877
Poids du sol sec : .....	1601	1648	1645	1581	1543
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4
Densité sèche : .....	<b>1,69</b>	<b>1,74</b>	<b>1,74</b>	<b>1,67</b>	<b>1,63</b>
N° de la tare : .....	C4    153	S0    R9	Z7    C10	12    N4	MZ    129
Poids total humid : .....	196    188	172,5    154,9	180,8    203,8	40,5    44,1	44,2    46,4
Poids total sec : .....	176    168,8	152,5    136,6	157,4    177,2	35,4    37,8	37,7    39,6
Poids de la tare : .....	20    18	15,5    16,8	18,5    18,8	8,5    8,5	8,2    7,7
Poids de l'eau : .....	20    19,2	20    18,3	23,4    26,6	5,1    6,3	6,5    6,8
Poids du sol sec : .....	156    150,8	137    119,8	138,9    158,4	26,9    29,3	29,5    31,9
Teneur en eau : .....	12,82    12,73	14,60    15,28	16,85    16,79	18,96    21,50	22,03    21,32
Moyenne : .....	<b>12,78</b>	<b>14,94</b>	<b>16,82</b>	<b>20,23</b>	<b>21,68</b>

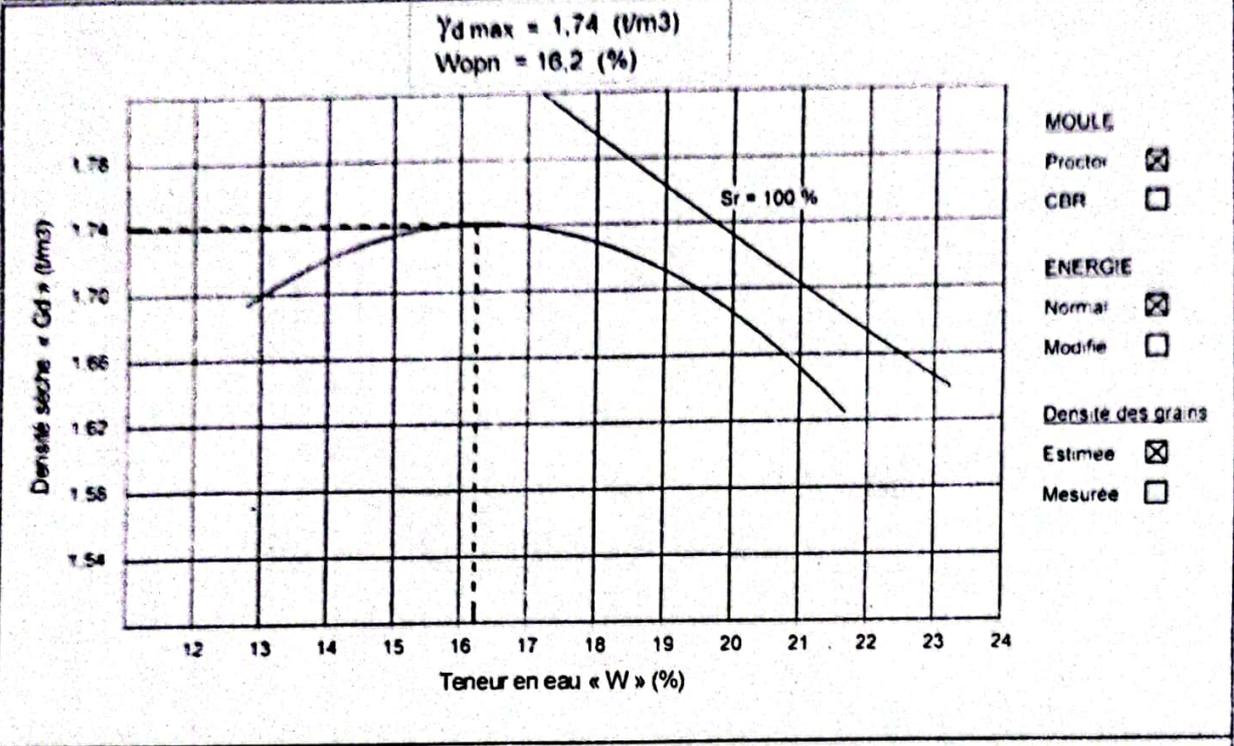
F-5-5q.03

# RAPPORT D'ESSAI ESSAI PROCTOR

N° 104 093

Client	N° Projet	sans titre
Projet	Ref Client	
Endroit	N° rapport	Réf

Echantillon n°	Endroit de prélèvement	Densité des grains	2,65
Sondage n°	Prélevé par	Refus à 20mm (%)	
Profondeur	Date prélèvement		
Matériaux	Reçu le		
Provenance	Date essais		



**TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES**

W (%)	12,8	14,9	16,8	20,2	21,7
Densité (T/m <sup>3</sup> )	1,69	1,74	1,74	1,67	1,63

Remarque

Préparé par	Date	Approuvé par	Date
-------------	------	--------------	------

© Brest 2007

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ESSAI PROCTOR

NORMAL

MODIFIE

NF P 94-093 Septembre 1997

Structure: U.GHARDAIA  
 N° Dossier interne: Etude Recherche  
 Echantillon: Sol +1.5 C.Blanc  
 Prise d'essai: 2500 g

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX  
 Température de séchage: 55C°  
 Teneur en eau Opm:.....  
 Densité sèche Max:.....

Date: 21/11/2021  
 Opérateur: Chamkha.a.h/Mesbah.s  
 Équipements utilisés: balance - etuve - dame p  
 N° D'inventaire: L21.51.15 /L49.10.15 /L54.03.15

Poids d'eau ajoutée : .....	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>	<b>20%</b>					
Poids total humide : .....	3498	3583	3616	3659	3662					
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793					
Poids du sol humide : .....	1705	1790	1823	1866	1869					
Poids du sol sec : .....	1567	1587	1588	1608	1580					
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4					
Densité sèche : .....	<b>1,65</b>	<b>1,67</b>	<b>1,68</b>	<b>1,70</b>	<b>1,67</b>					
N° de la tare : .....	KL	I53	S0	R9	Z7	C10	12	N4	MZ	I29
Poids total humid : .....	196,5	194,5	171,3	208,1	190,3	155,3	205,7	189,2	200,2	178
Poids total sec : .....	182,1	180,3	153,4	187,3	168,3	137,4	180,2	165,2	172,3	152,9
Poids de la tare : .....	18,6	18,5	18,5	18,8	18	18,4	18,4	18,4	17,3	17,3
Poids de l'eau : .....	14,4	14,2	17,9	20,8	22	17,9	25,5	24	27,9	25,1
Poids du sol sec : .....	163,5	161,8	134,9	168,5	150,3	119	161,8	146,8	155	135,6
Teneur en eau : .....	8,81	8,78	13,27	12,34	14,64	15,04	15,76	16,35	18,00	18,51
Moyenne : .....	<b>8,79</b>	<b>12,81</b>	<b>14,84</b>	<b>16,05</b>	<b>18,26</b>					

L'opérateur

Visa du responsable

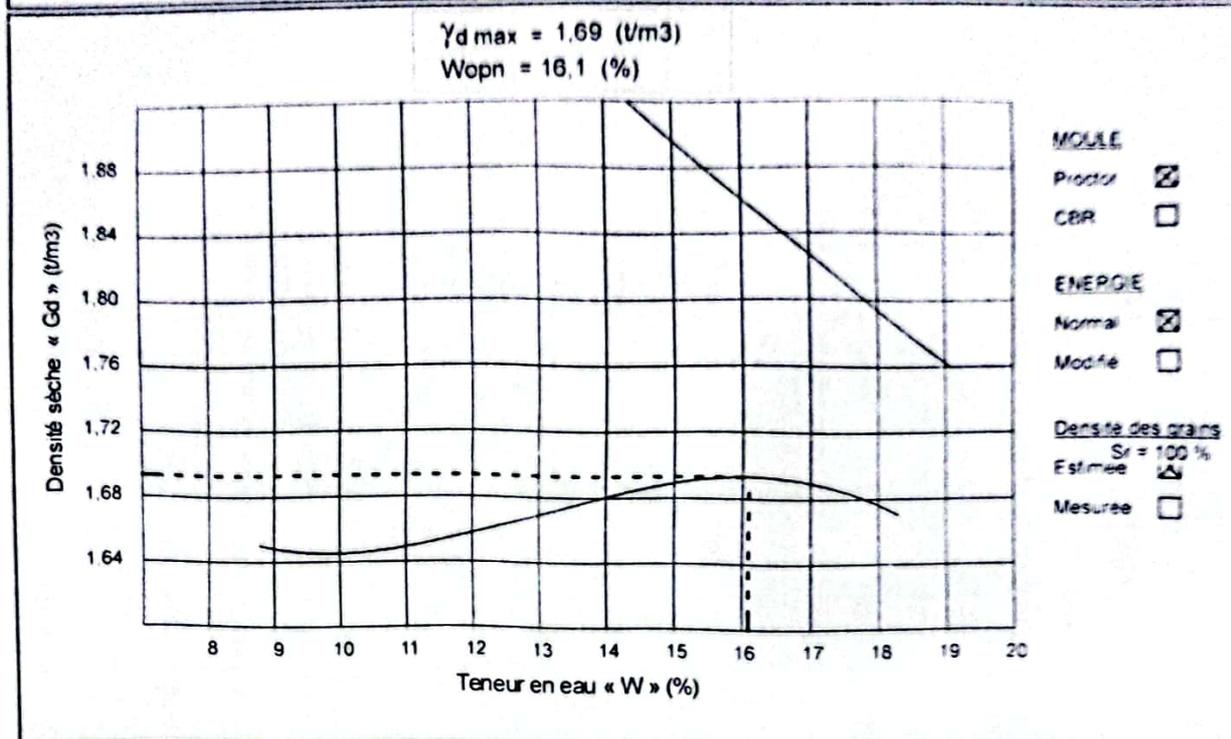
F-5-5q.03

# RAPPORT D'ESSAI ESSAI PROCTOR

NF P94 093

Client :	N° Projet sans titre		
Projet :	Réf Client		
Endroit :	N° rapport		Rév

Echantillon n° :	Endroit de prélèvement		
Sondage n° 15 :	Prélevé par		
Profondeur :	Date prélèvement		
Matériaux :	Reçu le	Densité des grains 2,65	
Provenance :	Date essais	Refus à 20mm (%)	



**TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES**

W (%)	8,8	12,8	14,8	16,1	18,3
Densité (T/m3)	1,65	1,67	1,68	1,70	1,67

Remarque :

Préparé par :	Date :	Approuvé par :	Date :
---------------	--------	----------------	--------

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ESSAI PROCTOR

NORMAL



MODIFIE



NF P 94-093 Septembre 1997

Structure: U.GHARDAIA  
 N° Dossier interne: Etude Recherche  
 Echantillon: Sol - 3 C.Blanc  
 Prise d'essai: 2500 g

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX  
 Température de séchage: 55C°  
 Teneur en eau Opm:.....  
 Densité sèche Max:.....

Date: 21/11/2021  
 Opérateur: Chamkha.a.h/Mesbah.s  
 Équipements utilisés: balance - etuve - dame p  
 N° D'inventaire: L21.51.15 /L49.10.15 /L54.03.15

Poids d'eau ajoutée : .....	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>	<b>20%</b>					
Poids total humide : .....	3501	3558	3614	3664	3660					
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793					
Poids du sol humide : .....	1708	1765	1821	1871	1867					
Poids du sol sec : .....	1537	1567	1602	1608	1600					
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4					
Densité sèche : .....	<b>1,62</b>	<b>1,65</b>	<b>1,69</b>	<b>1,70</b>	<b>1,69</b>					
N° de la tare : .....	KL	I53	S0	R9	Z7	C10	12	N4	MZ	I29
Poids total humid : .....	170,5	183,5	175,8	203,5	184,6	210,8	203,8	174,5	211,6	200,5
Poids total sec : .....	155,4	166,9	157,5	183,5	163,7	188,7	178,6	152	184,4	174,1
Poids de la tare : .....	18,5	18,5	18,6	18,9	18,2	18,8	19,2	19,3	18,7	18,4
Poids de l'eau : .....	15,1	16,6	18,3	20	20,9	22,1	25,2	22,5	27,2	26,4
Poids du sol sec : .....	136,9	148,4	138,9	164,6	145,5	169,9	159,4	132,7	165,7	155,7
Teneur en eau : .....	11,03	11,19	13,17	12,15	14,36	13,01	15,81	16,96	16,42	16,96
Moyenne : .....	<b>11,11</b>	<b>12,66</b>	<b>13,69</b>	<b>16,38</b>	<b>16,69</b>					

L'opérateur

Visa du responsable

F-5-5q.03

# RAPPORT D'ESSAI

## ESSAI PROCTOR

NF P94-093

Client :  
Projet : Recherche  
Endroit :

N° Projet sans titre  
Réf. Client :  
N° rapport : Rév

Echantillon n°  
Sondage n°  
Profondeur :  
Matériaux :  
Provenance :

Endroit de prélèvement :  
Prélevé par  
Date prélèvement  
Reçu le :  
Date essais  
Densité des grains 2.65  
Refus à 20mm (%)

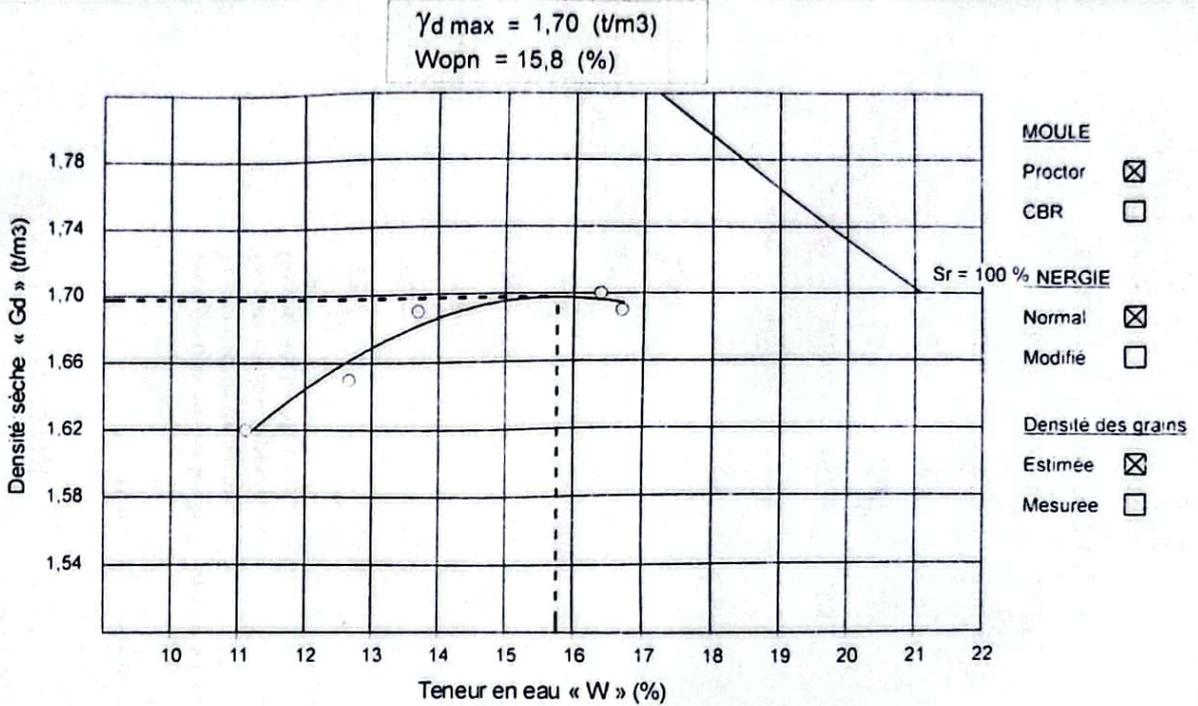


TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES

W (%)	11.1	12.7	13.7	16.4	16.7
Densité (T/m3)	1,62	1,65	1,69	1,70	1,69

Remarque :

Préparé par :

Date :

Approuvé par :

Date

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ESSAI PROCTOR

NORMAL

MODIFIE

NF P 94-093 Septembre 1997

Structure: UGHARDAIA

N° Dossier interne: Etude Recherche

Echantillon: Sol + 5 C Blanc

Prise d'essai: 2

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX

Température de séchage: 55°C

Teneur en eau Opti:.....

Densité sèche Maxi:.....

Date:

Opérateur: Chamkha.a./Meshah.s

Équipements utilisés: balance - etuve - dame p

N° D'inventaire: L.21.51.15 / L.49.10.15 / L.54.03.15

Poids d'eau ajoutée : .....	12%	14%	16%	18%	20%				
Poids total humide : .....	3493,1	3525	3542,3	3634,1	3639				
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793				
Poids du sol humide : .....	1700	1732	1749	1841	1846				
Poids du sol sec : .....	1525	1547	1542	1592	1562				
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4				
Densité sèche : .....	1,61	1,63	1,63	1,68	1,65				
N° de la tare : .....	C4	53	50	R9	Z7	C10	12	N4	MZ
Poids total humid : .....	188,8	175,2	193,8	195,4	216,7	205,5	197,7	187,2	185,3
Poids total sec : .....	171,6	159,1	174,9	176,6	193,2	183,4	174,4	163,5	160,4
Poids de la tare : .....	21,6	18,4	18,7	17,9	18,1	18,8	18,8	18,2	27,6
Poids de l'eau : .....	17,2	16,1	18,9	18,8	23,5	22,1	23,3	23,7	24,9
Poids du sol sec : .....	150	140,7	156,2	158,7	175,1	164,6	155,6	145,3	132,8
Teneur en eau : .....	11,47	11,44	12,10	11,85	13,42	13,43	14,97	16,31	18,75
Moyenne : .....	11,45	11,97	13,42	15,64	18,17				

F-S-5q.03



# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ESSAI PROCTOR

NORMAL    
 MODIFIÉ

NE P 94-093 Septembre 1997

Structure: L.GHARDAIA  
N° Dossier interne: Etude Recherche  
Echantillon: Sol- 1,5 CN  
Prise d'essai: 2500g

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX  
Température de séchage: 55°C  
Teneur en eau Opn:.....  
Densité sèche Max:.....

Date: .....  
Opérateur: Chamkha.a.h/Mesbah.s  
Équipements utilisés: balance - etuve - dame P  
N° D'inventaire: 1,21.51.15 /1,49.10.15 /1,54.03.15

	12%	14%	16%	18%	20%					
Poids d'eau ajoutée : .....	12%	14%	16%	18%	20%					
Poids total humide : .....	3494,4	3625,0	3652,2	3658,0	3677					
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793					
Poids du sol humide : .....	1701	1832	1859	1865	1884					
Poids du sol sec : .....	1502	1566	1618	1568	1558					
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4					
Densité sèche : .....	1,59	1,65	1,71	1,66	1,64					
N° de la tare : .....	C4	I53	S0	R9	Z7	C10	12	N4	MZ	129
Poids total humide : .....	188,6	199	230,6	189,5	195,8	167,1	263,4	262,1	212,2	195,4
Poids total sec : .....	168,8	177,8	199,8	164,8	172,6	148	224,3	223,4	178,8	164,6
Poids de la tare : .....	19,3	18,5	18,9	18,5	18,8	18,8	18,6	17,8	18,7	18,2
Poids de l'eau : .....	19,8	21,2	30,8	24,7	23,2	19,1	39,1	38,7	33,4	30,8
Poids du sol sec : .....	149,5	159,3	180,9	146,3	153,8	129,2	205,7	205,6	160,1	146,4
Teneur en eau : .....	13,24	13,31	17,03	16,88	15,08	14,78	19,01	18,82	20,86	21,04
Moyenne : .....	13,28	16,95	14,93	18,92	20,95					

F-5-5q.03

# RAPPORT D'ESSAI ESSAI PROCTOR

NF P94 093

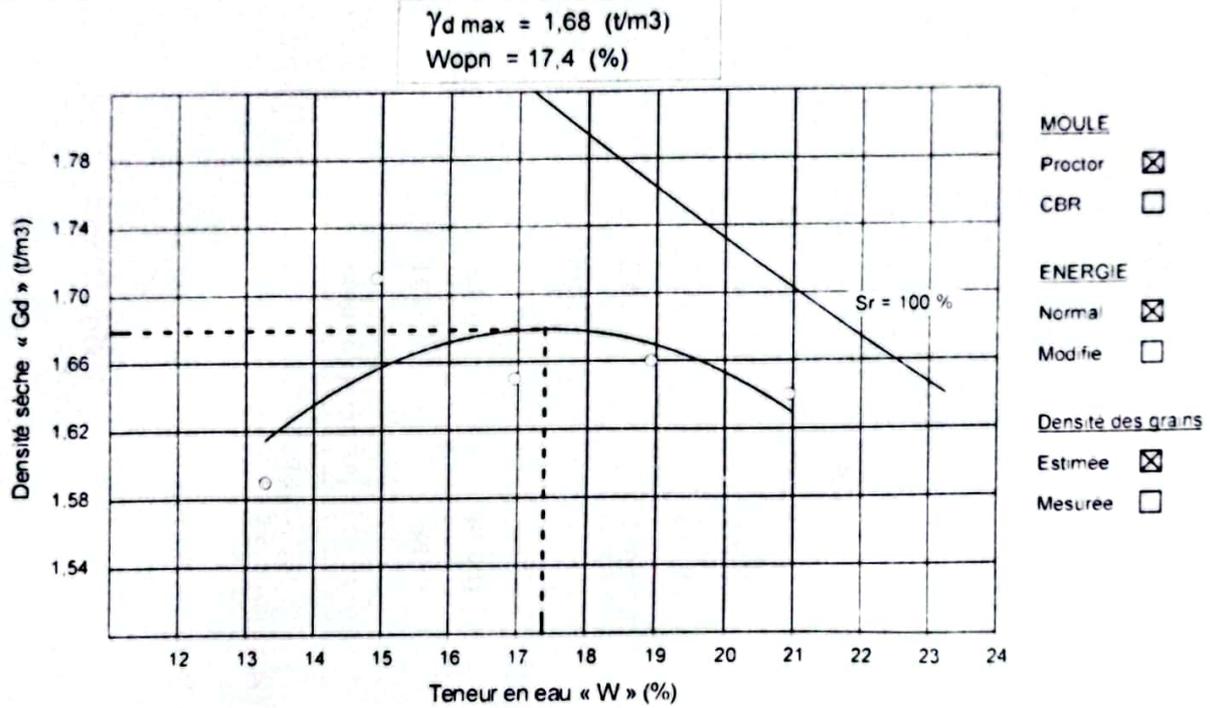
Client :  
Projet : ETUD RECH  
Endroit :

N° Projet : sans titre  
Réf Client :  
N° rapport :  
Rév :

Echantillon n° :  
Sondage n° :  
Profondeur :  
Matériaux :  
Provenance :

Endroit de prélèvement :  
Prélevé par :  
Date prélèvement :  
Reçu le :  
Date essais :

Densité des grains : 2.65  
Refus à 20mm (%) :



**TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES**

<b>W (%)</b>	13.3	17.0	14.9	18.9	21.0
<b>Densité (T/m3)</b>	1.59	1.65	1.71	1.66	1.64

Remarque :

Prépare par

Date

Approuvé par

Date

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**ESSAI PROCTOR**

NORMAL

MODIFIE

N° P 94-093 Septembre 1997

Structure: U.GHARDAIA  
 N° Dossier interne: Etude Recherche  
 Echantillon: Sol- 3 CN  
 Prise d'essai: 2500g

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX  
 Température de séchage: 55°C  
 Teneur en eau Opn:.....  
 Densité sèche Max:.....

Date:  
 Opérateur: Chamkha.a.h/Mesbah.s  
 Équipements utilisés: balance - etuve - dame p  
 N° D'inventaire: L21.51.15/L49.10.15/L54.03.15

Poids d'eau ajoutée : .....	14%	16%	18%	20%	22%					
Poids total humide : .....	3548,7	3605,6	3665,0	3666,0	3650					
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793					
Poids du sol humide : .....	1756	1813	1872	1873	1857					
Poids du sol sec : .....	1533	1554	1577	1574	1517					
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4					
Densité sèche : .....	1,62	1,64	1,66	1,66	1,60					
N° de la tare : .....	C4	153	S0	R9	Z7	C10	12	N4	MZ	I29
Poids total humid : .....	187	187	178,5	186,1	187,6	171,2	168,3	173	205,1	213
Poids total sec : .....	166	165,2	155,9	162,1	160,8	147,2	142,5	149,9	170,2	178,1
Poids de la tare : .....	17,8	18,5	20	18,6	18,2	18,1	16,6	18,4	18	18,6
Poids de l'eau : .....	21	21,8	22,6	24	26,8	24	25,8	23,1	34,9	34,9
Poids du sol sec : .....	148,2	146,7	135,9	143,5	142,6	129,1	125,9	131,5	152,2	159,5
Teneur en eau : .....	14,17	14,86	16,63	16,72	18,79	18,59	20,49	17,57	22,93	21,88
Moyenne : .....	14,52	16,68	18,69	19,03	22,41					

F-5-5q.03

# RAPPORT D'ESSAI

## ESSAI PROCTOR

NF P94-093

Client :  
 Projet : ETUDE RECH  
 Endroit :

N° Projet : sans titre  
 Réf. Client :  
 N° rapport :                      Rév :

Echantillon n° :                      Endroit de prélèvement :  
 Sondage n° :                          Prélevé par  
 Profondeur :                          Date prélèvement  
 Matériaux :                            Reçu le                              Densité des grains 2,65  
 Provenance :                          Date essais                          Refus à 20mm (%)

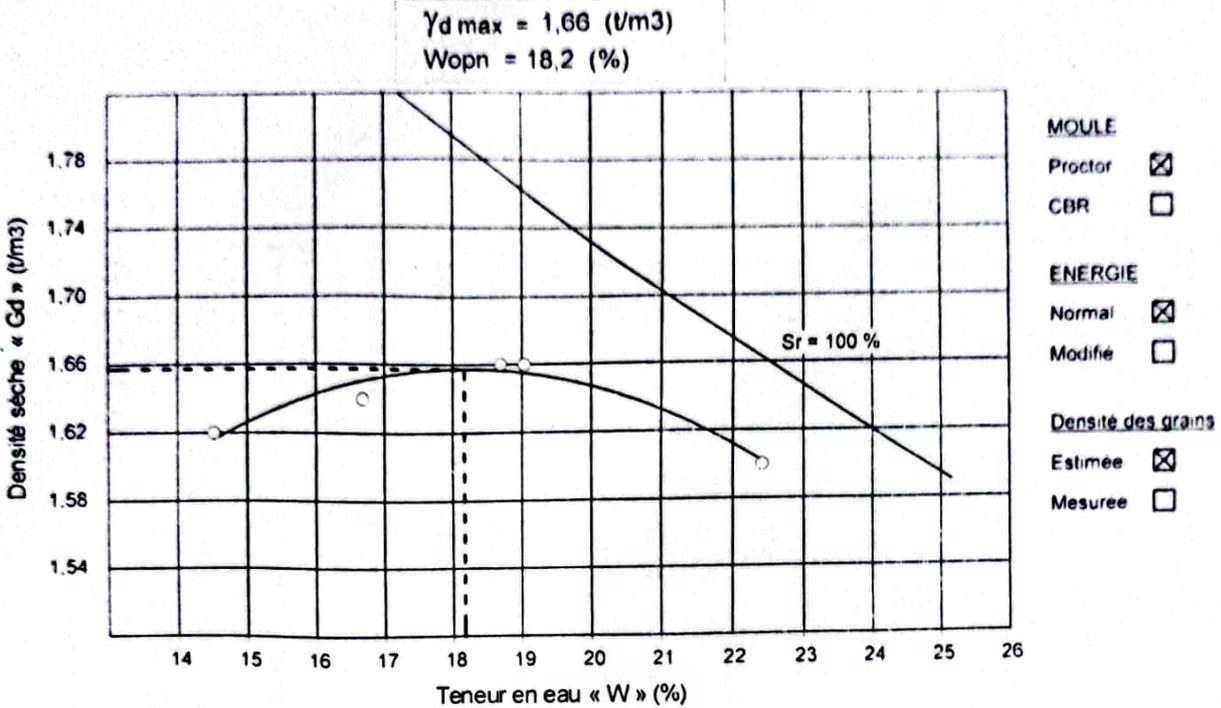


TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES

W (%)	14,5	16,7	18,7	19,0	22,4		
Densité (T/m3)	1,62	1,64	1,66	1,66	1,60		

© Sohestis 2007

Remarque :

Préparé par :                              Date

Approuvé par                              Date

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ESSAI PROCTOR

NORMAL

MODIFIE

NIF P 94-093 Septembre 1997

Structure: UGHARDAIA  
 N° Dossier interne: Etude Recherche  
 Echantillon: Sol - 5 CN  
 Prise d'essai: 2500g

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX  
 Température de séchage: 55C°  
 Teneur en eau Opti:.....  
 Densité sèche Max:.....

Date: .....  
 Opérateur: Chamkha.a.h/Mesbah.s  
 Equipements utilisés: balance - etuve - dame p  
 N° D'inventaire: L21.51.15/L.49.10.15/L.54.03.15

Poids d'eau ajoutée : .....	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>	<b>20%</b>	<b>22%</b>					
Poids total humide : .....	3562,0	3640,0	3670,0	3663,0	3642					
Poids du moule : .....	1793	1793	1793	1793	1793					
Poids du sol humide : .....	1769	1847	1877	1870	1849					
Poids du sol sec : .....	1582	1609	1619	1582	1568					
Volume du moule : .....	947,4	947,4	947,4	947,4	947,4					
Densité sèche : .....	<b>1,67</b>	<b>1,70</b>	<b>1,71</b>	<b>1,67</b>	<b>1,65</b>					
N° de la tare : .....	C4	153	S0	R9	Z7	C10	12	N4	MZ	129
Poids total humid : .....	229,9	204,4	170,6	197	210,2	155	213,5	190,2	229,2	206,5
Poids total sec : .....	208,2	184,2	150,5	174,5	184,8	135,6	164,6	185,4	198,7	176,7
Poids de la tare : .....	17,9	18,5	18,2	18,5	18,8	18,8	18,9	18,8	20	18,5
Poids de l'eau : .....	21,7	20,2	20,1	22,5	25,4	19,4	48,9	4,8	30,5	29,8
Poids du sol sec : .....	190,3	165,7	132,3	156	166	116,8	145,7	166,6	178,7	158,2
Teneur en eau : .....	11,40	12,19	15,19	14,42	15,30	16,61	33,56	2,88	17,07	18,84
Moyenne : .....	<b>11,80</b>	<b>14,81</b>	<b>15,96</b>	<b>18,22</b>	<b>17,95</b>					

F-5-5q.03

# RAPPORT D'ESSAI

## ESSAI PROCTOR

NF P94 093

Client :  
Projet : ETUDE RECH  
Endroit :

N° Projet : sans titre  
Réf. Client :  
N° rapport : Rév

Echantillon n°  
Sondage n°  
Profondeur  
Matériaux  
Provenance

Endroit de prélèvement  
Prélevé par  
Date prélèvement  
Reçu le  
Date essais

Densité des grains : 2,65  
Refus à 20mm (%)

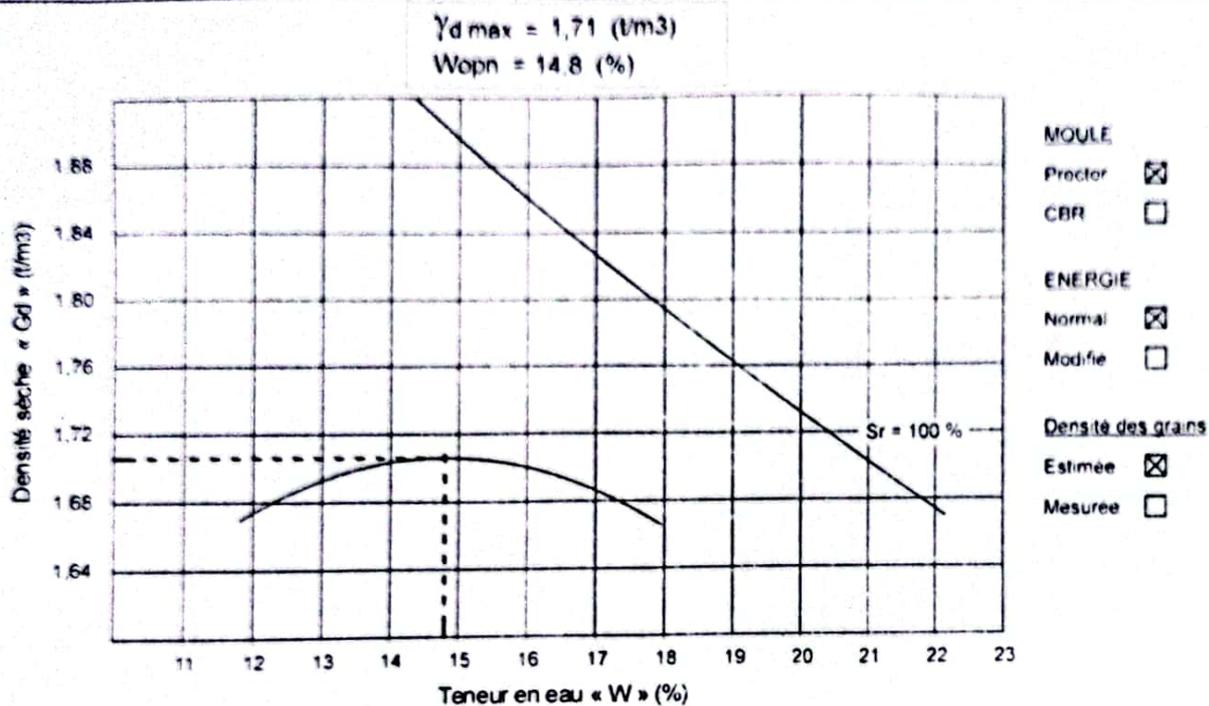


TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES

W (%)	11,8	14,8	16,0	18,2	18,0
Densité (T/m <sup>3</sup> )	1,67	1,70	1,71	1,67	1,65

Remarque

Préparé par

Date

Approuvé par

Date

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET ABSOLUE  
MODE OPERATOIRE COURS DE LABORATOIRE R.LANCHON  
BTS.DUT

Structure : U.GHARDAIA  
N° Dossier interne: TAF Bawhramas.  
Échantillon:  
Équipements utilisés: balance

Lieu de travail : SERVICE MATERIAUX  
Date: 06/11/2021  
Opérateur: CHAMKHA Abdelhakim, MSBAH Schemm  
N° D'inventaire: I.21.51.15

## Masse volumique apparente :

Volume du récipient  $V=2000$

Poids  $P=1810$

$P_1+T = 4321,3$                        $P_1 = 2511,3$

$P_2+T = 4322$                           $P_2 = 2512$

$P_3+T = 4332,6$                        $P_3 = 2522,6$

$P_4+T = 4324,2$                        $P_4 = 2514,2$

Poids moyen  $M = (P_1+P_2+P_3+P_4)/4 = 2515$

Masse volumique apparente  $P/V = 1.26 \text{ g/cm}^3$

## Masse volumique absolue :

Poids des agrégats secs  $P_1 = 500$

Poids du récipient plein d'eau  $P_2 = 2181.5$

$P_3 = P_1 + P_2 = 2681.5$

Poids récipient + agrégats + eau =

$P_4 = 2471.7$

Volume des agrégats  $V = P_3 - P_4 = 210$

Masse volumique absolue  $P_1/V = 2.38 \text{ g/cm}^3$

L'opérateur



Visa du responsable

F-5-5i.02

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ÉQUIVALENT DE SABLE  
NFP-18 598 Octobre 1991

Structure :... UNITE GHARDAIA.....	Lieu de Travail :... S <sup>CE</sup> ID ...	Date : 08.12.2021
N° Dossier interne : PROJET FIN D'ETUDE	Opérateur : CHAMKHA+MOSBAH	
Équipements utilisés: BALANCE	N° D'inventaire : L21.09.15	

Echantillon	120		.....		.....	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2
Hauteur totale H1 (cm)	33.2	34.5				
Hauteur de sable H2 (cm)	04	3.8				
ES = $\frac{H2}{H1} \times 100$	12.05	11.01				
ES moyen (%)	11.53					

L'Opérateur

Visa du responsable



**ENOF Spa**

**Unité MAGHNIA**

**CERTIFICAT D'ANALYSE ET DE CONFORMITE**

IDENTIFICATION  
SPC.LABO.MG.01.01  
DATE : 24/06/03  
PAGE : 01/01

DATE : 22/12/2020

DESIGNATION DU PRODUIT : BENTONITE DE FORAGE

LOT N° : 226/120

EXPEDIE LE : 22/12/2020

DESTINE A : L.T.P.S. GUYARDAIA  
BL, 380 5-QT,

SPECIFICATION	REQUISES ( API GRADE )	OBTENUES
600 RPM A 64 g/l d'argile	30cps min	31
YIELDPOINT/VISCOSITE PLASTIQUE	6% max	4,2
RESIDU AU TAMIS 200 MESH VOIE HUMIDE	2.5% Max	2,5
FILTRAT API	16 ml max	18
HUMIDITE	13% max	11,5

REMARQUES :

**LE CHEF SCo LABORATOIRE ENOF MAGHNIA**

Service Laboratoire



**NB :** Nous vous prions de nous transmettre dans les 10 jours à compter de la date d'expédition, les résultats des testes de contrôle éventuels.

**ENOF**

UNITE DE MAGHNIA

**ENTREPRISE NATIONALE DES PRODUITS MINIERES  
NON - FERREUX ET DES SUBSTANCES UTILES**  
31, Rue Mohamed Hattab-Hacène Baddie-El Harrach-Alger-Algérie  
Société par actions au capital social de 1.100.000.000 DA

## **FICHE TECHNIQUE**

### **BENTONITE DE FORAGE (DRILLING BENTONITE)**

<b>Composition chimique</b>	
SiO <sub>2</sub>	55 - 65 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12 - 19 %
TiO <sub>2</sub>	0,20 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 3,4 %
Na <sub>2</sub> O	1 - 3 %
CaO	1 - 2 %
K <sub>2</sub> O	0,5 - 1,18%
MgO	2 - 3,4 %
PAF	8,20 %
<b>Caractéristique Physico Mécanique</b>	
Viscosité (Lecteur 600 tr/mn)	30 Min
Yield Point /Plastic (Ratio)	06 Max
Perte au filtrate	20 cm <sup>3</sup>
Residue sur tamis 75 micrometers	2,5 % Max
Humidité	13 % Max
<b>Emballage</b>	
Sacs de papier multi-Kraft de 50 Kg	
Palette de 1T 250 kg	
Big Bags de 1T 250 kg	
<b>Domaine d'utilisation</b>	
Additive viscosifiant à la boue de forage	
Bentonite d'injection	
Genie civil ( Barrage ,Tunnel)	
Céramique	

BP 47, Rue 25 cité Péret, Maghnia 13300 w Tlemcen .ALGERIE

Tel N° 0213 .43.49.10.94 &amp; 0213 .43.49.10.88 Fax N° 0213 .43.49.10.06 &amp; 0213 .43.49.10.78

Email : [enof13300@gmail.com](mailto:enof13300@gmail.com) email : [enofcommaghnia@gmail.com](mailto:enofcommaghnia@gmail.com)

La Direction Générale: 31 Rue Mohamed Hattab-Hacène Baddie-El Harrach-Alger-ALGERIE

Tel N° 0213.82.71.73/74 Fax N° 0213.23.82.71.69

Email: [info@enof.dz](mailto:info@enof.dz) Site Web: [WWW.enof.dz](http://WWW.enof.dz)



# AWTED

CIMENT AUX PERFORMANCES ÉLEVÉES  
(SUPER STRUCTURES)  
NA 442-CEM II/A-L 42.5 N

## CONFORMITÉ PRODUIT

NA442 : 2013 – EN 197-1 : 2012.

### DESIGNATION NORMALISEE

NA 442-CEM II/A-L 42.5 N.

### OUVRAGES EN MILIEUX NON AGRESSIFS

Coulage par temps chaud.

### TRANSPORT DU BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

### FABRICATION

-PRODUIT 100% ALGERIEN

-Fabrication exclusive à l'usine Amouda Ciment sise à El Beida Laghouat.

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### PROPRIETES CHIMIQUES

NA 5042 (EN 196-2) : S03 ≤ 3.5%

NA 5042 (EN 196-2) : chlorure ≤ 0.1%

### PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mn

NA 234 (EN 196-1) :

-Resistance à la compression 2 jours > 10 Mpa

-Resistance à la compression 28 jours > 42.5 Mpa

## EMPLOIS ET USAGES CONFORME À VOS PROJETS

- Ouvrages en béton armé.
- Bétons autoplaçants.
- Dallages.
- sols industriels , chapes.
- Fondations.
- Travaux souterrains.
- Voiries et chaussées en béton.



## NOS PRODUITS AUSSI



### AL ESSES

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5.  
Ciment Résistant aux Sulfates.



### AL IMRAN

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R.  
Ciment pour les professionnels de la construction

POUR PLUS D'INFORMATION VEUILLEZ CONSULTER NOTRE SITE WEB :

[www.amoudacement.com](http://www.amoudacement.com)

Email : [service.clients@amoudacement.com](mailto:service.clients@amoudacement.com)

### Direction commerciale

Lotissement 202, Section 4, Zone d'activité Amara,  
Chéraga, Alger.

Tél. : 023 305 515

Région Nord : 0655 521 235

Fax : 023 30 55 14

Région Sud : 0658 363 463



### Coordonnées usine

Commune El-Beidha, Guellet Sidi Saad,  
wilaya de LAGHOUAT

Tél. : 029 173 490

Spécialiste Qualité : 0656 403 772

Fax : 029 17 34 91



# أوتاد

إسمنت ذو كفاءة عالية،  
(المنشآت الضخمة)

NA 442-CEM II/A-L 42.5 N



## التطبيقات و الإستعمالات حسب مشاريعكم

- منشآت بالإسمنت المسلح.
- خرسانة ذاتية التسوية.
- التبليط.
- أرضيات صناعية، أرضيات إسمنتية.
- أساسات.
- منشآت تحت أرضية.
- أشغال الطرقات والطرق الإسمنتية.

## منتجاتنا الأخرى



### العمران

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R  
إسمنت لمحترفي البناء



### الأساس

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5  
إسمنت مقاوم للكبريتات

للمزيد من المعلومات، يرجى زيارة موقعنا على الانترنت :

[www.amoudaciment.com](http://www.amoudaciment.com)

البريد الإلكتروني : [service.clients@amoudaciment.com](mailto:service.clients@amoudaciment.com)

## مطابقة المنتج

.NA442 : 2013 – EN 197-1 : 2012

### الصيغة المعيارية

.NA 442-CEM II/A-L 42.5 N

### المنشآت في الأوساط غير العدوانية

الأشغال في الأجواء الحارة،

نقل الخرسانة الجاهزة للإستعمال،

### الإنتاج

- منتج 100% جزائري.

- منتج حصريا في مصنع امودا للإسمنت

بمنطقة البيضاء - الأغواط.

## المميزات

### الخصائص الكيميائية

NA 5042 (EN 196-2) : S03 ≤ 3.5%

NA 5042 (EN 196-2) : chlorure ≤ 0.1%

### الخصائص الفيزيائية الميكانيكية

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mn

NA 234 (EN 196-1) :

- مقاومة الضغط (يوميين) < 10 MPa

- مقاومة الضغط (28 يوم) < 42,5 MPa



### المصنع :

بلدية البيضاء قلعة سيدي سعد  
ولاية الاغواط

الهاتف : 029 173 490  
مختص النوعية : 0656 403 772  
الفاكس : 029 17 34 91



### المديرية التجارية:

المنطقة الصناعية مجموعة ملكية رقم 202 قسم 04،  
شراكة الجزائر

الهاتف : 023 305 515  
المنطقة الشمالية : 0655 521 235  
المنطقة الجنوبية : 0658 363 463  
الفاكس : 023 30 55 14



NOUVEAU

ALGÉRIE

42,5

ملكي  
MALAKI

50kg

LAFARGE  
لافارج

## Malaki Ciment Blanc 42,5 Ciment Portland au Calcaire NA 442 CEM II/B-L 42,5 N

Le ciment Blanc **Malaki** 42,5 est idéal pour Le Béton Blanc, les applications exigeantes en matière de Blancheur et les travaux de maçonnerie d'art .

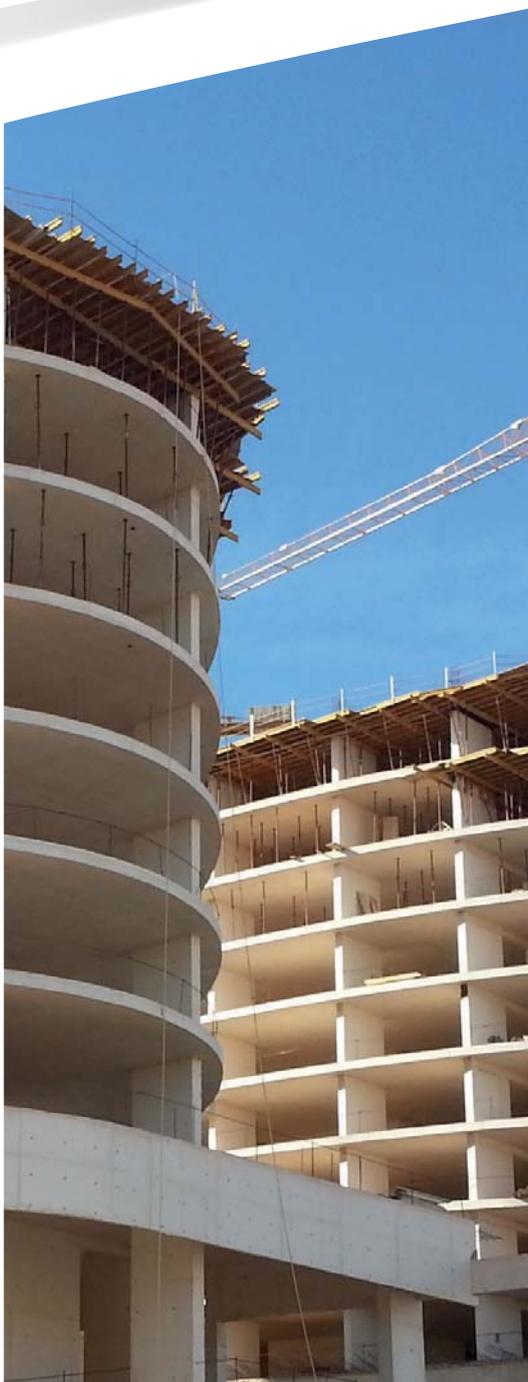
**Malaki**  
NA 442 CEM II/B-L 42,5 N

**Malaki** est conforme à la norme Algérienne (NA442 - 2013), Européenne (EN197-1).

### AVANTAGES PRODUIT



- Idéal pour les travaux de maçonneries et de jointement.
- Permet de réaliser des éléments en béton blanc avec un niveau de finitions inégalé.
- Favorise l'obtention d'une gamme importante de couleurs.
- Adapté pour les structures en béton apparent.



## APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Maçonnerie d'art .
- Travaux de jointement de carreaux .
- Construction des ouvrages architectoniques, esthétiques, et éléments décoratifs.
- Béton prêt à l'emploi blanc.
- Béton architectonique des parements.
- Béton brut de décoffrage, blanc ou coloré.
- Béton décoratifs: Relief, Sablé, Poli



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable Moyen (sec) 0/4 	Gravillons (sec) 8/15mm 15/25mm 	Eau (litres) 
Dosage pour béton c30/37	X 1 	+ X6 	+ X4,5  + X3,5 	+ 25 L

**Remarque: un bidon = 10 Litres**

Cette formule est proposée en l'absence d'une formulation étudiée et délivrée par un laboratoire spécialisé.

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### • Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	11,5 ± 1
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2,6 ± 0,6
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	2,5 ± 0,8
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

### • Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	54 ± 3
C3A (%)	10 ± 1

### • Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	28 ± 2
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	4500 - 5500
Retrait à 28 jours (µm/m)	≤ 1 000
Blancheur (Y)	85 ± 2

### • Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150 ± 40
Fin de prise (min)	210 ± 40

### • Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 19
28 jours (MPa)	≥ 42,5

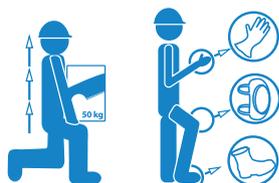
Ces données sont communiquées à titre informatif et sont susceptibles d'être modifiées en fonction des paramètres de production.

Conditionnement: Sac, Vrac

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

**1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU :** Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

**2- MANUTENTION :** Levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



## CONSEILS DE STOCKAGE

- Dans un endroit couvert.
- Ne pas entreposer directement au sol.

### LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,  
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.  
tél: + 213 (0) 21 98 54 54  
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94  
www.lafargealgerie.com  
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com  
Tél: 021 98 55 55

**LAFARGE**  
لافارج