REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

VALORISATION DE SABLE DE FONDERIE DANS LA REALISATION DES BARRIERES ETANCHES PAR L'AJOUT DE LA BENTONITE DE MAGHNIA

Présenté par :

- **MALKI Karim**
- **CHAIB RAS Abdelouahab**

Proposé et dirigé par :

- **Dr. MESSAD Ali**

Promotion Juin 2019

ملخص

تقوم مؤسسة المضخات و الصمامات بالبرواقية باستعمال قوالب الرمل في سبك الحديد و الفولاذ، هذه العملية التي ينجم عنها كميات معتبرة من مادة رمل المسبك المستعمل الذي يعتبر كنفايات .

هذا العمل يهدف لدراسة إمكانية استعمال "رمل المسبك المستعمل مع مادة البنتونيت" في إنجاز حاجز محكم لحماية التربة و المياه الجوفية من تسرب الملوثات.

و لهذا الغرض قممنا بسلسلة من التجارب االمخبرية لتقييم السلوك الهيدروميكانيكي لخليط هذا الرمل مع الطين (البنتونيت) و إيجاد الخليط المثالي من ناحية التدفق الهيدروليكي و كذا المقاومة.

نتائج التجارب المخبرية أثبتت أنه يمكن استعمال هذا الرمل لوحده دون اللجوء لإضافة البنتونيت مع مراعاة القيام بعملية الرص للحصول على الكتلة الحجمية الجافة القصوى.

Résumé

La valorisation du sable usagé de fonderie a pour but de l'utiliser comme barrière étanche pour protéger le sol et la nappe d'eau contre l'infiltration des polluants.

L’objectif principal de ce travail est d'étudier expérimentalement le comportement hydromécanique de mélanges sable usagé de fonderie-bentonite avec détermination du mélange optimal satisfaisant la perméabilité et la résistance.

Dans notre étude de caractérisations de ce sable et pour le but de réaliser une barrière étanche, nous avons constaté que nous pouvons l’utiliser seul sans recourir à l'addition de la bentonite en tenant compte le compactage pour obtenir la masse volumique sèche maximale.

Abstract

The purpose of recovering used foundry sand is to use it as a watertight barrier to protect the soil and the water table against the infiltration of pollutants.

The main objective of this work is to experimentally study the hydromechanical behavior of used foundry-bentonite sand mixtures with determination of the optimal mixture satisfying the permeability and the resistance.

In our study of the characterizations of this sand and to realize a watertight barrier

We found that we can use it alone without the addition of bentonite taking compaction into account to achieve the maximum dry volume.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ***Allah,*** *le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.*

Nous tenons d'abord à remercier vivement le Docteur MESSAD ***Ali pour*** *avoir accepté de diriger notre projet de fin d'études. Grâce à sa grande disponibilité, ses précieux conseils, ses idées et ses nombreux amendements que ce travail a abouti à sa fin.*

Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre cher enseignant ***TOUZOUT Mohamed Amine***

Nous remercions Monsieur ***KAFANE Mohamed*** *ingénieur cadre au Ministère de l'énergie, qui nous a aider.*

Nous remercions aussi tout le personnel du laboratoire géotechnique de l'EPTRC, en particulier ***FERROUDJI AEK, BOUSSOUAR Redouane, MAGHCEL Hamza ,AMELLAL Sid Ahmed,*** *qui nous ont aidé pour la mise en œuvre des essais.*

Nous tenons également exprimer notre bienveillance au chef de notre département :

*M^me^* ***BOUKHELKHAL Djamila***

Nos sincères gratitudes vont vers tous ce qui ils ont participé de près ou de loin à ce travail

MALKI Karim
CHAIB RAS Abdelouahab

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralité sur les installations de stockage des déchets et les barrières étanches 3

I.1.Introduction : 3

I.2. Définition d'une installation de stockage de déchets (ISD): 3

a) Achèvement des travaux de réalisation b) phase d'exploitation 4

I.3. Principe d'exploitation d'une installation de stockage de déchets : 4

I.4. Différentes barrières étanches constituant une ISD : 5

I.4.1 Barrière d'étanchéité active : 6

I.4.2. Barrière d'étanchéité passive : 6

I.5. Différentes couches constituant de barrières d'étanchéité: 8

I.5.1. Couches d'argile : 8

I.5.2. Géosynthétiques bentonitiques: 9

I.5.3. Géomembranes ou membranes synthétiques : 9

I.5.4. Couches sable/bentonite : 9

I.6. Traitement et mise en œuvre des matériaux de la barrière passive : 10

I.6.1. Traitement des matériaux constituant la barrière passive : 10

I.6.2. Mise en œuvre des matériaux constituant la barrière passive : 11

I.7. Conclusion : 12

CHAPITRE II : Présentation des matériaux utilisée pour concevoir des barrières d'étanchéité passive 15

II.1. Introduction : 15

II.2. Choix des matériaux : 15

II.3. GÉNÉRALITÉS SUR LES ARGILES 16

II.3.1. Définitions 16

II.3.2. Classification 16

II.4. Bentonite 18

II.4.1. Différents type de la bentonite 18

II.5. Bentonite de Maghnia 19

II.6. Sable de fonderie 21

II.6.1. Introduction : 21

II.6.2. Préparation des sables de fonderie (mélange) 22

II.6.3. Classification géotechnique 23

II.6.4. Domaines d'utilisations des sables usagés 24

II.6.5. Utilisation dans les infrastructures routières 24

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux naturels utilisés pour réaliser des barrières passives et des couvertures 26

III.1. Introduction : 26

III.2. Paramètres de nature : 26

III.3. Paramètres d'état : 27

III.4. Comportement mécanique : 28

III.5. Comportement hydraulique : 29

CHAPITRE IV : caractéristiques des Mâteriaux utilises 32

IV-1. Introduction : 33

IV-2. Analyses minéralogiques : 33

IV-2-1Diffraction aux rayons X (DRX 33

IV-2-2.Microscopie électronique à balayage (MEB) 37

IV-3. Analyse granulométrique : 37

IV-4. La masse volumique des grains solides: 38

IV-5. Essai au bleu de méthylène : 39

IV-6. Essais mécaniques : 40

IV-6-1.EssaiProctor : 40

IV-6-2.Détermination des paramètres de la résistance au cisaillement : 45

IV-7. Essai de perméabilité : 48

IV-8. Conclusion : 50

Conclusion : 51

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : installation de stockage des déchets de Zoubiria (Médéa) 4
Figure 1-2 : Principe d'exploitation d'une ISDND..... 5
Figure 1-3 : Principe du confinement des centres de stockage de déchets 6
Figure I.4 : Coupe schématique de la double barrière de sécurité
préconisée pour le stockage des déchets industriels spéciaux 7
Figure I.5 : Coupe schématique de la double barrière de sécurité
préconisée pour le stockage des déchets ménagers et assimilés 7
Figure II-1 : Carte de répartition des gisements de bentonites de Hammam Boughrara 18
Figure II-2 : Situation de l'unité BENTAL par rapport aux gisements 18
Figure II-3 : Extraction bentonite (carrière Roussel I)..... 19
Figure II-4: Processus de production de la bentonite de Maghnia..... 20
Figure II-5: Ensachage de la bentonite de Maghnia 20
Figure II-6: Constituants de sable de moulage 21
Figure IV-1 : Diffractomètre PANalytical : Empyrean 34
Figure IV-2 : Microscope électronique à balayage JEOL JSM-6340F..... 34
Figure IV-3 : DRX d'un Echantillon bentonite de Maghnia. 35
Figure IV-4 : DRX d'un Echantillon sable usagé de fonderie..... 36
Figures IV-5 : Courbe granulométrique du sable usagé de fonderie 37
Figures IV-6 : Analyse granulométrique du Bentonite de Maghnia..... 38
Figure IV-7: La masse volumique des grains solides ρ_s 38
Figure IV-8: Détermination de la masse volumique des grains solides..... 39
Figure IV-9: Essai de bleu de méthylène effectué
sur l'échantillon du sable usagé de fonderie 40
Figure IV- 10 : Préparation des mélanges pour les essais Proctor..... 41
Figure IV-11:Dispositif de compactage..... 42
Figure IV-12 : Résultats des essais Proctor 43
Figure VI-13 : Variation de la teneur en eau optimale en
fonction du pourcentage de bentonite..... 44
Figure IV-14 : Variation de la masse volumique sèche
maximale en fonction du pourcentage de bentonite..... 44

Figure VI-15 :Variation de la cohésion en
fonction du pourcentage de bentonite 46
Figure VI-16 :Variation de l'angle frottement en fonction
du pourcentage de bentonite..... 46
Figure VI-17 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction
du pourcentage de bentonite pour σ3=bar..... .47
Figure IV-18 : Dispositif de la perméabilité à charge variable..... 49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Principaux essais de caractérisation en laboratoire des matériaux d'étanchéité naturels 31
Tableau IV-1 : Masse volumique des grains solides de la bentonite de Maghnia et du sable usager de fonderie 39
Tableau IV-2: Résultat des essais Proctor 42
Tableau IV-3 : Résultat d'essais de cisaillement a la boite de Casagrande. 45
Tableau IV-4 : Résultat des contraintes de cisaillement en fonction de contrainte normal et de pourcentages de bentonite 46
Tableau IV-5: Résultat des essais de perméabilité 49

NOTATIONS

Ac : activité d'un matériaux

BTP :bâtiment et travaux publics

CSPE: chlorosulfures de polyéthylène

ENOF: **E**nterprise **n**ational des produits miniers n**o**n **f**erreux et substances utiles

HDPE: high density polyéthylène

Ip : indice de plasticité

IPI: indice portant immédiat

ISD: Installation de stockage des déchets

ISDND: installation de stockage des déchets non dangereux

JORF: journal officiel de la république Française

K: perméabilité

LDPE: low density polyethylene

POVAL : Pompes et Vannes Algérie

teneur en eau naturelle du sol $w_{nat,}$

VBS : valeur de bleu de sol

W :teneur en eau pondérale

$\mathbf{W_L}$: la limite de liquidité

$\mathbf{W_p}$**:** limite de plasticité

γ :poids volumique

$\boldsymbol{\omega_{opt}}$:la teneur en eau optimale

Ic : l'indice de consistance

Introduction générale

Les déchets sont inévitables et certains peuvent même être extrêmement dangereux. Il faut d'une part essayer de les réduire et d'autre part de les gérer. Cela est possible en entreposant les déchets en surface ou en les enfouissant au sein du sol. Dans les deux cas, le risque de contamination de la nappe souterraine existe si des précautions dans le sens de l'imperméabilisation du sol encaissant ne sont pas observées. Le risque de pollution des nappes souterraines menace les zones industrielles. Ceci est dû à l'augmentation progressive du volume de déchets domestiques (expansion des villes) et industriels (exploitation des hydrocarbures).

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

L'efficacité des couches étanches dépend de leur comportement mécanique, de leur comportement hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination.

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 inférieure à 10^{-9} m/s. L'angle de frottement recommandé pour les interfaces sols/Géosynthétiques bentonitiques dans les installations de stockage des déchets est de l'ordre de 26°.

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

L'objectif de la présente étude consiste à caractériser le sable usagé de la fonderie de Berrouaghia et étudier l'effet de l'ajout de la Bentonite sur son comportement mécanique et hydraulique.

Ce travail de recherche est composé de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous présentons l'essentiel d'informations relatives aux installations de stockage des déchets et les barrières étanches.
- Au deuxième chapitre nous allons présenter les matériaux utilisés dans la réalisation des barrières d'étanchéité passive.
- Le troisième chapitre traite les traits principaux de la caractérisation des matériaux naturels utilisés pour réaliser des barrières passives et des couvertures
- Le quatrième chapitre présente les modes opératoires et les résultats des essais minéralogiques, physiques, mécaniques et hydrauliques réalisés.

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DES DECHETS ET LES BARRIERES ETANCHES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DES DECHETS ET LES BARRIERES ETANCHES

I.1. Introduction :

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

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

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

L'expérience a montré que le fond et les flancs de l'installation de stockage des déchets (ISD) doivent répondre au minimum à une perméabilité en saturé inférieure à 10^{-9} m/s. Les sols argileux compactés présentent des performances vis-à-vis de la perméabilité qui sont souvent intéressantes. Ils constituent de ce fait des matériaux de prédilection dans la construction des systèmes étanches. Ces mêmes sols, présentent la particularité de perdre leur résistance en présence d'eau, ce qui pose un problème de portance de la barrière étanche.

I.2. Définition d'une installation de stockage de déchets (ISD) :

C'est une installation d'élimination de déchets par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre. Les ISD constituent l'étape finale et obligatoire de toute filière de traitement des déchets ménagers ou industriels [1].

La figure I-1 montre un exemple d'une installation de stockage des déchets sise à la commune de Zoubiria, Wilaya de Médéa.





a) Achèvement des travaux de réalisation **b) phase d'exploitation**

Figure I.1: installation de stockage des déchets de Zoubiria (Médéa)

I.3. Principe d'exploitation d'une installation de stockage de déchets :

Une ISD est une entité sécurisée dont l'exploitation est divisée en plusieurs étapes [2] :

- Une phase d'admission au niveau de la zone d'entrée lors de laquelle sont assurés le contrôle des déchets entrants (type, provenance), leur pesée sur un pont à bascule et leur contrôle (portique de détection de la radioactivité).
- Une fois leur entrée validée, les déchets sont dirigés vers le casier en cours d'exploitation afin d'y être enfouis. Ils sont dépotés dans la zone d'enfouissement puis étalés et compactés. Le camion d'amenée ressort du site après une ultime pesée de contrôle (phase d'enfouissement).

Il existe trois types d'installations de stockage de déchets [3] :

- Les installations de stockage des déchets dangereux de **classe 1**, accueillant les déchets à caractère dangereux reconnu pour le milieu naturel ou les êtres vivants.
- Les installations de stockage des déchets non dangereux, de **classe 2**.
- Les installations de stockage des déchets inertes, de **classe 3**, accueillant majoritairement les déchets du BTP.

Une ISD classe 1 ou 2 présente une ou plusieurs zones de stockage subdivisent en casiers, eux-mêmes pouvant être divisés en alvéoles. Les casiers sont exploités l'un après l'autre, jusqu'à comblement du site.

Comme précisé dans la règlementation, les casiers sont équipés de dispositif d'étanchéité et de drainage assurant une parfaite protection des sols et des eaux.

L'ensemble des effluents issus de l'exploitation du site sont collectés de manière séparative et acheminés vers une zone de traitement adaptée.

Le principe d'exploitation d'une ISD classe 1 et 2 est illustré ci-après.

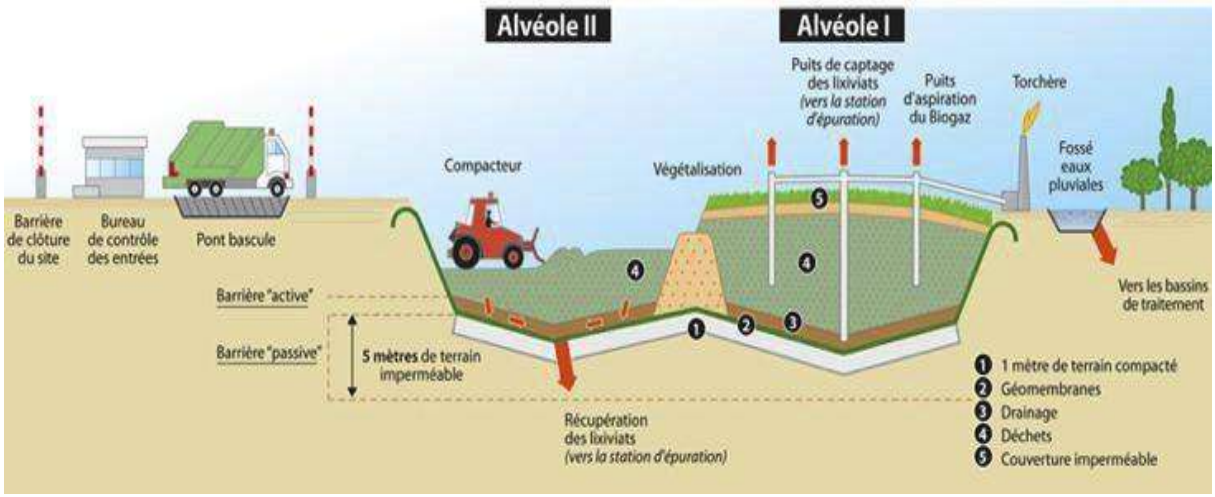


Figure I.2: Principe d'exploitation d'une ISDND

Entre le stock de déchets et ces différents milieux, des dispositifs de sécurité et de protection sont aménagés sous forme de « barrières ». Ce dispositif doit permettre d'assurer deux fonctions essentielles et complémentaires [3] :

- La protection du sous-sol vis à vis des infiltrations de polluants (fonction d'atténuation et de rétention), c'est-à-dire le rôle de barrière.

- L'évacuation vers l'extérieur des lixiviats, durant la période où les flux sont les plus importants, c'est-à-dire le rôle de drainage.

Une fois un casier plein, il est nécessaire de le refermer afin de garantir son étanchéité totale et éviter tout type de pollution (odeurs, envols, ...).

I.4. Différentes barrières étanches constituant une ISD :

Le stockage des déchets s'appuie sur le principe des barrières multiples (principe retenu au niveau Européen). On distingue deux types de barrières :

Une barrière dite « active » et une autre dite « passive »

Dès la fin du comblement d'un casier ou du site de stockage, ce dernier est rendu plus ou moins étanche par la pose d'une barrière de couverture minérale et/ou synthétique (figure I-3). Cette couverture doit limiter les infiltrations d'eau à travers le massif de déchets lors de la phase de post exploitation [1].

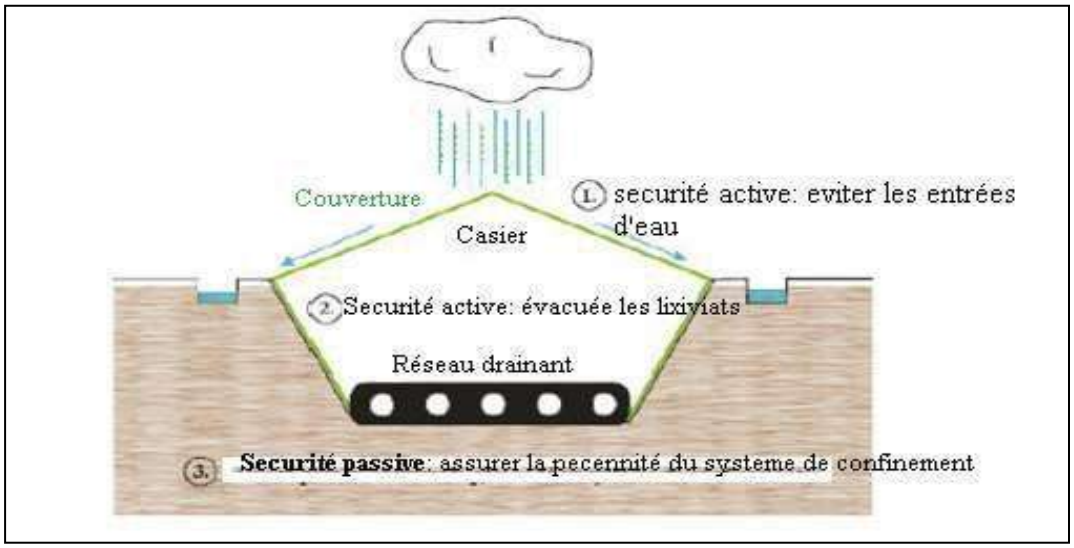


Figure I.3 : Principe du confinement des centres de stockage de déchets (ADEME, 1999).

I.4.1. Barrière d'étanchéité active :

Cette barrière, surplombe la barrière dite « passive », est installée à la base des déchets : il s'agît d'un système d'étanchéité drainage, constitué typiquement d'un horizon drainant surmontant une géo membrane (figure 1-3). Elle est constituée successivement de haut en bas, d'un système de collecte et de drainage des lixiviats, d'un géotextile de protection et d'une géomembrane. Son rôle est de préserver la barrière d'étanchéité passive des sollicitations, mais aussi d'isoler hydrauliquement les différents casiers du centre de stockage. Enfin, elle assure la collecte et l'évacuation des lixiviats [2], [3].

I.4.2. Barrière d'étanchéité passive :

La barrière passive est destinée à garantir l'étanchéité des casiers en cas de défaillance de la barrière de sécurité active sous laquelle elle se trouve.

L'étanchéité de la barrière passive doit être pérenne. Elle devra résister de manière durable [2] :

- Aux sollicitations mécaniques lors de la mise en œuvre et en service.
- Eventuellement à l'action chimique des lixiviats.

Cette barrière est soit constituée par le milieu géologique naturellement en place, ou alors qui peut être « rapportée » (reconstituée artificiellement).

L'arrêté du 18 décembre 1992 (JORF 1992), **relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux**, indique que la barrière de sécurité passive doit être constituée par une formation géologique naturelle en place ou rapportée, ayant une épaisseur minimale de 5 m et dont le coefficient de perméabilité est inférieur ou au plus égal à 1.10^{-9} m/s sur le fond et les

flancs de chaque alvéole. Une coupe type conforme à la réglementation des barrières de sécurité d'un stockage de déchets industriels spéciaux est présentée sur la figure I-4

Dans le cas des **déchets ménagers et assimilés**, l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 (JORF 1997) indique que la barrière de sécurité passive doit présenter, de haut en bas, un coefficient de perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 m et inférieure à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 m (voir figure I-5).

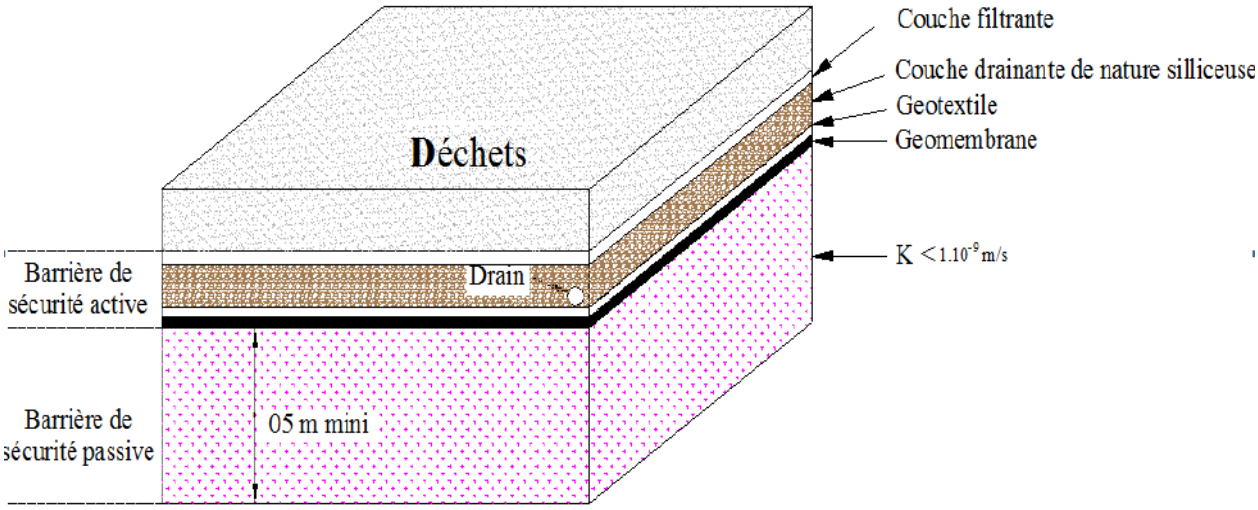


Figure I.4 :Coupe schématique de la double barrière de sécurité préconisée pour le stockage des déchets industriels spéciaux

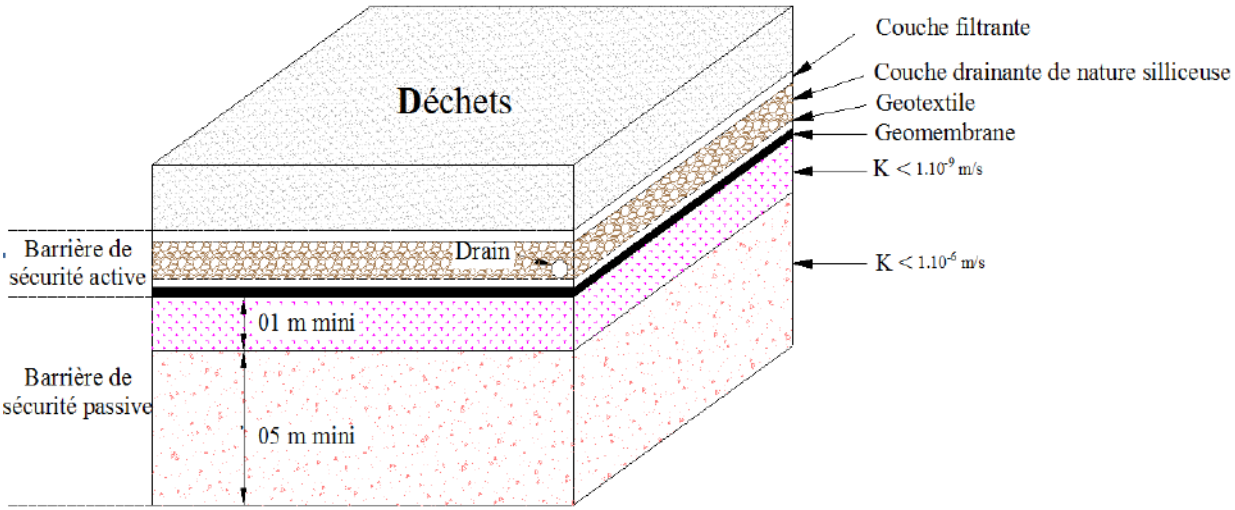


Figure I.5: Coupe schématique de la double barrière de sécurité préconisée pour le stockage des déchets ménagers et assimilés

Les différentes solutions pour la constitution d'une barrière minérale peuvent être regroupées en deux catégories : les sols naturels et les sols rapportés, renforcés ou non par des géosynthétiques bentonitiques. Dans les deux cas, cette barrière est mise en œuvre à partir de sols contenant une forte proportion de minéraux argileux ou de sols auxquels sont appliqués un traitement par adjonction de minéraux argileux, telle la bentonite ou la kaolinite.

Le matériau argileux est ensuite compacté de manière à obtenir une couche de sol de densité maximale et une faible conductivité hydraulique.

I.5. Différentes couches constituant de barrières d'étanchéité :

I.5.1. Couches d'argile :

Les couches d'argile sont utilisées lorsque des matériaux argileux en quantité suffisante, relativement homogènes et compactables, sont disponibles à un coût raisonnable. Les pérennités différentielles importantes et qu'elles soient à l'abri des intempéries, donc des cycles de gel-dégel et des cycles de mouillage-séchage.

La minéralogie et l'arrangement des particules peuvent être affectés par l'action d'acides, de bases ou de composés organiques ou encore par des échanges de cations [1].

I.5.2. Géosynthétiques bentonitiques :

Les géosynthétiques bentonitiques sont des produits manufacturés servant de barrière hydraulique et formés par une couche de bentonite de faible perméabilité, comprise entre des géotextiles et/ou une géomembrane, l'ensemble étant cousu, aiguilleté ou collé. Leurs performances reposent sur le très fort potentiel de gonflement de la bentonite comprise entre deux géotextiles. Leur perméabilité, fonction de leur nature et de la contrainte de confinement, varie quand ils sont saturés et confinés entre 5.10^{-11} et $5.\ 10^{-12}$ m/s.

I.5.3. Géomembranes ou membranes synthétiques :

Les géomembranes ou membranes synthétiques sont constituées de polymères. Il y en a de nombreuses sortes comme entre autres celles de chlorures de polyvinyle **(**PVC**),** celles de polyéthylènes (LDPE pour « low density polyethylene », HDPE pour « high density polyéthylène ») et celles de chlorosulfures de polyéthylène (CSPE), qui font partie de la famille des polymères thermoplastiques pour ne nommer que ceux-là. On retrouve les géomembranes, nommées ci-dessus, en panneaux de différentes largeurs dont l'épaisseur varie entre 0,25 et 2,5mm dépendant des sortes. Les géomembranes ont une conductivité hydraulique qui est de l'ordre de 10^{-12}cm/s.

Cependant, la performance réelle d'une géomembrane dépend principalement des défauts de fabrication et de mise en place (joints imparfaits) ou encore de l'altération physique (perforations) ou chimique qu'elle subira au cours de sa vie utile [1], [4] .

I.5.4. Couches sable/bentonite :

Les barrières en sol qui consistent en un mélange de sable bentonite sont largement utilisées à travers le monde et également en Amérique du Nord. Cette solution a été utilisé (mélange S/B) lorsque les sols en place sont trop grossiers pour être utilisés comme couche étanche et qu'il n'y a pas d'argile compactable disponible a proximité. Leurs efficacités dépendent de leur comportement mécanique, de leur comportement hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination [1].

La réalisation d'une barrière en sable 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 et des couches uniformes lors de la pose.

I.6. Traitement et mise en œuvre des matériaux de la barrière passive :

Si le contexte géologique du site potentiel d'implantation d'un nouveau centre de stockage ne satisfait pas forcement aux caractéristiques géométriques et hydromécaniques exigées par la législation, deux solutions peuvent se dégager pour constituer une barrière de sécurité passive qui présente des caractéristiques hydrauliques satisfaisantes [4] :

- Soit rapporter du matériau naturel répondant aux caractéristiques exigées.
- Soit traiter un matériau présent sur le site ou proche de celui-ci, de façon à acquérir les caractéristiques exigées.

I.6.1. Traitement des matériaux constituant la barrière passive :

Les traitements de matériau visent essentiellement à améliorer [4] :

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

Pour améliorer le comportement hydraulique d'un matériau naturel, la solution de traitement la plus couramment retenue passe par l'adjonction de bentonite [1].

L'ajout de quelques pourcents de bentonite améliora nettement les performances hydrauliques du matériau que l'on souhaite traiter. A titre d'information, le gonflement d'une bentonite sodique est de 13.8 fois alors qu'il est limité à 5 fois au

maximum pour la bentonite calcique. Cette propriété tient à une capacité d'échange cationique plus élevée qui favorise les processus d'hydratation par gonflement des espaces inter foliaires.

La bentonite est toutefois susceptible d'échanger ses ions sodiques avec des ions bivalents ou trivalents et de voir son pouvoir gonflant diminuer. La pérennité des caractéristiques hydrauliques de la barrière peut alors être remise en question.

Une alternative à l'utilisation de bentonite sodique est celle d'une argile naturelle dite non gonflante, riche en kaolinite, contenant aussi généralement de l'illite. Les taux de mélange seront forcément plus élevés, de quelques dizaines de pourcents. Les matériaux obtenus présenteront une meilleure résistance au cisaillement et une moindre sensibilité aux échanges ioniques.

I.6.2. Mise en œuvre des matériaux constituant la barrière passive [1],[4] :

Pour satisfaire aux exigences d'une perméabilité minimale, des essais en laboratoire sont réalisés avant la construction de la couche d'étanchéité. Ces essais ont pour but de déterminer les caractéristiques de mise en place des matériaux. Pour les sols argileux, la couche Proctor donne le couple teneur en eau optimale-densité sèche maximale et les essais de perméabilité fournissent le couple densité sèche - perméabilité minimale.

Lorsque le matériau est « qualifié », il est indispensable de vérifier que les paramètres mesurés en laboratoire peuvent être obtenus sur le site, c'est-à-dire qu'après avoir validé le gisement et les qualités propres du matériau, il est nécessaire de valider sa mise en œuvre.

Dans le cas des barrières d'étanchéité dans les ISD, une planche d'essai de compactage et de perméabilité est vivement recommandée pour régler les différentes étapes de la mise œuvre.

La planche d'essai a pour objectif de tester l'évolution des caractéristiques de compacité du matériau en fonction du type d'engin de compactage et du nombre de passages. Elle est réalisée couche par couche, jusqu'à atteindre l'épaisseur nominale requise, par l'entreprise et avec les engins qui seront utilisés pendant toute la durée du chantier (c'est-à-dire dans les conditions réelles d'exécution).

La planche d'essai permet de fixer les conditions de mise en œuvre, notamment la teneur en eau la plus appropriée en fixant éventuellement les limites d'utilisation, mais aussi le poids volumique sec nominal à atteindre avec les engins mis à disposition.

Si ceux-ci ne conviennent pas, la planche d'essai doit être reprise avec d'autres moyens.

Après la réalisation de la planche d'essai, des échantillons sont prélevés pour les essais en laboratoire. Des essais de perméabilité in situ permettent de déterminer si les objectifs de perméabilité sont respectés. Ces essais sont réalisés d'après les normes. Sur la base de ces résultats, des recommandations finales pour la réalisation de la couche d'étanchéité sont définies.

Les principaux paramètres de mise en œuvre sont :

- le type de compacteur : pour la réalisation des étanchéités minérales les compacteurs à « pied de mouton » sont souvent utilisés. Ce type de compacteur permet la bonne interpénétration des couches successives.
- L'épaisseur des couches élémentaires : le matériau est étalé en couches régulières puis compacté. Le nombre de couches et leurs épaisseurs doivent être déterminés après l'étude en laboratoire puis validés par une planche d'essai. Pour les barrières minérales d'un mètre d'épaisseur, il est généralement préconisé 3 couches de 33cm d'épaisseur ou 4 couches de 25cm.
- La dimension des mottes : la taille moyenne des mottes est une caractéristique importante. Pour les sols argileux compactés à des teneurs en eau plus faibles que l'optimum, on observe une augmentation importante de la perméabilité avec la taille des mottes. Ce phénomène est beaucoup moins important pour les teneurs en eau supérieures à l'optimum car les mottes, même grosses, sont plus déformables.
- L'humidification : quand il faut ajouter de l'eau pour augmenter la teneur en eau du matériau argileux, il faut prendre en compte le temps nécessaire pour l'absorption de l'eau, afin d'éviter le compactage des mottes humides à l'extérieur et sèches à l'intérieur.
- La pente du talus : lorsqu'on est amené à réaliser des compactages sur des pentes, il existe deux méthodes, soit compacter parallèlement à la pente, soit compacter par couches horizontales. La première méthode minimise les risques de fuite par les interfaces horizontales, mais à partir des pentes supérieures à 20 % le compactage devient difficile.

I.7. Conclusion :

La conception des ISD (classe 1 ou 2) doit donc intégrer ces incertitudes de manière à respecter le principe de précaution et assurer un niveau de protection fiable dans le long terme. Le confinement des déchets et des fluides polluants engendrés par la percolation des eaux de pluie à travers les déchets, appelés lixiviats, est réalisé grâce à des structures d'étanchéité-drainage. Ce confinement a pour rôle de limiter le transfert de polluants vers le milieu environnant (sous-sol, nappes aquifères).

L'impact minimum sanitaire et environnemental des ISD (classe 1 ou2) repose sur l'efficacité des barrières d'étanchéité alors que de nombreux doutes persistent quant à leur durabilité. Le dispositif d'étanchéité doit former d'une barrière de sécurité passive surmontée d'un niveau de sécurités actives dont la complémentarité constitue, en théorie, une technique capable d'assurer un niveau de protection maximal vis-à-vis de l'environnement. Cependant, l'étanchéité parfaite n'est jamais atteinte et les éléments polluants peuvent s'écouler à travers le dispositif d'étanchéité composite.

Il est important de noter que la barrière dite « active » et celle dite « passive » sont complémentaires. En effet, la durée de vie de la barrière active est limitée par rapport à celle des déchets car l'expérience montre que, d'une part, les niveaux drainants peuvent se colmater avec le temps, et que d'autre part les géomembranes vieillissent et peuvent présenter des ruptures de natures diverses. La barrière passive sera donc sollicitée.

CHAPITRE II :

PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISEE POUR CONCEVOIR DES BARRIERES D'ETANCHEITE PASSIVE

CHAPITRE II : PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISEE POUR CONCEVOIR DES BARRIERES D'ETANCHEITE PASSIVE

II.1. Introduction :

La réalisation d'une barrière en sable 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 et des couches uniformes lors de la pose.

Une considération de base dans la sélection et la construction des barrières en sable bentonite est l'éventualité de l'interaction entre la bentonite et le fluide à retenir ; qui peut causer une augmentation de la conductivité hydraulique et provoquer ainsi une défaillance grave dans le fonctionnement de la barrière.

Les spécimens de sable bentonite ont montré de bonnes résistances au phénomène de gel dans des essais de laboratoire comparés aux barrières en argiles compactées [1].

II.2. Choix des matériaux :

Certaines caractéristiques distinguent les minéraux argileux de type smectite et sont indispensables pour tout matériau de barrière antipollution [5] :

- Leurs propriétés de gonflement qui assurent un bon contact avec la roche hôte et permettent le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient à posteriori ;
- Une très faible perméabilité ;
- Des propriétés d'échange et d'adsorption aptes à retenir préférentiellement certains polluants ;
- Une stabilité physique du matériau lors d'un contact avec de l'eau. Canada Environnent (1985) recommande l'utilisation de bentonites à forte teneur en montmorillonite ayant principalement du sodium comme cations échangeables. Les bentonites avec du calcium auraient un potentiel de gonflement plus faible et nécessiteraient des pourcentages de bentonite plus élevés pour atteindre les mêmes objectifs de conductivité hydraulique. Le sable doit aussi posséder des caractéristiques granulométriques telles que la stabilité hydraulique du mélange sera assurée et que la bentonite demeurera à l'intérieur du squelette formé par le sable. Les données de Marcotte et al. (1993) recueillies dans le cadre de l'étude géotechnique réalisée pour la décharge de trois- rivières, montrent que le risque de lessivage augmente lorsque les pourcentages de particules fines et de bentonite sont faibles.

Les pourcentages de bentonite utilisés dans les mélanges sable-bentonite varient généralement entre 4 et 15 %.

II.3. GÉNÉRALITÉS SUR LES ARGILES

II.3.1. Définitions

En génie civil, la première définition des argiles est **granulométrique** : les argiles correspondent à la fraction inférieure à 2 µm d'un sol ou d'une formation géologique. **Minéralogiquement**, les argiles correspondent à des minéraux alumino-silicatés, le plus souvent de la famille des phyllo silicates, qui sont formés de particules dont les unités de bases sont des feuillets de très faible épaisseur (7, 10 ou 14 Å). Les deux définitions (granulométrique et minéralogique) se recoupent mais ne sont pas équivalentes. En effet, si les minéraux argileux sont le plus souvent constitués de particules inférieures à 2 µm, la fraction granulométrique inférieure à 2 µm d'un sol ou d'une formation géologique comprend très souvent d'autres minéraux que les seuls minéraux argileux (quartz, silice colloïdale, carbonates, etc.) [6].

Compte tenu de la granulométrie des particules et de leur structure (association de feuillets de très faible épaisseur), les matériaux argileux développent des surfaces spécifiques très élevées, comprises entre 5 et 800 m^2/g, ce qui leur confère des propriétés d'adsorption très importantes.

Le terme roche argileuse désigne des roches sédimentaires (ou détritiques) à grain très fin contenant au moins 50 % de minéraux argileux auxquels peuvent s'ajouter d'autres minéraux très divers, détritiques ou non (quartz, minéraux carbonatés, si1ice colloïdale, etc.). Les roches argileuses se présentent macroscopiquement comme des roches tendres (rayables à l'ongle), fragiles à l'état sec et qui se brisent avec une cassure conchoïdale. Elles sont douées alors d'un grand pouvoir absorbant, gonflent à l'eau et deviennent plastiques avant de perdre leur cohésion. Elles se dispersent alors dans l'eau et forment une solution colloïdale dont la stabilité dépend à la fois de la nature de l'argile et des caractéristiques physico-chimiques du liquide.

II.3.2. Classification

Parmi l'ensemble des minéraux cités nous évoquerons plus particulièrement trois familles importantes, les ***kaolinites***, les ***illites*** et les ***smectites*** [6] .

II.3.2.1. Kaolinite :

La kaolinite est un phyllosilicate constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. La faible capacitée d'échange des kaolinites est due à des sites de surface amphotères. Morphologiquement la kaolinite se présente sous forme de particules hexagonales constituées par des empilements de feuillets fortement associés les uns aux autres. Compte tenu de leurs faibles propriétés d'hydratation, les kaolinites sont dites ***argiles non gonflantes***.

II.3.2.2. Illite :

Les illites sont composées de feuillets possédant une charge globale négative, plus élevée que celle des smectites, qui est compensée par des ions potassium. La différence fondamentale avec les smectites réside dans le fait que les ions compensateurs (potassium) ne sont que très faiblement échangeables : l'illite a une capacité d'échange cationique très faible. Il n'y a pas d'hydratation des espaces interfoliaires. Comme la kaolinite, l'illite est qualifiée ***« argile non gonflante »***. Bien que l'illite ait une structure voisine de celle des smectites, ses propriétés d'échange, d'hydratation et de gonflement sont proches de celles de la kaolinite. Les particules sont également des entités rigides constituées par des feuillets fortement associés les uns aux autres.

II.3.2.3. Smectites (bentonites) :

Les smectites sont des phyllosilicates constitués des deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique. Minéralogiquement, cette famille est constituée de plusieurs espèces telles que la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite. La charge élevée de ces argiles est due pour l'essentiel à des substitutions isomorphiques. Cette charge est donc permanente, négative et peu dépendante du pH. Elle est compensée par des cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} et K^{+} le plus souvent) échangeables, placés entre les feuillets. Ces argiles possèdent donc une capacité d'échange cationique élevée. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans les espaces interfoliaires et le degré d'hydratation dépend de la nature du cation et de l'humidité relative. Cette possibilité de gonflement des espaces interfoliaires conduit à désigner ces argiles par le terme **« argiles gonflantes ».** Cette famille de minéraux argileux possède donc des propriétés remarquables d'hydratation et de gonflement. Elles sont très peu perméables.

D'un point de vue textural, les smectites sont constituées de feuillets de grande extension latérale, associés les uns aux autres en nombre très variable (de 1 à plusieurs centaines) selon l'humidité et la nature du cation échangeable. Lorsque les particules sont

constituées d'un faible nombre de feuillets (cas des smectites sodiques aux fortes teneurs en eau), les particules sont à la fois très souples et anisotropes et forment des réseaux très « lâches » susceptibles de retenir de grandes quantités d'eau.

II.4. Bentonite

Le terme **BENTONITE** désigne les matériaux argileux à usage industriel, essentiellement composés de smectites et plus particulièrement de montmorillonite. Les propriétés de gonflement et de perméabilité des bentonites dépendent étroitement de la nature du cation compensateur.

Il existe une certaine diversité parmi les matériaux commercialisés sous le terme de bentonite, dont les performances, vis à vis de la fonction d'étanchéifiassions dépendent de [7]:

- La teneur en montmorillonite présente dans le produit ;
- La concentration relative de la bentonite en sodium et en calcium ;
- La finesse de mouture qui a une conséquence indirecte sur l'activité de la bentonite : à poids égal, une bentonite fortement broyée a une surface d'exposition supérieure et s'hydrate plus rapidement que la bentonite plus grossière ;
- Des additifs chimiques éventuellement introduits lors de la fabrication du matériau commercialisé.

II.4.1. Différents types de la bentonite

II.4.1.1. Bentonites naturelles :

En fonction de la nature du cation échangeable présent, il existe à l'état naturel deux types de bentonites [8] :

- les **bentonites sodiques**, où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption.

- les **bentonites calciques,** où le calcium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un pouvoir de gonflement et d'adsorption plus faible que les bentonites sodiques.

Ces deux types de bentonites, éventuellement après un séchage à 80-90 °C, sont simplement broyés avant leur commercialisation.

II.4.1.2. Bentonites activées :

Afin d'améliorer les propriétés d'adsorption des bentonites calciques, ces dernières sont le plus souvent activées par du carbonate de sodium puis séchées et broyées ; on obtient ainsi des bentonites calciques activées dont les propriétés sont égales ou supérieures à celles des bentonites sodiques. Ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou

de granulés sphériques ou cylindriques. Elles ont des couleurs très variables allant du blanc pour les produits les plus purs au gris, beige ou vert pour les autres [8].

II.5. Bentonite de Maghnia [9]

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) et de celle de Mostaganem (M'zila).

Le gisement d'argiles bentonitiques de Hammam Boughrara est situé à 15 Km au Nord-Est de la ville de Maghnia, Wilaya de Tlemcen et à 05 Km du village Hammam-Boughrara. Le gisement qui s'étale sur une superficie de 175 Ha est composé de cinq carrières (Roussel1, Roussel 2, Dar M'Barek 1, Dar M'Barek2 et RM) avec un potentiel de réserve estimé à 11 millions de tonnes.

ENOF (**E**ntreprise **n**ationale des produits miniers n**o**n **f**erreux et substances utiles) exploite actuellement la carrière de Roussel 1.

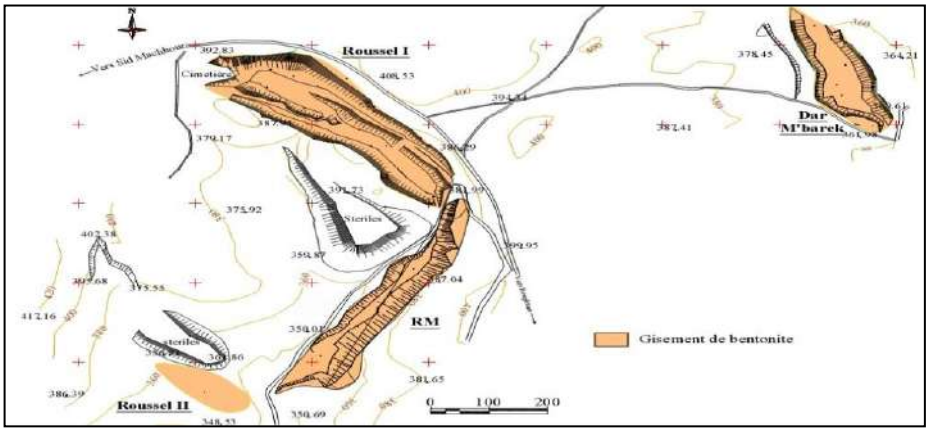


Figure II.2 : **: Carte de répartition des gisements de bentonites de Hammam Boughrara**



Figure II.1 : **Situation de l'unité BENTAL par rapport aux gisements**

L'extraction se fait à ciel ouvert après découverture des morts terrains. Le transport vers l'usine, située à 15 km dans la ville de Maghnia, se fait par camions de 15 t de capacité.



Figure II.3 : **Extraction bentonite (carrière Roussel I)**

L'unité de Maghnia se situe à l'intérieur de la zone urbaine. Elle est conçue en 1950. ENOF Maghnia intervient sur quatre produits :

- **Bentonite de forage :** son domaine d'utilisation est : Viscosifiant de forage – (Forages pétrolier et hydraulique).
- **Bentonite de fonderie** : son domaine d'utilisation est : liant des sables de moulage.
- **Bentonite de Charge industrielle** : elle est utilisée comme additif dans les produits phytosanitaires (pesticides) et alimentation animale.

La production globale de la bentonite est en moyenne de 18000 tonnes/an répartie comme suit :

- **Bentonite de forage : 16 000 T**
- **Bentonite de fonderie : 1 000 T**
- **Bentonite de charge industrielle : 1 000 T**

Le traitement des bentonites se fait en 5 stades (voir figure II-4) :

- Concassage
- Activation au carbonate de soude (Na_2CO_3).
- Séchage.
- Broyage et dopage au Magnésie
- Ensachage : 50 kg et big bags de 1.25 T (voir figure II-5).

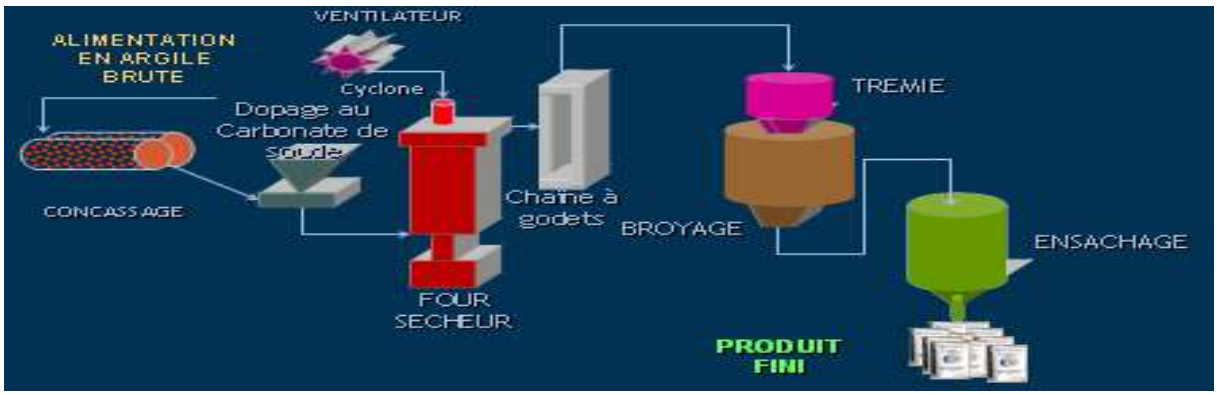


Figure II.5 : Processus de production de la bentonite de Maghnia





Figure II.4 : Ensachage de la bentonite de Maghnia

II.6. Sable de fonderie

II.6.1. Introduction :

La fonderie est un procédé de réalisation de pièces en fonte obtenues en coulant un métal fondu dans une empreinte généralement appelée « moule ». La fonte peut provenir d'un haut fourneau (obtention d'une fonte de première fusion) ou d'un cubilot (obtention d'une fonte de deuxième fusion).

Le moulage au sable reste le plus employé par rapport aux moulages métallique et céramique, les sables siliceux étant peu onéreux. Il permet de réaliser des pièces de fonderie de 1 kg à 200 t et de dimension de 10 cm à 13 m pour les procédés réalisés à la main, et des pièces de 100 g à quelques dizaines de kg et de 10 cm à 1 m pour les procédés réalisés par des machines.

Ces moulages au sable sont spécifiés pour la fabrication de pièces lourdes et des alliages ayant des points de fusion supérieurs à 900 °C. Les deux inconvénients des moules en sable

sont leur usage souvent unique (ils sont cassés au démoulage), et l'impossibilité de couler des métaux ayant des températures de fusion > 1 600 °C. Les sables utilisés dans les moulages peuvent être réutilisés après traitement (dépoussiérage, broyage, calcination) [10].

II.6.2. Préparation des sables de fonderie (mélange) [11]

Pour des raisons propres à la technique de la fonderie (maniabilité des sables, perméabilité de ceux-ci vis à vis des gaz qui se forment au contact du métal en fusion, aspect final de la pièce coulée, ...), il est recherché pour la constitution des moules et noyaux des sables siliceux, très propres, aux grains arrondis et d'une dimension s'établissant pour leur majorité entre 0,1 et 1 mm

II.6.2.1. Différents composants du sable de moulage :

Les différents composants sont incorporés aux sables afin de leur conférer la cohésion et la tenue dans le temps des formes imprimées par les modèles et les boites à noyaux. On distingue deux grandes familles :

II.6.2.1.1. Liants minéraux

a) Argile

Elle est probablement la plus utilisée. Introduite à raison de 5 à 10%, elle confère au sable, après humidification, la plasticité et la cohésion nécessaires pour ce qui est appelé le "Moulage à vert". Les sables traités de la sorte sont surtout utilisés pour la confection des moules (formes extérieures).

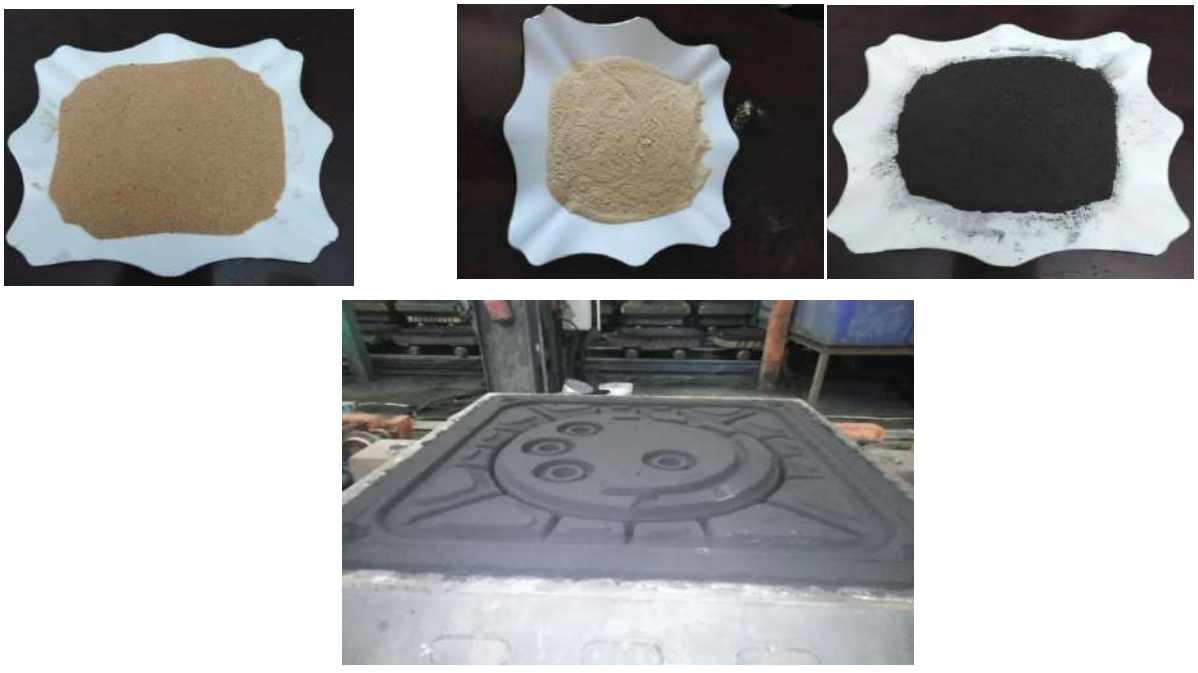


Figure II.6 : Constituants du sable de moulage

b) Silicate de soude.

Le mélange sable-silicate, plutôt utilisé pour la fabrication de grandes séries. Les sables au silicate de soude sont employés tant pour la confection des moules que des noyaux.

c) Ciment.

Le mélange sable-ciment est essentiellement employé pour la confection de moules de grandes dimensions. Le durcissement du mélange, lent, peut être accéléré par des adjuvants appropriés.

II.6.2.1.2. Liants organiques

D'une manière générale, ces liants sont utilisés sous des dosages faibles avoisinant les 2%. On y trouve :

A. Résines thermodurcissables

(Résines urée-formol, phénol-formol, urée-formol phénol, ...). La polymérisation de ces résines nécessite la présence d'un catalyseur, généralement acide, et une température de 200 à 300°C. Ces sables sont utilisés à la fois pour la confection des moules et noyaux.

B. Résines polymérisant à froid (Résines furanniques, polyuréthane...).

Utilisées exclusivement pour la fabrication des noyaux.

II.6.2.1.3. Adjuvants

Pour favoriser le démoulage et le décochage sont ajoutés, notamment dans les "moulages à vert", un certain nombre de produits qui, pour la plupart, se décomposeront au contact du métal liquide. Citons les huiles minérales, le sucre (sous forme de dextrose), le noir minéral, la farine de bois.

II.6.3. Classification géotechnique

Les sables usagés de fonderie sont classés d'une manière générique sous la classe "F9" par la norme NF P11-300 de Septembre 1992.

En termes de comportement, les sables de fonderie peuvent être assimilés aux classes des matériaux naturels suivantes, sous réserve cependant de vérification au cas par cas [12] :

- Sable à l'argile : Classe B2 à B5
- Sable au silicate : Classe B1 à D1
- Sables aux liants organiques de synthèse : Classe B1 à D1

II.6.4. Domaines d'utilisations des sables usagés

Le sable usagé et le sable déclassé provenant du circuit de sable ou du procédé de régénération du sable peuvent trouver certaines de leurs applications à l'extérieur, les domaines principaux d'application étant [13] :

- l'industrie de la construction (construction de route, construction d'autoroute)
- l'industrie des matériaux de construction (fabrication de ciment, de briques, de castine)
- le remplissage de cavités minières
- la construction de décharges (construction de routes dans les décharges, construction de couvertures permanentes) [14].

Les limites de ces applications sont données soit par des critères techniques pour les matériaux de construction et/soit par des critères environnementaux pour l'application donnée. Les critères environnementaux sont en général basés sur les propriétés de lixiviation et la teneur en composés organiques [15].

Les sables usagés ont en général un faible potentiel de lixiviation des métaux**.**

Des essais à l'échelle industrielle ont été réalisés avec succès dans le domaine de la fabrication [16] :

- de couches de base destinées aux routes
- de matériau de remplissage - de matériau de drainage.

II.6.5. Utilisation dans les infrastructures routières

En raison de leur granulométrie holométrique, les sables usés ne présentent pas une bonne cohésion propre et peuvent poser des problèmes de traficabilité. Le retour d'expérience sur des chantiers expérimentaux a permis d'établir quelques précautions d'emploi [17], [18] :

- un contrôle de la teneur en eau dans les sables, comprise entre 10 et 15%, permettant une mise en œuvre optimale ;
- un compactage moyen à l'aide d'engins vibrants ou à pneus ;
- une protection des talus (sol très érodable) par placage de terre végétale engazonnée pour lutter contre le ravinement et les ruissellements d'eau ;
- une mise en œuvre d'une couche de forme mince pour assurer la traficabilité de surface.

Par ailleurs, l'utilisation de tels sables est interdite pour le remblaiement de carrières et d'excavations lorsque des interactions avec les eaux souterraines sont possibles.

II.6.5.1. Utilisation en assises de chaussées

Le retour d'expérience sur des chantiers expérimentaux, suivi par le réseau des LPC [Genet, 1996], a permis de tester, sans problèmes particuliers, des mélanges contenant des sables usés jusqu'à [19]:

-15% dans une grave non traité ;

-15% dans un sable traité aux liants hydrauliques ;

-20% dans une grave traitée aux liants hydrauliques.

Il est important de s'assurer que la présence de produits organiques n'a pas un effet inhibiteur sur certains liants hydrauliques routiers.

Quelles que soient la technique de chaussée envisagée, la maîtrise de la qualité des sables usés (origine, conditions de stockage, granularité, argilosité,) est prépondérante. Toute variation notable aura une incidence sur les performances du produit fini.

II.6.5.2. Utilisation dans les techniques d'enrobés

Les sables usés peuvent être utilisés comme constituant en substitution partielle du sable traditionnellement incorporé dans les formules d'enrobé. En limitant le domaine d'emploi sur des revêtements peu circulés (voirie de lotissement, trottoirs, parking VL, cour, …) sans dépasser un dosage de 10% dans une formule d'enrobé, les sables usés peuvent être incorporés dans des matériaux traités aux liants hydrocarbonés [20].

CHAPITRE III :

CARACTERISATION DES MATERIAUX NATURELS UTILISES POUR REALISER DES BARRIERES PASSIVES ET DES COUVERTURES

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX NATURELS UTILISES POUR REALISER DES BARRIERES PASSIVES ET DES COUVERTURES

III.1. Introduction :

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

III.2. Paramètres de nature :

Les paramètres de nature correspondent à des caractéristiques intrinsèques du matériau. Ce sont des caractéristiques qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps, ni au cours des différentes manipulations que subit le matériau lors de sa mise en œuvre. Ces paramètres de nature comprennent : **[2]**

- La granulométrie ;
- L'argilosité ;
- La minéralogie ;
- La teneur en carbonate de calcium ;

L'analyse granulométrique consiste à évaluer, en termes de poids, la répartition des grains du sol suivant leurs dimensions (NF P94-056 et NF P94-057). La norme NF P94-056 concerne l'analyse granulométrique d'un sol par tamisage, jusqu'à 80 µm. La norme NF P94-057 traite de l'analyse granulométrique par sédimentation, c'est à dire la fraction granulaire inférieure 80 µm.

La teneur en argile peut être définie par le pourcentage d'éléments inférieurs à 2 µm.

L'argilosité peut être déterminée, soit par l'indice de plasticité Ip, soit par la valeur au bleu de méthylène (VBS).

L'indice de plasticité Ip, est déduit des limites d'Atterberg (norme NF94-051). Ces limites caractérisent trois états de consistance des sols fins : les états liquide, plastique et solide, qui dépendent de la teneur en eau du matériau. L'indice de plasticité correspond à la différence entre la limite de liquidité w_L et la limite de plasticité w_P. Il définit l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. C'est pourquoi cet indice est à la fois un paramètre d'identification et de comportement. L'indice de plasticité d'un sol dépend de la nature et de la quantité des minéraux argileux qu'il contient. Il est d'autant plus élevé que le sol contient plus d'argile. L'expérience a prouvé que cet indice était extrêmement important pour mesurer le caractère de plus ou moins grande sensibilité à l'eau d'un sol fin. **[2]**

Adsorption au bleu de méthylène (essai au bleu) : cette mesure fait l'objet de la norme P94-068. Elle est d'usage courant en géotechnique pour évaluer la fraction argileuse d'un sol ou d'un granulat, mais également dans l'industrie des bentonites. Le résultat de l'essai dépend directement de la nature minéralogique des argiles et de leur quantité dans le sol. Cette mesure permet d'évaluer rapidement l'activité colloïdale des matériaux argileux. La quantité de bleu de méthylène adsorbé par un échantillon augmente lorsque sa surface spécifique augmente. **[2]**

L'étude minéralogique par diffractométrie des rayons X donne des informations notamment sur la nature des minéraux argileux présents dans le matériau (présence d'argiles gonflantes par exemple).

III.3. Paramètres d'état :

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

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

La ***teneur en eau pondérale*** (w exprimée en %) est le rapport de la masse de l'eau contenue dans l'échantillon de sol à la masse des grains solides. Sa détermination est décrite dans la norme P94-050.

Le ***poids volumique*** (γ exprimé en KN/m^3) est le rapport du poids de matériau à une teneur en eau donnée à un volume donné. Le poids volumique sec est le rapport du poids du matériau sec et le volume. Le poids volumique sec, utilisé avec la teneur en eau et le poids volumique des grains solides, permet de déterminer l'indice des vides, la porosité, le degré de saturation et le poids volumique humide du matériau. Sa détermination est décrite dans la norme NF P94-053.

Certains paramètres de nature et d'état, nécessaires à la caractérisation du matériau naturel, font appel aux ***limites d'Atterberg***. A partir de la et pour situer l'état de ce sol par rapport à ses limites de liquidité w_L et de plasticité w_P, on peut calculer ***l'indice de consistance*** $Ic = \frac{w_l - w}{w_l - w_p}$ qui permet d'apprécier la consistance du sol.

Des résultats de l'analyse granulométrique et des limites d'Atterberg, on peut déduire un paramètre d'état : l'activité d'un matériau.

On définit ***l'activité d'un matériau*** noté ***Ac***, comme le rapport de l'indice de plasticité I_p (déduit des limites d'Atterberg) et de la teneur en argile, correspondant aux éléments inférieurs à 2 µm. Lorsque la valeur de Ac est inférieure à 0,75, l'argile est considérée comme « inactive » ; au-delà de 1,25, l'argile est dite « active ». Ac peut être considéré comme un indicateur de l'aptitude au gonflement de l'argile.

III.4. Comportement mécanique :

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement du sol. Ces paramètres sont obtenus à partir d'essais géotechniques en laboratoire et notamment :

- L'essai Proctor ;
- L'indice portant immédiat
- L'essai de cisaillement direct à la boîte ;
- L'essai de cisaillement à l'appareil triaxial.
- L'essai œdométrique ;

L'essai Proctor : permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. Cet essai peut viser deux objectifs :

- Diminuer la conductivité hydraulique en diminuant l'indice des vides du sol par compactage.

- Augmenter la résistance mécanique du sol ;

Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie de référence. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière très générale cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique du sol sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor normal ou Proctor modifié suivant l'énergie utilisée. Ainsi, lorsque l'on compacte de façon identique des échantillons d'un même sol à des teneurs en eau différentes, on constate que la masse volumique sèche ρ_d varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée, dite optimale et notée w_{opt}.

Le principe de l'essai servant à déterminer ***l'indice portant immédiat IPI***, décrit par la norme NF P94-078, « consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon pour le faire pénétrer à une vitesse donnée dans une éprouvette de sol étudiée ». Cet indice ne constitue pas une caractéristique intrinsèque d'un sol. En effet, si cette grandeur dépend en partie de la nature du sol, de sa teneur en eau, de sa masse volumique sèche et de son degré de saturation.

L'essai de cisaillement permet de déterminer la résistance au cisaillement d'un sol. Les paramètres à la rupture que l'on obtient pour plusieurs états de contraintes permettent en particulier d'étudier la stabilité des pentes et talus.

L'essai œdométrique permet d'évaluer les tassements et gonflements du matériau au cours du temps par variation des charges mécaniques et hydriques appliquées sur le matériau (NF P94-090-3).

III.5. Le comportement hydraulique :

Le comportement hydraulique du sol est caractérisé essentiellement par la perméabilité, notée *k* et exprimée en m/s. Ce paramètre est obtenu à l'aide de l'essai de perméabilité qui peut s'effectuer en laboratoire à l'aide de l'appareil triaxial, de l'œdomètre ou du perméamètre à paroi rigide.

Le tableau III.1 récapitule les différents essais qui permettent d'obtenir les paramètres de nature, d'état, de comportement mécanique et hydraulique d'un matériau susceptible de former la couche d'étanchéité.

Il convient de noter que les valeurs de conductivité hydraulique obtenues à partir d'essais en laboratoire, sur des échantillons de petite taille, sont souvent inférieures aux valeurs obtenues à partir d'essais in situ réalisés sur la couche d'étanchéité après sa mise en œuvre.

En pratique, la qualification d'un gisement de matériau naturel peut s'articuler en trois phases :

- La première phase, consiste à réaliser des essais relativement simples en vue d'obtenir des informations sur la nature argileuse du matériau et sur son homogénéité.

  Il s'agit principalement de la détermination des paramètres de nature (analyse granulométrique,

  limites d'Atterberg, analyse minéralogique), et des paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique).

- La deuxième phase consiste à réaliser la caractérisation hydraulique du matériau.
- La troisième phase de caractérisation porte sur le comportement mécanique du matériau et ses conditions de mise en œuvre s'il doit constituer une barrière rapportée. Le comportement mécanique sera étudié à partir d'essais triaxiaux, à la boîte de cisaillement, à l'œdomètre et au Proctor. Ces essais sont essentiels pour les opérations de dimensionnement et la définition des conditions de mise en œuvre.

L'utilisation d'un matériau naturel fin, implique que celui-ci soit compacté jusqu'à 1'obtention de la densité et de 1'épaisseur désirées, pour qu'il atteigne la valeur de perméabilité souhaitée. Soulignons que 1'effet du compactage sur la valeur de la perméabilité est très important. Pour atteindre 1'objectif de conception, on doit non seulement contrôler le poids unitaire ɣ du matériau, mais aussi la teneur en eau de compactage. Pour obtenir une perméabilité faible en conservant une bonne valeur de ɣ, l'expérience a montré que la teneur en eau devrait être environ 2 à 6 % supérieure à la teneur en eau optimale o_{pt} obtenue à 1'essai Proctor (à noter que dans la pratique elle est parfois bien supérieure). En fait, les critères de compacité appliqués aux barrières d'étanchéité dans les centres de stockage sont différents de ceux appliqués dans les études géotechniques dites « classiques » concernant les fondations de bâtiments ou les chaussées.

Dans les études géotechniques de fondations, le compactage du sol vise à améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau, tandis que dans le cas des ISD, le compactage des matériaux destinés aux barrières d'étanchéité vise surtout à améliorer les caractéristiques hydrauliques (faible perméabilité) de la couche de sol concernée. **[2]**

Tableau III.1 : Principaux essais de caractérisation en laboratoire des matériaux d'étanchéité naturels.

	Essai en laboratoire	Normes ou texte de référence	Observation
Paramètres de nature	Masse volumique des particules solides des sols	NF P 94-054	Méthode du pycnomètre à eau
	Analyse granulométrique	NF P 94-056 NF P 94-057	Evaluation en poids de la répartition des grains du sol suivant leurs dimensions
	Indice de plasticité (Ip)	NF P 94-051	Etendue du domaine de plasticité du sol
	Essai au bleu de méthylène (VBS)	NF P 94-061	Détermination de la quantité et de la qualité de l'argile
	Evaluation des carbonates	Pr X 31-108	Teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$)
	Etude minéralogique (par diffractométrie des rayons X)		Information sur la nature des minéraux constitutifs d'un sol
Paramètres d'état	Teneur en eau w (%)	NF P 94-050	Rapport masse d'eau sur masse des grains solides
	Poids volumique γ	NF P 94-053	Relation entre poids et volume
	Indice de consistance Ic (Limites d'Atterberg)	NF P 94-051	Aptitude du sol à supporter des charges
Paramètres de comportement mécanique	Essai œdométrique	Pr P 94-090	Tassement et compressibilité
	Essai Proctor	NF P 94-093	Caractéristique de compactage d'un sol
	Indice portant immédiat IPI	NF P 94-078	Portance du sol Résistance à la rupture
	Essai de cisaillement	NF P 94-071-1 NF P 94-071-2	Cohésion C (kPa) et angle de frottement φ (°). En vue de l'étude de stabilité
	Essai triaxial	NF P 94-070 NF P 94-074	Cohésion C (kPa) et angle de frottement φ (°). En vue de l'étude de stabilité
Paramètres de comportement hydraulique	Essai de perméabilité	NF X 30-441 NF X 30-442 NF X 30-443	Détermination du coefficient de perméabilité K (m/s)

CHAPITRE IV :

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

IV.1. Introduction :

Dans le but de valoriser le sable de fonderie de Berrouaghia (POVAL) dans le domaine de la géotechnique, une étude expérimentale a été réalisée sur les matériaux suivant :

- Sable usagé de fonderie (SUF) provenant de l'unité POVAL Berrouaghia
- Bentonite de Maghnia.
- Des mélanges (SUF/Bentonite) à différents pourcentages de Bentonite notamment 2%, 4%, 6% et 8%.

L'étude expérimentale consiste à réaliser des essais minéralogiques, physiques, mécaniques et hydrauliques.

IV.2. Analyses minéralogiques :

Afin de réaliser ces analyses, nous avons réalisé deux types d'essais :

- Diffraction aux rayons X (DRX)
- Microscopie électronique à balayage (MEB)

Ces essais ont été réalisés au laboratoire du CRD SONATRACH de Boumerdes (Centre de Recherche et du Développement) à l'aide des dispositifs suivants :

- Diffractomètre PANalytical : Empyrean (figure IV-1)
- Microscope électronique à balayage JEOL JSM-6340F (figure IV-2)

IV.2.1. Diffraction aux rayons X (DRX)

Des essais de diffraction aux rayons X (DRX) ont été réalisés sur des échantillons de sable de fonderie et de Bentonite pour identifier les différents minéraux constituants l'échantillon.

Résultats et interprétations des essais au DRX :

Les résultats obtenus montrent que la Bentonite de Maghnia est composée principalement de montmorillonite avec la présence de quartz, de calcite et des traces de zéolite, anorthite et muscovite (Figure IV-3).

Le minéral argileux prédominant étant la montmorillonite, l'échantillon considère est bien une bentonite.

D'autre part, les résultats des essais réalisés sur le sable de fonderie (Figure IV-4) montrent que le Quartz est le minéral prédominant. Le sable usagé de fonderie est classé comme un Sable siliceux.



Figure IV.1 : Diffractomètre PANalytical : Empyrean



Figure IV.2: Microscope électronique à balayage JEOL JSM-6340F

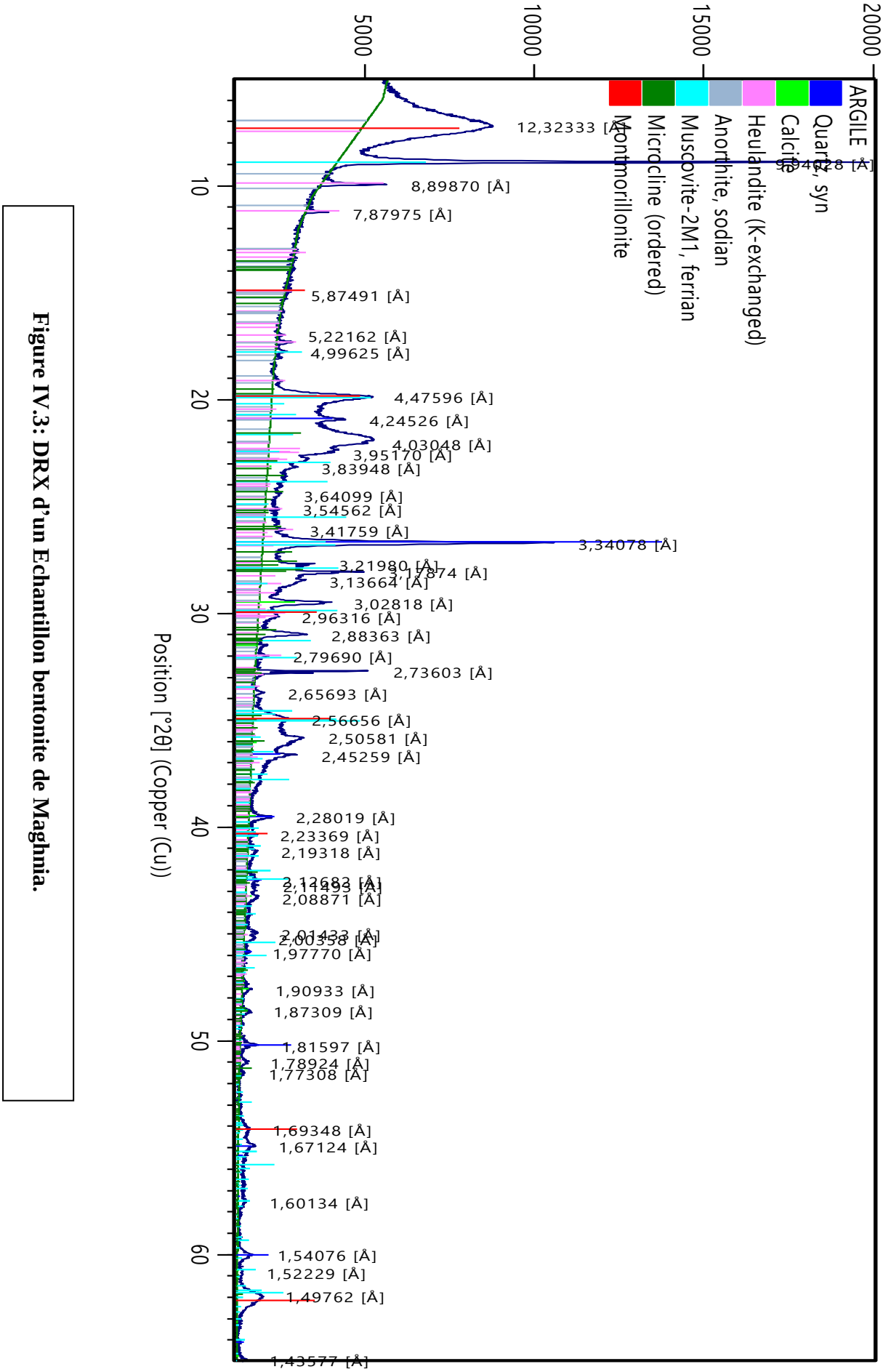


Figure IV.3: DRX d'un Echantillon bentonite de Maghnia.

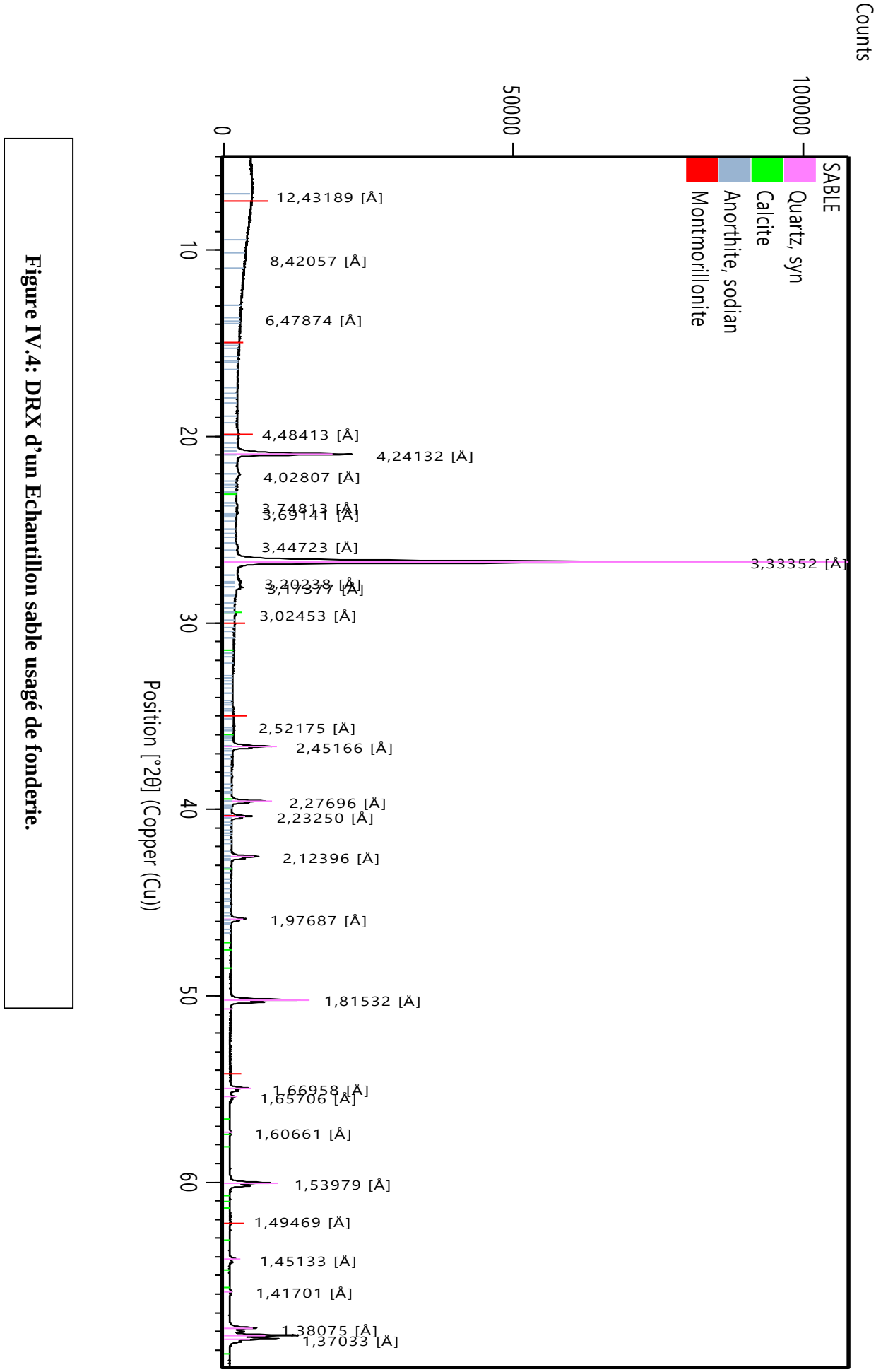


Figure IV.4: DRX d'un Echantillon sable usagé de fonderie.

IV.2.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) ou Scanning Electron Microscopy (SEM) en anglais) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

Résultats et interprétations :

Les résultats obtenus par MEB confirment les résultats déjà obtenus par DRX.

IV.3. Analyse granulométrique :

Selon les normes NF P94-056 et NF P94-057, des essais d'analyse granulométrique ont été réalisé sur des échantillons de sable de fonderie usagé et de Bentonite.

Chaque essai comporte deux phases :

- Analyse granulométrique par tamisage pour les particules de dimensions supérieur ou égal 80µm (0.08mm).
- Analyse granulométrique par sédimentation pour la partie fine dont le diamètre des particules est inférieur à 80µm.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures IV-5 et IV-6 ci-dessous.

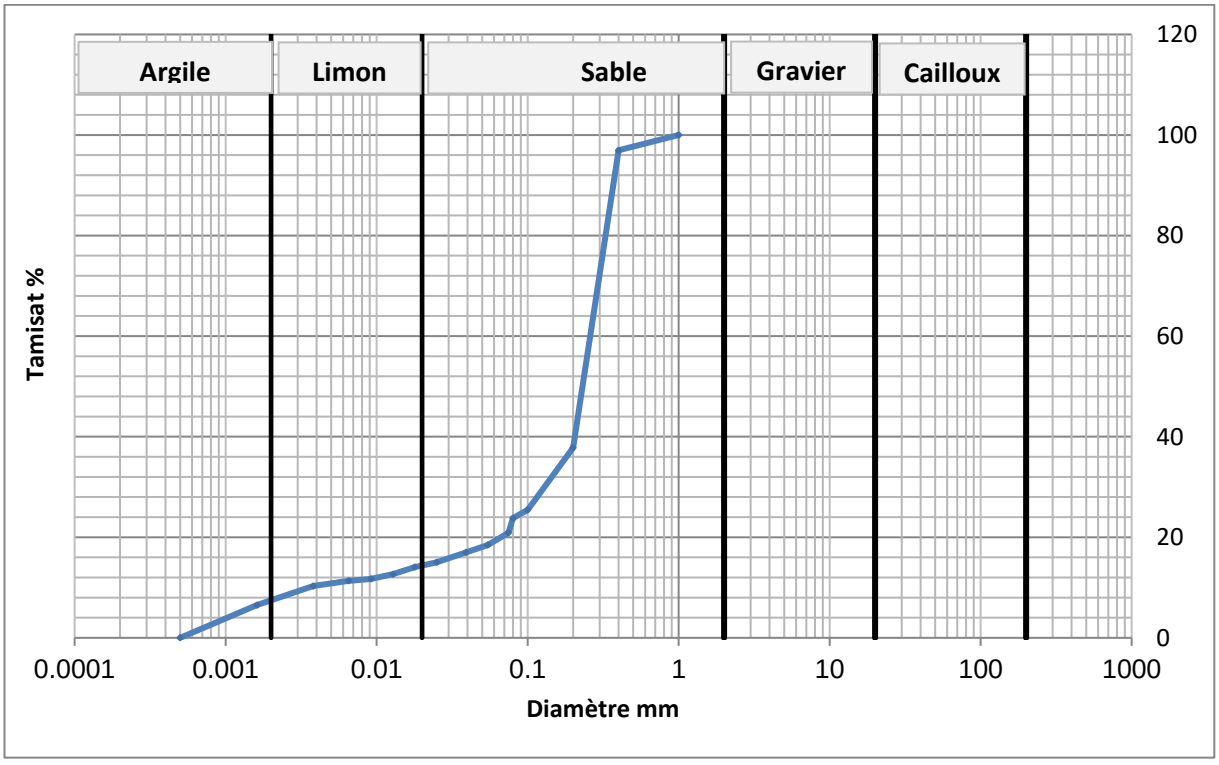


Figure IV.5: Courbe granulométrique du sable usagé de fonderie

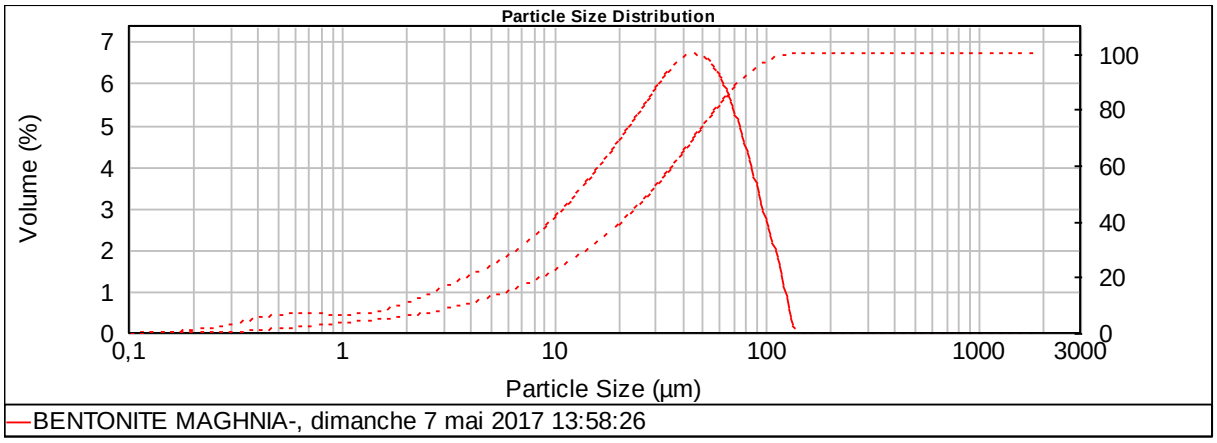


Figure IV.6 : **Analyse granulométrique du Bentonite de Maghnia**

A partir d'analyses granulométriques on peut classifier les deux matériaux comme suit :

- Sable usagé de fonderie : sable peut argileux avec des traces de limon
- Bentonite de Maghnia : argile.

IV.4. La masse volumique des grains solides ρ_s :

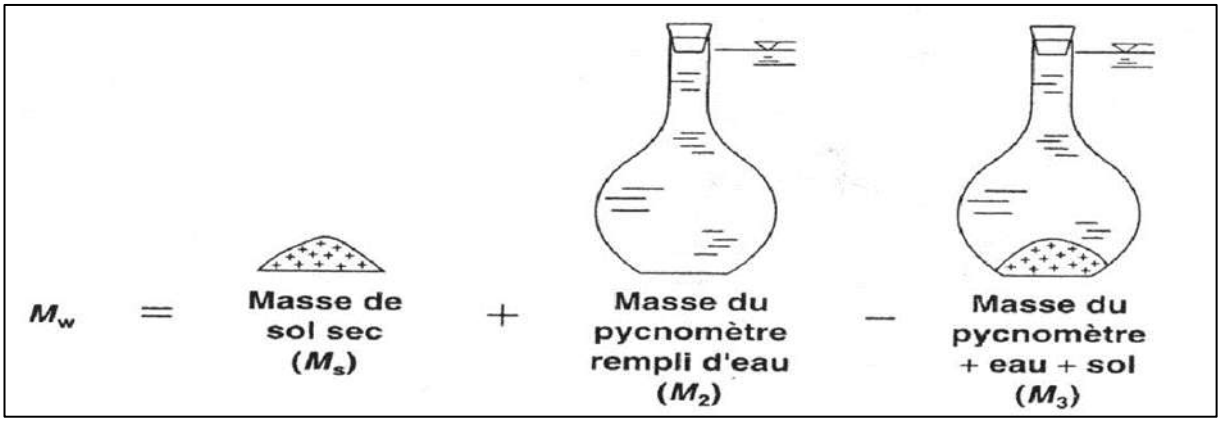


Figure IV.7 : La masse volumique des grains solides ρ_s

L'essai consiste à trouver la masse d'eau (Mw) déplacée par émersion dans un pycnomètre d'une masse connue de sol sec (Ms). Pour ce faire, on mesure la masse d'un pycnomètre rempli d'eau distillée et désaérée (M2) et la masse du même pycnomètre dans lequel on a placé l'échantillon de sol et qu'on a rempli d'eau distillée et désaérée (M3). Les mesures des masses M2 et M3 se font à une même température (T2). La masse d'eau déplacée est alors égale à :

Mw= Ms+M2-M3

$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$ **Avec :**Ms : la masse des grains solides

Vs : Volume des grains solides

Des essais de détermination de la masse volumique des grains solides ont été réalisés sur des échantillons de sable usagé de fonderie et de bentonite de Maghnia (figure IV-8).



Figure IV.8 Détermination de la masse volumique des grains solides

Des essais de détermination de la masse volumique des grains solides ont été réalisés sur des échantillons de sable de fonderie usagé et de Bentonite.

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Masse volumique des grains solides de la bentonite de Maghnia et du sable usager de fonderie

	Sable usage de fonderie	Bentonite de Maghnia
Masse volumique des grains solides (t/m^3)	**2.04**	**2.64**

IV.5. Essai au bleu de méthylène :

Selon la norme NF P 94-061, l'essai au bleu de méthylène VBS sert à déterminer la quantité d'argile dans le sol étudié.

Les résultats de l'essai VBS effectué sur l'échantillon du sable usagé de fonderie sont présentés sur la figure IV-8 ci-dessus :

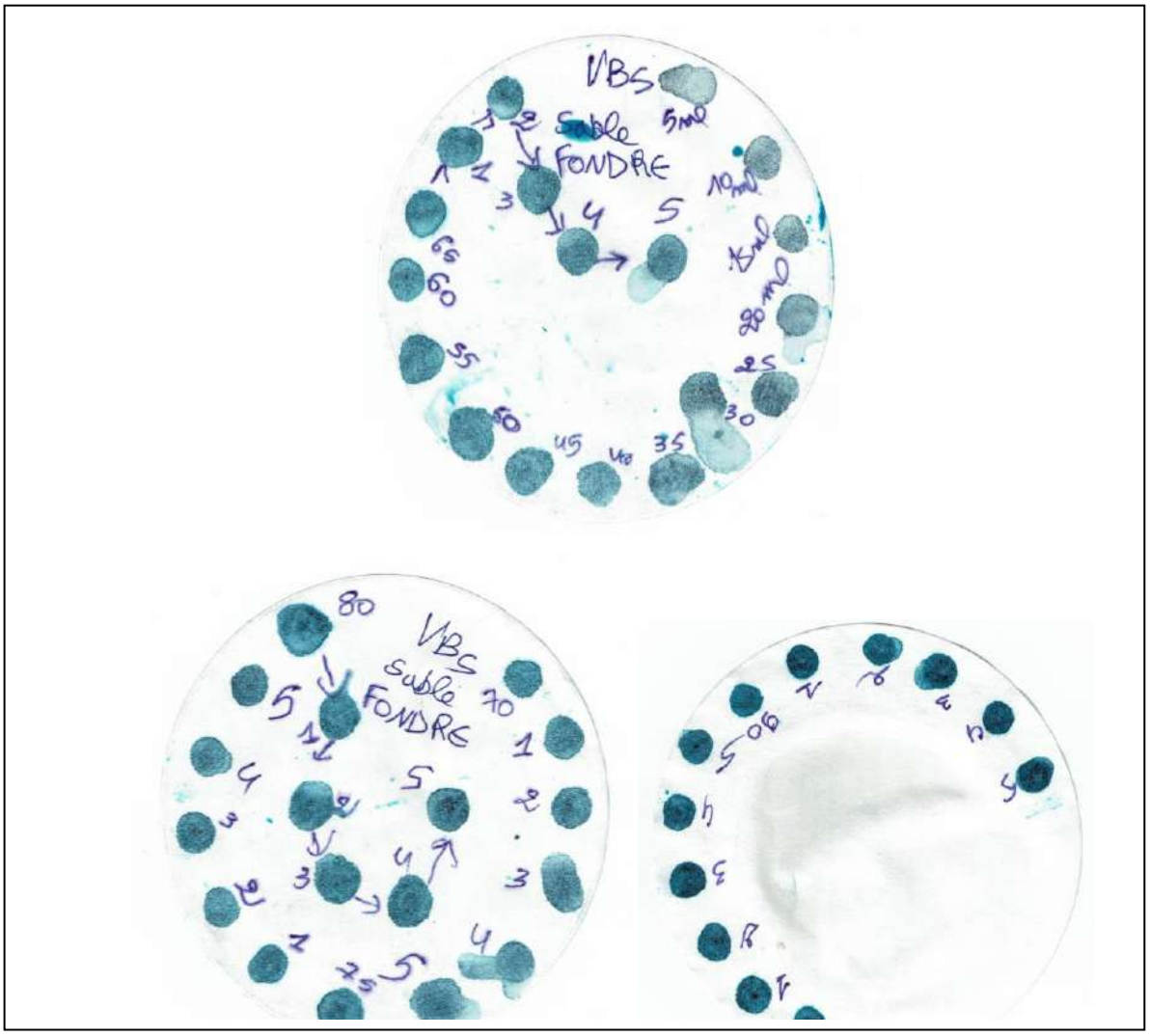


Figure IV.9: Essai de bleu de méthylène effectué sur l'échantillon du sable usagé de fonderie

Les résultats de l'essai effectué sur l'échantillon de sable usagé de fonderie sont montés sur la figure IV-9

$$VB=\frac{90}{60}=1,5$$

L'échantillon de sable usagé de fonderie contient de l'argile active (bentonite).

IV.6. Essais mécaniques :

IV.6.1. Essai Proctor :

Selon la norme NF P 94-093, l'essai Proctor normal permet de reproduire au laboratoire les conditions de compactage sur chantier.

L’essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale d’un sol ($\rho_{d\,max}$, ω_{opt})

L’essai consiste à compacter dans un moule de dimensions normalisées, à l’aide d’une dame, selon un processus bien défini. L'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son masse volumique sèche après compactage. L’essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On trace cette courbe qui représente un maximum dont l’abscisse est la teneur en eau optimale et l’ordonnée la masse volumique sèche.

Des mélanges de sable usagé de fonderie ont été préparés avec différents pourcentages de bentonite de Maghnia. Notamment : 2%, 4%,6%, et 8%.

Pour préparer un mélange de 2% de bentonite, nous avons utilisé 200g de bentonite et 9800 g du sable usagé de fonderie. Ces quantités ont été mélangées manuellement pour avoir un mélange homogène de 10 kg. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en cinq portions de 2kg (voir figure IV-10).



Figure IV.10: Préparation des mélanges pour les essais Proctor



Figure IV.11: Dispositif de compactage

Résultats et interprétation :

Les résultats des essais Proctor sont présentés sur le tableau et les figures suivants :

Tableau IV.2: Résultat des essais Proctor

Bentonite	**0**	**2**	**4**	**6**	**8**
W opt (%)	**13,80**	**14,30**	**14,90**	**15,30**	**15,50**
P_{dMax} (T/m3)	**1,860**	**1,840**	**1,810**	**1,790**	**1,780**

Figure IV.12 : Résultats des essais Proctor.

Pour nous permettre interpréter l'évolution des (Wopt, ρdmax), nous avons réalisé les courbes de tendances mentionnées sur les figures IV-13etIV-14

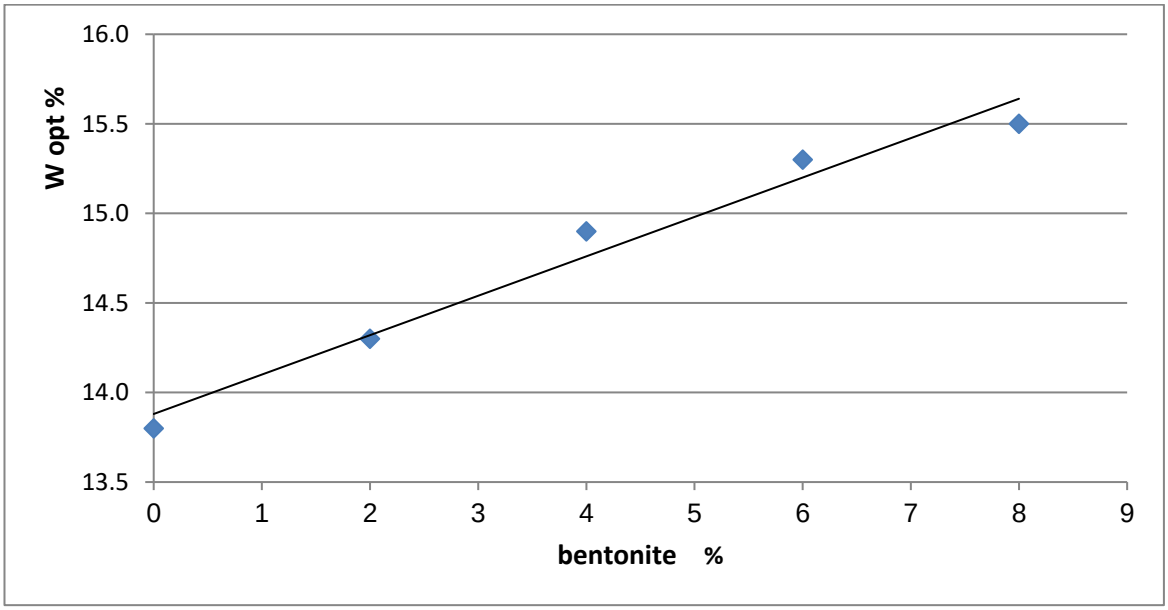


Figure IV.13 : Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de bentonite.

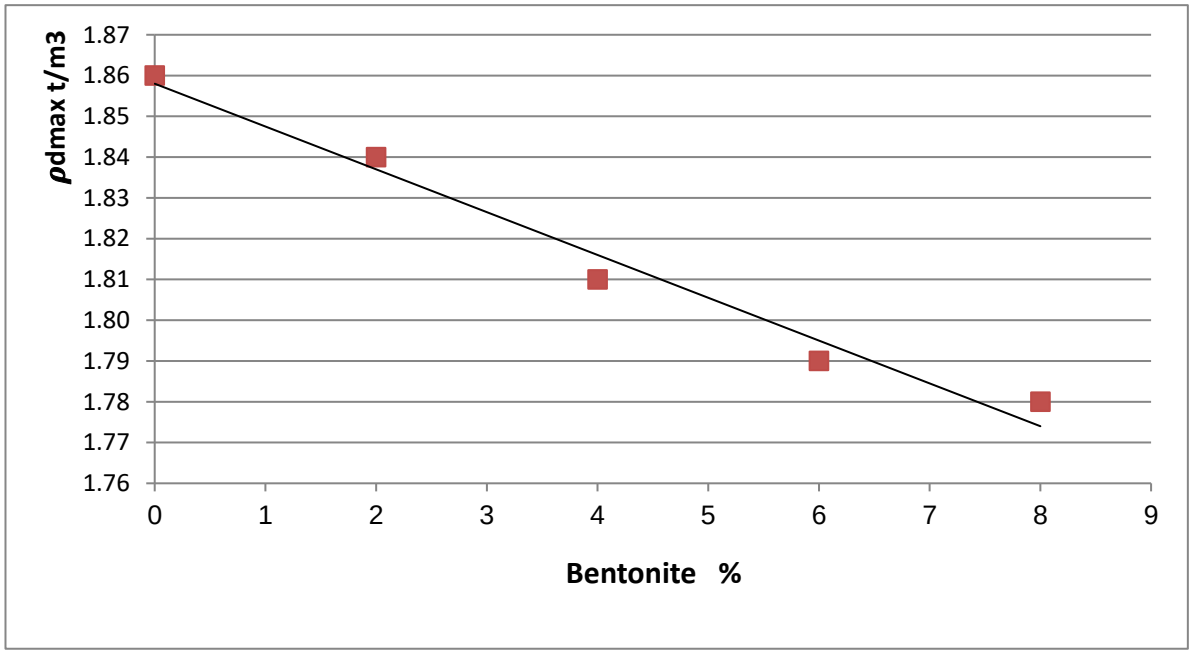


Figure IV.14: Variation de la masse volumique sèche maximale en fonction du pourcentage de bentonite.

A partir des figures IV-13 et IV-14, on constate que les valeurs de la masse volumique sèche ρ_{dmax}sont inversement proportionnelles avec le pourcentage de bentonite. Par contre les valeurs de la teneur en eau optimale sont proportionnelles avec le pourcentage de bentonite.

IV.6.2. Détermination des paramètres de la résistance au cisaillement :

Selon la norme NF P 94 – 071-1 des essais non consolidés non drainé (UU) de cisaillement direct à la boîte de Casagrande ont été réalisés sur des mélanges sur les pourcentages de 2%,4%,6% et 8% de bentonite.

Les échantillons du sable usagé de fonderie/bentonite ont été confectionnés dans la boite de cisaillement aux paramètres optimal.

Pour chaque essai de cisaillement direct, trois contraintes normales ont été utilisées 1, 2 et 3 bar avec une vitesse de cisaillement de 0.5mm/min.

Résultats et interprétations :

En fonction de pourcentages de bentonite, des essais ont été effectués pour étudier les paramètres suivants :

- Variation de la cohésion ;
- Variation de l'angle de frottement ;
- Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de pourcentages de bentonite ;
- Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du pourcentage de bentonite pour les contraintes normales σ =1 bar, 2 bar et 3 bar.

Les résultats des essais de cisaillement sont résumés sur les tableaux et les figures suivants :

Tableau IV.3: Résultat d'essais de cisaillement a la boite de Casagrande.

Bentonite ajoutéau SUF%	0%	2%	4%	6%	8%
C (kPa)	22,00	24,00	33,80	39,91	56,02
φ (°)	39,00	32,00	36,25	33,69	31,20

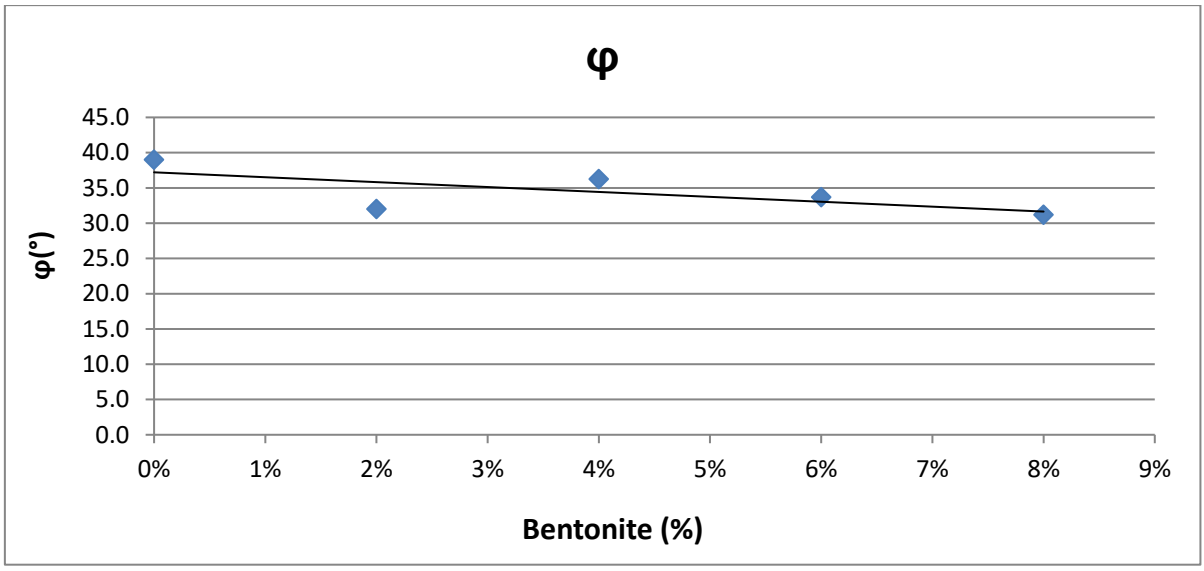


Figure IV.15: Variation de la cohésion en fonction du pourcentage de bentonite.

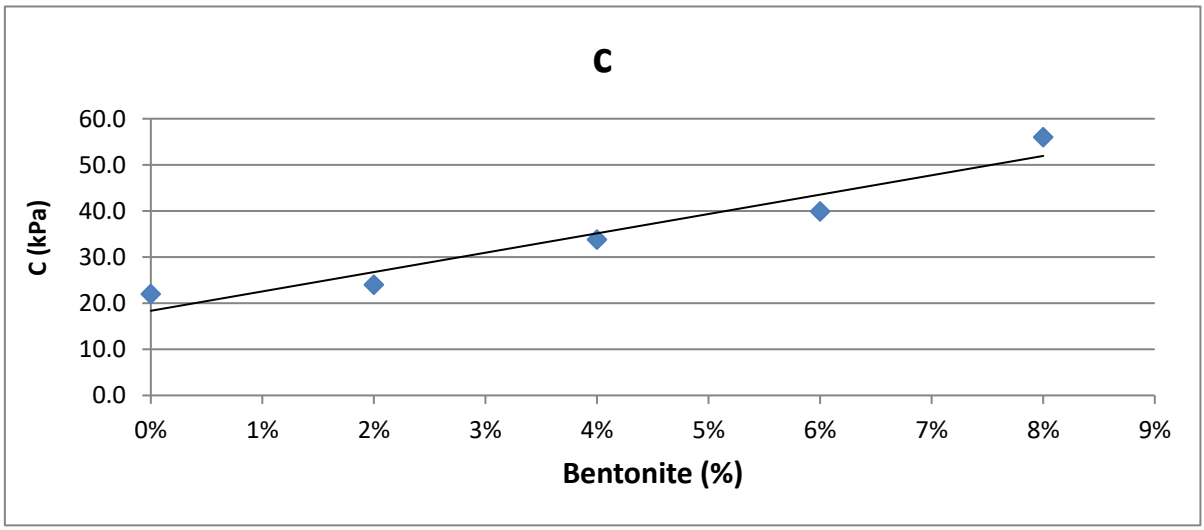
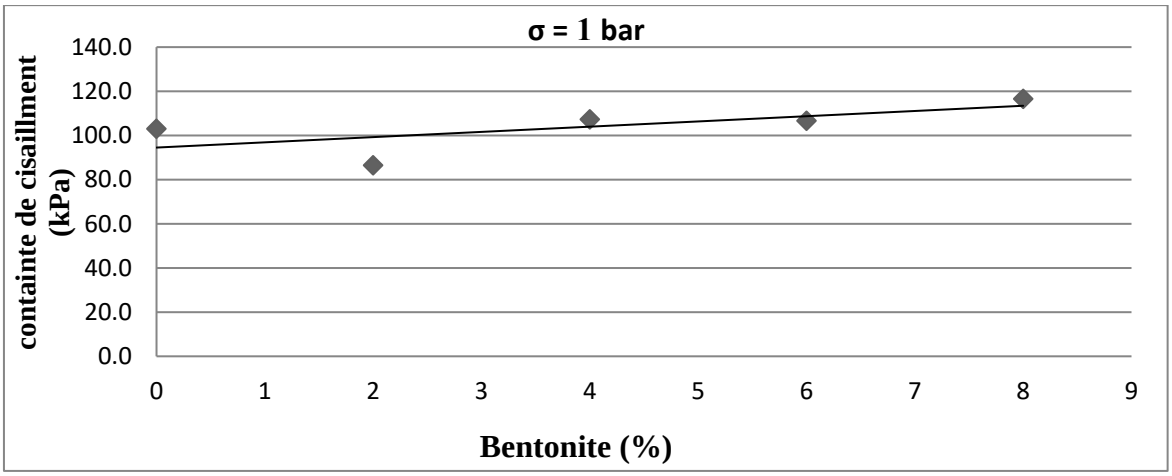
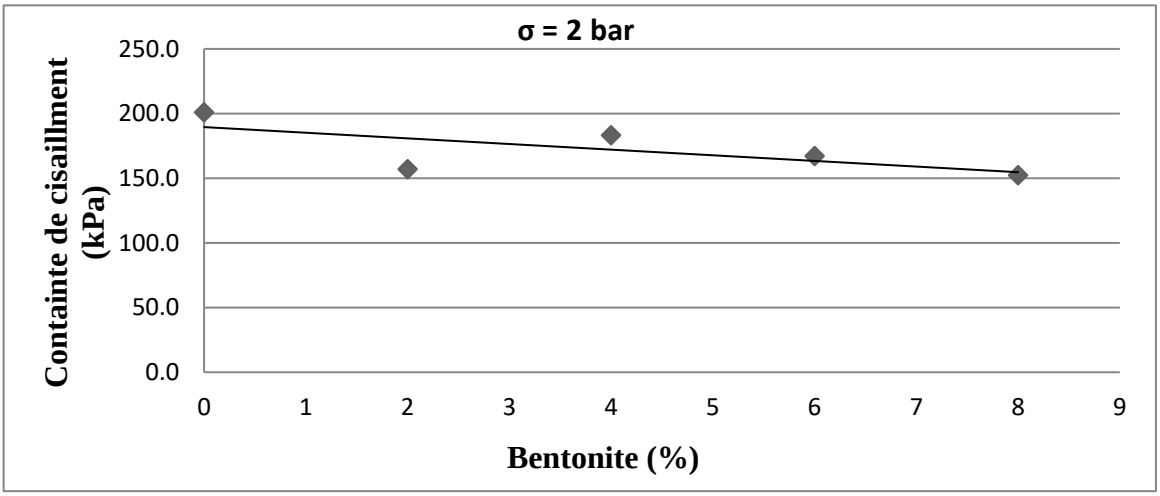


Figure IV.16: Variation de l'angle frottement en fonction du pourcentage de bentonite.

Tableau IV.4: Résultat des contraintes de cisaillement en fonction de contrainte normal et de pourcentages de bentonite.

Bentonite%	0	2	4	6	8
C kPa	22,0	24,0	33,8	39,9	56,0
φ (°)	39,0	32,0	36,3	33,7	31,2
σ =100 kPa	103,0	86,5	107,3	106,6	116,6
σ =200 kPa	201,0	157,0	183,2	167,1	152,3
σ =300 kPa	243,7	188,1	221,1	200,7	182,3





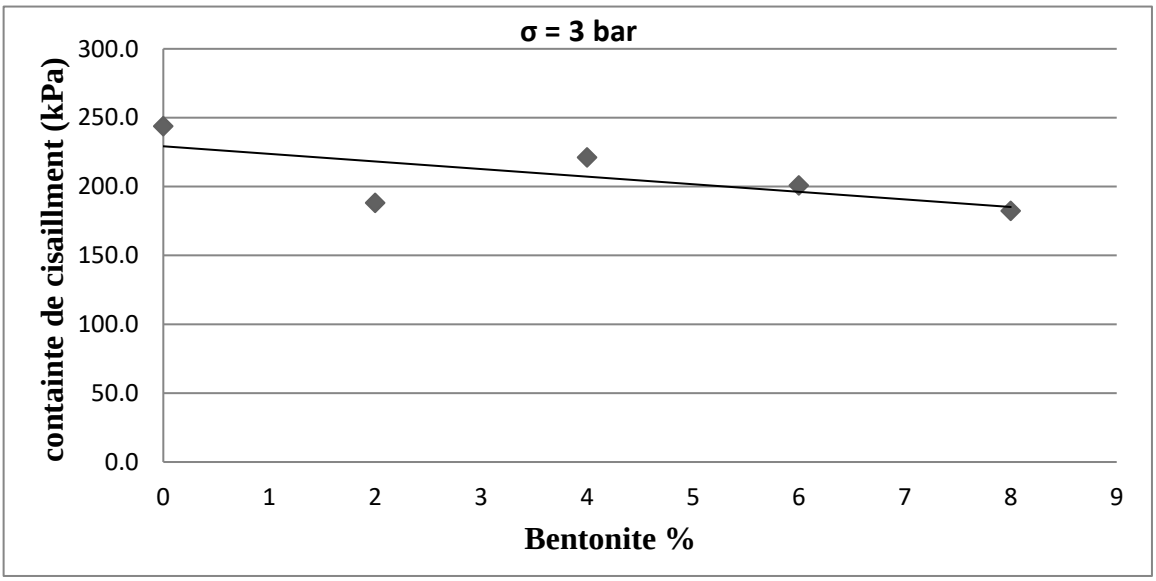


Figure IV.17: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du pourcentage de bentonite pour σ3=bar.

D'après l'analyse des résultats, nous avons constaté ce qui suit :

L'angle de frottement est inversement proportionnel avec le pourcentage de la bentonite.

La cohésion varie proportionnellement avec le pourcentage de la bentonite.

La contrainte tangentielle :

Pour σ = 1bar, est proportionnelle avec le pourcentage de la bentonite.

Pour σ = 2bar ou σ = 3bar, est inversement proportionnelle avec le pourcentage de la bentonite.

IV.7. Essai de perméabilité :

Les mesures de perméabilité ont été effectuées avec une perméamétrie à charge variable (figure IV-18). Il consiste à créer une différence de charge entre le bas et le haut de l'échantillon qui conduit à un écoulement. Le perméamètre, du type à charge variable, est fixé sur le support solidaire du bâti à l'aide de vis et d'écrous à oreilles. Il comporte un tube placé devant une échelle graduée en charge hydraulique de 10 à 60 cm et qui est réglable en hauteur pour être étalonnée en fonction de la hauteur de l'échantillon. Un réservoir permet de saturer les circuits

Les échantillons sont préparés en mélangeant en premier le sable usagé de fonderie avec le pourcentage choisi de la bentonite sèche, de l'eau est ajoutée afin d'obtenir la teneur en eau (w opt) voulue dans le mélange.

Les échantillons ont été compactés aux optimum Proctor.

Après avoir mesuré l'abaissement du niveau d'eau dans le tube de section connue pour un temps déterminé, on peut déduire le débit volumétrique. En connaissant la section de l'échantillon, on peut donc calculer la perméabilité. Elle est donnée par la formule suivante :

$$k=2{,}3\frac{a}{A}\frac{l}{\Delta t}\log\frac{h_1}{h_2}$$

Avec a, A et l qui représentent respectivement : la section du tube, la section et la hauteur de l'échantillon.

Δt c'est l'intervalle de temps entre t_1 et t_2.

h_1 et h_2 représentent la différence de charge à t_1 et t_2



Figure IV.18: Dispositif de la perméabilité à charge variable

Résultats et interprétations

Les résultats des essais réalisés ont été les tableaux suivants :

Tableau IV.5: Résultat des essais de perméabilité

Sable usagé de fonderie	Perméabilité (m/s)
Etat lâche	4.5×10^{-7}
Etat dense (ρdmax)	9.7×10^{-10}

On remarque que la perméabilité du sable usagé de fonderie varie de 4.5×10^{-7} à 9.73×10^{-10}, soit une différence de 400 fois de moins.

A partir de ces constatations, on peut dire que l'objectif d'avoir une perméabilité k inférieure à 10^{-9}sans l'ajout de la bentonite.

IV.8. Conclusion :

Dans le cadre de la valorisation des déchets industriels et les matériaux locaux, une étude expérimentale a été réalisée sur le sable usagé de fonderie (POVAL Berrouaghia) et la bentonite de Maghnia.

L'étude expérimentale réalisée comporte des essais physiques (détermination de la masse volumique des grains solides, minéralogiques (DRX et MEB), mécaniques (Proctor et cisaillement à la boite de Casagrande) et hydrauliques (Essai de perméabilité).

Les résultats obtenus ont montré que :

- la bentonite de Maghnia est composée principalement de montmorillonite ;
- le sable usagé de fonderie est classé comme un Sable argileux avec des traces de limon ;
- la masse volumique sèche maximale $\boldsymbol{\rho_{d\,Max}}$ diminue et la teneur en eau optimale $\boldsymbol{w_{opt}}$ augmente en fonction des pourcentages de bentonite ajoutés ;
- la cohésion augmente avec le pourcentage de bentonite, tandis que l'angle de frottement diminue ;
- La conductivité hydraulique du sable usagé de fonderie compacté est inférieure à 10^{-9} m/s.

Le sable usagé de fonderie (SUF) provenant de l'unité Pompes et Vannes Algérie (POVAL) de Berrouaghia est considéré comme un déchet industriel qui a un effet nocif sur l'économie et sur l'environnement. Son mode de stockage actuel et sa composition peuvent provoquer la contamination des nappes d'eau souterraine et par conséquent la dégradation de l'environnement.

Dans le cadre de la valorisation des déchets industriels et les matériaux locaux dans le domaine de la géotechnique, une étude expérimentale a été réalisée sur le SUF de Berrouaghia et de la Bentonite de Maghnia.

Cette étude expérimentale, réalisée au niveau de plusieurs laboratoires, comporte des essais de caractérisation physique, minéralogique, mécanique et hydraulique.

Les essais expérimentaux ont été effectués sur des échantillons de SUF, de Bentonite et sur des mélanges (SUF/ Bentonite).

Les résultats obtenus nous ont permis de trouver une solution adéquate pour le stockage du SUF. Cette solution consiste à réaliser des zones de stockage étanches en empêchant l'infiltration des polluants aux nappes d'eau souterraine. L'étanchéité est assurée par la réalisation d'une barrière passive à base du SUF.

L'ajout de la Bentonite au SUF à différents pourcentage augmente la cohésion $\boldsymbol{C}$ et diminue l'angle de frottement interne $\boldsymbol{\varphi}$.

La résistance au cisaillement $\boldsymbol{\tau}$ augmente en fonction du pourcentage de Bentonite sous les contraintes normales de **1,00** bar et diminue sous les contraintes de **2,00** et **3,00** bars; la difficulté d'interpréter ces résultats donne naissance à une nouvelle problématique pour d'éventuelle étude complémentaire.

BIBLIOGRAPHIE

[1] LACHACHE.Rafika «Effets des pollutants sur la consolidation d'un mélange sable/bentonite utilisé dans l'imperméabilisation d'une décharge» thèse de magister université de Constantine (2014).

[2] Youcef Kehila, Fatiha Mezouari « Intérêt des matériaux géo synthétiques dans la conception des centres d'enfouissement technique (CET) en Algérie » 2011.

[3] BENALLAL Abdelheq« Etude d'impact de centre d'enfouissement technique d'Ain Témouchent (Sidi Ben-Adda) sur l'environnement» memoire de master université de Tlemcen (2016).

[4] Ait Saadi Lotfi., Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.

[5] Winiarski.T « Analyse systémique du fonctionnement de l'interface système naturel et système anthropisé exemple de l'interface décharge/ aquifère » thèse de doctorat, université Claud Bernard-Lyon 1 (1994).

[6] L.K. Koffi., «Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium», Thèse de doctorat de l'université de Limoges, (2006).

[7] Luckham, P. F. and S. Rossi (1999), Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions Adv. Colloid Interface Sci. 82.

[8] BOUGDAH NABIL« Etude de l'adsorption de micropolluants organiques sur la bentonite» mémoire de master université de Skikda (2007).

[9] BENTAL-ENOF: Etude technique et économique des gisements de M'Zila (Mostaganem) et Hammam Boughrara (Maghnia), Vol I Rapport Final, BUMIGENE INC., Monréal (Québec), Canada H3B 1P5,Mars 2010.

[10] Bernard, Vecoven J., 1986. « Les sables de fonderie : Suivi du chantier CD 250 ISSANS RAYMANS. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1986.

[11] Brouwet J., Vecoven J., Moset, 1985. « Traitement des sables de fonderie par un liant.» Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Juin 1985.

[12] Centre Technique de l'industrie de la Fonderie (CTIF), 1982. « Comité sols et déchets solides. Campagne d'essais ».

[13] CETE Nord-Pas-de-Calais, Mines de Douai., 2002. « Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels (PREDIS). Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des sables de fonderie. Décembre 2002.

[14] Chevalier, 1995. « Utilisation de sable de grenaillage de fonderie en remblai de tranchée. » Compte rendu de planche d'essais Renault, 1995.

[15] Devaux P., 1984. « Les sables de fonderie : Utilisation en technique routière. » Compte rendu d'étude du LRPC de Strasbourg, Mai 1984.

[16] Duquet B. « Utiliser les déchets dans les travaux publics, valorisation des sables de fonderie-réglementation-expérimentations et opérations pilote », CTIF, 2010.

[17] Genet, 1996. « Valorisation des sables de fonderie en technique de chaussées : Etude de faisabilité. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Juillet 1996.

[18] Genet, 1998. « Bilan des études et suivi de chantier RN 81» Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1998.

[19] Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels. « Plan Régional d'Elimination des Déchets Industriels et des Déchets de Soins à Risques (PREDIS), Nord-pas-de-Calais »,1996.

[20] Guide technique régional Nord/Pas de Calais « Filières de valorisation des déchets du BTP et des co-produits industriels de la région Nord-Pas de Calais », Guide d'aide à la décision à destination des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre et bureaux de contrôles », Juin 2011.