



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Conception et Calcul des Structures

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Reggad Fatima Zouhra et Keniche Aicha

Thème

**Comportement hydro-mécanique des barrières ouvragées
(Tuf + Sable calcaire +Bentonite)
Application pour les centres d'enfouissement techniques**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Pr: ZAIDI .A	Professeur	Président
Mr: NOUIOUA.T	M.A.A	Examineur
Dr: GUEDDOUDA.M.K	M.C.A	Encadreur
Dr. GOUAL.I	M.C.A	Co- Encadreur

Promotion : juin -2017



Remerciement

Nous tenons à exprimer nos plus vives reconnaissances à **Mr GUEDDOUDA Mohamed Kamel** maitre de conférences l'université Ammar Thelidji Laghouat, avec qui nous avons pu profiter de ses connaissances scientifiques, de ces conseils judicieux et d'apprécier sa constante disponibilité et sa grande qualité humaine. Nous désirons chaleureusement lui rendre hommage ici

Nous adressons nos profondes gratitudees à, **Mr GOUAL Idriss** maitre de conférences à l'université Ammar Thelidji Laghouat, avec qui nous a permis de mener à bon terme ce travail de recherche.

Nous voudrions remercier **Mr ZAIDI** Professeur à l'université Ammar Thelidji Laghouat qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire , qu' il puisse trouver ici l'assurance de notre respectueuse gratitude .

Nous remercier également **Mr NOUIOUA .T** charge de cours à **l'université** Ammar Thelidji Laghouat membre jury d'avoir accepter d'examiner ce travail. Nous remercions pareillement l'ensemble de membres de laboratoire de génie civil que nous avons côtoyés

Quotidiennement notamment à **Mr DEMDOUM Abdellah** doctorant à l'université de Laghouat

Résumé :

Le stockage des déchets dans l'environnement pose un problème important pour les ingénieurs. Le problème est lié à la pollution éventuelle de l'eau souterraine par des contaminants toxiques, notamment des métaux lourds.

La pollution de l'environnement causée par les percolations de lixiviats issues de déchets confinés dans les sites d'enfouissement est un problème assez répandu et de nombreuses études lui ont été consacrées.

Le présent travail concerne une étude de valorisation de matériaux locaux en vue d'une utilisation comme barrière ouvragée dans les fonds et les flancs d'installations de stockage de déchets (ISD).

Avec la production des grandes quantités d'ordures ménagères et des déchets industriels, l'enfouissement technique des déchets est devenu important. Parmi les principales techniques utilisées pour assurer une bonne étanchéité du fond d'un CET (centre d'enfouissement technique) : les couches sable/ bentonite qui doivent résister structurellement dans le temps aux attaques physiques et chimiques et offrir de bonnes propriétés mécaniques et physico-chimique. Les matériaux de base étant le sable calcaire et tuf de la région de Laghouat et la bentonite de Maghnia.

Les essais basés sur le critère de perméabilité (essais œométriques) ont fait apparaître que la formulation composée de 80% tuf +20 % de sable + 10 % de bentonite (T₈₀SC₂₀B₁₀) satisfait ce critère pour la conception des barrières ouvragées des fonds des centres Installations de Stockage des Déchets(ISD).

Dans le cas des essais de cisaillement direct des mélanges T-SC-B, la formulation composée de 80% de Tuf et 20% sable calcaire et 10 % de bentonite (T₈₀SC₂₀B₁₀) correspondant à un angle de frottement de l'ordre de 13.49°. Cette valeur est conforme à l'ordre de grandeur recommandé par le comité français des géosynthétiques (2011) pour les interfaces sols/géosynthétiques bentonitiques dans les (ISD).

Finalement, On conclut que la formulation à base de tuf, sable de calcaire et de bentonite adoptée répond parfaitement aux exigences de la réglementation en vigueur et constitue un produit économique à base de matériaux locaux disponibles en abondance pour la conception des barrières des fonds des ISD.

Mots-clés : barrières ouvragées, mélange tuf-sable/bentonite, conductivité hydraulique, résistance au cisaillement

ملخص

تخزين النفايات في البيئة مسألة هامة للمهندسين. المشكلة تتعلق إلى تلوث محتمل للمياه الجوفية من الملوثات السامة، بما في ذلك المعادن الثقيلة

التلوث البيئي الناجم عن تسرب عصارة النفايات (الراشح) المقفل عليها في أماكن الردم هو مشكل سائد وكرست له عدة دراسات .

العمل الحالي يوضح دراسة تقييميه للمواد المحلية من ناحية استغلالها في برمجة أماكن تخزين النفايات (الطبقة السفلية والجانبية) المواد المستعملة (الرمل الكلسي والطيف) بالاغواط و(البينتونيت)بمغنيه ولاية تلمسان

مع إنتاج كميات كبيرة من القمامة والنفايات الصناعية، أصبحت مكب النفايات المهم. ومن بين التقنيات الرئيسية المستخدمة لضمان ختم جيدة الجزء السفلي من هذا: طبقات الرمال / البنتونيت التي يجب أن تتحمل هيكليا مع مرور الوقت إلى الاعتداءات الفيزيائية والكيميائية وتقديم الخواص الميكانيكية والفيزيائية جيدة

التجارب متأسسة على نظرية النفاذية (تجربه ادومتر) وتجلي لنا تشكيل مركب 80 % طيف و20% رمل كلسي و10% بينتونيت وهذه النظرية كافييه لهيكله طبقات ذات السياج مسدود متقن مخصص لتخزين لنفايات

في حالة تجارب القص المباشر لمزيج من العينات (طيف , رمل كلسي , البينتونيت) تشكيل المركب 80 % طيف و20% رمل كلسي و10% بينتونيت ذو زاوية الاحتكاك 13.49 درجه وهذه النتيجة موصى بها من اجل طبقات اماكن التخزين

و أخيرا نستخلص إن التشكيلية المكونة من الطيف و رمل الكلسي و البينتونيت تجيب بإحكام على متطلبات التنظيمية و ذلك بالأخذ بعين الاعتبار الجانب الاقتصادي و الذي يتأسس على استغلال المواد المحلية المتوفرة في إنشاء الطبقات السفلية لاماكن تخزين النفايات

الكلمات المفتاحية : طبقات ذات سياج مسدود . مزيج (رمل – البينتونيت) . النفاذية المائيه – الطيف – الرمل الكلسي - مقاومة القص



Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu qui illumine mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études.

Je dédie le fruit de mes années d'étude :

*Mon père **Moussa** et ma mère **Messaouda** qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Pour m'avoir donné les moyens de réussir. Vous m'avez apporté votre confiance depuis toutes ces années pour leur soutien sans faille, pour le courage et le sacrifice qu'ils ont consentis pendant la durée de mes études, que dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

A mes chers Frères : Mohamed, Ali

A mes chères sœurs : Amel, Amina, Marwa

A mon amie de ce travail : Fatima Zohra

A toute mes amies : Safia, Souad, Hanane, Oussama, Chafik, Abdelkader et toutes amies son expection

*A tous mes enseignants de puis le primaire jusqu'à maintenant surtout à mon encadreur **M^o GUEDDOUDA** pour son encadrement, sa compréhension et sa gentillesse durant tout le long de mon mémoire.*

*Sans oublier toute la promotion 2017 du **2^{iem}** Master Génie civil.*

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant les moments difficiles.

Aicha



Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu qui illumine mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études.

Je dédie le fruit de mes années d'étude :

*Mon père **Habib** et ma mère **Messaouda** qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Pour m'avoir donné les moyens de réussir. Vous m'avez apporté votre confiance depuis toutes ces années pour leur soutien sans faille, pour le courage et le sacrifice qu'ils ont consentis pendant la durée de mes études, que dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

A mes chers Frères : Saifddine

A mes chères sœurs : Houda, Hiba, Aya

A mon amie de ce travail : Aicha

A toute mes amies : Safia, Souàd, Amel

*A tous mes enseignants de puis le primaire jusqu'à maintenant surtout à mon encadreur **M^o GUEDDOUDA** pour son encadrement, sa compréhension et sa gentillesse durant tout le long de mon mémoire.*

*Sans oublier toute la promotion 2017 du **2^{iem}** Master Génie civil.*

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant les moments difficiles.

Fatima



SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des photos	
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur les installations des stockages des déchets (ISD)	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les centres de stockage de déchets.....	3
I.2.1. Définitions des centres d'enfouissement technique.....	4
I.2.2. Structure d'un centre d'enfouissement.....	6
I.2.3. Définitions juridiques des déchets.....	6
I.2.4. Production des déchets.....	9
I.2.5. Classification des centres d'enfouissement technique	10
I.2.6. Barrières étanches.....	14
I.3. Choix des matériaux	20
I.3.1. Critères de nature.....	20
I.3.2. Critères d'ouvrabilité.....	21
I.3.3. Critères de perméabilité.....	21
I.4. Réalisation des CET : contextes réglementaires	21
I.4.1. Principes élémentaires de la conception du C.E.T.....	22
I.4.2. Choix du site.....	22
I.4.3. Réalisation de la barrière : réglementations algériennes.....	22
I.4.4. Comportement à long terme.....	26
I.5. Gestion de C.E.T Ben N. Benchohra de la wilaya de Laghouat	27
I.6. Conclusion.....	28
Chapitre II. Techniques expérimentales	
II.1. Introduction	30
II.2. Essais d'identification.....	30
II.2.1. Limite d'Atterberg.....	30
II.2.2. Essai de Proctor Normal.....	32
II.2.3. Analyse granulométrique.....	34
II.2.4. Equivalent de sable.....	36
II.3. Paramètres de gonflement.....	38
II.3.1. Estimation indirecte du gonflement libre	38

II.3.2. Méthodes de détermination des Paramètres de gonflement.....	39
II.3.3. Mesure du gonflement libre.....	39
II.4. Conductivité hydraulique.....	40
II.4.1. Mesure indirecte de la perméabilité	40
II.4.2. Principe de l'essai	40
II.5. Cisaillement direct.....	41
II.5.1. But d'essais.....	41
II.5.2. Essai de cisaillement direct.....	41

Chapitre III : Caractérisation des sols étudiés

III.1. Introduction.....	42
III.2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	42
III.2.1. Bentonite.....	42
III.2.2. Tuf.....	45
III.2.3. Sable calcaire.....	48
III.2.4. Mélanges (Tuf- Sable calcaire).....	52
III.2.5. Mélanges (Tuf- Sable calcaire - bentonite).....	55
III.3. Paramètres de gonflement des mélanges	59
III.3.1. Mesure du gonflement libre.....	60
III.4. Conclusion	62

Chapitre IV : Comportement Hydrique et mécanique des mélanges

IV.1. Introduction.....	63
IV.2. Comportement Hydrique.....	63
IV.2.1. Principe de l'essai oedométrique.....	63
IV.2.2. Résultats et discussion.....	64
IV.3. Comportement mécanique.....	70
IV.3.1. Résistance au cisaillement des mélanges (Tuf-sable calcaire – bentonite) à teneur en eau de compactage.....	70
IV.3.2. Résultats et discussion.....	71
IV.4. Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques	79
Annexe.....	82

Introduction Générale

Introduction générale

La croissance de la population dans les zones urbaines et les centres ruraux conduisent à la génération de volumes de déchets de plus en plus importants.

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

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

L'expérience a montré que le fond et les flancs de l'installation de stockage des déchets (ISD) doivent répondre au minimum à une perméabilité en saturé inférieure à 10^{-9} m/s.

L'angle de frottement recommandé pour les interfaces sols/géosynthétiques bentonitiques dans les installations de stockage des déchets est de l'ordre de 25° .

Il existe plusieurs types de couches étanches. Les couches d'argile, les couches sable bentonite, les membranes bentonite/géosynthétique, les géomembranes, les parois verticales en béton, etc. 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 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.

Une solution technologique consiste à utiliser un mélange sable – bentonite. Le choix sera guidé par des considérations économiques et pratiques comme la disponibilité de matériaux, la facilité de mise en œuvre et le savoir-faire local.

L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers. Elle compte 3000 décharges sauvages. On compte 88 % de décharges sauvages, 9 % de décharges semi-contrôlées et 3 % de décharges contrôlées respectant les règles environnementales. Malheureusement, ces décharges sont souvent dans des zones agricoles ou naturelles. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares.

Introduction Générale

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.

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

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

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

Organisation du mémoire

Ce mémoire a été organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre constitue une étude bibliographique sur les installations de stockage des déchets « I.S.D » tout en indiquant les définitions et les classes des déchets selon la réglementation algérienne. Par la suite, les problèmes des déchets et les critères fondamentaux pour la réalisation des barrières étanches sont indiqués.

Le deuxième chapitre : consiste à la présentation des techniques expérimentales utilisées dans ce travail.

Le troisième chapitre : présente les résultats des essais de caractérisation physiques et mécaniques du tuf, sable calcaire et la bentonite de Maghnia , ainsi que les mélanges sable-bentonite

Le quatrième chapitre : est consacré à l'étude du comportement hydrique et mécanique des mélanges sable-bentonite.

Cette étude est clôturée par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus lors de ce travail.

Généralités sur les Installations De Stockage des Déchets(ISD)

I.1.Introduction

Les couches étanches à base de sols compactés sont utilisées pour isoler les contaminants et les matériaux contaminés de l'environnement extérieur et empêcher par le fait même la contamination des sols, des eaux souterraines et de l'air. Une des solutions actuelles est de les contenir dans des lieux spécifiques ceinturés d'une couche étanche protectrice. L'efficacité de ces couches dépend de leur comportement mécanique, hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination.

D'après les recommandations de la communauté européenne, Le calcul d'une barrière ouvragée compactée destinée pour les fonds d'installation de stockage des déchets ménagers et spéciaux (Van Impe et Bouazza, 1996) nécessite la connaissance de son comportement mécanique dans les deux états saturés et partiellement saturés. Les conditions principales des matériaux utilisés pour ce type d'ouvrage nécessitent une perméabilité saturée inférieure à 10^{-9} m/s ou (10^{-8} et 10^{-10}) et un angle de frottement de l'ordre de 25° . Ces recommandations sont conformes avec celles préconisées par le Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du tourisme algérien. (M.A.T.E) Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés (2009).

Les sols argileux compactés présentent des performances vis-à-vis de la perméabilité qui sont souvent remarquables. 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.

Une solution technologique consiste à utiliser un mélange sable-bentonite (Chapuis, 1990; Thériault, 2000; 2002; Blatz et al., Kouloughli, 2007;Cui et al.,2008; Ameta et al., 2008). Les différents pourcentages de bentonite additionnés au sable varient selon le type de bentonite, calcique ou sodique ; Montañez, 2002 ; Kouloughli, 2007 ; Gueddouda 2011).

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu, des généralités sur les centres d'enfouissement techniques « CET » ainsi que des définitions et classes des déchets selon la réglementation algérienne. Finalement, on présente les différents matériaux utilisés et les critères

Fondamentaux pour la réalisation des barrières étanches.

I.2. Généralités sur les centres de stockage de déchets

Avant 1930, et dans beaucoup de pays, les déchets ménagers étaient stockés sur des sites non contrôlés à proximité des habitations. Ce stockage aléatoire était la source de

nuisances telles que les odeurs, la présence d'insectes, les incendies et la contamination des eaux de surface et des nappes souterraines voisines.

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

L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers. Elle compte 3000 décharges sauvages dont 88 % de décharges sauvages, 9 % de décharges semi - contrôlées et 3 % de décharges contrôlées respectant les règles environnementales. Malheureusement, ces décharges sont souvent dans des zones agricoles ou naturelles. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares (ministère de l'Aménagement du territoire, de l'Environnement et du Tourisme algérien « MATET ». Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés (2015).

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.

Avant de présenter les définitions des juridiques des déchets ainsi que leurs classes selon la réglementation algérienne qui dépendent de leurs natures et de leurs toxicités, il est nécessaire de présenter les définitions des C.E.T

I .2.1 Définitions des Centres d'enfouissement techniques

Un centre de stockage est installation d'élimination de déchets par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre. Les centres de stockage constituent l'étape finale et obligatoire de toute filière de traitement des déchets ménagers ou industriels (photo I.1).

Ils sont indispensables pour accueillir les résidus pour les quels aucune valorisation ou traitement n'est envisageable dans les conditions techniques et économiques de moment ces résidus sont appelés déchets ultimes d'où aussi le terme de « centre de stockage de déchets ultimes » (CSDU). En France, la notation de centre d'enfouissement technique (CET) et les prescriptions d'exploitation sont définies conformément à la circulaire ministérielle de 11 mars 1987. Cette circulaire est abrogée par l'arrêté du 9 septembre 1997.

Il s'agit d'une installation classée pour la protection d'environnement (ICPE) soumise à autorisation. Dans le cas de centres destinés à recevoir des déchets toxique, le grand public parle de décharge de classe 1.



Photo I.1 : Centre d'enfouissement d'Ouled Fayet- Alger- (Y.KEHILA et al.2011)

D'après le MATET, un CET est une installation (classée) qui réceptionne les déchets ménagers 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).

Plus généralement, on définit les centres d'enfouissement technique comme « un site d'élimination des déchets par dépôt des déchets sur ou dans la terre (c'est-à-dire en sous-sol), y compris :

- Les décharges internes (les décharges où un producteur de déchets procède lui-même à l'élimination des déchets sur le lieu de production).
- un site permanent (pour une durée supérieure à un an) utilisé pour stocker temporairement les déchets, à l'exclusion.
- des installations où les déchets sont déchargés afin de permettre leur préparation à un transport ultérieur en vue d'une valorisation, d'un traitement ou d'une élimination en un endroit différent.
- du stockage des déchets avant valorisation ou traitement pour une durée inférieure à trois ans en règle générale.
- du stockage avant élimination pour une durée inférieure à un an.

Le but des CET est le stockage permanent c'est-à-dire sans intention de reprise ultérieure des déchets, avec la garantie d'une haute protection de l'environnement.

I.2.2 structure d'un centre d'enfouissement

Un centre de stockage moderne et conforme à la réglementation des pays dits « avancés » est généralement un ensemble de casiers creusés dans le sol et étanchés par une géomembrane où sont déversés les déchets. Les casiers, une fois pleins, sont recouverts par un matériau étanche et un système de drainage des lixiviats et de captage de biogaz (explosif et puissant gaz à effet de serre) est créé (figure I.1).

Le site est fermé par une clôture et doit être équipé à l'entrée d'un pont-bascule et d'un matériel ou portique de la radioactivité ainsi que de moyens de surveillance et traitement des lixiviats (wikipedia, 2013).

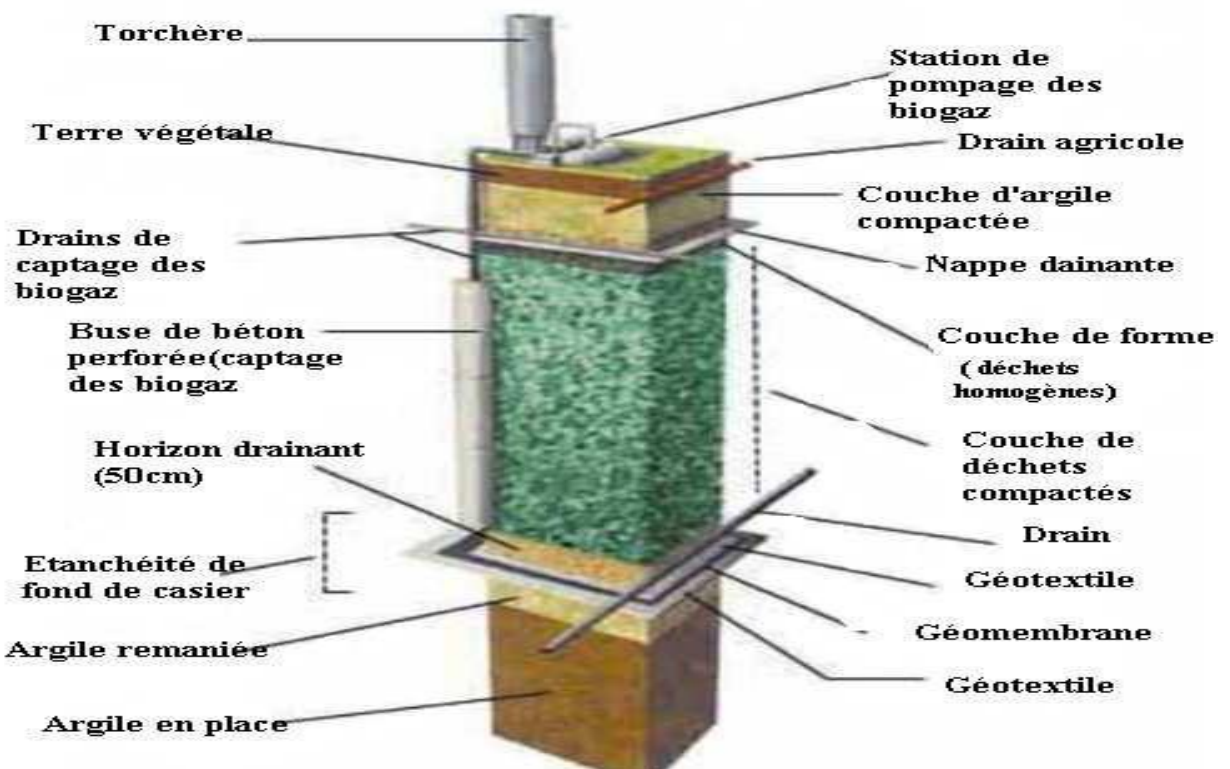


Figure I.1 : La structure d'un centre d'enfouissement.

I.2.3.Définitions juridiques des déchets

Le type et la structure de stockage dépendent de la nature et des caractéristiques des déchets.

D'après le Guide Algérien des Techniciens Communaux pour la Gestion des Déchets Ménagers et Assimilés (2009), la Loi N°01-19 du 12/12/2001 p7 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit :

CHAPITRE I :Généralités sur les I.S.D

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



Photo I.2: Déchets inertes.

- **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.



Photo I.3 : Déchets ménagers et assimilés.

- **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

CHAPITRE I :Généralités sur les I.S.D

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.



PhotoI.4 : Déchets spéciaux.

• **Déchets spéciaux dangereux:** tous déchets spéciaux qui, par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent, sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement. Déchets d'activité de soins : tous déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire.

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 même en récipient clos.
- ✓ les déchets radioactifs ou explosifs.



Photo I.5 : Déchets spéciaux dangereux

CHAPITRE I : Généralités sur les I.S.D

Le tableau I.1 présente une classification synthétique des déchets et de leur stockage selon la législation française (cité dans Gaidi, 2002).

Tableau I.1 : Différents types de stockages selon la législation française

	Classe I	Classe II	Classe III
	SITES IMPERMEABLES	SITES SEMI IMPERMEABLES	SITES PERMEABLES
Nature des déchets	Industriels spéciaux	Ménagers	Inertes
But	Eviter la dispersion dans l'environnement	Vers un déchet ultime et éviter la dispersion	Eviter la dispersion dans l'environnement
Aménagement	Enveloppe étanche (fond et couverture)	Enveloppe étanche (fond et couverture)	Pas d'étanchéité de couverture
Future	Long terme pas d'évolution	20/30 fermentescibles évolutifs	Long terme Pas d'évolution
Ultérieurement	Maintien ; surveillance ; mémoire	Abandon ; aménagement du site pour d'autres usages	Aménagement du site pour d'autres usages

I. 2.4. Production des déchets

La production croissante des déchets a provoqué la multiplication de grandes décharges sauvages un peu partout, autour des grandes villes, sans compter celles qui naissent et grandissent d'elles-mêmes, dans les terrains vagues à l'intérieur des villes. Cette augmentation est liée à la croissance démographique et au développement économique et social du pays.

La quantification des déchets solides est essentielle pour une planification du système de gestion et par conséquent des centres de stockages de déchets, maillon ultime de toute filière de traitement. À noter que le ratio de production par habitant est variable suivant les pays et les villes (tableau I.2). D'après ce tableau, l'Algérie est classée parmi les pays les plus productifs des déchets.

Tableau I.2 : Production des déchets par habitant de plusieurs villes (Aina, 2006)

Ville	Pays	Production des déchets (kg/hab/j)
Alger	Algérie	0,75-1
Ouagadougou	Burkina faso	0,62
Bobo dioulasso	Burkina faso	0,55
Hong- kong	Chine	0,7
Rabat	Maroc	0,6
Grand casablanca	Maroc	0,89
Nouakchot	Mauritanie	0,21
Moyenne nationale	Inde	0,41
Kuala Lumpur	Malaisie	1,7
Moyenne nationale	Vietnam	0,61
Youndé	Cameroun	0,85
Alger	L'Aghouat	0.5
Alger	Oran	0.6

Les différences de production spécifique journalière entre les villes et les régions, et même à l'intérieur des pays sont dues aux modes de vie des populations locales, aux niveaux de vie mais aussi, en partie, aux procédures d'évaluation des tonnages qui peuvent varier d'un centre de recherche à un autre. Les statistiques montrent que la production des déchets ménagers 3en Algérie a presque doublé ces dernières années (tableau I.3).

Tableau I.3 : Évolution du volume de déchets en Algérie (Mezouari, 2002)

Année	Taille des villes	Production (kg/hab/j)
1980	Villes moyennes	0,5
	Grandes villes	-
2000	Villes moyennes	1,0
	Grandes villes	1,2

I .2.5. Classifications des Centres d'enfouissement techniques

Autrefois, les Centres de stockage des déchets (CSD) étaient appelées des décharges. Aujourd'hui, il s'agit de centres d'enfouissement technique (CET) ou installations de stockage de déchets (ISD). La nature et les caractéristiques des déchets imposent une mise

en œuvre et un traitement spécifique aux risques associés. La classification des centres de stockage de déchets est donc faite en fonction de la nature des déchets [Saadi, 2003]. Selon les textes réglementaires, on distingue trois types de centres de stockage de déchets :

- Classe I : déchets danger
- Classe II : déchets non dangereux
- Classe III : déchets inertes

Centre de stockage de déchets (CSD) classe I : déchets dangereux

L'installation de CSD de classe I est destinée aux déchets qui sont issus des activités industrielles et qui sont classés comme dangereux.

La réglementation du décret N° 2002-540 du 18 avril 2002 indique que les déchets considérés comme dangereux possèdent une ou plusieurs propriétés de dangers

Pour chaque CSD classe I, un arrêté d'exploitation doit préciser : les modalités de fonctionnement, les modalités d'exploitation, les modalités de captage et de traitement des effluents, les seuils d'admission des résidus ultimes stabilisés, les conditions de surveillance permanente du site, les modalités de réaménagement et de suivi à long terme après fermeture du centre .Le choix d'un lieu pour l'implantation d'un site résulte d'une concertation avec les autorités et la population locales, basée sur une succession d'études. Il doit respecter des prescriptions techniques légales, visant à garantir une bonne protection de l'environnement.

Différentes étapes vont se succéder pour l'aménagement d'une CSD de classe I :

- Terrassement : préparation du terrain et création de premières alvéoles de stockage de déchets.
- Détournement des eaux de ruissellement : fossé de collecte des eaux de ruissellement extérieur au site, tranchée drainante pour détourner les eaux de la nappe souterraine, stockage des eaux propres dans un bassin étanche et contrôle avant rejet dans le milieu naturel.
- Captage des lixiviats : le réseau de drains permet l'évacuation des lixiviats vers principal, puis vers un bassin de stockage.
- Suppression d'apport en eaux météorologiques dans l'alvéole : l'alvéole est protégée en cours d'exploitation, puis une couverture étanche sera mise en place à la fin du remplacement.

Centre de stockage de déchets de classe II : déchets non dangereux (ménagers et assimilés)

Dans ce cas de CSD classe II, les installations sont réglementées par l'arrêté du 9 septembre 1997, les déchets non dangereux sont traités en effectuant des dépôts ou des enfouissements successifs dans le terrain naturel. En conséquence, ces déchets sont définis comme tous déchets qui ne sont pas définis comme dangereux (le décret N° 2002-540 du 18 avril 2002) pour le milieu naturel.

La circulaire du 28 avril 1998, relative à la mise en œuvre et à l'évolution des plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés, précise qu'il est formellement interdit de stocker des déchets bruts. Autrement dit, un stockage doit être relatif à des déchets considérés comme ultimes ou stabilisés.

Un déchet est considéré ultime s'il est traité ou non, et s'il n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment.

Notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Un déchet est considéré comme stabilisé s'il est traité ou non pour que sa perméabilité soit réduite et sa tenue mécanique, améliorée.

Centre de stockage de déchets de classe III : déchets inertes

Ces centres de stockage sont réservés aux déchets dits inertes. Les déchets inertes sont éliminés par réemploi ou stockage. Leur incinération n'est pas envisageable du fait de leur pouvoir calorifique quasi nul. Le stockage de déchets inertes est donc réalisé dans des CSD de classe III. Ces déchets sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique, ou biologique importante. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres. (Source : Directive 1999/31/CE du conseil du 26 avril 1999– JOCE du 16 juillet 1999.)

Décharge (site d'enfouissement)

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle pour s'en débarrasser et encore la plus courante dans la plupart des pays. Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets ; néanmoins une méthode plus efficace sera sans aucun doute requise lorsque les espaces libres appropriés diminueront.

Les anciennes carrières ou celles mal gérées peuvent avoir de forts impacts sur l'environnement, comme l'éparpillement des déchets par le vent, l'attraction des vermines et les polluants comme les lixiviats qui peuvent s'infiltrer et polluer les nappes phréatiques et les rivières. Un autre produit des décharges contenant des déchets nocifs est le biogaz, la plupart du temps composé de méthane et de dioxyde de carbone, qui est produit lors de la fermentation des déchets.

Les caractéristiques d'une décharge moderne sont des méthodes de rétention des lixiviats, tels que des couches d'argile ou des bâches plastiques. Les déchets entreposés doivent être compactés et recouverts pour éviter d'attirer les souris et les rats et éviter l'éparpillement. Beaucoup de décharges sont aussi équipées de systèmes d'extraction des gaz installés après le recouvrement pour extraire le gaz produit par la décomposition des déchets. Ce biogaz est souvent brûlé dans une chaudière pour produire de l'électricité ou de la chaleur (voire les deux par cogénération). Il est même préférable pour l'environnement de brûler ce

CHAPITRE I :Généralités sur les I.S.D

gaz que de le laisser s'échapper dans l'atmosphère, ce qui permet de consumer le méthane, un gaz à effet de serre encore plus nocif que le dioxyde de carbone. Une partie de ce biogaz peut aussi être utilisé comme carburant.

Remarque

- **Lixiviats**

Le lixiviat est le produit liquide riche en matière organique, en sels minéraux et en bactéries, résultant de la réaction de certaines sortes de déchets avec l'eau. Il se forme pendant l'infiltration d'eaux dans le centre de stockage en diluant la fraction liquide initiale du déchet .La quantité de lixiviat produit dépend de la quantité d'eau souterraine dans le centre de stockage (Bell, 1998). La quantité d'eau absorbée par le déchet dépend de l'âge de l'enfouissement du déchet. Les caractéristiques des lixiviats varient très largement d'une décharge à une autre.

Lixiviats signifie 'jus de décharges', c'est-à-dire l'eau qui percolé à travers les déchets en se chargeant de polluants organiques, minérales et de métaux. Nous po schématiser la formation des lixiviats par la réaction :



L'eau provient des précipitations et de la dégradation des déchets. La formation des lixiviatsest fonction d'une grande variété de phénomènes :

- modes de transport par écoulement, par gravité, par diffusion.
- mécanismes chimiques : complexation, solubilisation, oxydo-réduction.
- processus biologique : aérobies, anaérobies.



Photo I.5 : Lixiviats de wilaya de ziralda

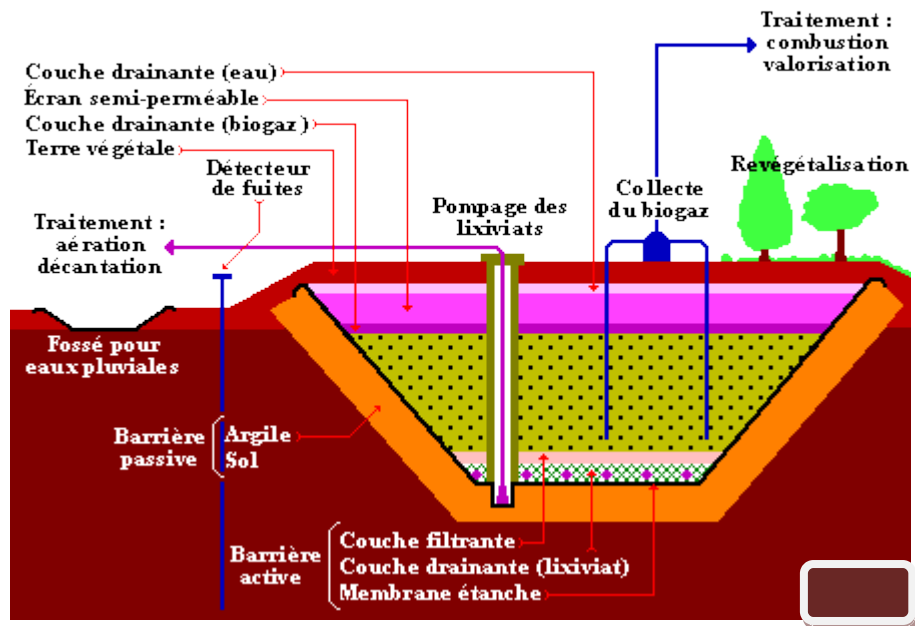


Figure I.2: barrière de stockage des déchets

I.2.6. Barrières étanches

Il s'agit d'examiner et de préciser les moyens de qualification, de mise en œuvre et de contrôle d'une barrière étanche rapportée en fond de fouille, sur les flancs, ainsi qu'en couverture, sur un site dont le substratum naturel ne satisfait pas aux spécifications et contraintes environnementales réglementaires.

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. Ces argiles qui, à l'état compacté, sont hautement imperméables sont capables d'un gonflement au contact de l'eau et, de ce fait, autocolmatantes. 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.

Le matériau répondra à différents objectifs, liés à l'obtention d'un coefficient de perméabilité inférieur à 10^{-9} m/s in situ, à la stabilité mécanique de l'ouvrage mais aussi au maintien des performances à long terme de la barrière argileuse dans les conditions d'exploitation.

Les réglementations européenne et américaine intègrent des seuils de perméabilité pour les différentes installations de stockage de déchets ménagers et spéciaux. Le tableau I.4 présente les grandes lignes de ces réglementations (Van Impe et Bouazza, 1996 ; Cazeaux, 2001) et montre la diversité qui existe entre les différents pays.

CHAPITRE I :Généralités sur les I.S.D

Tableau I.4 : Réglementations pour les installations de stockage des déchets (Van Impe et Bouazza, 1996 ; Cazeaux, 2001)

Pays	Déchets ménagers				Déchets spéciaux			
	fond		Couverture		Fond		Couverture	
	e (m)	k (m/s)	e (m)	k (m/s)	e (m)	k (m/s)	e (m)	k (m/s)
C.E	1	1.10^{-9}	Nd	Nd	5	1.10^{-9}		
Allemagne	0.75	5.10^{-10}	0.5	5.10^{-9}	1.5 3	5.10^{-10} 1.10^{-7}	0.5	5.10^{-10}
Autriche	0.5 ou 0.75	5.10^{-10} ou 1.10^{-9}	0.4	1.10^{-9}	0.5	5.10^{-10}	0.5	1.10^{-9}
Belgique Filandes, Wallonie)	(a. b.	a : 1.10^{-9} b : nd	Nd	Nd	1	Nd		
Danemark	0.5 ou LCS	1.10^{-10}	0.5	1.10^{-10}				
France	1 5	1.10^{-9} 1.10^{-6}	1	1.10^{-9}	5	1.10^{-9}	1	1.10^{-9}
Portugal	1	nd			1	Nd		
Suisse	0.8 10	1.10^{-9} 1.10^{-7}	Nd	Nd				
USA	0.6	1.10^{-9}	Nd	Nd	0.9	1.10^{-9}	0.45	1.10^{-9}

C.E : Communauté Européenne

e : épaisseur en mètre / nd : non défini

I .2.6.1. Couches d'argile : sont utilisées lorsque des matériaux argileux en quantité suffisante, relativement homogènes et compactables, sont disponibles à un coût raisonnable.



Photo I.6:Type de barrière étanche (Couches d'argile).

La pérennité de ces couches est très bonne autant qu'elles ne subissent pas de mouvements différentiels importants 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.

I .2.6.2. Membranes bentonite/géo synthétique : Elles sont formées d'une couche d'environ 5 kg/m²de bentonite sèche, contenant ou pas une colle soluble à l'eau, qui est placée sur un support constitué d'un géotextile ou d'une géo membrane.

Il existe plusieurs variétés de ces membranes bentonite/géo synthétiques. Certaines sont recouvertes d'un géotextile, certaines sont aiguilletées, c'est-à-dire que les géotextiles du haut et du bas qui recouvrent la membrane sont liés par des files, à plusieurs endroits à l'intérieur de la membrane. La conductivité hydraulique de ces produits varie entre 4×10^{-9} et 3×10^{-10} cm/s, avec une tendance à décroître lorsque la contrainte appliquée augmente (Thériault, 2000).

Remarque :

- **Géosynthétique :** Un géosynthétique est un terme générique désignant un produit manufacturé en usine disposant d'une qualité industrielle, de caractéristiques précises et régulières, dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de feuille, de bandelette, ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique ou du génie civil.

- **Fonctions des géosynthétiques dans les CSD :**

CHAPITRE I :Généralités sur les I.S.D

Il existe plusieurs types de géosynthétiques utilisés dans les applications CSD et chacun remplit une fonction spécifique :

-Séparation

Prévention du mélange sous actions mécaniques de deux matériaux différents adjacents

- Renforcement

Amélioration de la stabilité et de la résistance d'un sol

- Filtration

Rétention d'une fraction calibrée de sol soumis à un écoulement de fluides

-Drainage

Collecte et évacuation des fluides (liquides, gaz)

-Étanchéité

Minimisation des transferts de fluides (liquides, gaz).

- Protection

Pour les géo membranes essentiellement, rôle anti-poinçonnant vis à vis du sol support et du sol de couverture

*Comparés aux matériaux naturels, les géo synthétiques apportent un grand nombre d'avantages (photo I.7 -9)

-gain de volume de stockage.

-rapidité d'exécution.

-contrôle systématique des soudures.

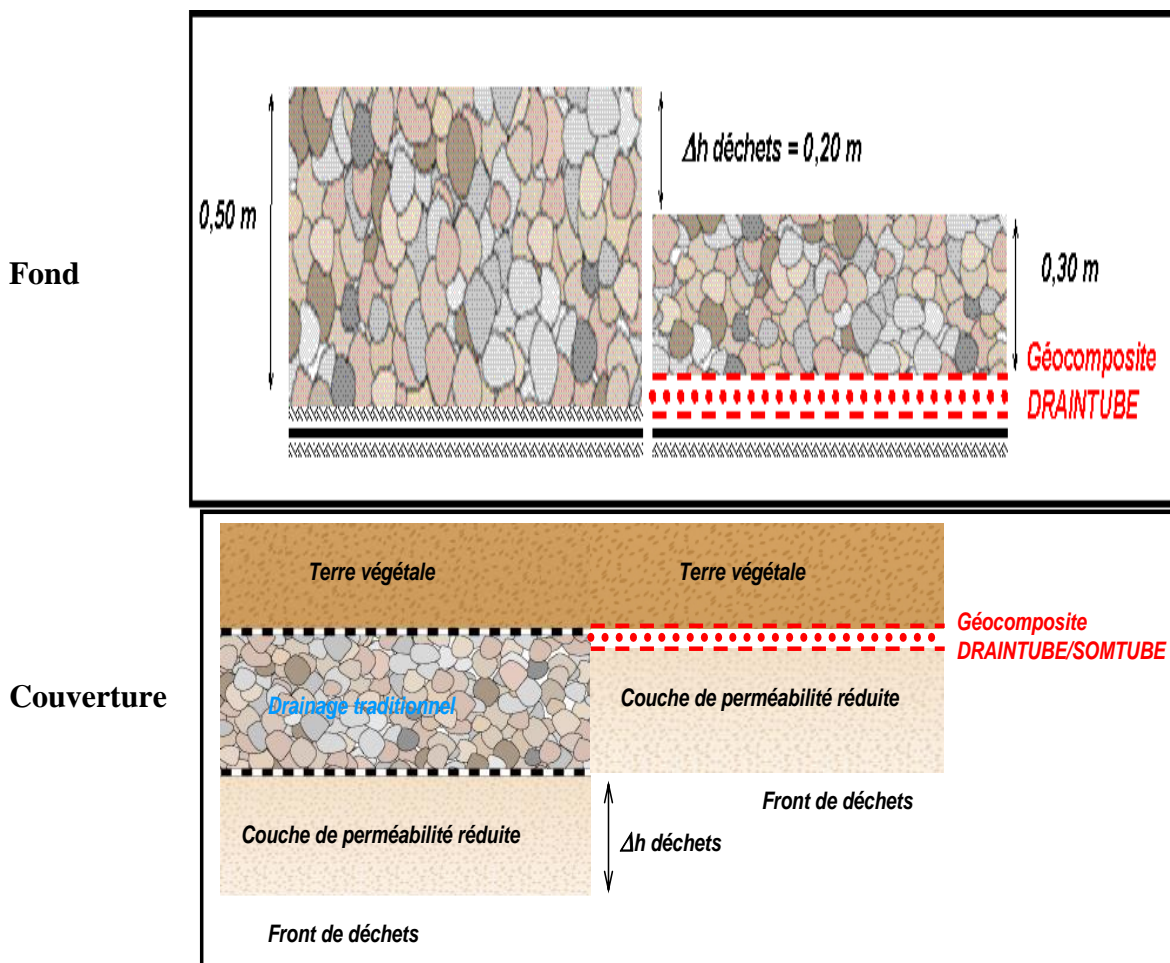


Photo I.7: Gain de volume de stockage



Photo I.8 : rapidité d'exécution



Photo I.9 : contrôle systématique des soudures

I.2.6.3. Géomembranes ou membranes synthétiques: Elles sont constituées de polymères. Il y en a de nombreuses sortes comme entre autres celles de chlorures de polyvinyle (PVC), celles de polyéthylènes (LDPE : Low Density Poly Ethylene, HDPE : High Density PolyEthylene) et celles de chloro-sulfures 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 2,5 mm dépendant des sortes. Les géomembranes ont une conductivité hydraulique qui est de l'ordre de 10-12 cm/s (Thériault, 2000).

Il est important de tenir compte de la résistance chimique des joints. Lorsqu'elles sont soumises aux rayons ultraviolets du soleil, certaines géomembranes, comme les PVC et les polyéthylènes, subissent une dégénérescence polymérique qui affecte leurs propriétés

mécaniques, en particulier leur flexibilité. De façon générale, les matériaux HDPE et PVC conservent 80 % et plus de leur résistance après qu'ils ont été enfouis (Thériault, 2000).



Photo I.10:Géomembranes.

I.2.6.4.Les couches sable-bentonite (s/b) : Lorsque les sols en place sont trop grossiers pour être utilisés comme couche étanche et qu'il n'y a pas d'argile compactable disponible à proximité, une solution consiste à utiliser un mélange sable-bentonite (s/b). Les expériences technique et scientifique indiquent qu'en mélangeant un matériau granulaire avec une argile active comme la bentonite, on obtient un mélange de faible perméabilité qui est mécaniquement stable et ceci en dépit de la nature contrastée des propriétés des constituants en terme de dimension des grains et de l'activité chimique (Kouloughli, 2007). Il en résulte que l'agrégation d'un matériau pulvérulent avec la bentonite, si elle est judicieusement proportionnée et compactée, peut satisfaire plusieurs exigences hydrauliques et mécaniques pour des travaux de terre.

Les pourcentages de bentonite utilisés varient généralement entre 3 % et 15 % (Thériault, 2000). Plusieurs facteurs peuvent affecter la pérennité des barrières de sable-bentonite, des facteurs de nature chimique tels que dissolution de minéraux, modification de la minéralogie, modification des doubles couches, et des facteurs de nature physique tels que les cycles de gel-dégel, les cycles de mouillage-séchage et l'érosion interne. Comme les autres argiles, la bentonite peut être affectée par les acides, les bases et les composés organiques, mais elle est particulièrement sensible aux échanges cationiques.

Certaines bentonites commerciales sont traitées pour accroître leur résistance à ces différents facteurs, mais leur comportement à long terme reste incertain. De façon générale, la couche d'eau «non libre» diminue d'épaisseur lorsque la concentration en cations augmente dans le liquide perméant. Ce changement provoque une augmentation de la conductivité hydraulique et une diminution de la stabilité interne du mélange sable-bentonite.

Étant donné que les couches sable-bentonite font partie du sujet principal de cette recherche, la description de leurs propriétés et de leur comportement à long terme est exposée en détail.

Les couches sable-bentonite (s/b) Comme il a été mentionné précédemment, sont utilisées entre autre pour l'enfouissement des déchets, ont comme fonction principale d'isoler les contaminants de l'environnement extérieur et d'empêcher toute contamination des sols, des eaux souterraines et de l'air.

Kouloughli (2007) a résumé les considérations de base pour la sélection de la bentonite et les méthodes de design de ces barrières par la granulométrie du sol de base, la quantité et la minéralogie de la bentonite.

Canada, Alberta Environnement (1985) recommande l'utilisation de bentonites à forte teneur en montmorillonite ayant principalement du sodium comme cations échangeables. D'après ce document, 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 les étangs de Trois-Rivières, montrent que le risque de lessivage augmente lorsque les pourcentages de particules fines et de bentonite sont faibles. On peut y remédier en augmentant le pourcentage de particules fines. Bien sûr, les conditions conduisant à un lessivage varient avec le sol étudié, la nature de la bentonite utilisée et peut-être les caractéristiques d'essais. On doit donc vérifier que le mélange sable-bentonite est stable, en réalisant des essais de perméabilité sous des gradients hydrauliques au moins aussi élevés que dans les conditions de terrain, sans papier-filtre qui pourrait arrêter la bentonite, et en suivant l'évolution dans le temps de la conductivité hydraulique et de l'apparence de l'eau percolée (Laine et Miklas, 2002).

Pour de faibles pourcentages de bentonite, le comportement mécanique est contrôlé par le sol pulvérulent. Si par contre le pourcentage en bentonite devenait excessif, les particules de sable ne seraient plus en contact les unes avec les autres et le comportement mécanique serait alors contrôlé par la bentonite et son faible angle de frottement. En ce sens, trop de sécurité sur le pourcentage de bentonite pour atteindre une performance hydraulique peut conduire à un problème de stabilité mécanique des mélanges sur les talus.

I.3. Choix des matériaux

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

Certaines caractéristiques distinguent les minéraux argileux de type smectite et sont indispensables pour tout matériau de barrière antipollution (Winiarski 1994) :

- ✓ Leurs propriétés de gonflement 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;
- ✓ Unestabilité physique du matériau lors d'un contact avec l'eau.

En pratique, il n'est pas nécessaire d'effectuer tous les essais simultanément. Le matériau doit d'abord être identifié et répondre aux critères principaux de nature, d'ouvrabilité et de perméabilité.

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

I.3.1. Critères de nature

- granularité :
 - > 15 % de passant à 2 μm (fraction argileuse)
 - > 30 % de passant à 60 μm
 - < 10 % de refus à 10 mm
 - pas d'élément >50 mm
- fraction argileuse contenant plus de 10 % de gonflants.
- CEC / % < 2 μm doit être > 0.3.
- teneur en matières organiques M.O \leq 15 %.

I.3.2. Critères d'ouvrabilité

Ce concept recouvre tout l'aspect de la mise en œuvre. Le matériau est livré sur chantier dans un état de compacité et de teneur en eau donné et doit pouvoir être mis en œuvre de manière à ce que les caractéristiques conditionnant la perméabilité (et la résistance) soient obtenues.

- limite de liquidité < 80%
- indice de plasticité supérieur à 10%, idéalement compris entre 10 et 30%, et inférieur à 40% (des argiles de plasticité supérieure formant des mottes si le matériau est sec et étant trop collantes si le matériau est humide)
- courbe Proctor donnant moins de 5% de variation de compacité pour 2.5% de variation de teneur en eau de part et d'autre de l'optimum Proctor.
- épaisseur : 5 couches de 20 cm \pm 5 cm après compactage, chacune, épaisseur totale, 1m (guide Algériens pour la conception de C.E.T des déchets ménagers 2005).

I.3.3. Critères de perméabilité

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

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

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

I.4. Réalisation des CET: contextes réglementaires

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 (Kenny et al, 1991 ; Evans, 1991) 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 (Stewart et al, 1999 ; Kleppe et Olson, 1985). Les mélanges de sable bentonite ont montré de bonnes résistances au phénomène de gel dans des essais de laboratoire (Wong et Haug, 1991) comparés aux barrières en argiles compactées, il est cependant prudent de les protéger contre le gel dégel et la dessiccation (Kouloughli, 2007).

I.4.1. Principes élémentaires de la conception du C.E.T

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

Par ailleurs, il faut prendre en compte la réintégration du site dans son environnement naturel après la fermeture.

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

- types et quantités des déchets.
- propriétés des déchets.
- niveau technique approprié.
- prétraitement des déchets souhaitable.

I.4.2. Choix du site

Selon le guide Algérien pour la conception de CET des déchets ménagers 2005, un choix du site inapproprié peut causer des dépenses excessives, des risques environnementaux additionnels et des problèmes sociaux et culturels.

Le choix du site d'un CET est une des plus importantes décisions pour la mise en œuvre du schéma directeur de gestion de déchets.

Généralement, les zones suivantes sont considérées à priori comme absolument inappropriées :

- parc national :
- zones militaires.
- zones avec une distance entre les limites du site et les zones d'habitation le plus proche inférieure à 200 m.
- zones avec mines souterraines.
- zones avec une distance à un aéroport inférieure à 5 km.

En plus la détermination du site d'un C.E.T doit tenir compte de la possibilité d'exploitation sur une période de 15 ans au minimum.

I.4.3. Réalisation de la barrière : réglementations algériennes

La réalisation de la barrière étanche 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 argileuse. Pour cela, les engins de type "pied de mouton" seront préférés aux compacteurs lisses. 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.

CHAPITRE I :Généralités sur les I.S.D

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 sur épaisseur de 10 cm qui sera arasé 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 0.5 cm 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.

Deuis les années 1990, des dispositions techniques très importantes et radicales, ont été 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.
- conditions de rejet fixées en teneurs et en flux pour le biogaz et les lixiviats, ce qui nécessite obligatoirement des systèmes performants de collecte et traitement avant rejet.
- surveillance des sites au moins 30 ans après leur fermeture pour gérer la période post exploitation. Pour marquer cette « révolution » dans le domaine, la réglementation a rompu avec le passé en donnant un nouveau nom : les centres de stockage de déchets. Cela sous-entend que les déchets sont entreposés dans un lieu confiné, sans échange avec les milieux environnants (eaux souterraines, sol et atmosphère).

Entre le stock de déchets et ces différents milieux, des dispositifs de sécurité et de protection sont aménagés sous forme de « barrières », l'une passive (géologique) et l'autre active (artificielle):

➤ la barrière passive, généralement constituée d'une couche de sol imperméable plus ou moins épaisse (1 à 5 m) 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 en cas de défaillance des dispositifs d'étanchéité et de drainage; d'où l'appellation de système passif.

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

Une coupe type conforme à la réglementation des barrières de sécurité d'un stockage de déchets ménagers et assimilés est présentée dans la figure I.3.

➤ la barrière active, ou dispositifs sur lesquels il est possible d'agir pour prévenir tout accident ou pour minimiser par une action volontaire toute sollicitation de la barrière passive. Elle est constituée d'un écran étanche généralement à base d'un matériau géosynthétique ou membrane et d'un réseau de drainage composé d'un réseau de canalisations de collecte, disposées dans une couche de matériaux drainants.

De plus, dans la masse des déchets, si ceux-ci sont évolutifs et fermentescibles, un réseau de collecte des gaz formés (biogaz) est aménagé, de même qu'en superficie, sous la barrière passive de couverture.

Pour les déchets inertes, la réglementation algérienne (2009) indique que la barrière de sécurité passive doit avoir un coefficient de perméabilité inférieur à 10^{-7} m/s sur une épaisseur inférieure ou égale à 1m.

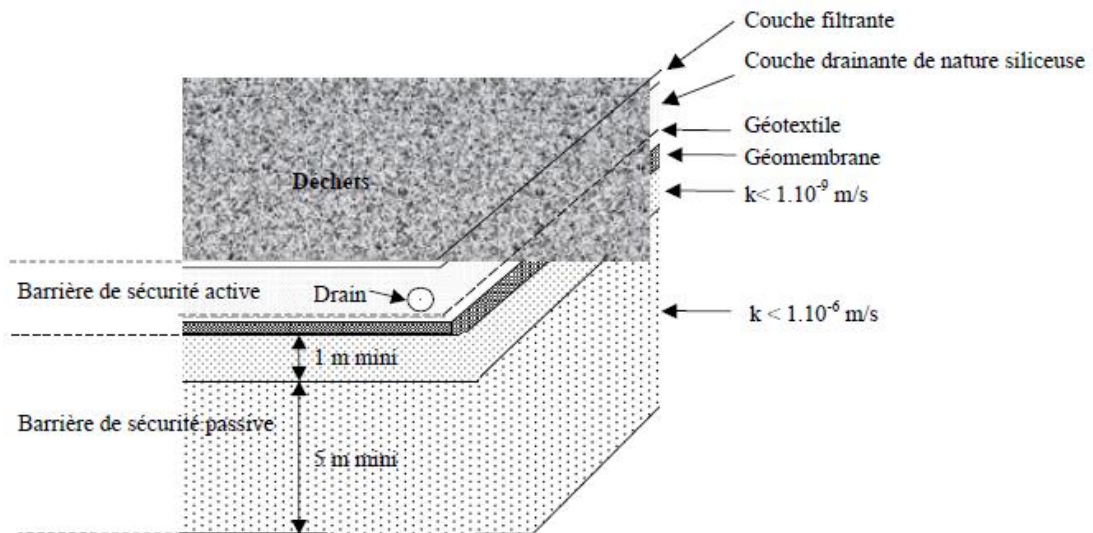


Figure I.3 : Coupe schématique de la double barrière de sécurité préconisée pour le stockage des déchets ménagers et assimilés.

Le perfectionnement de la sécurité de ces installations de stockage passe nécessairement par l'optimisation de l'aménagement du fond et des flancs des sites de stockage de déchets. L'étanchéité totale d'une décharge repose sur trois "piliers":

- un fond étanche.
- le drainage des lixiviats au-dessus du fond.
- l'étanchéité de la couverture.

Un exemple de réalisation d'un CET à plusieurs casiers est présenté sur la photo I.11.



Photo I.11 : CET de zeralda, Algérie ; 2010.

Un élément indispensable au bon confinement des déchets est la couverture. Après avoir rempli l'alvéole, il faut la couvrir. La couverture d'un site de stockage est sans doute la structure qui a le plus de conséquences sur le devenir à moyen et à long termes du site.

Dans le cas le plus général, une couverture se compose des éléments suivants (figure I.4), de haut en bas, sur les déchets non inertes:

- la terre végétale.
- un drainage.
- un géotextile.
- une géomembrane.
- la barrière argileuse.
- un géotextile.
- une couche drainante.
- un géotextile;
- une couche d'égalisation du sommet des déchets.

L'objectif d'un système de couverture finale pour un C.E.T fermé est de :

- isoler les déchets de l'environnement de la surface;
- fournir une minimisation à long terme de l'infiltration de l'eau de précipitation au sein du C.E.T.

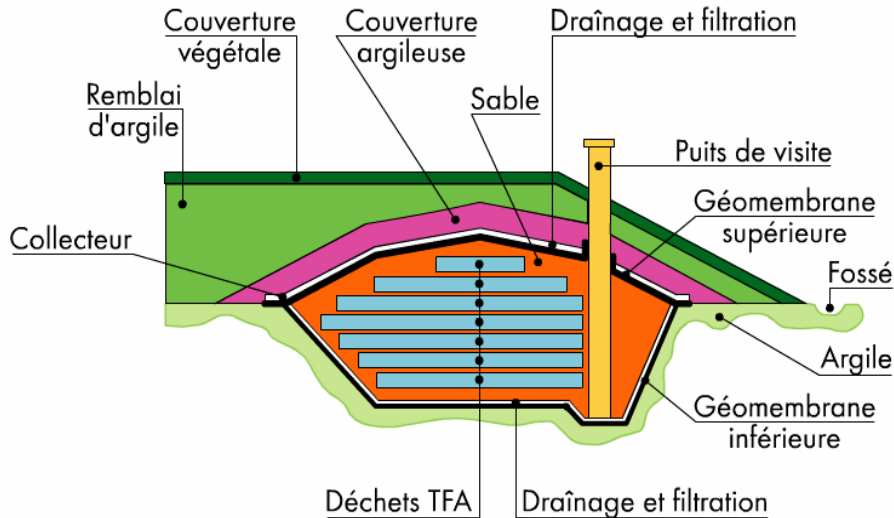


Figure I.4 : Un casier de stockage de déchets

I.4.4. Comportement à long terme

Plusieurs facteurs peuvent affecter la pérennité des barrières sable-bentonite : des facteurs de nature chimique tels que dissolution de minéraux, modification de la minéralogie, modification des doubles couches, et des facteurs de nature physique tels que les cycles de gel-dégel, les cycles de mouillage-séchage et l'érosion interne.

La tendance au retrait par séchage de la bentonite est très marquée. Pour éviter la fissuration du mélange, il faut que celui-ci ait un squelette de sable suffisamment rigide pour y résister, le retrait et la fissuration de mélanges sable-bentonite diminuant lorsque le pourcentage de sable augmente.

La bentonite peut éventuellement sécher et diminuer de volume à l'intérieur des pores, mais sans affecter le volume total du sol; par ailleurs, lorsque l'eau redevient disponible, la bentonite reprend son volume initial. Les cycles de gel-dégel n'augmentent pas la conductivité hydraulique des mélanges sable-bentonite (Thériault, 2000; Kouloughli, 2007).

Comme les autres argiles, la bentonite peut être affectée par les acides, les bases et les composés organiques, mais elle est particulièrement sensible aux échanges de cations. Il est bien connu que les sols qui possèdent une forte teneur en minéraux de type smectite peuvent voir leur conductivité hydraulique augmenter de façon significative lorsqu'ils sont exposés à certains contaminants (Mesri et Olson 1971, D'apponia 1980, Anderson et al. 1985, Wu et Khera 1990). Par exemple, Wu et Khera (1990) ont démontré que la perméabilité d'un mélange sable-bentonite, contenant 10 % de bentonite, augmentait lors d'une augmentation de la concentration des contaminants. Ils ont observé, dans le pire des cas, une augmentation de cinq ordres de grandeur.

De plus, ils concluent que les contaminants qui ont le plus d'impact sur le gonflement de la bentonite, provoquent les plus grandes hausses de la conductivité hydraulique du mélange

s/b. En somme, ce qui tend à diminuer l'épaisseur de la double couche autour des particules tend à restreindre le gonflement de la bentonite et à augmenter la perméabilité des couches s/b (Wu et Khera, 1990).

Selon les données disponibles, il semble que l'impact négatif sur le gonflement de la bentonite et sur la conductivité hydraulique de mélanges s/b soit inférieur pour les contaminants organiques comparé à celui provoqué par les métaux lourds qui est lui-même inférieur à celui dû aux acides et aux bases.

La pression de consolidation est un autre facteur qui influence le degré de détérioration des couches s/b. Pour une pression de consolidation supérieure à 100 kPa, Wu et Khera (1990) ont observé peu de variation de la conductivité hydraulique en présence de contaminants. Celle-ci était modifiée de façon significative lorsque la pression de consolidation était inférieure à 100 kPa. Alston et al. (1997) ont observé qu'en augmentant la pression de consolidation, l'augmentation de la conductivité hydraulique de couches s/b due aux contaminants était moindre.

I.5. La gestion de CET Ben Nacer Ben Chouhra de la wilaya de Laghouat

Le site situe au sud-ouest de la ville de Laghouat 11 Km, il est accessible en empruntant la RN1 à partir du chef-lieu de Laghouat.

Superficie du CET : 13 hectares.

Capacité totale du CET (m³) : 153 600 pour un casier.

- Nombre de casier : 04 Casier, actuellement deux grandes casier réalisés.
- La quantité des déchets qui sera enfuis annuellement (T /an) 35574.
- Durée de vie de CET 16 ans.
- Les communes desservies par le CET : Laghouat, khneg, Ben Nacer Ben Chohra. En plus de quelques entreprises privés : ESSOUHOB, Bayat Catering, KADIHO,
- L'exploitation du centre a débuté le 11/01/2011.

Composition :

- Un poste de contrôle des admissions des déchets.
- Une clôture perimetrale en dur de 2 ,5m de hauteur et de 1484 m linéaire.
- Bâtiments techniques comprenant :
 - Un bloc administration (bureaux, sanitaires et douches).
 - Un atelier de maintenance.
 - Un magasin
 - Un abri pour les engins d'exploitation en charpente métallique.
 - Un casier de 72 151,20 m³
 - 1^{er} casier 17 800 m³
 - 2^{er} casier 44 064 m³
 - Une station primaire de récupération de lixiviats



Photo I.12:La pollution de l'eau

I.6.Conclusion

La législation sur les déchets a conduit le ministère de l'aménagement du territoire, La conception des centres d'enfouissement doit donc intégrer ces incertitudes de manière à respecter ce principe de précaution et assurer un niveau de protection fiable à long terme. Le ministère 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 ($k \leq 10^{-9}$ m/s).

En premier lieu, nous avons présenté le contexte réglementaire de stockage des déchets ménagers et spéciaux. Par la suite, les différentes classes de CET ont été présentées selon la réglementation algérienne.

En second lieu, nous avons présenté les exigences pour le choix des matériaux en les subdivisant en trois grandes familles: les critères de nature, d'ouvrabilité et de perméabilité ; facteurs importants dans la caractérisation des barrières étanches.

Les géosynthétiques sont utilisés avec succès dans les Centres de Stockage de Déchets Comparés aux matériaux naturels, les géosynthétiques apportent un grand nombre d'avantages.

Les techniques réglementaires algériennes pour la réalisation des barrières pour les ISD sont exposées.

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.

Chapitre II. Techniques expérimentales

II.1. Introduction

Le but de ce chapitre, et avant d'accéder au programme expérimental dans le chapitre suivant, il est nécessaire de définir et d'exposer les méthodes, les techniques expérimentales et les modes opératoires des essais d'identification.

II.2. Essais d'identification

II.2.1. Limite d'Atterberg

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eaux pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers.

Ces limites déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 μ m.

Les limites utilisées sont :

- Limite de liquidité notée w_L (norme NF P 94-050) : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.
- Limite de plasticité notée w_P (NF P 94-054) : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide

- **Principe de détermination des limites de consistance**

- **La limite de liquidité WL (norme NF P 94-050)**

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.

Il faut utiliser cette méthode, le nombre de coups à l'approbation de l'humidité entre 15 -35 grève est situé, L'expérience doit également être retournée deux fois afin de vérifier la validité du nombre de grèves enregistrées. La limite de liquidité est déterminée graphiquement à partir de la courbe teneur en eau en fonction du nombre de coups. Elle correspond à la teneur à 25 coups. Elle peut être déterminée analytiquement à partir de la relation suivante :

$$w_l = w_N = \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad \text{II.1}$$

- **La limite de plasticité WP (norme NF P 94-054)**

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.

➤ **Indice de plasticité IP** : représente la moyenne des deux essais

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 :

$$I_p = W_L - W_P \quad \text{II.1}$$

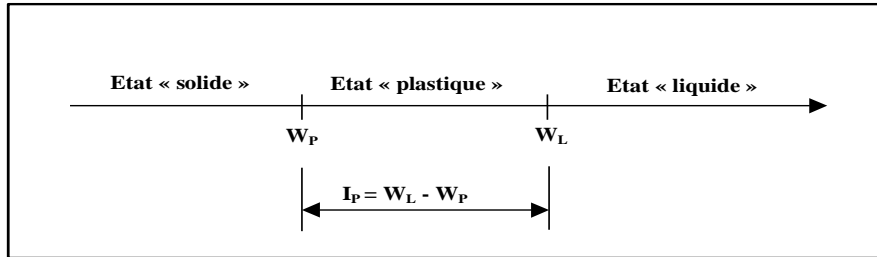


Figure II.1:Etat de teneur en eau.

➤ **Appareillage :**

- appareil de gasagrande.
- coupelle.
- spatule.
- balance électronique.
- l'outil à rainure en V.
- four électrique.

➤ **Photos d'appareillages utilisés**



Photo II.1 : boîte de casagrande (limite de liquidité)



Photo II.2 : Essai de limite de plasticité.

Tableau II.1 : Classification de casagrande pour les sols fins

	Limite de liquidité (W_L)	Indice de plasticité (I_P)
Sable	$W_L < 35$	$I_P < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < I_P < 25$
argile	$W_L > 30$	$I_P > 15$

➤ **II.2.Essai de Proctor (norme NF P 94093)**

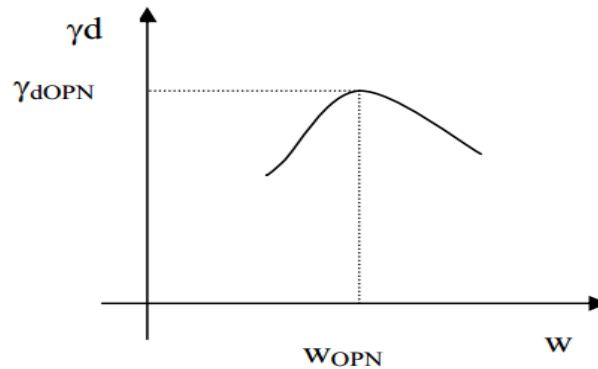
➤ **Le but d'essai**

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

➤ **Principe de la méthode**

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\gamma_d ; w$); on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche.

La courbe sous forme de :



- OPN : Optimal Proctor Normal
- OPM : Optimal Proctor Modifié

Pour ces essais on peut utiliser, selon la finesse des grains du sol, deux types de moules :

- Le moule Proctor Φ moule intérieur = 101,6 mm / H = 117 mm (sans rehausse) $V_{\text{moule Proctor}} = 948,99 \text{ cm}^3$
- Le moule CBR $\Phi_{\text{moule}} = 152 \text{ mm}$ / H = 152 mm (sans rehausse) dont disque d'espacement de 25,4 mm d'épaisseur, soit une hauteur $H_{\text{utile}} = 126,6 \text{ mm}$ $V_{\text{moule CBR}} = 2296 \text{ cm}^3$

Avec chacun de ces moules, on peut effectuer deux types d'essai (choix par rapport à l'énergie de compactage) :

- L'essai PROCTOR NORMAL,
- L'essai Proctor modifié.

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 : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé,
- Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

➤ Photos d'appareillages utilisés



Photo II.3 : moule Proctor normal avec la dame



Photo II.4 : Moule Proctor normal avec la dame dans Laboratoire de Génie Civil (Laghouat).

II.2.3. Analyse granulométrique (norme NF P 18-101)

➤ Le but d'essai :

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

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

- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056.
 - La sedimentometrie pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui complète la première. Elle est effectuée selon la norme NF P94-057.

- **Tamissage à sec :**

Le matériau est versé le plus souvent en plusieurs fois pour ne pas surcharger les tamis supérieures le tamissage à sec recommandé pour les sols sableux ou renfermant surtout des cailloux et des graviers.

- **Appareillage :**

- Balance.
- Les tamis.
- Appareil d'analyse granulométrique.

- **Photos d'appareillages utilisés**



Photo II.5 : Appareillage d'analyse granulométrique.

La courbe granulométrique est le résultat de l'essai, elle nous renseigne sur son uniformité, on caractérise un sol par la granulométrie c'est-à-dire par le coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen, qui est défini comme suit :

$$Cu = D_{60}/D_{10}$$

II.2

-si $(D_{60}/D_{10}) < 2$ le sol présente une granulométrie uniforme.

-si $(D_{60}/D_{10}) > 2$ le sol présente une granulométrie variée.

II.2.4.Équivalent de sable

➤ Principe :

L'essai d'équivalent de sable se consiste à faire flocculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavante puis, après un temps de mise au repos donné, à mesurer la hauteur des éléments sédimentés.

Il permet de mesurer la propreté d'un sable et rend compte de la quantité des éléments fins contenus dans ce sable: fines de nature siliceuse ou calcaire et fines de nature argileuse, y compris celles qui recouvrent les granulats de dimension supérieure à 80 μm et qui n'apparaissent pas dans l'analyse granulométrique par voie sèche.

➤ Matériel nécessaire :

- un tamis de mailles 2 mm avec fond et couvercle.
- une machine à tamiser.
- deux éprouvettes cylindriques transparentes en matière plastique, diamètre intérieur 32 mm, hauteur 430 mm, munies de deux repères à 100 et 380 mm de la base.
- un bouchon de caoutchouc s'adaptant sur les éprouvettes.
- un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon.
- un piston taré de 1 kg.
- un réglet métallique gradué, de 500 mm de longueur.
- un flacon de 5 litres muni d'un siphon (placé à 1 mètre au-dessus de la table de travail) contenant une solution lavante à base de solution concentrée (chlorure de calcium + glycérine + solution aqueuse de formaldéhyde).
- un tube laveur relié au flacon avec un robinet d'arrêt.
- une machine agitatrice.
- un chronomètre.
- une main écope pour le remplissage.
- une balance de portée 5 kg, précision 1g.
- des bacs en plastique pour effectuer les essais.
- Les essais ont été réalisés conformément à la norme NEP 18-595 .deux indices peuvent déterminées : Es à vue et Es à piston (voir les photos 6, 7 et8).

$$Es=100 \cdot h_2/h_1 \quad II.3$$

Avec :

Es : équivalent de sable : h_1 = sable propre + éléments fines. h_2 = sable propre seulement.

Tableau II.2: classification la nature et qualité du sable

Es	Nature et qualité du sable
Es =100(h1=h2)	Sable pur.
Es=80	Sable propre pour béton
Es=35 – 40	Sable pour couche de base de routes
Es=30 – 45	Sable pour couche de fondation des routes
Es=35	Sable argileux
Es=0	Argile pure



Photo II.6 : Appareillage d'équivalent de sable.

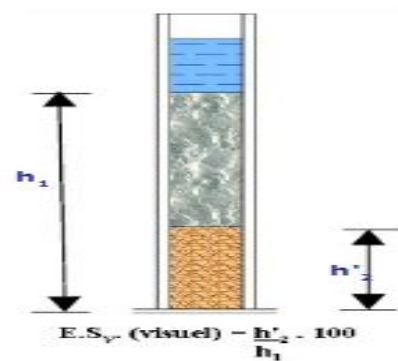


Photo II.7: la méthode de calcul visuel.

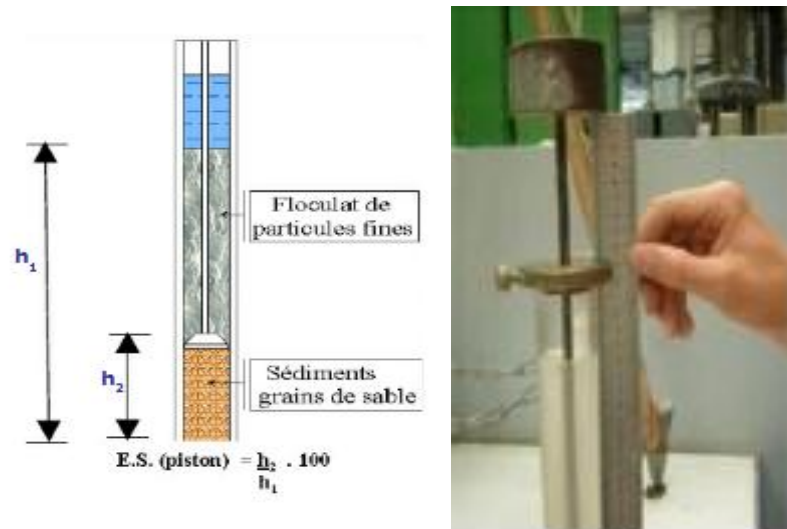


Photo II.8: la méthode de calcul par piston.

II.3. Paramètres de gonflement des sols

II.3.1. Estimation indirecte du gonflement libre

Un nombre considérable d'approches empiriques introduites par différents auteurs (Vijayverjya et Ghazzaly, 1973; Williams et Donaldson, 1980) basées sur des caractéristiques du sol qui sont très simples à déterminer en laboratoire, sont utilisées pour l'évaluation du potentiel de gonflement. Certaines approches sont basées sur un seul paramètre, et d'autres sur la combinaison de deux paramètres ou plus, et plus le nombre des paramètres est grand, plus l'évaluation du potentiel de gonflement est meilleure (Lamara et al. 2006).

Dans ce qui suit, nous allons considérer deux classifications pour évaluer le potentiel de gonflement des sols en fonction de l'indice de plasticité et la limite de liquidité tableau II.2, 3, il s'agit de :

- ❖ Classification de Sanglerat (1981).
- ❖ Classification de Dakstana (1965).

Tableau II.3: Classification de Sanglerat (1981).

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité(%)
Bas(b)	0-15
Moyen(M)	10-35
Haut (H)	35-55
Très haut (TH)	>55

Tableau II.4 : Classification de Dakstana (1965).

Limité de liquidité (%)	0-20	20-35	35-50	50-70	70-90	>90
Potentiel de gonflement (%)	Non Gonflant (NG)	Faible (F)	Moyen (M)	élevé (E)	Très élevé (TE)	Extrêmement élevé (EE)

Les caractéristiques physiques sont de bons indicateurs pour l'estimation du gonflement des sols. Néanmoins, il reste à confirmer cette évaluation par les mesures directes du potentiel et de la pression de gonflement.

III.3.2. Méthodes de détermination des paramètres de gonflement

Le gonflement d'un sol est caractérisé par deux paramètres : le potentiel et la pression de gonflement. Le potentiel de gonflement correspond au rapport entre la variation de hauteur enregistrée lors de l'humidification ΔH , et la hauteur initiale H .

III.3.3. Mesure du gonflement libre

Les essais de gonflement libre dans cette étude sont effectués dans un œdomètre classique, dont les dimensions des échantillons sont respectivement :

- Hauteur : $H = 20$ mm.
- Diamètre : $D = 50$ mm.

L'essai est réalisé selon la méthode du gonflement libre. En premier lieu, on procède à la préparation de l'échantillon suivi d'un compactage statique à des teneurs en eau et densités sèches correspondant à l'Optimum Proctor Normal. L'échantillon est placé dans une cellule cylindrique entre deux pierres poreuses, après qu'il est lissé et arasé au niveau supérieur et inférieur. Puis, suite à l'inondation, il est autorisé de gonfler verticalement sous la pression du piston durant plusieurs jours, jusqu'à la stabilisation. Le gonflement total ($G\%$) est déterminé d'après la relation suivante :

$$G(\%) = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad \text{III.4}$$

Avec :

$$\Delta H = H_f - H_0$$

H_0 : hauteur initiale.

H_f : hauteur finale après stabilisation.

La cellule œdométrique utilisée pour la mesure de gonflement libre est représentée sur la photo III.9.



Photo II.9: La cellule œdométrique

II.4. Conductivité hydraulique

II.4.1. Mesure indirecte de la perméabilité (norme NF P94-090-3)

➤ But de l'essai :

L'essai œdométrique permet d'évaluer le tassement du matériau au cours du temps, Il permet également de classer les sols vis-à-vis de leur compressibilité. En plus, comme son nom l'indique, c'est un perméamètre à paroi rigide est constitué d'un moule indéformable enveloppant l'échantillon de sol. Du fait de la simplicité de la procédure d'essai, ce perméamètre reste le plus couramment utilisé en laboratoire. Plusieurs types de perméamètres à parois rigides sont utilisés pour la détermination du coefficient de perméabilité des sols fins, parmi eux la cellule oedométrique.

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

➤ Principe de l'essai :

On mesure les déformations à charge constante d'une éprouvette cylindrique avec déformation latérale nulle et drainage sur les faces inférieure et supérieure.

On recommence l'expérience pour plusieurs charges. L'échantillon est saturé avant d'être soumis à des paliers de charges successives et croissantes suivant une progression géométrique $\sigma_{i+1} / \sigma_i = 2$. On mesure le tassement en fonction du temps pour chacun des paliers durant une période qui est habituellement de 24 heures, qui représente le tassement total pour la charge considérée. Cet essai permet d'établir pour un échantillon donné deux types de courbes, une courbe qui définit l'évolution des tassements en fonction du temps appelée « courbe de consolidation » et l'autre courbe montre le comportement

déformable du sol en fonction des contraintes appliquées appelée « courbe de compressibilité ».

II.5. Cisaillement direct

II.5.1. le but d'essais

La résistance au cisaillement des sols constitue l'aspect le plus important de la géotechnique, elle peut être déterminé de plusieurs façons (au laboratoire ou in situ).

Les essais les plus fréquemment utilisés au laboratoire, sont l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial

Dans cette étude, l'essai de cisaillement direct est utilisé pour mener cette investigation, pour cela on décrira brièvement le cisaillement direct.

II.5.2. Essai de cisaillement direct

Cet essai est probablement le plus ancien puisque Coulomb a utilisé une boîte de cisaillement, il y'a plus de 200 ans (Holtz et al, 1991, [41]), pour déterminer expérimentalement les paramètres utilisés dans son équation.

L'essai est relativement simple. On confine l'échantillon dans une boîte formé de deux parties divisé par un plan horizontal .Une partie est fixe tandis que l'autre peut se mouvoir horizontalement. On applique une charge normale constante sur l'échantillon à l'aide d'un capuchon de chargement et on mesure, en cours d'essai, la force de cisaillement de même que les déformations horizontales et verticales. On peut ensuite calculer la contrainte de cisaillement et la contrainte normale. On ne doit pas oublier qu'avec cet appareil le plan de rupture est prédéfini. La résistance mobilisée par l'échantillon augmente jusqu'à atteindre une valeur limite ou l'échantillon commence à se rompre. Cette valeur représente la résistance au cisaillement maximal ou de pic

L'essai de cisaillement direct comporte des avantages et des inconvénients, Essentiellement, l'essai est économique, rapide et simple, en particulier avec les matériaux granulaires. Cependant il est difficile de contrôler les conditions de drainages, en particulier dans le cas des sols à grains fins. Un autre inconvénient de cet essai réside dans la concentration des contraintes aux extrémités de la boîte, soit à l'endroit même ou sont transmises des contraintes externes très peu homogènes à l'intérieur de l'échantillon (répartition non uniforme).En dernier lieu, il se produit une rotation des plans principaux et des contraintes entre le début de l'essai et la rupture et que la surface de rupture est imposée.

Comme remarque, il est impossible de séparer les frottements des demi boîtes l'une de l'autre du frottement de l'échantillon.

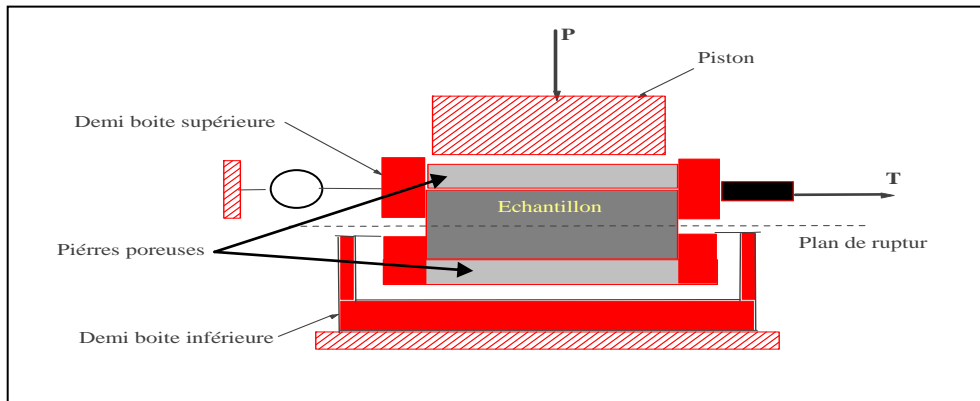


Figure II.2: coupe transversale de l'appareil de cisaillement direct

Caractérisation des sols étudiés

III.1. Introduction

Ce chapitre présente une caractérisation des matériaux locaux à base de tuf ; sable calcaire de la région de Laghouat et de bentonite de carrière de Maghnia pour la conception de barrières ouvragées destinées à la réalisation des fonds des installations de stockage des déchets (ISD) dans les régions arides (sud de l'Algérie) pour arriver à proposer une formulation (mélange tuf-bentonite) répondant aux critères réglementaires.

Une solution technologique consiste à utiliser un mélange tuf-bentonite. Les différents Pourcentages de bentonite additionnée au sable varient selon le type de bentonite, calcique ou sodique (Goran et al, 2002; Kouloughli, 2007).

Les mélanges tuf –sable calcaire –bentonite ont été choisis dans un but environnemental et économique, vu la disponibilité du tuf et du sable calcaire dans les régions du sud.

III.2. Caractérisations des matériaux utilisés

III.2.1. Bentonite

III.2.1.1. Définition

Le terme BENTONITE désigne les matériaux argileux à usage industriel, tendre de couleur blanche, avec reflet grisâtre quelque fois 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) ou dans le domaine du génie civil (barrage en terre, barrière étanche...). Son pouvoir gonflant est considérable, il varie de trois à trente fois son volume initial (Wolfe et al. 1985).



Photo III.1: Localisation des gisements de bentonite (Maghnia)

III.2.1.2. Origine de la bentonite utilisé

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest de l'Algérie). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara (Tlemcen)) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et celle de Mostaganem avec des réserves de deux millions de tonnes (Bental, 2002).

La bentonite utilisée au cours de notre travail, est une Argile naturelle (bentonite de Maghnia), extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à 600 km à l'ouest de la capitale (photoIII.1). Elle nous a été fournie non traitée à l'état finement broyé par la société (ENOF) conditionnée dans des sacs de 50 kg (photoIII.2).



Photo III.2 : bentonite de Maghniade Hammam Boughraa

III.2.1.3. Essais de caractérisation

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer les paramètres qui permettent l'identification des matériaux utilisés.

● Analyse granulométrique

Les résultats des analyses granulométriques de bentonite sont représentés graphiquement dans la figure III.1.

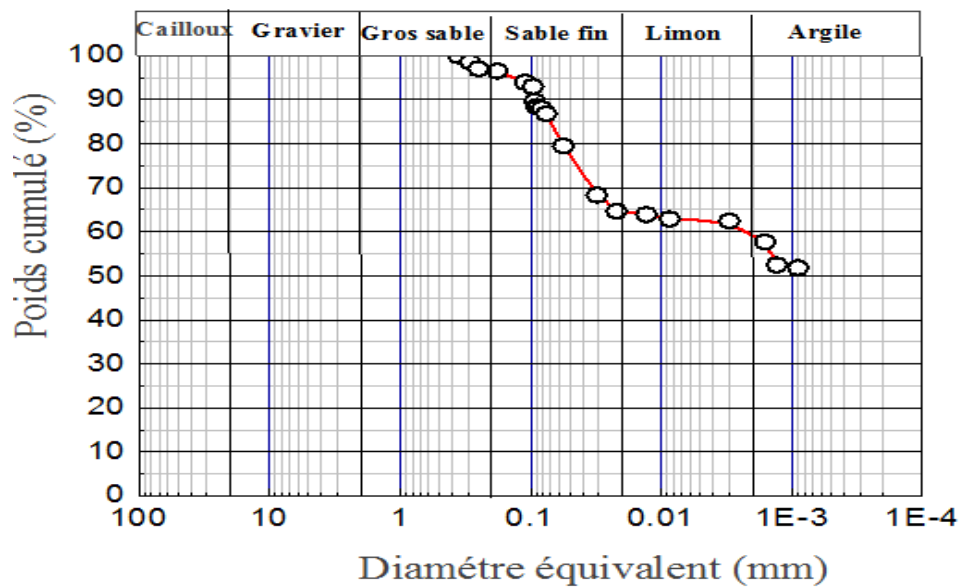


Figure III.1: Courbe granulométrique de la bentonite de Maghnia. (Gueddouda, 2011)

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 ($\Phi < 80 \mu\text{m}$)

Le tableau III.1 résume les résultats qui sont des paramètres pour la classification des sols gonflants.

Tableau III.1 : Résultats granulométriques des argiles étudiées.

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

● **Densité des grains solides**

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

$$\gamma_s = 26.4 \text{ kN/m}^3. \quad G_s = 2,64, \quad \text{Avec: } G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

● **Essai Proctor Normal**

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure III.2.

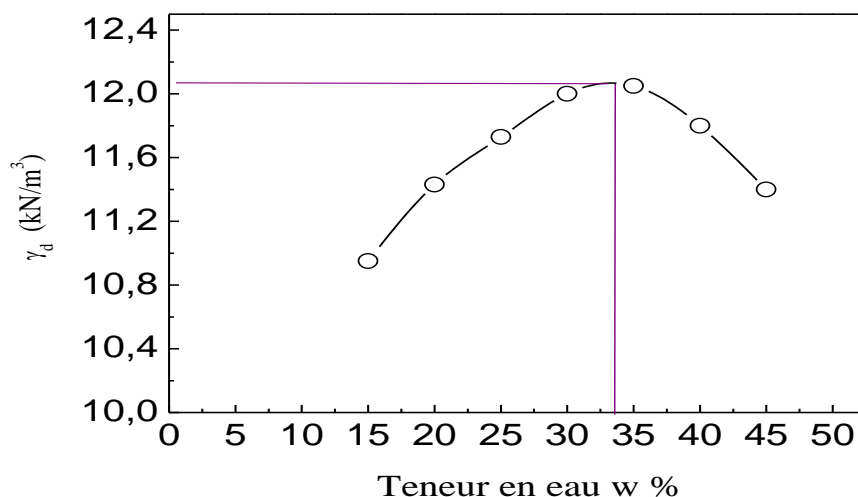


Figure III.2 : Courbe Proctor Normal de la bentonite de Maghnia.

La bentonite présente une teneur en eau optimale de l'ordre de 32% et un poids volumique sec maximum de l'ordre de 12kN/m^3 .

● Limites d'Atterberg ou limites de consistance

Les mesures de ces limites sont indiquées dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Limites de consistance de la bentonite.

$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P
141	48	93

La connaissance de w_L et I_P permet de situer les sols dans le diagramme de plasticité de Casagrande. Placée dans le diagramme de plasticité, la bentonite de Maghnia apparaît comme une argile très plastique

III.2.2. Tuf

Le tuf est un matériau pulvérulent poudreux de couleur blanche. Extrait d'un gisement à âge de formation qui va du quaternaire au Crétacé.

Les tufs d'encroûtements font partie des matériaux subnormaux utilisés en construction routière dans de nombreux pays à climat aride ou subhumide. En Algérie, ils couvrent approximativement une superficie de 300.000 km^2 , l'abondance de cette ressource naturelle dans la région de Laghouat (400 km au sud d'Alger), (photo. III.3) fait que leur utilisation comme matériau routier est devenue de plus en plus répandue



Photo III.3 :site du gisement des Tuf (région de Laghouat)

III.2.2.1. Essais de caractérisation

● Analyse granulométrique

La distribution des particules du Tuf est traduite par la courbe granulométrique suivante (Figure III.3).

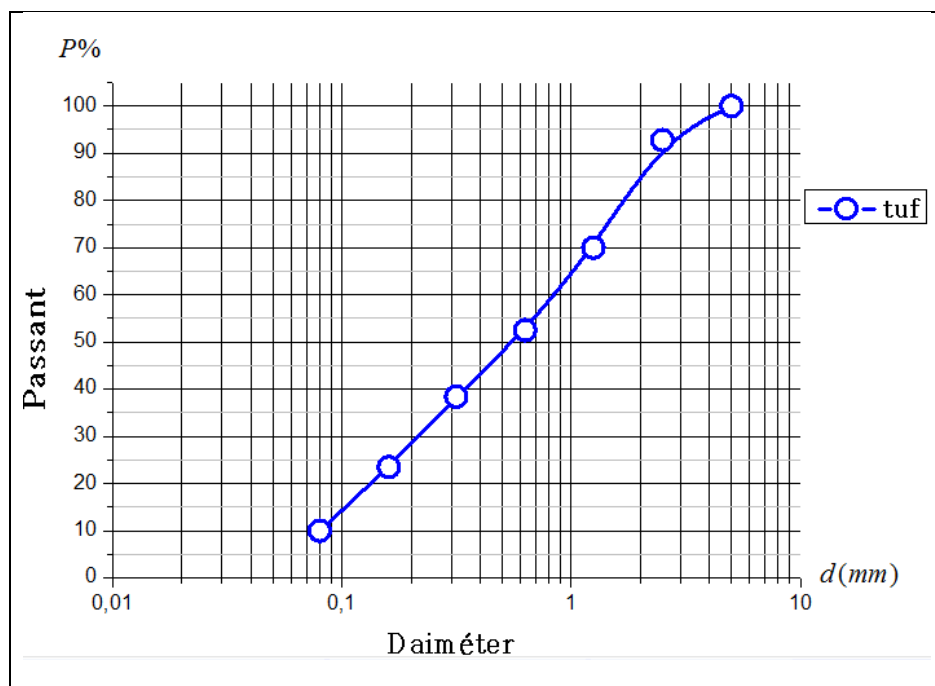


Figure III.3 : Courbe granulométrique de Tuf (région de Laghouat)

Les résultats des analyses granulométriques sont illustrés dans le tableau III.3

Tableau.III.3 : Résultats de l'analyse granulométrique du Tuf.

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	Cu	Cc
13.46%	0%	10	0.625

Cu : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $Cu = D_{60}/D_{10}$

Cc : coefficient de courbure. $Cc = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (laboratoire central des ponts et chaussées) basée sur les coefficients d'uniformité et de courbure, le tuf se classe parmi les sables mal gradués symbolisés par les lettres SM (sable mal gradué), le mélange présente une granulométrie étalée

● **Essai Proctor Normal**

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure III.4.

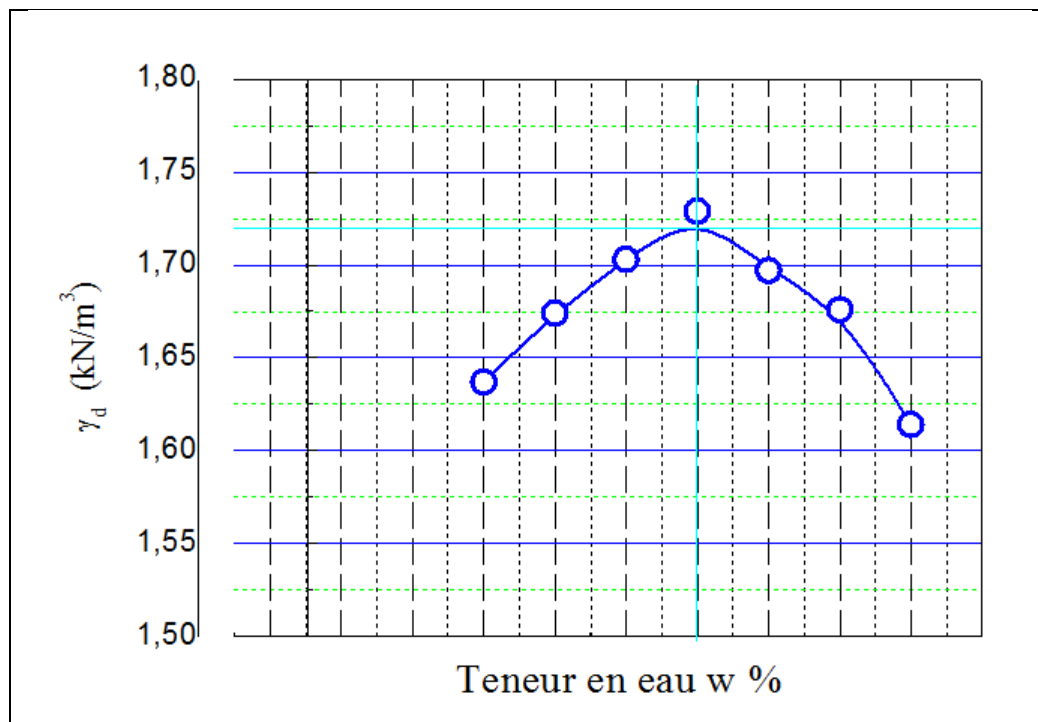


Figure III.4 : courbe Proctor du tuf

LeTuf présente une teneur en eau optimale de l'ordre de 14% et un poids volumique sec maximum de l'ordre de 17. 29 KN/m³

● **Equivalent de sable**

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau III.4.

D'après la classification LCPC, le Tuf de Laghouat est un sable argileux

Tableau III.4: Equivalent de sable du Tuf

Equivalent de sable		
Paramètres	ES_V	ES_P
Tuf	26.19	23.65

ES_V : (Équivalent de sable visuel)

ES_P : (Équivalent de sable au piston)

● **Limites d’Atterberg ou limites de consistance**

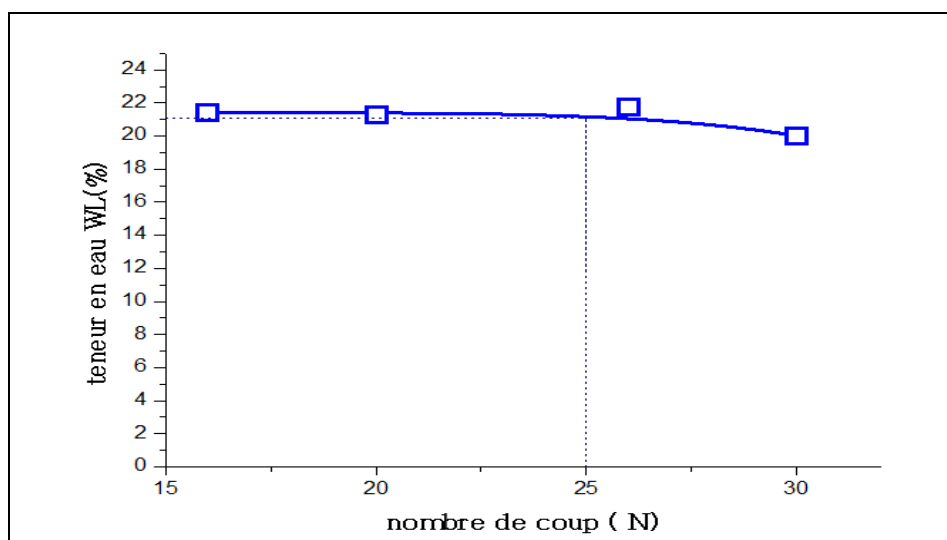


Figure III. 5: courbe limites d’Atterberg de tuf

Les mesures de ces limites sont indiquées dans le tableau III.5.

Tableau III.5: Limites de consistance de la Tuf

$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P
21.08	19.45	1.63

La connaissance de W_L et I_P permet de situer les sols dans le diagramme de plasticité de Casagrande. Placée dans le diagramme de plasticité, le Tuf de région de Laghouat apparait comme un limon minéral de faible compressibilité.

III.2.3.Sable calcaire

Le sable calcaire est issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires, cette station dites Station d’Ouezzane située au nord de la commune Laghouat (photoIII.4) près du pont d’Oued M’zi. En effet, dans cette station, la fraction des granulats dont le diamètre est supérieur à 3 mm est commercialisée, le reste est rejeté dans la nature.

Le sable de calcaire sera nommé SC



Photo III.4 : sable calcaire de d'Oued M'Zi

La provenance des matériaux est illustrée sur la Photo III.5



Photo III.5 :Provenance des matériaux

III.2.3.1.Essais de caractérisation

● Analyse granulométrique

La distribution des particules du sable calcaire est traduite par la courbe granulométrique suivante (Figure III.6).

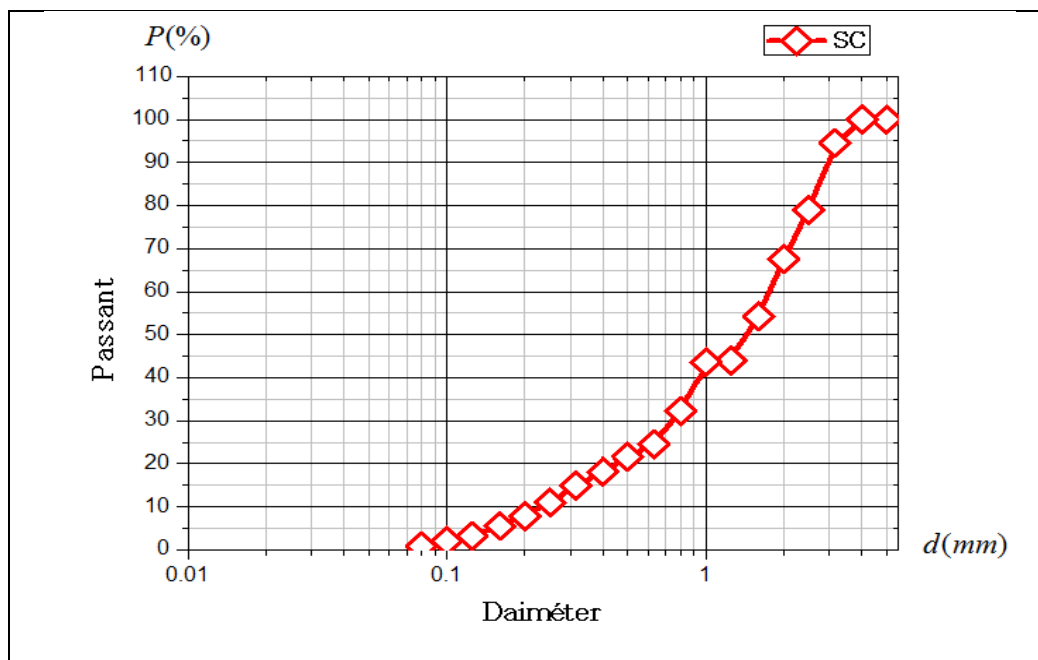


Figure III.6: Courbe granulométrique de sable de calcaire

Les résultats des analyses granulométriques sont illustrés dans le tableau III.6.

Tableau III.6: Résultats de l’analyse granulométrique du sable de calcaire

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	Cu	Cc
2.17%	0%	7.78	1.29

À partir de ces résultats, et d’après la classification des sols LCPC (laboratoire central des ponts et chaussées) basée sur les coefficients d’uniformité et de courbure, le sable calcaire se classe parmi le sable propre bon gradué symbolisé par les lettres Sb (sable propre bon gradué), le sol présente une granulométrie étalée suivant le critère de caquot-kérisel

● **Equivalent de sable**

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau III.7

Tableau III.7: Equivalent de sable du sable calcaire

Equivalent de sable		
Paramètres	ES_V	ES_P
sable	79.07	71.37

D’après la classification LCPC, le sable calcaire de Laghouat est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses

● **Essai Proctor Normal**

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

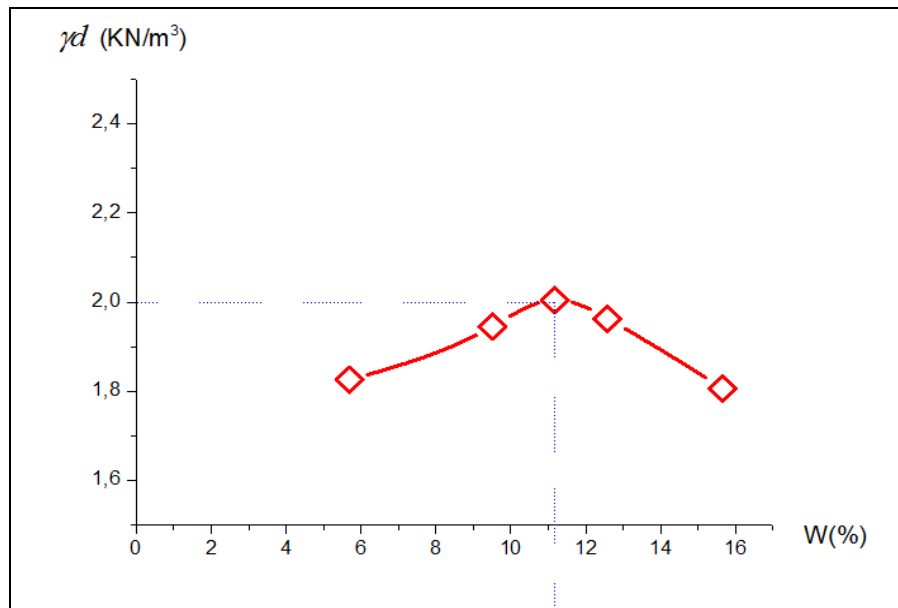


Figure III.7 : courbe Proctor du sable calcaire

Le sable calcaire présente une densité sèche maximale de l'ordre de 20.05kN/ m³ correspondant à une teneur en eau optimale de l'ordre de 11.17%.

● **Limites d'Atterberg ou limites de consistance**

Les mesures de ces limites sont indiquées dans le tableau III.8.

Tableau III.8: Limites de consistance de sable calcaire

$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P
26.23	n.m	n.m

n.m : non mesurable

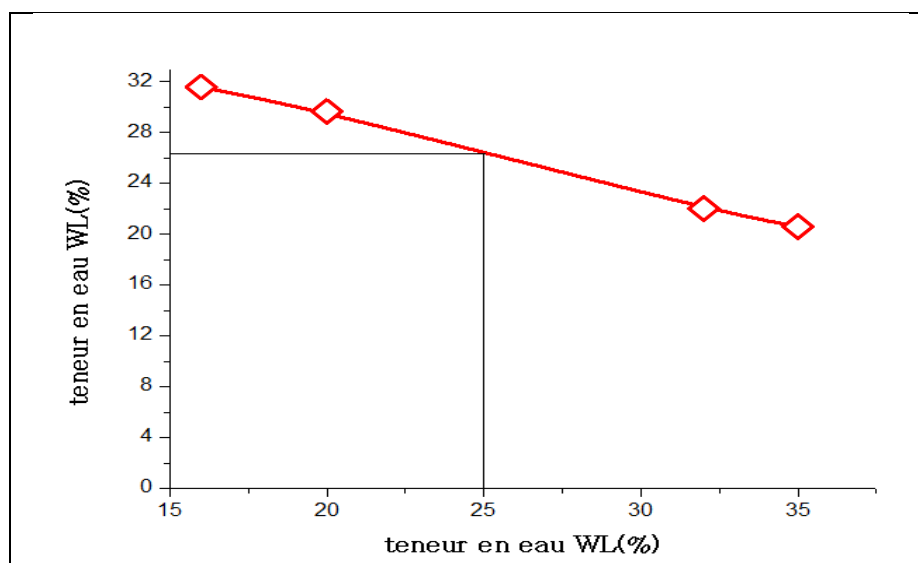


Figure III.8 : courbe limites d'atterberg de sable calcaire

III.2.4.Mélanges (80% tuf-20% sable calcaire)

III.2.4.1.Essais de caractérisation

● Analyse granulométrique

Les résultats des analyses granulométriques sont illustrés dans le tableau III.9.

Tableau III.9: Résultats de l'analyse granulométrique du mélange (Tuf - sable calcaire)

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	Cu	Cc
2.17%	0%	10.44	0.63

À partir de ce résultat, et d'après la classification des sols LCPC (laboratoire central des ponts et chaussées) basée sur les coefficients d'uniformité et de courbure, le mélange (tuf + sable calcaire) se classe parmi les sables propres mal gradués symbolisés par les lettres SM (sable propre mal gradué), le mélange présente une granulométrie étalée suivant le critère de Caquot-kérisel.

Les résultats de l'analyse granulométrique de mélange (80%tuf + 20%sable calcaire) sont représentés graphiquement dans la figureIII.9.

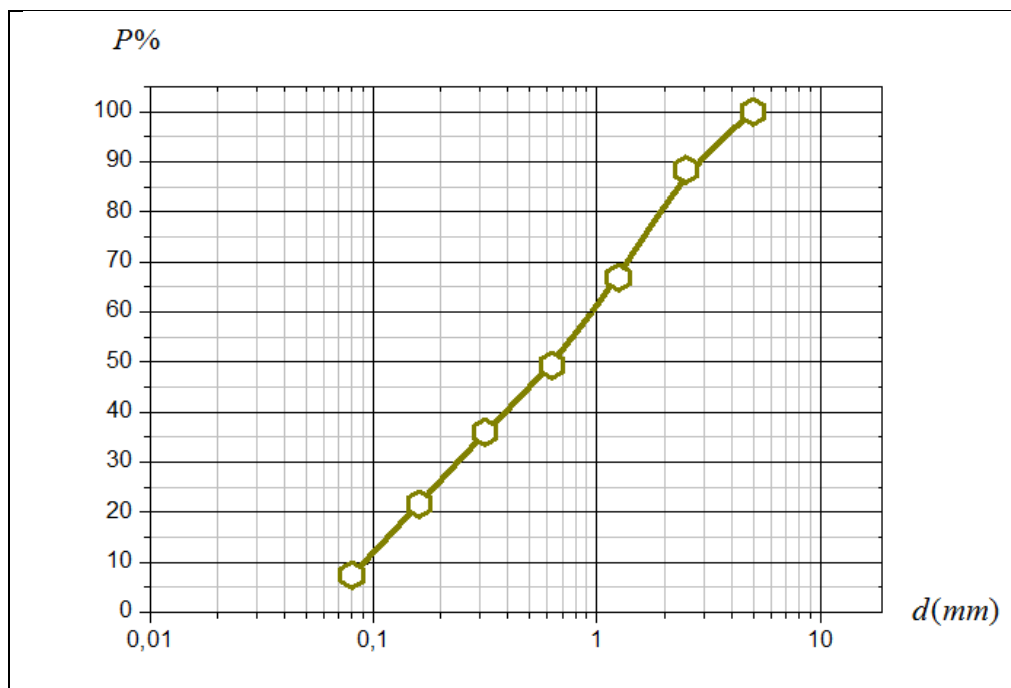


Figure III.9 : courbe granulométrique de (tuf - sable calcaire)

● Limites d'Atterberg ou limites de consistance

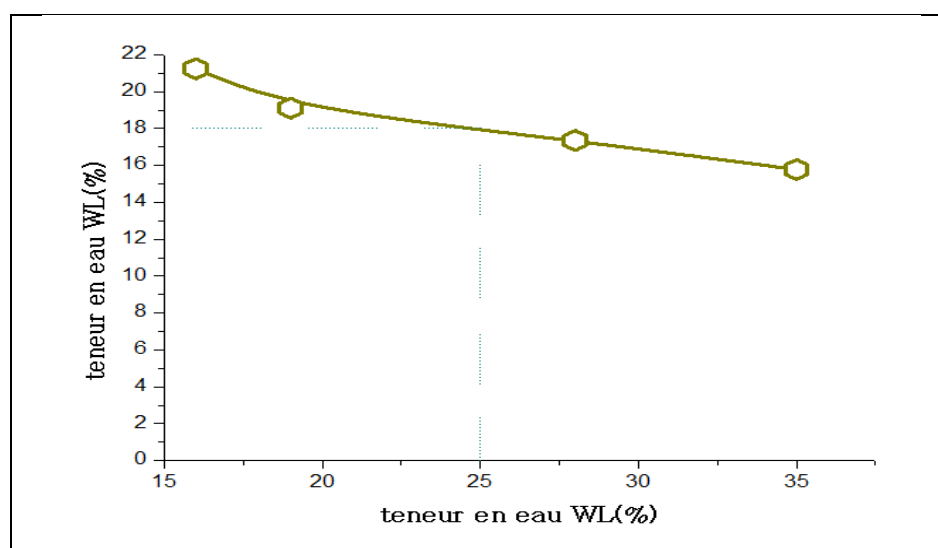


Figure III.10 : courbe limites d'atterberg de mélange (80% Tuf-20% - sable calcaire)

Les mesures de ces limites sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : Limites de consistance des mélanges (80 % Tuf – 20% Sable calcaire)

$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P
17.9	n.m	n.m

n.m : non mesurable

● **Essai Proctor Normal**

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure III.11.

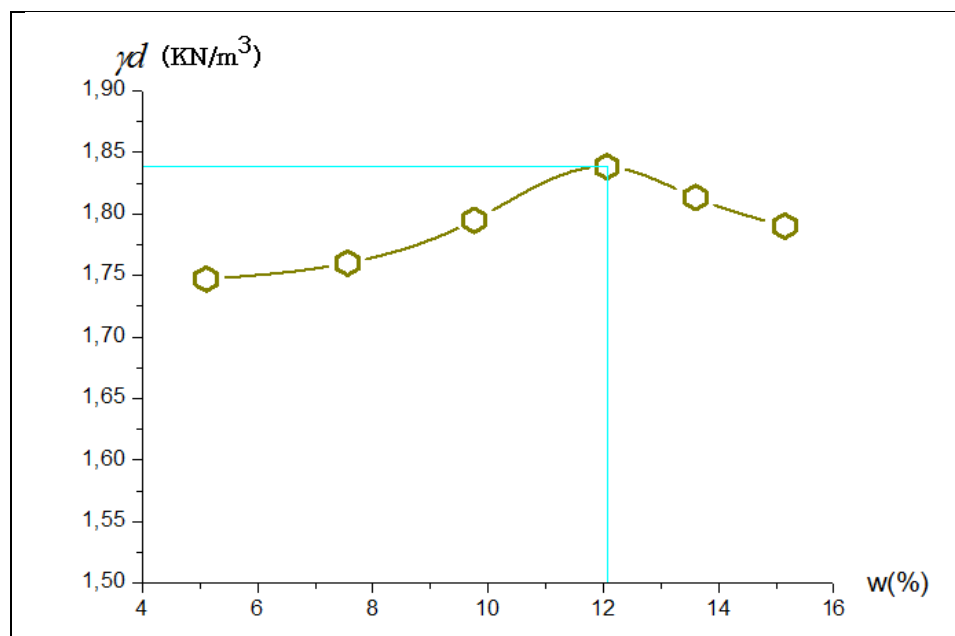


Figure III.11 :courbe Proctor du mélange (Tuf – sable calcaire)

Le sable calcaire présente une densité sèche maximale de l'ordre de 18.83 kN/ m³ correspondant à une teneur en eau optimale de l'ordre de 12.06%.

● **Essai de gonflement libre**

Le résultat du gonflement libre du mélange est indiqué dans le tableau III.11.

L'évolution du gonflement libre de mélange en fonction du logarithme du temps sera représentée graphiquement sur figures III.12.

D'après lecourbe, le gonflement libre du mélange présente un taux de gonflement faible qui est de l'ordre de 2.2%.

Tableau III.11 :Gonflement libre de mélange (Tuf – sable calcaire)

<i>Formulations</i>	<i>G (%)</i>
80%T+20%SC	2.2

III.2.5.1. Les essais de caractérisation des matériaux utilisés

➤ III.2.5.1.1. limites d'Atterberg

Les résultats des limites d'Atterberg sont présentés dans la figure suivantes :

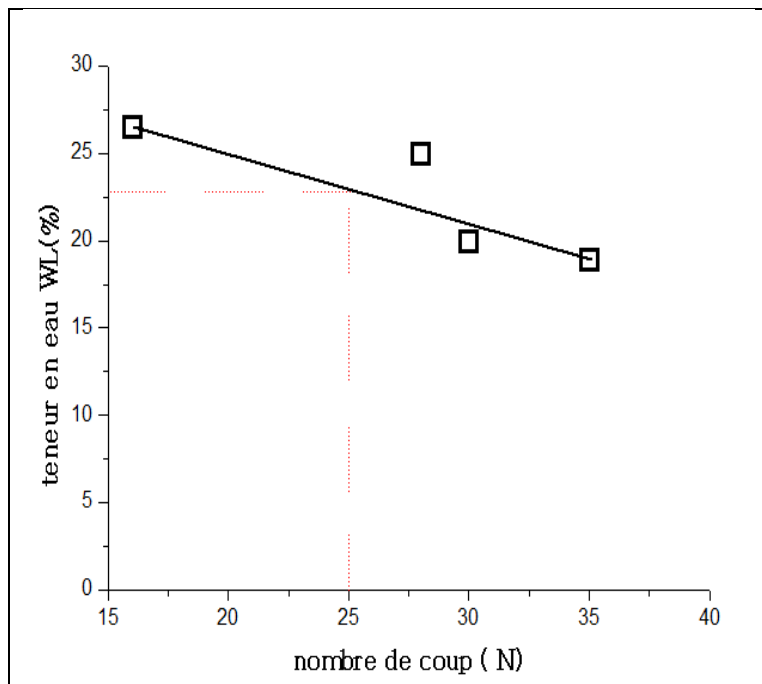


Figure III.13 : Limite de liquidité (WL%)M1

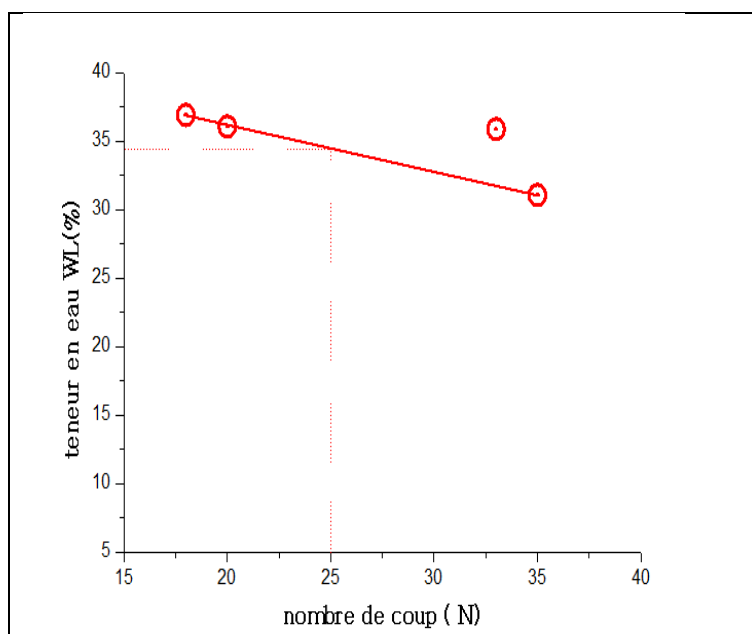


Figure III.14 : Limite de liquidité (WL%)M2

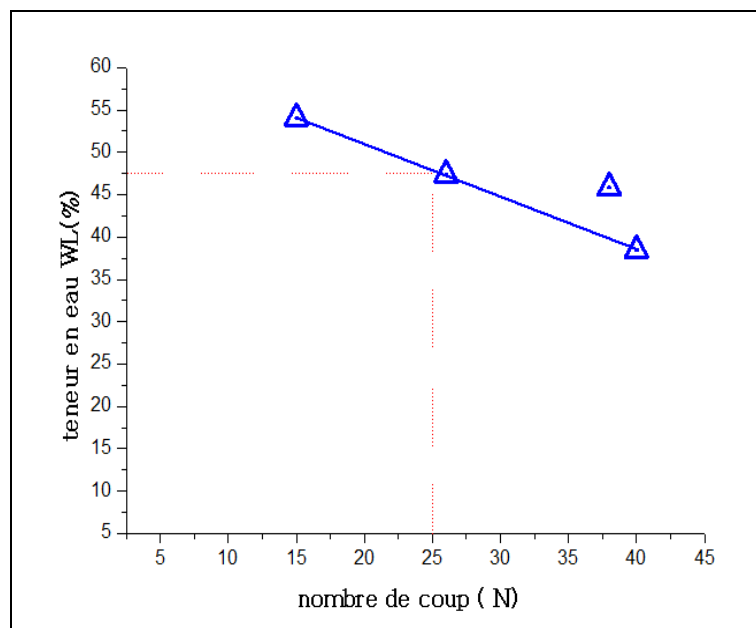


Figure III.15 : Limite de liquidité (WL%)M3

Les résultats des limites de consistance sont illustrés dans le tableau III.12.

Tableau III.12 : Limites de consistance de mélange (M1, M2 et M3)

%B	w_L (%)	w_P (%)	I_P
80% T+20%SC +5% B	22.79	19.23	5.61
80% T+20%SC +10% B	34.42	18.73	17.29
80% T+20%SC +15% B	47.53	30.50	18.18

La connaissance de w_L et I_P permet de situer les sols dans le diagramme de plasticité de Casagrande (figure III.15). Placée dans le diagramme de plasticité, le mélange de M1 apparaît comme une argile minérale de faible plasticité, et le mélange M2 et M3 apparaît comme une argile minérale de moyenne plasticité.

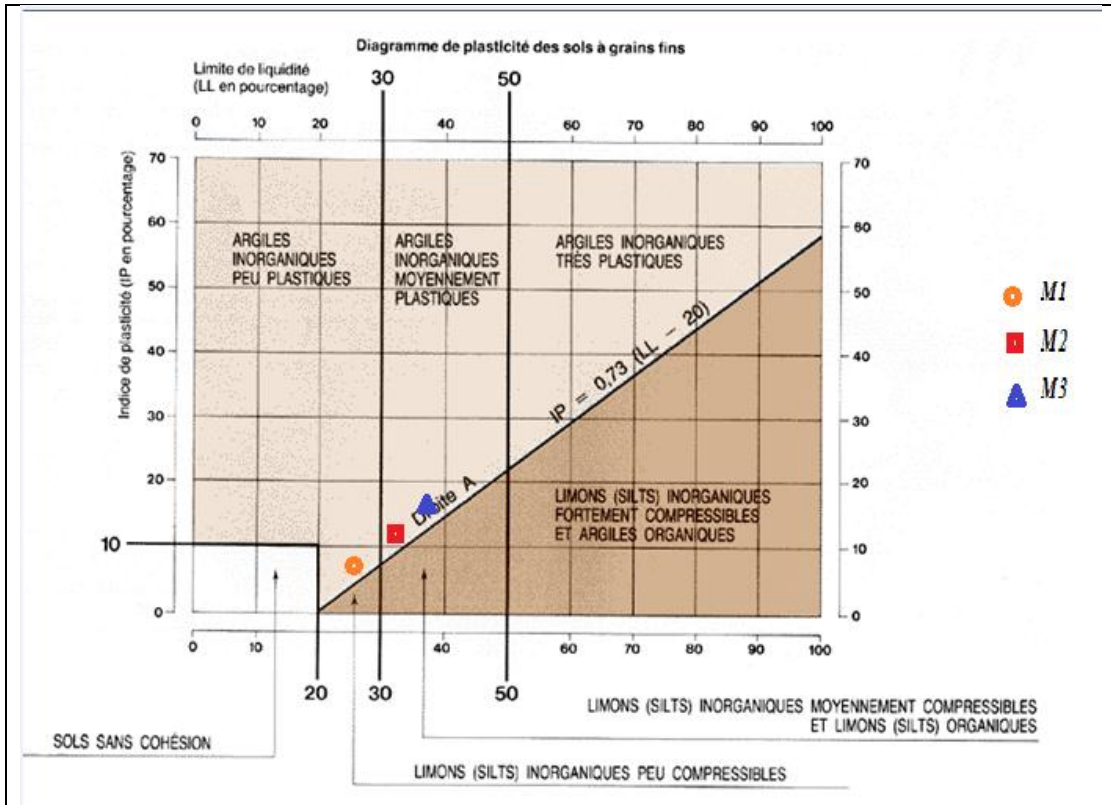


Figure III.16 : classification des sols fins sur le diagramme de casagrande (Philip ponnat et Hubert .1997)

✓ Effet du pourcentage de bentonite sur les limites de consistance

Les résultats du tableau (III. 12) sont traduits par des courbes des figures suivantes :

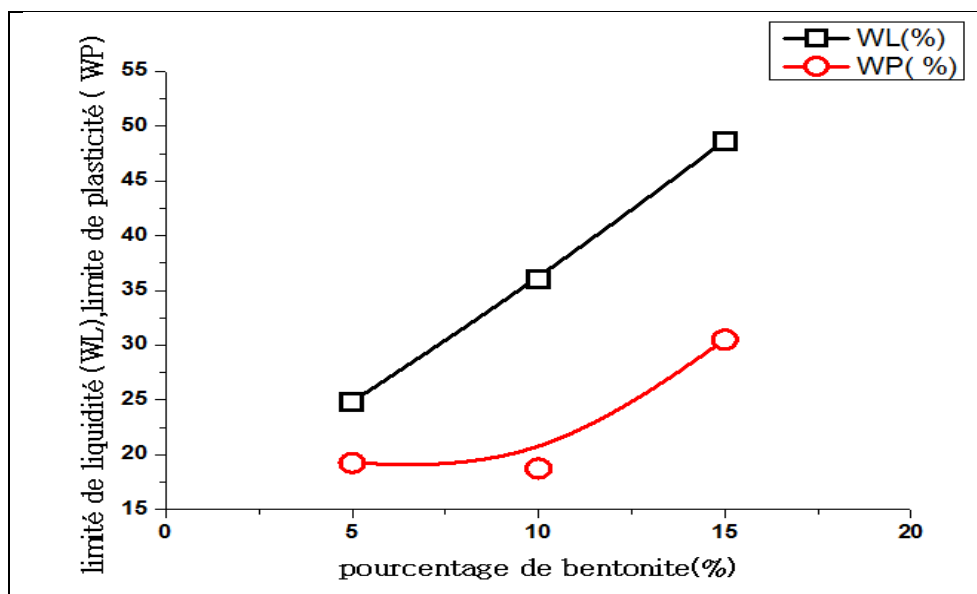


Figure III.17: Effet du pourcentage de bentonite sur les limites de consistance des mélanges(M1, M2et M3)

Les limites de consistance des différents mélanges augmentent avec l'augmentation du pourcentage de bentonite ajoutée. Les limites de liquidité des mélanges passent de 25 à 50 % Pour des pourcentages de bentonite variant de 5 à 15 %, cela est dû à l'augmentation du taux des particules fines.

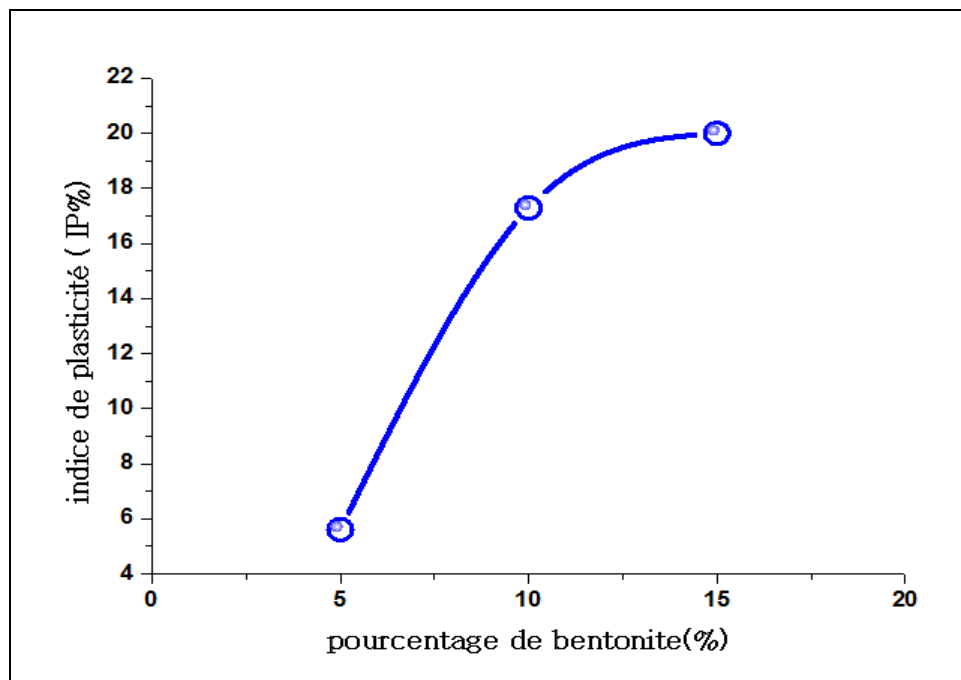


Figure III.18: Effet du pourcentage de bentonite sur l'indice de plasticité de mélange (M1, M2 et M3).

Pour l'indice de plasticité, et par définition, il représente la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, nous avons calculé cet indice pour les différents mélanges. Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure III.17. Les mêmes constatations observées pour les limites de liquidité sont obtenues pour les indices de plasticité, c.à.d. une augmentation de l'indice de plasticité avec l'ajout de bentonite.

III.3. Paramètres de gonflement des mélanges

L'estimation du potentiel de gonflement des mélanges à partir des caractéristiques physiques montrent que ces mélanges présentent des taux de gonflement faible à moyen. Le tableau suivant classe ces mélanges d'après leurs amplitudes au gonflement.

Tableau III.13 : Estimation indirecte du potentiel de gonflement des mélanges

<i>Les auteurs</i>	<i>paramètres</i>	M1	M2	M3
<i>Sanglerat (1981)</i>	I_p	b	b	b
<i>Dakstana (1965)</i>	w_l	F	F	F

b : bas ; F : Faible

Les caractéristiques physiques sont de bons indicateurs pour l'estimation du gonflement des sols. Néanmoins, il reste à confirmer cette évaluation par les mesures directes du potentiel.

III.3. 1. Mesure du gonflement libre

Les résultats du gonflement libre des différents mélanges sont indiqués dans le tableau III.14. L'évolution du gonflement libre des différents mélanges en fonction du logarithme du temps sera représentée graphiquement sur les figures III.19.

La tendance de la variation du gonflement libre dans le temps est la même pour tous les mélanges. D'après les courbes, plus le pourcentage de bentonite ajoutée augmente, plus le taux de gonflement augmente. Le gonflement libre de la bentonite est l'ordre de 47.5 % (Gueddouda, 2011). Le taux de gonflement des mélanges varie entre 3 et 15 % pour les pourcentages de bentonite ajoutée allant de 5 à 15 %.

Tableau III.14 : Gonflement libre de mélange (M1, M2, M3).

<i>Formulations</i>	<i>G (%)</i>
<i>80%T+20%SC+5 % B</i>	3
<i>80 % T+20%SC+10 % B</i>	5
<i>80 % T+20%SC +15% B</i>	15



Photo III 6 : échantillons pour la mesure de gonflement libre de mélange (M1, M1, M3)

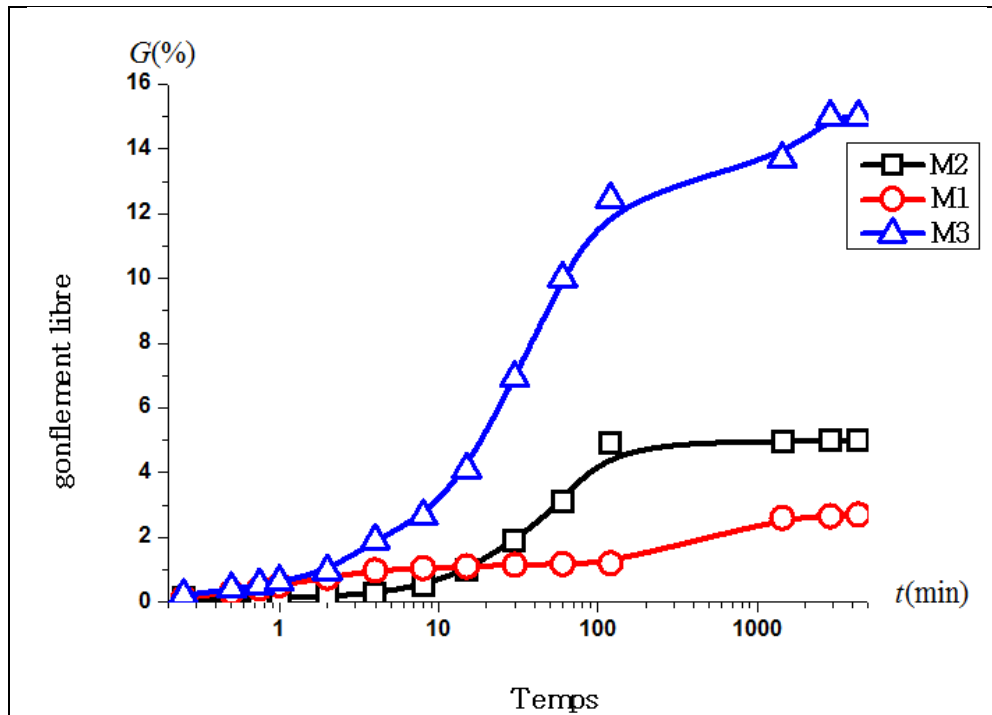


Figure III.19: Evolution du gonflement libre en fonction du temps des mélanges (M1, M2 et M3)

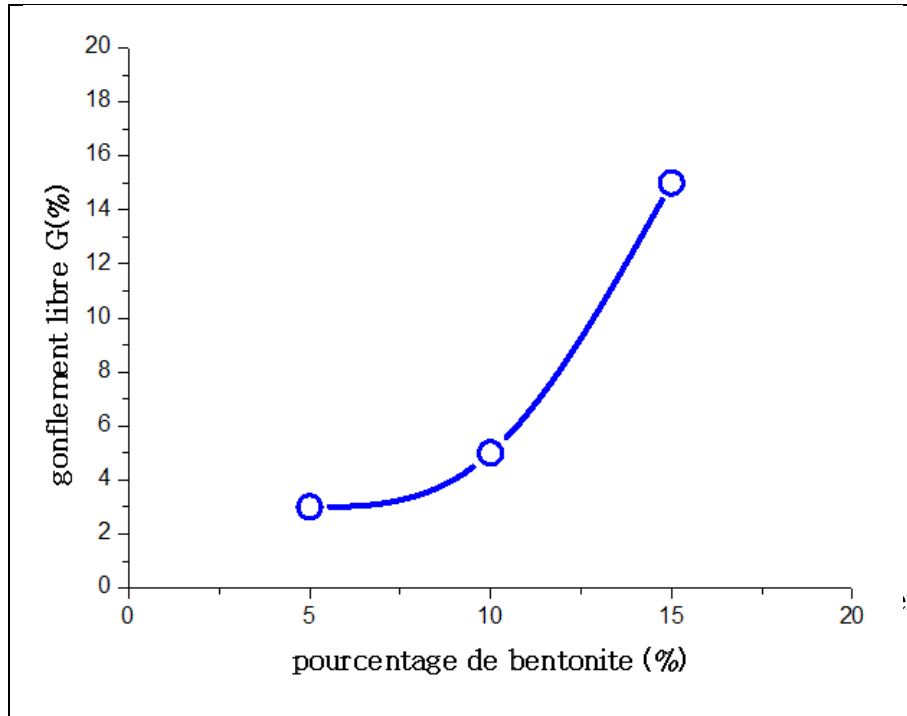


Figure III.20 : Effet du pourcentage de bentonite sur le gonflement libre de mélange (M1, M2 et M3).

III. 4. Conclusion

Les essais de caractérisation réalisés sur les trois matériaux utilisés ont permis de signaler les constatations suivantes :

Les résultats des essais de consistance réalisés sur les mélanges ont montré d'après l'abaque de Casagrande que le mélange M1 apparaît comme une argile minérale de faible plasticité, et les mélanges M2 et M3 apparaissent comme des argiles minérales de moyenne plasticité.

L'essai Proctor Normal réalisé sur les mélanges 80% Tuf –20% sable calcaire nous a permis d'obtenir la teneur en eau optimale de l'ordre de 12.06 % et un poids volumique sec maximum de l'ordre de 18.83 KN / m³. Ces deux valeurs sont utilisées pour les essais de gonflement et conductivité hydrique des différents mélanges (M1, M2et M3).

Les mesures directes des paramètres de gonflement ont montré que les mélanges (M1, M2) présentent un taux de gonflement faible à l'ordre de 3% à 5% et pour le mélange M3 présente un taux de gonflement moyen qui est de l'ordre de 15%.Le mélange 80% Tuf – 20% sable calcaire présente de gonflement faible 2.2 %.

Chapitre IV : Comportement Hydrique et mécanique des mélanges**IV.1. Introduction**

Pour faire barrière à l'infiltration des lixiviats de déchets, une couche de sol imperméable constituée de matériaux argileux est une solution fréquemment adoptée, seule ou combinée avec des géosynthétique.

Les expériences techniques et scientifiques indiquent qu'en mélangeant un matériau granulaire avec une argile active comme la bentonite, on obtient un mélange de faible perméabilité qui est mécaniquement stable et ceci en dépit de la nature contrastée des propriétés des constituants en terme de dimensions des grains et de l'activité chimique. Il en résulte que l'agrégation d'un matériau pulvérulent avec la bentonite, si elle est judicieusement proportionnée et compactée, peut satisfaire plusieurs exigences hydrauliques et mécaniques pour des travaux de terre (Kouloughli, 2007).

Ce chapitre est divisé en deux parties, Nous présentons dans la première partie, la définition de la perméabilité saturée ainsi que les facteurs qui influent sur ce paramètre. Les méthodes de mesure de ce coefficient sont présentées. Nous présentons dans la deuxième partie, l'étude du comportement mécanique (résistance au cisaillement) dans les états saturé. Les facteurs influençant sur les paramètres mécaniques des sols sont indiqués.

IV.2.Comportement Hydrique**IV.2.1.principe de l'essai oedométrique**

Le principe général de la détermination de la perméabilité d'un sol est de mesurer la déformation à charge constante d'une éprouvette cylindrique avec déformation latérale nulle

L'échantillon de sol est placé dans une cellule cylindrique entre deux pierres poreuse. Ce cylindre est relié à sa base à un récipient rempli d'eau surélevé par rapport à lui, après la saturation des échantillon il doit faire les palier de charge alternativement et croissantes pour mesure le tassement en fonction du temps pour chacun des palier durant période qui est habituellement de 24 heures, qui représente le tassement total pour la charge considérée .

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

- ✓ Courbe de compressibilité : qui indique le tassement total en fonction de logarithme de la contrainte appliquée.
- ✓ Courbe de consolidation : qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.

IV.2.2. Résultats et discussion

Les courbes de compressibilité pour les différents mélanges sont représentées dans la Figure IV.1. On constate d'après cette figure que l'indice des vides est pratiquement constant pour des contraintes verticales faibles. Par contre en augmentant les contraintes σ une chute de l'indice des vides.

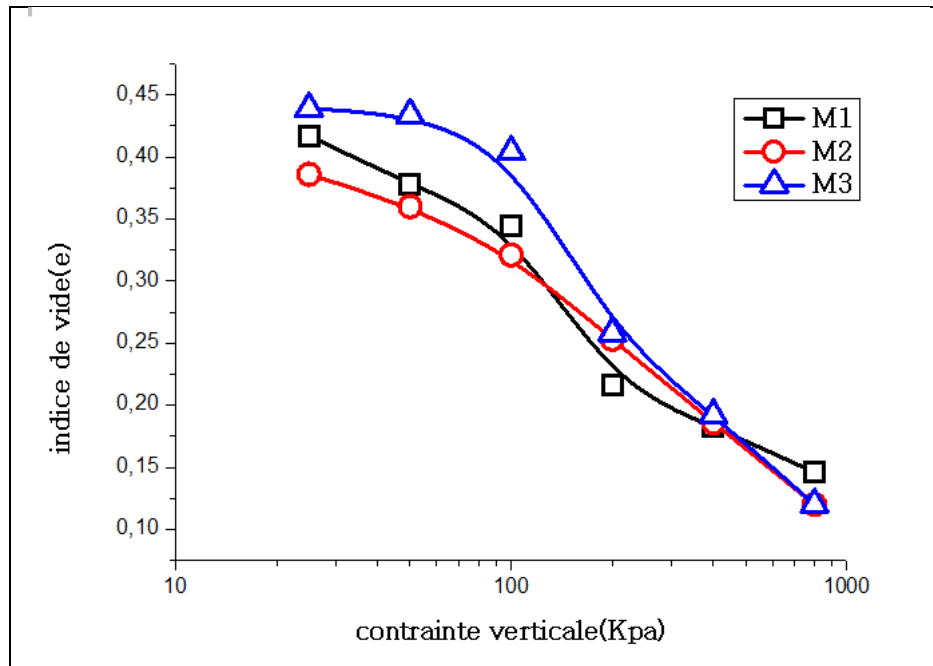


Figure IV.1 : courbes de compressibilité oedométriques des mélanges (M1, M2 et M3).

IV.2.2.1. Variation des coefficients de compressibilité et de gonflement des mélanges sable-bentonite

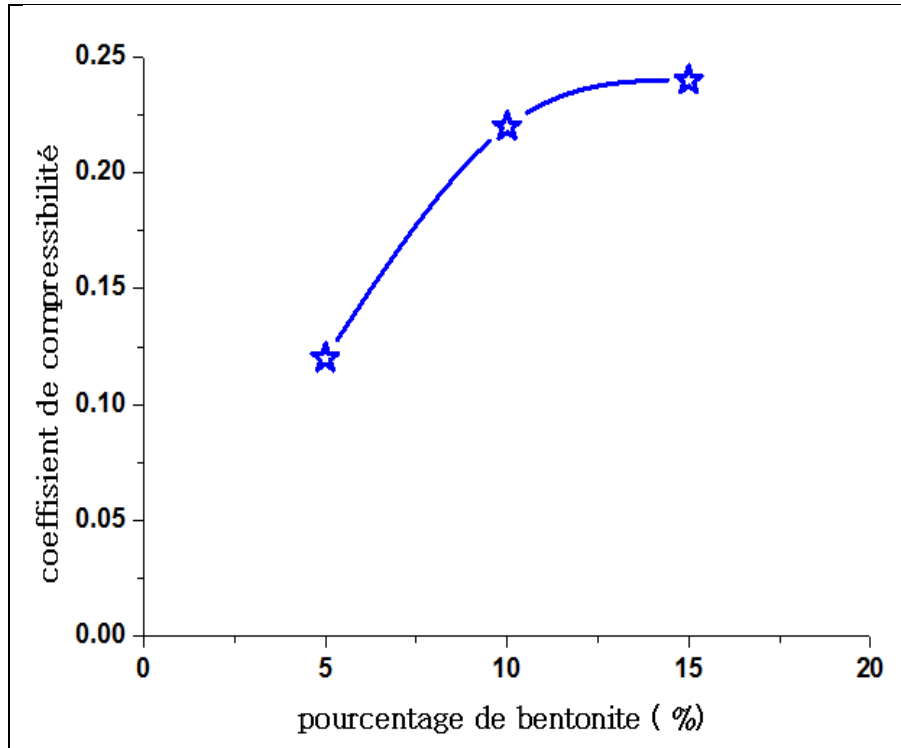
A partir des courbes de compressibilité, on peut déterminer les coefficients C_c et C_s graphiquement dans le plan $(e-\log\sigma')$ qui représentent les pentes de chargement ; c_s est estimé à partir de la valeur de c_c selon les deux formules suivantes :

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \quad C_s = \frac{c_c}{4} \quad \text{IV.1}$$

$\Delta \log \sigma'$: Variation de σ' pour le dernier intervalle de chargement.

Δe : Variation de e pour le dernier intervalle de chargement.

Après les résultats de calcul on doit représenter les variations des coefficients de compressibilité et de gonflement en fonction du pourcentage de bentonite ajouté aux mélanges sont représentées graphiquement sur les figures IV.2 et IV.3



Figures IV.2 : variation des coefficients de compressibilités des mélanges s/b

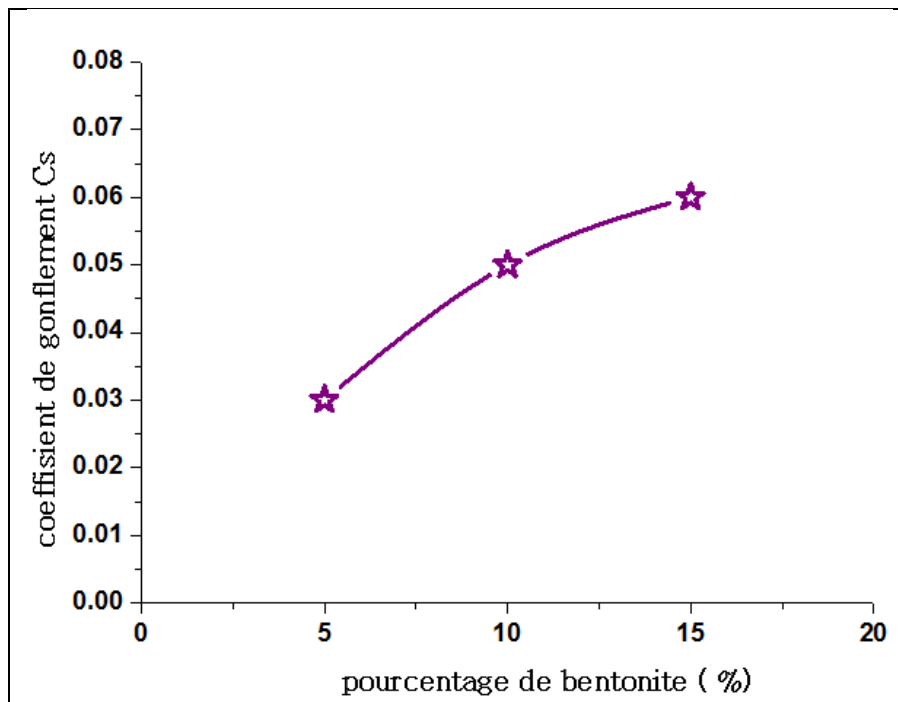


Figure IV.3 : variation des coefficients de gonflement (c_g) des mélanges s/b

D'après la Figure IV.2 et Figure IV.3, on remarque que les coefficients de compressibilité (c_c) et de gonflement (c_g) augmentent avec le pourcentage de bentonite.

IV.2.2.2. variation du coefficient de consolidation c_v

Le coefficient de consolidation C_v est un paramètre très important pour l'estimation de la conductivité hydraulique, il est fonction de la hauteur de l'échantillon H_0 et t_{90} (méthode de Taylor). Sa valeur est donnée par l'expression suivante:

$$C_v = \frac{0,848 \times H_0^2}{4 \times t_{90}} \quad \text{IV.2}$$

H_0 : hauteur de l'échantillon ($H_0 = 0,02$ m).

t_{90} : la projection d'intersection d'une droite coupe l'axe d'ordonnées ($t=0$) avec la courbe de compressibilité. (Figure IV.4)

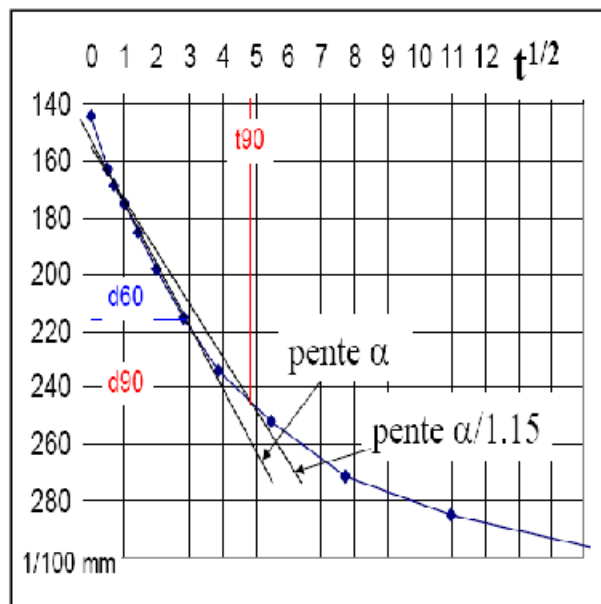


Figure IV.4 : courbes des tassements en fonction du temps (Claude Mieussens, 2003).

Les figures (IV.5, IV.6, et IV.7) présente la méthode de Taylor pour la détermination du coefficient de consolidation c_v des différents mélanges.

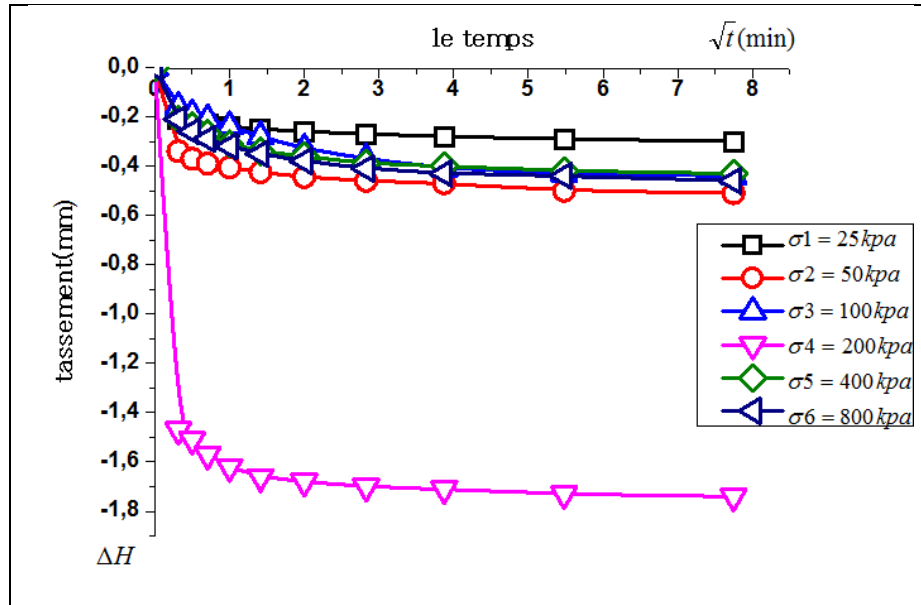


Figure IV.5 : courbes consolidations en fonction du temps et de chargement (M1)

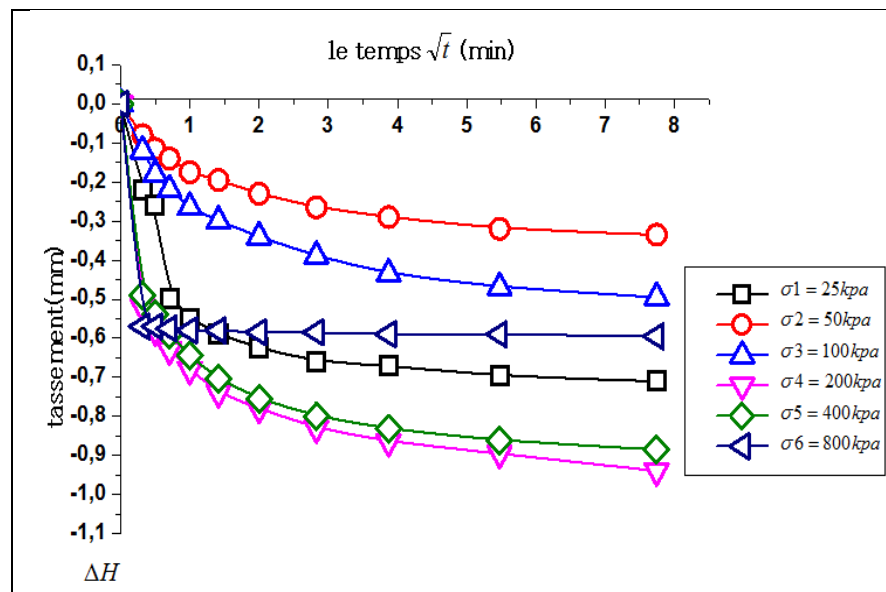


Figure IV.6 : courbes consolidations en fonction du temps et de chargement (M2)

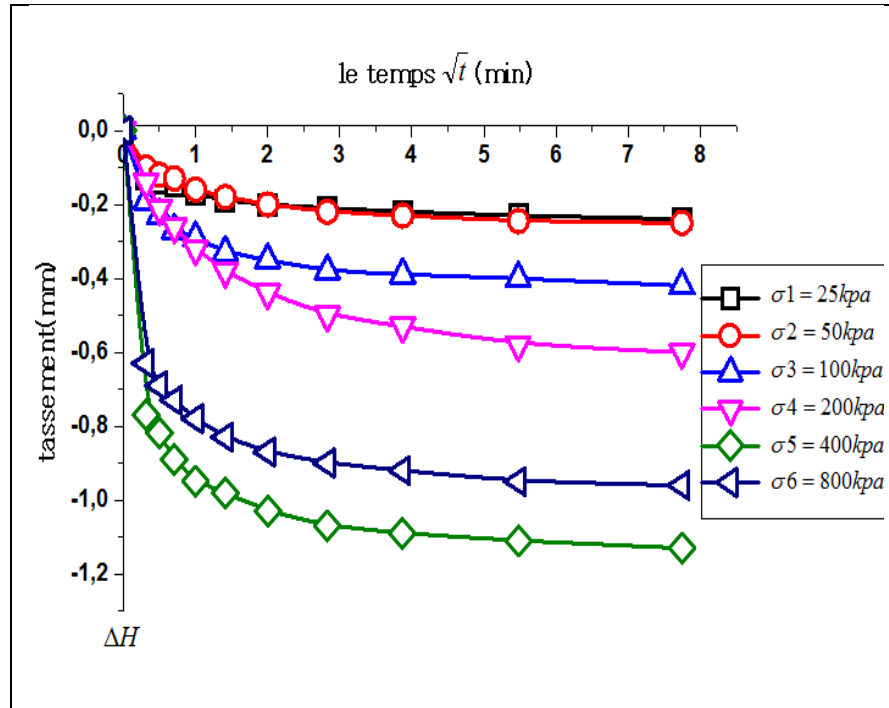


Figure IV.7 : courbes de consolidations en fonction du temps et de chargement (M3)

Les résultats de la variation de coefficients de consolidation des mélanges (M1, M2 et M3) en fonction de la contrainte verticale appliquée sont représentés graphiquement sur la Figure IV.8.

En général ; Nous remarquons que pour chaque mélange ; le coefficient c_v augmente avec la contrainte appliquée.

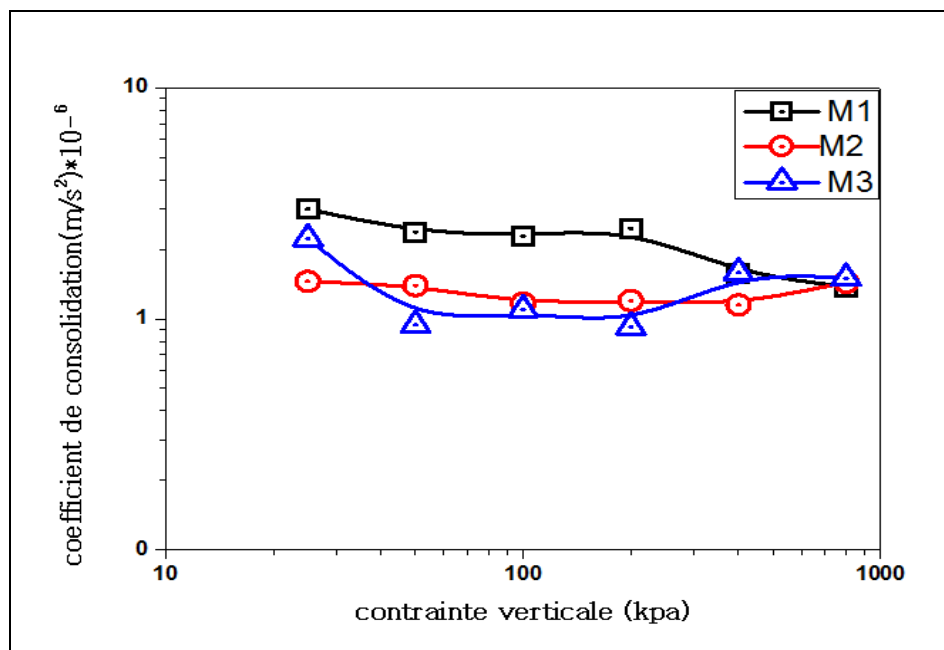


Figure IV.8 : variation des coefficients de consolidation (c_v) des mélanges (M1, M2 et M3) en Fonction de la contrainte verticale.

IV.2.2. 3.variation de la conductivité hydraulique des mélanges sable- bentonite

L'application principalement visée est l'enfouissement des déchets ménagers et industriels qui nécessite suivant la réglementation, sur le fond et les flancs de l'installation de stockage, une barrière étanche de perméabilité à la saturation inférieure ou égale à 10^{-9} m/s.

L'estimation indirecte de la conductivité hydraulique à partir de l'essai oedométrique sur des échantillons remaniés basée sur des résultats graphiques (courbes de compressibilité et de consolidation) peut donner une estimation de la valeur de la conductivité hydraulique « k_{sat} » d'après l'équation suivante :

$$k_{sat} = c_v m_v \gamma_w \tag{IV.3}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma (1+e_0)} \tag{IV.4}$$

Les résultats de la conductivité hydraulique des mélanges tuf sable - bentonite en fonction des contraintes verticales appliquées sont présentés graphiquement dans la Figure IV.9.

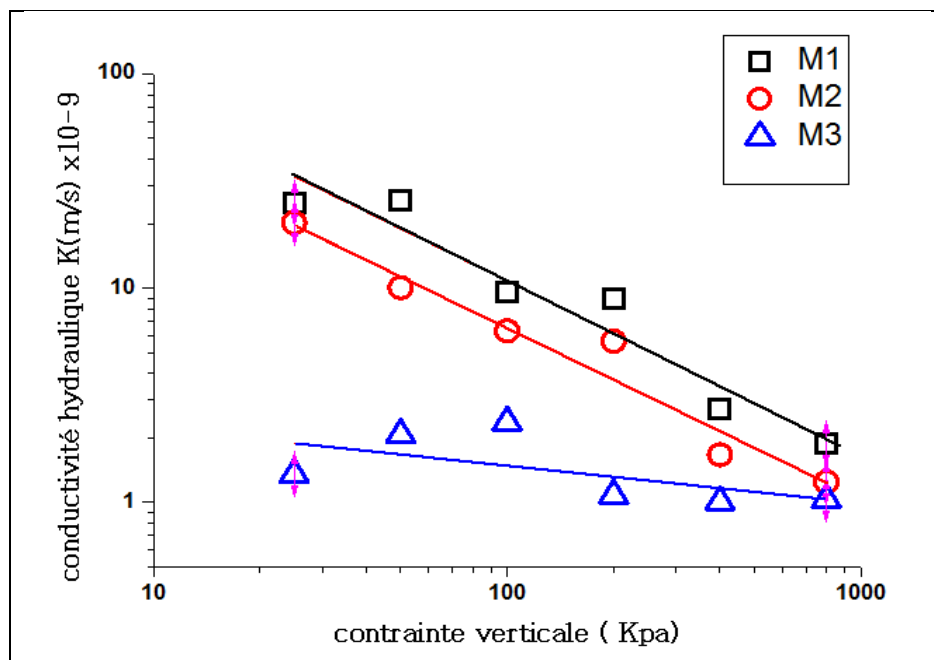


Figure IV.9 : conductivité hydraulique des mélanges (M1, M2 et M3) en Fonction de la contrainte verticale appliquée.

Après la courbe de Figure IV.9 on remarque :

- la perméabilité saturée diminue avec l'augmentation de la contrainte appliquée.
- Pour une même contrainte appliquée ; la perméabilité diminue avec l'augmentation des pourcentages de bentonite.

- Pour le même mélange, la contrainte appliquée et la conductivité hydraulique sont inversement proportionnelles.
- D'après les résultats obtenus les mélanges qui satisfaisant le critère de perméabilité des barrières étanches sont les mélanges M2 et M3 et qui présentent des perméabilités de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-9} m/s pour les contraintes appliquées de 25 à 800 KPa.

IV.3. Comportement mécanique

IV.3.1. Résistance au cisaillement des mélanges (Tuf- sable calcaire – bentonite) à teneur en eau de compactage

L'objectif de cette partie expérimentale, dans un premier temps, est la détermination des paramètres de résistance au cisaillement pour les différents mélanges (M1, M2 et M3), qui sont l'angle de frottement interne et la cohésion.

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 τ (ou résistance au cisaillement) pour une contrainte normale donnée σ .

🌱 Préparation des échantillons

Après passage des trois constituants (Tuf- sable calcaire – bentonite) à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, une proportion massique de premier mélange du (80%T+20%SC) et deuxième mélange 80% de Tuf ; 20% de sable calcaire et bentonite (5%, 10%, 15%) est mélangé manuellement avant d'ajouter la quantité d'eau de gâchage, représentant les teneurs en eau de l'OPN (12.6%) de poids sec du mélange. Le malaxage est fait en plusieurs fois par criblage dans un tamis de 4 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 Proctor normal. Après démoulage, les éprouvettes sont découpées verticalement en trois parties, puis à l'aide d'une trousse coupante, qui possède les mêmes dimensions que celles de la boîte de cisaillement (forme carrée, de côté 6 cm et de hauteur 2 cm), on a pris un seul échantillon de chaque partie. Pour s'assurer que la surface de contact est plane, on procède à l'arasage et au lissage de l'échantillon dans les deux côtés, supérieur et inférieur, avec remplissage des vides. Après la phase de préparation de l'échantillon, il est mis dans la boîte de cisaillement appelée aussi boîte de Casagrande.

Les échantillons des mélanges sable-bentonite sont cisailés à leurs teneurs en eau de compactage. Les contraintes normales utilisées pour ces essais sont :

$$\sigma_1 = 100 \text{ kPa} ; \sigma_2 = 200 \text{ kPa} ; \sigma_3 = 300 \text{ kPa}$$

La vitesse de cisaillement utilisée est de 1mm/min.

IV.3.2. Résultats et discussion

● Mélange (80% Tuf +20% SC +5% B)

Les photos IV.1. Présentent l'état des échantillons après cisaillement.

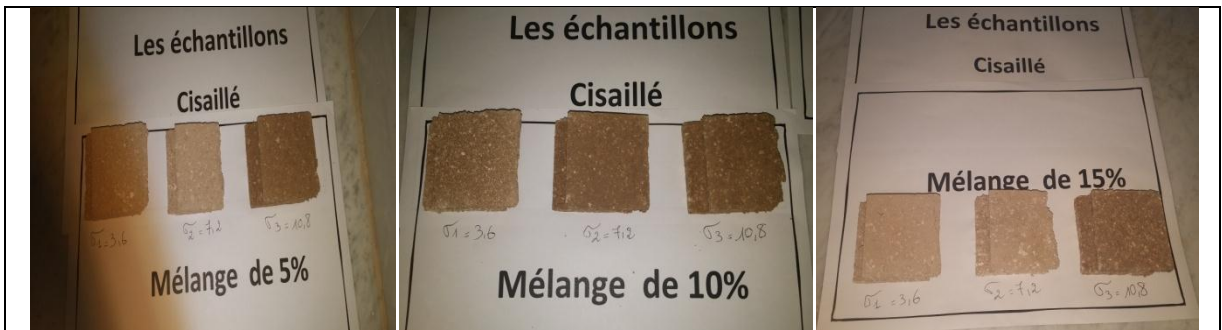


Photo IV.1 : Echantillon après cisaillement des mélanges M1, M2 et M3

Les caractéristiques mécaniques des mélanges bentonite-sable s'obtiennent en traçant les droites de Coulomb (courbes intrinsèques) dans un repère orthonormé qui présente, en abscisses les contraintes verticales (σ_i) et en ordonnées les contraintes de cisaillements maximales (τ_{imax}), (figures IV.16).

Les pentes de ces droites représentent les tangentes des angles de frottement internes ϕ des mélanges sable-bentonite, d'une part, d'autre part, les cohésions C s'obtiennent par l'intersection de ces droites avec l'axe des ordonnées.

La loi de coulomb :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

IV.5

Les figures (IV.10-15) regroupent les courbes de résultat de l'essai de cisaillement.

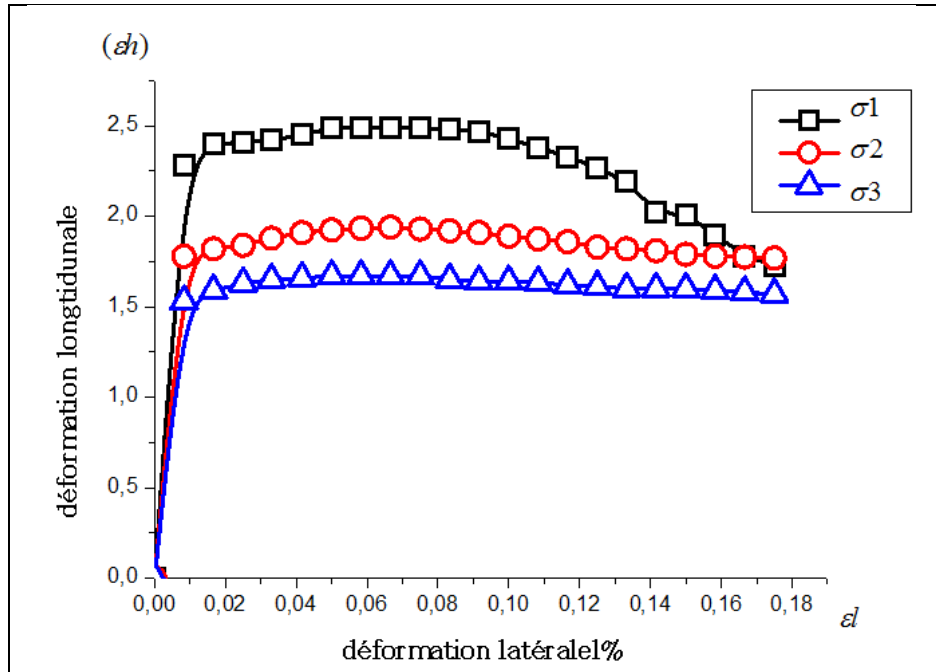


Figure IV.10 : courbe de $\epsilon h=f(\epsilon l)$ de mélange de M1= (80%T+20%Sc+5%B).

:

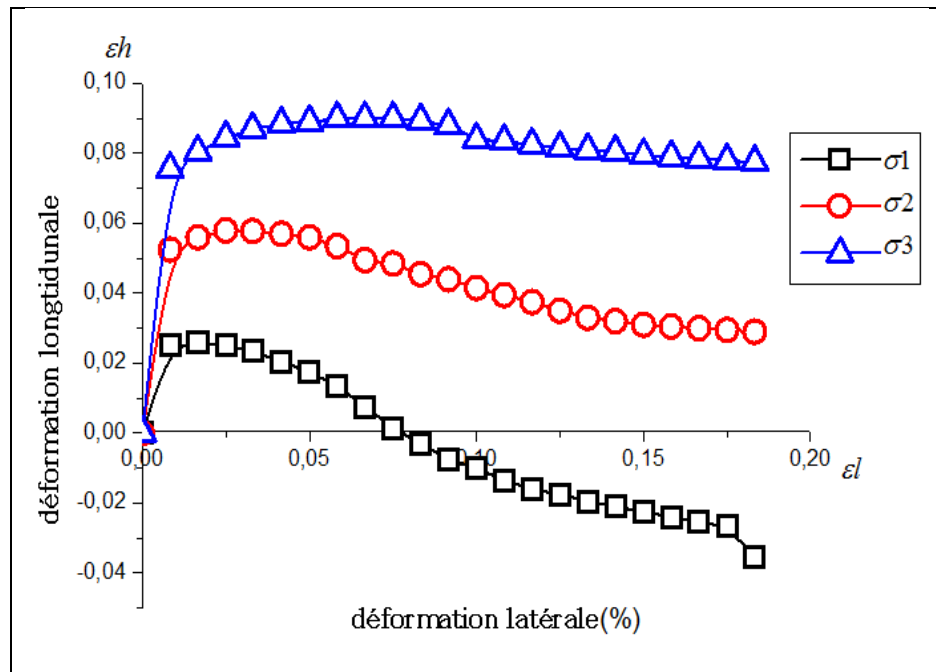


Figure IV.11 : courbe de $\epsilon h=f(\epsilon l)$ de mélange de M2= (80%T+20%Sc+10%B).

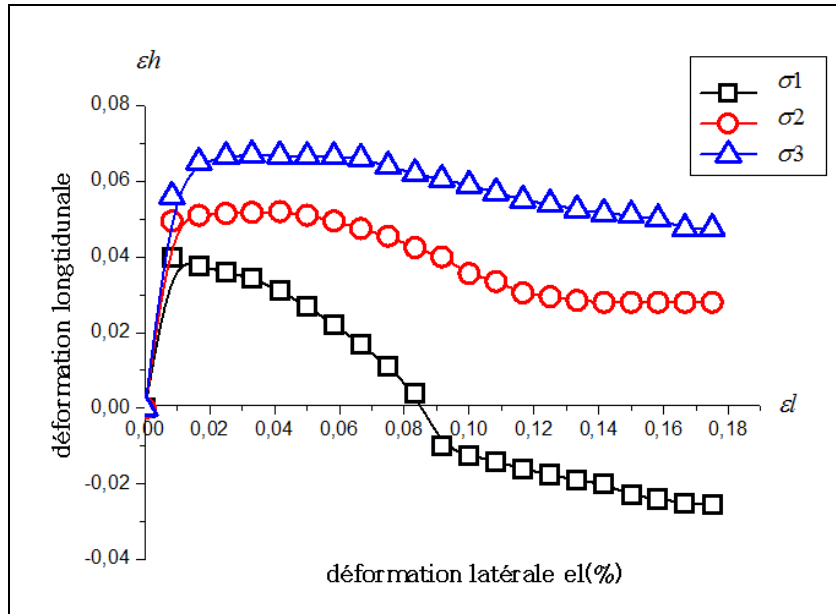


Figure IV.12 : courbe de $\epsilon_h=f(\epsilon_l)$ de mélange de M3= (80% T+20% Sc+15% B).

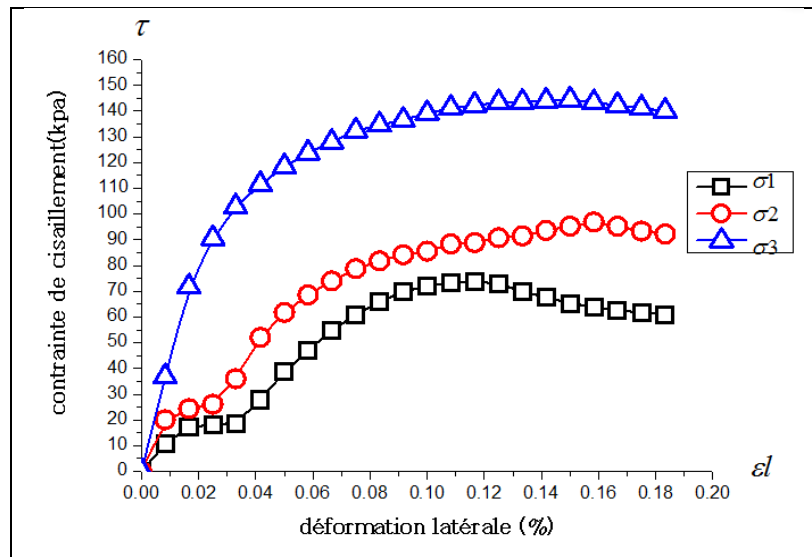


Figure IV.13 : courbe de $\zeta=f(\epsilon_l)$ pour le mélange de M1= (80% T+20% Sc+5% B).

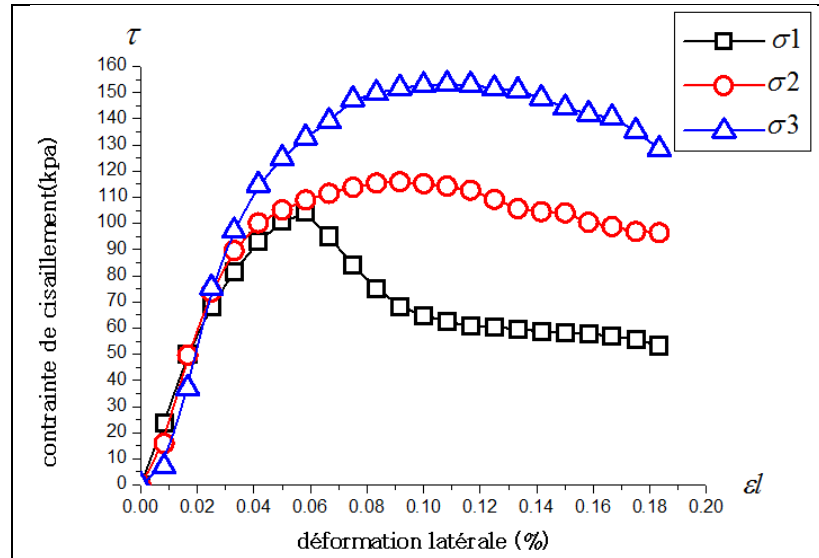


Figure IV.14 : courbe de $\zeta=f(\epsilon_l)$ pour le mélange de M2=(80%T+20%SC+10%B)

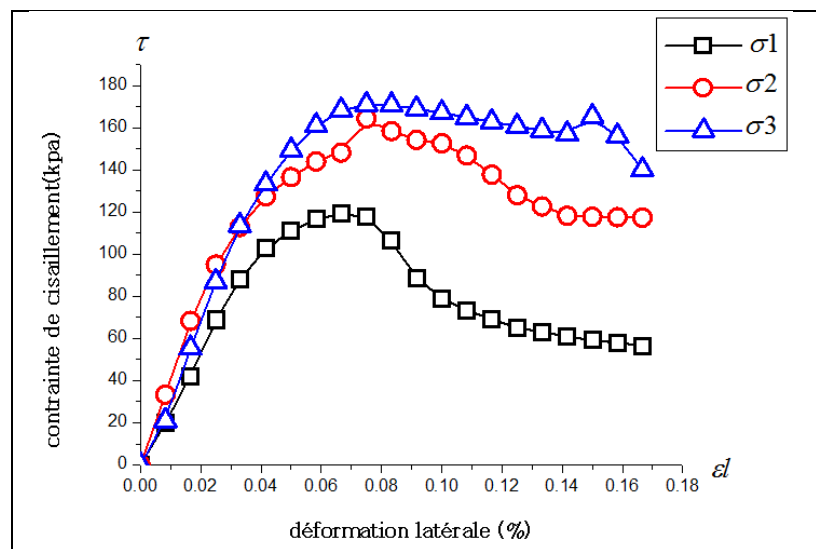


Figure IV.15 : courbe de $\zeta=f(\epsilon_l)$ pour le mélange de M3= (80%T+20%SC+15%B).

D'après les résultats obtenus dans les courbes contraintes- déformation les figures (IV.13, IV.14, IV.15), on peut tirer les constatations suivantes :

- La contrainte de cisaillement augmente avec le pourcentage de bentonite.
- La contrainte de cisaillement augmente avec la charge verticale.
- Pour chaque charge, la contrainte de cisaillement augmente avec la déformation latérale jusqu'à un optimum. Après cet optimum, cette variation semble être négligeable (c.-à-d., les valeurs de τ sont presque constantes). La contrainte τ tend vers un palier.

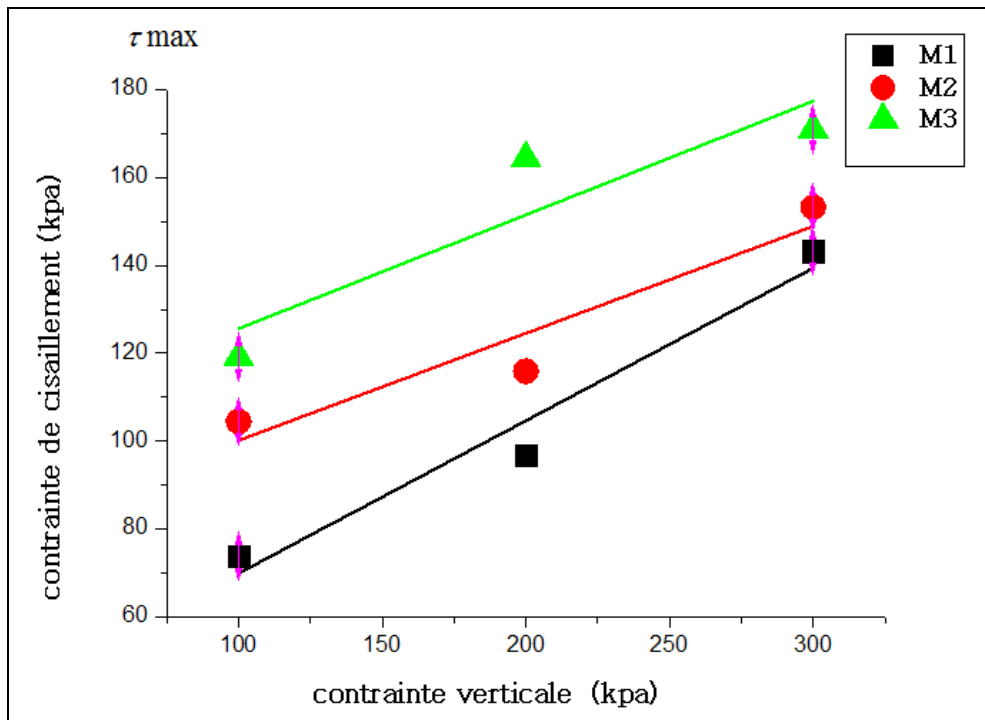


Figure IV.16 : courbes intrinsèques des mélanges sable-bentonite

Les Caractéristiques mécaniques des mélanges Tuf- sable calcaire-bentonite sont résumées dans le tableau IV.1

On constate que la cohésion augmente avec le pourcentage de bentonite ajouté, contrairement pour l'angle de frottement.

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques des mélanges (M1, M2 et M3).

	5 %B	10 %B	15 % B
<i>C (kPa)</i>	14.5	16.13	24.14
<i>φ (degré)</i>	18.77	13.49	14.03

Contrairement l'angle de frottement diminue

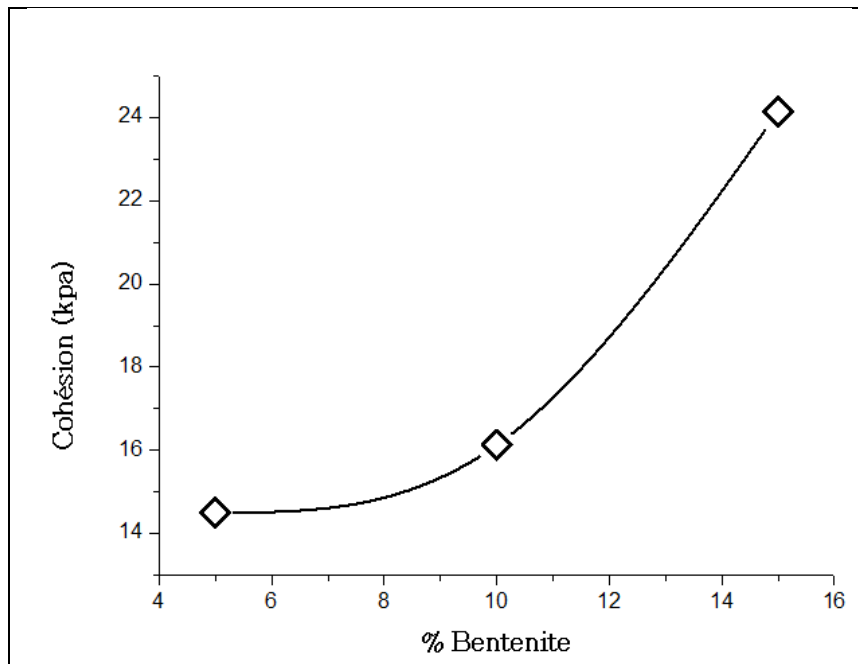


Figure IV.17 : Variation de la cohésion des mélanges s- b en fonction du pourcentage de bentonite

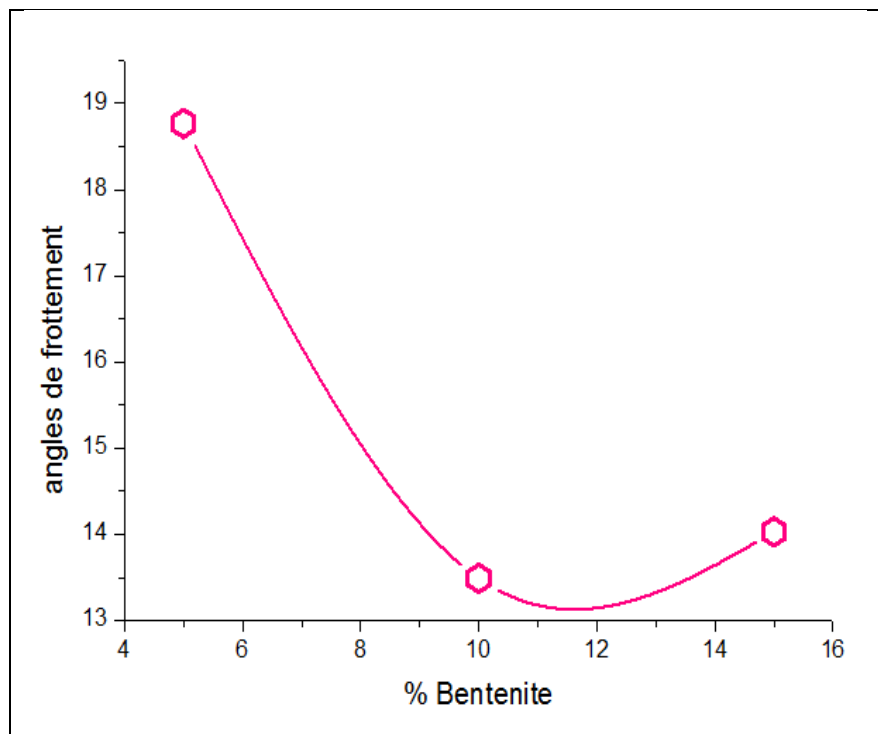


Figure IV.18 : Variation de l'angle de frottement des mélanges s- ben fonction du pourcentage de bentonite

IV .4.Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre consiste à déterminer les coefficients de perméabilité grâce à l'utilisation de l'essai œnométriques réalisé sur les différents mélanges. Les résultats obtenus ont conduit à une formulation de 80%Tuf+20 % sable de calcaire et 10 % de bentonite satisfaisant en terme de perméabilité pour les barrières de stockage des déchets ménagers. L'angle de frottement réalisé avec l'essai de cisaillement direct avec compactage statique sur les mélanges (M1, M1et M3), ont montré généralement que l'angle de frottement des mélanges diminue avec le pourcentage de bentonite, tandis que la cohésion augmente avec l'ajout de bentonite.

Enfin, on peut conclure que le mélange adopté est constitué de 80%Tuf -20% sable calcaire et 10% de bentonite nommé $T_{80}SC_{20}B_{10}$. D'après les résultats obtenus, on recommande pour ces types de matériaux, un pourcentage de bentonite supérieur à 10%.

Conclusion générale

Cette étude entre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux pour la réalisation de barrières étanches à base de tuf –sable calcaire et de bentonite. Elle a des retombées essentiellement environnementales et économiques.

Sur la base des résultats expérimentaux :

L'essai Proctor Normal réalisé sur les mélanges 80% Tuf –20% sable calcaire nous a permis d'obtenir la teneur en eau optimale de l'ordre de 12.06 % et un poids volumique sec maximum de l'ordre de $18.83 \text{ KN} / \text{m}^3$ et ces deux valeurs sont utilisés pour les essais de gonflement et de conductivité hydrique des différentes mélanges (M1, M2et M3).

L'ajout de pourcentage de bentonite au mélange (tuf +sable calcaire) conduit à une augmentation de limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité.

Le taux de gonflement libre augmente avec le pourcentage de bentonite.

La conductivité hydraulique diminue avec le pourcentage de bentonite ajouté. Plus le sol est gonflant plus sa perméabilité saturée diminue.

Les résultats de conductivités hydrauliques des mélanges sont des valeurs inférieures ou égales 10^{-9} m/s . Le mélange qui satisfait le critère de perméabilité est $T_{80}SC_{20}B_{10}$.

L'ajout de pourcentage de bentonite au mélange (tuf +sable calcaire) conduit à une augmentation de la cohésion et une diminution de l'angle de frottement.

L'angle de frottement du mélange $T_{80}SC_{20}B_{10}$ est de l'ordre de 13.49° .

Cette étude montre qu'un mélange tuf-sable calcaire- bentonite avec une teneur de 10% de bentonite répond aux normes concernant la conductivité hydraulique pour la réalisation d'un CET (centre d'enfouissement technique). Il reste cependant à évaluer les performances de ce mélange mis en contact avec les lixiviats issus de déchets solides ménagers afin de connaître les effets de ce dernier sur les paramètres de conductivité hydraulique et de résistance et plus particulièrement ses effets à long terme sur ces mêmes paramètres.

Ce volet de la recherche constitue le complément de cette 1ere partie sur les possibles utilisations de la bentonite sodique de Maghnia dans les applications pour la réalisation de centres d'enfouissements techniques de déchets solides en Algérie.

Références bibliographiques

Abeele W.V., « The Influence of Bentonite on the Permeability of Sandy Silt », Nuclear and Chemical Waste Management, 6, 1986, p. 81-88.

Aina M.P., Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED : contributions a l'élaboration d'un guide méthodologique et a sa validation expérimentale sur sites, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2006.

Alston, C., Daniel, D. E. , et Devroy, D. J. "Design and construction of sand-Bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario ", Canadian Geotechnical Journal., No. 34, 1997. pp. 841-852.

Bental., Projet de développement des gisements d'argile bentonitique du district de Hammam Boughrara, Maghnia, (Tlemcen), Algérie. 2002.

Chapuis R.P., « Sand - Bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests », Canadian Geotechnical Journal, 27, 1990, p. 47-57.

COMITÉ FRANÇAIS DES GÉOSYNTHÉTIQUES (Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets)

D'Appolonia D.J., « Soil–bentonite slurry trench cutoffs », Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106(4): 1980, p. 399 - 418.

Daniel D.E., « Predicting hydraulic conductivity of clay liners », Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110: 1984, p. 285–300.

Goual. I. «Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application en construction routière». Université ABOUBAKR Belkaid – TLEMCEM 2012

Gueddouda. M.K, Aboubekr. N, Taibi. S, Wang. H.Q, Lamara. M, Goual. I, Goual. M.S. « Effet des contraintes de confinement sur la perméabilité d'un geomateriau valorise : application a la conception des barrières ouvragées pour les CET ». Premier Symposium Méditerranéen de Géoengineering «SMGE09». Alger 20 et 21 juin 2009.

Gueddouda. M.K, « Comportement hydro-mécanique des sols compactés Application à la conception d'une barrière ouvragée« sable de dune –bentonite » » thèse de doctorat Université ABOUBAKR Belkaid – TLEMCEM 2011

Gueddouda. M.K «stabilisation des argiles gonflement par ajout de sable dune région de Laghouat». Thèse de magister Université Amar Thelidji- Laghouat 2005

Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme Algérien. 2009.

K. B. Hoddinott and R. O. Lamb, Eds., American Society for Testing and Materials, 1990, pp. 47-59

Kouloughli Salim. «Étude expérimentale des mélanges sable bentonite- leurs performances comme barrières de confinement dans les cet- ». Thèse de doctorat d'état. Université Mentouri Constantine. 2007

LACHACHE RAFIKA thèse. (Effet des polluant sur la consolidation d'un mélange sable/ bentonit utilisé dans l'imperméabilisation d'une décharge).2014

Marcoen. J.M, Tessier. D, Thorez.j, Monjoie.A, Schroeder. CH. « Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour C.E.T et réhabilitation de dépotoirs en Région wallonne ». Ministère de la Région wallonne .2001.

Marcotte, D., Marron, J. C. et Fafard, M., " Washing of Bentonite in Laboratory Hydraulic-Conductivity Tests". J.of Env. Engineering, Vol. 1 20, No. 3, 1994, pp. 691-698.

Mesri, G. et Olson, R. E." Shear Strength of Montmorillonite ", Géotechnique, Vol. 20, No. 3, 1970. pp. 261-270.

Montañez J.E.C., "Suction and Volume Changes of Compacted Sand-Bentonite Mixtures". Thèse de Doctorat, University of London, 2002.

Olsen, H.W. "Hydraulic flow through saturated clays", Clay & Clay Minerals, 1962, Vol. 9, 1962, pp. 131-161.

Olson, R.E. and Daniel, D.E. "Measurement of the hydraulic conductivity of finegrained soils, Permeability and Groundwater Contaminant Transport", In T.F. Zimmie, and C.O. Riggs Eds., Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1981, pp. 18-64, (ASTM STP 746).

Parker R.J., Bateman S., Williams D., « Design and management of landfills , Geotechnical management of waste and contamination », Fell, Phillips & Gerard (eds), Balkema, Rotterdam, 1993, p. 209-252.

Philipponnat.G, Huber.B. « Fondations et ouvrages en terre ». Edition Eyrolles. (1997). 548p. Popescu,G. « A comparaison between the behaviour of swelling and of collapsing soils », Engineering geology, Elseviers sciences publishers B.V., Amsterdam,1986 pp .145-163.

Thériault P. « Etude de l'influence des métaux lourds sur la conductivité hydraulique de couches sable/bentonite », Mémoire pour l'obtention du grade de maître des sciences (M.Sc.), Canada, 2000

Van Impe, W.F., Bouazza, A., « Barrières d'étanchéité dans les sites de décharges :

développement récents », Revue Française de Géotechnique, 74 : 1996, p. 3-18.

Vijayvargiya V.N. and Ghazzaly D.I. “ Prediction of swelling potential for natural clays”
Proc. of the 3rd, I.C.E.S., Haifa, 1973, pp. 227-236

Winiarski, T. « Analyse systémique du fonctionnement de l'interface système naturel et système anthropisé: -exemple de l'interface décharge/aquifère », Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I. 1994.

Wu, J. Y. et Khera, R. P., “ Properties of a Treated-Bentonite /Sand Mix in Contaminant Environment. Physic-Chemical Aspects of Soil and Related Materials”, ASTM STP 1095,

**&&&Les résultats d'essais

1).Limite d'atterberg

Nature d'échantillon : $M_1(2\text{kg T}+0.5\text{kg SC}+5\%B)$

La date d'essai : 15/02/2017

(Limite de liquidité)

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup		16	24	28	35
N° de tare	/	24	04	29	03
poids de tare M1	G	17.8	10.5	12.3	10.5
poids de tare+poids humideM2	G	36.4	23	25.8	26.2
poids de tare+poids sec M3	G	32.5	21.1	23.1	23.7
poids d'eau (M3-M2)	G	3.9	1.9	2.7	2.5
poids sec (M3-M1)	G	14.7	10.6	10.8	13.2
Teneur d'eau W	%	26.53	17.92	25	18.93

Essai de limite d'atterberg (limite de plasticité)

N° d'essai	Unité	1	2	3
N° de tare	/	24	17	D_3
poids de tare M1	G	10.5	10.5	10.5
poids de tare+poids humideM2	G	12.6	12.3	12.8
poids de tare+poids sec M3	G	12.3	12	12.4
poids d'eau (M3-M2)	G	0.3	0.3	0.4
poids sec (M3-M1)	G	1.8	1.5	1.9
Teneur d'eau W	%	16.66	20	21.05
WP	%	19.23		

Nature d'échantillon : $M_2(2\text{kg T}+0.5\text{kg SC}+10\%B)$

La date d'essai : 15/02/2017

(Limite de liquidité)

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup	/	18	20	33	48
N° de tare	/	LG3	23	6	38g
poids de tare M1	G	32.6	29.6	30.8	38.2
poids de tare+poids humideM2	G	41.5	47.7	41.4	47.9
poids de tare+poids sec M3	G	39.1	42.9	38.6	45.6
poids d'eau (M3-M2)	G	2.4	4.8	2.8	2.3
poids sec (M3-M1)	G	6.5	13.3	7.8	7.4
Teneur d'eau W	%	36.92	36.09	35.89	31.08

(Limite de plasticité)

N° d'essai	Unité	1	2	3
N° de tare	/	25	B_2	A_F
poids de tare M1	G	10.3	14.4	10.6
poids de tare+poids humideM2	G	13.2	13.8	14.2
poids de tare+poids sec M3	G	12.6	12.9	13.5
poids d'eau (M3-M2)	G	0.6	0.9	0.7
poids sec (M3-M1)	G	2.3	1.5	2.9
Teneur d'eau W	%	26.08	6	24.13
WP	%	18.73		

Nature d'échantillon : $M_3(2\text{kg SC}+0.5\text{kg SC}+15\%B)$

La date d'essai : 15/02/2017

(limite de liquidité)

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup		15	26	38	40
N° de tare	/	C-C	15-C	19-A	12
poids de tare M1	G	38.9	30.6	38.8	13.8
poids de tare+poids humideM2	G	50.3	39	45.8	21
poids de tare+poids sec M3	G	46.3	36.3	43.6	19
poids d'eau (M3-M2)	G	4	2.7	2.2	2
poids sec (M3-M1)	G	7.4	5.7	4.8	5.2
Teneur d'eau W	%	54.05	47.36	45.83	38.46

(limite de plasticité)

N° d'essai	Unité	1	2	3
N° de tare	/	P_1	P_2	L_5
poids de tare M1	G	15.2	15.3	30.5
poids de tare+poids humideM2	G	17.9	18.2	33.5
poids de tare+poids sec M3	G	17.2	17.6	32.8
poids d'eau (M3-M2)	G	0.7	0.6	0.7
poids sec (M3-M1)	G	2	2.3	2.3
Teneur d'eau W	%	35	26.08	30.43
WP	%	30.50		

Nature d'échantillon : M6 (80% T+20%SC)

La date d'essai : 15/02/2017

(limite de liquidité)

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup		16	19	28	35
N° de tare	/	5	10	l_5	P_1
poids de tare M1	G	10.3	10.3	30.4	15.1
poids de tare+poids humideM2	G	20	18.4	47.3	21.7
poids de tare+poids sec M3	G	18.3	17.1	44.8	20.8
poids d'eau (M3-M2)	G	1.7	1.3	2.5	0.9
poids sec (M3-M1)	G	8	6.8	14.4	5.7
Teneur d'eau W	%	21.25	19.11	17.36	15.78

(limite de plasticité)

N° d'essai	Unité	1	2	3
N° de tare	/	23	B_1	24
poids de tare M1	G	29.7	39.2	32.6
poids de tare+poids humide M2	G	33.3	41.6	36.6
poids de tare+poids sec M3	G	32	41.3	35.3
poids d'eau (M3-M2)	G	1.3	0.3	1.3
poids sec (M3-M1)	g	2.3	2.1	2.7
Teneur d'eau W	%	56.52	14.28	48.14
WP	%	39.64		

La date d'essai : 15/02/2017

(limite de liquidité)

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup		16	20	32	35
N° de tare	/	A_4	Ci_2	Li_3	L_1
poids de tare M1	G	14	14	14	15
poids de tare+poids humide M2	G	19	21	18.5	20
poids de tare+poids sec M3	G	17.8	19.4	17	18.5
poids d'eau (M3-M2)	G	1.2	1.6	1.5	1.5
poids sec (M3-M1)	G	3.8	5.4	3	3.5
Teneur d'eau W	%	31.57	29.62	50	42.85

M6 :(100% Tuf)

La date d'essai : 15/02/2017

(Limite de liquidité)

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup		16	20	26	30
N° de tare	/	2_A	8	N_1	42
poids de tare M1	G	13.7	10.2	21	13.8
poids de tare+poids humideM2	G	20.5	22.2	29.4	22.8
poids de tare+poids sec M3	G	19.3	20.1	27.9	21.3
poids d'eau (M3-M2)	G	1.2	2.1	1.5	1.5
poids sec (M3-M1)	G	5.6	9.9	6.9	7.5
Teneur d'eau W	%	21.42	21.21	21.73	20

La date d'essai : 15/02/2017

M5 : 100% Sable calcaire

N° d'essai	Unité	1	2	3	4
N° de coup		16	20	32	35
N° de tare	/	A_4	Cl_2	Li_3	L_1
poids de tare M1	G	14	14	14	15
poids de tare+poids humideM2	G	19	21	18.5	20
poids de tare+poids sec M3	G	17.8	19.4	17	18.5
poids d'eau (M3-M2)	G	1.2	1.6	1.5	1.5
poids sec (M3-M1)	G	3.8	5.4	3	3.5
Teneur d'eau W	%	31.57	29.62	50	42.85

2).Gonflement libre

Nature d'échantillon : $M_1(80\%T+20\%SC+5\%B)$

La date d'essai : 20/02/2017

t	$\Delta h(\text{lecture})$	$\Delta h(\text{mm})$
15''	2.5	0.025
30''	6	0.06
45''	8.5	0.085
1'	10.5	0.105
2'	15	0.15
4'	19.5	0.195
8'	21	0.21
15'	22	0.22
30'	23	0.23
1h	23.5	0.235
2h	24	0.24
24h	52	0.52
48h	53	0.53
72h	54	0.54
96h	55	0.55

Nature d'échantillon : $M_2(80\%T+20\%SC+10\%B)$

La date d'essai : 20/02/2017

t	$\Delta h(\text{lecture})$	$\Delta h(\text{mm})$
15''	1	0.01
30''	1.25	0.0125
45''	1.5	0.015
1'	2	0.02
2'	3	0.03
4'	3.5	0.035
8'	5.5	0.055
15'	10.5	0.105
30'	20	0.2
1h	38	0.38
2h	62	0.62
24h	98	0.98
48h	99	0.99
72h	100	1
96h	100	1

Nature d'échantillon : $M_3(80\%T+20\%SC+15\%B)$

La date d'essai : 20/02/2017

t	Δh (lecture)	Δh (mm)
15''	4	0.04
30''	8	0.08
45''	10.5	0.105
1'	12.5	0.125
2'	19	0.19
4'	27	0.27
8'	38	0.38
15'	53	0.53
30'	82	0.82
1h	138.5	1.385
2h	200	2
24h	249	2.49
48h	274	2.74
72h	300	3
96h	300	3

Nature d'échantillon : $M_4(80\%T+20\%SC)$

La date d'essai : 20/02/2017

t	Δh (lecture)	Δh (mm)
15''	0	0
30''	0	0
45''	0	0
1'	1.25	0,0125
2'	3.75	0,0375
4'	3.75	0,0375
8'	5	0,05
15'	7.5	0,075
30'	8.75	0,0875
1h	12.5	0,125
2h	17.5	0,175
24h	50	0,5
48h	165	1,65
72h	215	2,15
96h	220	2,2

3).Essai odométrique

Nature d'échantillon : $M_1(80\%T+20\%SC+5\%B)$

La date d'essai : 10/03/2017

	p1=500g	p2=1000g	p3=2000g	p4=4000g	p5=8000g	p6=16000
t	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)
0	0	0	0	0	0	0
6"	0.21	0.34	0.16	1.47	0.21	0.21
15"	0.22	0.37	0.19	1.55	0.24	0.26
30"	0.23	0.39	0.21	1.57	0.27	0.29
1'	0.24	0.405	0.24	1.62	0.31	0.32
2'	0.25	0.425	0.28	1.66	0.34	0.35
4'	0.26	0.445	0.33	1.68	0.36	0.38
8'	0.27	0.46	0.37	1.70	0.39	0.41
15'	0.28	0.47	0.41	1.71	0.40	0.43
30'	0.29	0.50	0.43	1.73	0.42	0.44
1h	0.30	0.51	0.44	1.74	0.43	0.46
2h	0.31	0.53	0.46	1.75	0.44	0.47
24h	0.33	0.54	0.47	1.77	0.45	0.50

Résultats de perméabilité M1

$t_{90}(s)$	$cv \times 10^{-6}$	e	σ	Δe	$\Delta \sigma$	$av \times 10^{-4}$	$mv \times 10^{-4}$	$k \times 10^{-9}$
0.4728	2.99	0.441	/	0.024	25	9.6	6.66	19.91
0.593	2.38	0.417	25	0.039	25	15.6	10.82	25.75
0.616	2.29	0.378	50	0.034	50	6.8	4.71	9.549
0.57	2.47	0.344	100	0.128	100	12.8	8.88	21.93
0.903	1.57	0.216	200	0.033	200	1.65	1.11	1.743
1.023	1.38	0.183	400	0.037	400	0.925	0.64	0.883
/	/	0.146	800	/	/	/	/	/

Nature d'échantillon : M_2 (80% T+20% SC+10% B)

La date d'essai : 10/03/2017

	p1=500g	p2=1000g	p3=2000g	4000g	8000g	16000g
t	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)
6"	0.22	0.08	0.12	0.52	0.49	0.49
15"	0.26	0.115	0.18	0.58	0.54	0.55
30"	0.50	0.14	0.22	0.63	0.59	0.60
1'	0.55	0.175	0.265	0.68	0.645	0.645
2'	0.59	0.195	0.30	0.74	0.705	0.69
4'	0.625	0.23	0.34	0.78	0.755	0.75
8'	0.66	0.265	0.39	0.83	0.80	0.80
15'	0.67	0.29	0.435	0.865	0.8325	0.83
30'	0.6975	0.32	0.47	0.895	0.8625	0.85
1h	0.71	0.335	0.495	0.915	0.885	0.87
2h	0.72	0.345	0.51	0.92	0.90	0.88
24h	0.74	0.36	0.53	0.94	0.92	0.91

Résultats de perméabilité M_2

t_{90} (s)	$cv \times 10^{-6}$	e	σ	Δe	$\Delta \sigma$	$av \times 10^{-4}$	$mv \times 10^{-4}$	$k \times 10^{-9}$
0.9728	1.453	0.441	0	0.055	25	22	15.26	22.17
1.0135	1.395	0.386	25	0.026	25	10.4	7.21	10.05
1.21	1.168	0.360	50	0.039	50	7.8	5.41	6.319
1.18	1.20	0.321	100	0.068	100	6.8	4.71	5.652
1.23	1.15	0.253	200	0.067	200	3.35	2.32	2.668
0.98	1.442	0.186	400	0.066	400	1.65	1.14	1.644
/	/	0.120	800	/	/	/	/	/

Nature d'échantillon : M_3 (80% T+20% SC+15% B)

La date d'essai : 10/03/2017

	p1=500g	p2=1000g	p3=2000g	p4=4000g	p5=8000g	p6=16000g
t	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)
6"	0	0.01	0.04	0.48	0.45	0.52
15"	0.005	0.0125	0.09	0.60	0.49	0.56
30"	0.0075	0.0125	0.1	0.65	0.54	0.58
1'	0.01	0.015	0.13	0.71	0.59	0.64
2'	0.01	0.02	0.17	0.75	0.64	0.70
4'	0.01	0.0225	0.23	1.82	0.69	0.76
8'	0.01	0.0275	0.28	1.88	0.74	0.82
15'	0.0125	0.0325	0.32	1.93	0.80	0.88
30'	0.015	0.045	0.36	1.97	0.85	0.93
1h	0.015	0.04	0.38	2	0.88	0.96
2h	0.0175	0.04	0.40	2.01	0.90	0.98
24h	0.02	0.06	0.41	2.02	0.91	1

Résultats de perméabilité M₃

t ₉₀ (s)	cv×10 ⁻⁶	e	σ	Δe	Δσ	av ×10 ⁻⁴	mv ×10 ⁻⁴	k ×10 ⁻⁹
0.635	2.23	0.441	0	0.002	25	0.8	0.55	0.349
1.5	0.942	0.439	25	0.005	25	2	1.38	2.07
1.29	1.096	0.434	50	0.03	50	6	4.16	5.366
1.53	0.923	0.404	100	0.146	100	14.6	10.13	15.5
0.89	1.588	0.258	200	0.066	200	3.3	2.29	3.636
0.94	1.503	0.192	400	0.072	400	1.8	1.24	1.863
/	/	0.120	800	/	/	/	/	/

4).Cisaillements

L=60mm ; H=20mm ; v=1mm/min

Mélange de M1 σ₁=1bar(3.6kg)

ΔL (lect)	ΔL(mm)	ε _l =ΔL/L	ΔH (lect)	ΔH (mm)	ε _h %	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	50	0.5	0.025	98	0.0854	23.72
100	1	0,0166	52	0.52	0.026	207	0.1804	50.11
150	1,5	0,025	50	0.5	0.025	283	0.2454	68.16
200	2	0,033	47	0.47	0.0235	340	0.2937	81.58
250	2,5	0,0416	41	0.41	0.0205	389	0.3353	93.13
300	3	0,05	35	0.35	0.0175	421	0.3625	100.69
350	3,5	0,0583	27	0.27	0.0135	437	0.3761	104.47
400	4	0,0666	15	0.15	0.0075	397	0.3422	95.05
450	4,5	0,075	3	0.03	0.0015	350	0.3022	83.94
500	5	0,0833	-6	-0.06	-0.003	313	0.2708	75.22
550	5.5	0.0916	-15	-0.15	-0.0075	283	0.2454	68.16
600	6	0.1	-20	-0.20	-0.01	269	0.2334	64.83
650	6.5	0.1083	-27	-0.27	-0.0135	259	0.2250	62.5
700	7	0.1166	-32	-0.32	-0.016	251	0.2182	60.61
750	7.5	0.125	-35	-0.35	-0.0175	250	0.2173	60.36
800	8	0.1333	-39	-0.39	-0.0195	247	0.2148	59.66
850	8.5	0.1416	-42	-0.42	-0.021	243	0.2113	58.69
900	9	0.15	-45	-0.45	-0.0225	241	0.2097	58.25
950	9.5	0.1583	-48	-0.48	-0.024	239	0.2080	57.77
1000	10	0.1666	-51	-0.51	-0.0255	236	0.2054	57.05

1050	10.5	0.175	-53	-0.53	-0.0265	230	0.2003	55.63
1100	11	0.1833	-71	-0.71	-0.0355	220	0.1917	53.25

Mélange de M1 $\sigma_2=2\text{bar}$ (7.2kg)

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\varepsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\varepsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	105	1.05	0.0525	66	0.0575	15.97
100	1	0,0166	112	1.12	0.056	205	0.1787	49.63
150	1,5	0,025	116	1.16	0.058	307	0.2657	73.80
200	2	0,033	115.5	1.155	0.0578	374	0.3226	89.61
250	2,5	0,0416	114	1.14	0.057	419	0.3608	100.22
300	3	0,05	111	1.11	0.056	440	0.3786	105.16
350	3,5	0,0583	107	1.07	0.0535	456	0.3923	108.97
400	4	0,0666	99	0.99	0.0495	467	0.4014	111.5
450	4,5	0,075	97	0.97	0.0485	477	0.4097	113.80
500	5	0,0833	91	0.91	0.0455	484	0.4156	115.44
550	5.5	0.0916	88	0.88	0.044	486	0.4173	115.91
600	6	0.1	83	0.83	0.0415	483	0.4147	115.19
650	6.5	0.1083	79	0.79	0.0395	479	0.4114	114.27
700	7	0.1166	75	0.75	0.0375	472	0.4056	112.66
750	7.5	0.125	70	0.70	0.035	457	0.3930	109.16
800	8	0.1333	66	0.66	0.033	442	0.3803	105.63
850	8.5	0.1416	64	0.64	0.032	437	0.3761	104.47
900	9	0.15	62	0.62	0.031	435	0.3744	104
950	9.5	0.1583	61	0.61	0.0305	420	0.3617	100.47
1000	10	0.1666	60	0.60	0.03	413	0.3557	98.80
1050	10.5	0.175	59	0.59	0.0295	405	0.3489	96.91
1100	11	0.1833	58	0.58	0.029	403	0.3473	96.47

Mélange de M1 $\sigma_3=3\text{bar}(10.8\text{kg})$

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\varepsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\varepsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	151	1.51	0.0755	29	0.0252	7
100	1	0,0166	161	1.61	0.0805	153	0.1334	37.05
150	1,5	0,025	169	1.69	0.0845	314	0.2716	75.44
200	2	0,033	174	1.74	0.087	406	0.3498	97.16
250	2,5	0,0416	177	1.77	0.0885	481	0.4131	114.75
300	3	0,05	178	1.78	0.089	525	0.4498	124.94
350	3,5	0,0583	180	1.80	0.09	559	0.4782	132.83
400	4	0,0666	180	1.80	0.09	586	0.5007	139.08
450	4,5	0,075	180	1.80	0.09	622	0.5307	147.41
500	5	0,0833	179	1.79	0.0895	632	0.5391	149.75
550	5.5	0.0916	176	1.76	0.088	641	0.5466	151.83
600	6	0.1	168	1.68	0.084	645	0.5500	152.77
650	6.5	0.1083	167	1.67	0.0835	647	0.5516	153.22
700	7	0.1166	165	1.65	0.0825	646	0.5508	153
750	7.5	0.125	163	1.63	0.0815	640	0.5457	151.58
800	8	0.1333	162	1.62	0.081	637	0.5433	150.91
850	8.5	0.1416	161	1.61	0.0805	624	0.5324	147.88
900	9	0.15	159	1.59	0.0795	608	0.5191	144.19
950	9.5	0.1583	158	1.58	0.079	598	0.5107	141.86
1000	10	0.1666	157	1.57	0.0785	592	0.5057	140.47
1050	10.5	0.175	156	1.56	0.078	570	0.4874	135.38
1100	11	0.1833	155	1.55	0.0775	540	0.4623	128.41

Mélange de M2 $\sigma_1=1\text{bar}(3.6\text{kg})$

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\epsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\epsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	50	0.5	0.025	98	0.0854	23.72
100	1	0,0166	52	0.52	0.026	207	0.1804	50.11
150	1,5	0,025	50	0.5	0.025	283	0.2454	68.16
200	2	0,033	47	0.47	0.0235	340	0.2937	81.58
250	2,5	0,0416	41	0.41	0.0205	389	0.3353	93.13
300	3	0,05	35	0.35	0.0175	421	0.3625	100.69
350	3,5	0,0583	27	0.27	0.0135	437	0.3761	104.47
400	4	0,0666	15	0.15	0.0075	397	0.3422	95.05
450	4,5	0,075	3	0.03	0.0015	350	0.3022	83.94
500	5	0,0833	-6	-0.06	-0.003	313	0.2708	75.22
550	5.5	0.0916	-15	-0.15	-0.0075	283	0.2454	68.16
600	6	0.1	-20	-0.20	-0.01	269	0.2334	64.83
650	6.5	0.1083	-27	-0.27	-0.0135	259	0.2250	62.5
700	7	0.1166	-32	-0.32	-0.016	251	0.2182	60.61
750	7.5	0.125	-35	-0.35	-0.0175	250	0.2173	60.36
800	8	0.1333	-39	-0.39	-0.0195	247	0.2148	59.66
850	8.5	0.1416	-42	-0.42	-0.021	243	0.2113	58.69
900	9	0.15	-45	-0.45	-0.0225	241	0.2097	58.25
950	9.5	0.1583	-48	-0.48	-0.024	239	0.2080	57.77
1000	10	0.1666	-51	-0.51	-0.0255	236	0.2054	57.05
1050	10.5	0.175	-53	-0.53	-0.0265	230	0.2003	55.63
1100	11	0.1833	-71	-0.71	-0.0355	220	0.1917	53.25

Mélange de M2 $\sigma_2=2\text{bar}$ (7.2kg)

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\epsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\epsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	105	1.05	0.0525	66	0.0575	15.97
100	1	0,0166	112	1.12	0.056	205	0.1787	49.63
150	1,5	0,025	116	1.16	0.058	307	0.2657	73.80
200	2	0,033	115.5	1.155	0.0578	374	0.3226	89.61
250	2,5	0,0416	114	1.14	0.057	419	0.3608	100.22
300	3	0,05	111	1.11	0.056	440	0.3786	105.16
350	3,5	0,0583	107	1.07	0.0535	456	0.3923	108.97
400	4	0,0666	99	0.99	0.0495	467	0.4014	111.5
450	4,5	0,075	97	0.97	0.0485	477	0.4097	113.80
500	5	0,0833	91	0.91	0.0455	484	0.4156	115.44
550	5.5	0.0916	88	0.88	0.044	486	0.4173	115.91
600	6	0.1	83	0.83	0.0415	483	0.4147	115.19
650	6.5	0.1083	79	0.79	0.0395	479	0.4114	114.27
700	7	0.1166	75	0.75	0.0375	472	0.4056	112.66
750	7.5	0.125	70	0.70	0.035	457	0.3930	109.16
800	8	0.1333	66	0.66	0.033	442	0.3803	105.63
850	8.5	0.1416	64	0.64	0.032	437	0.3761	104.47
900	9	0.15	62	0.62	0.031	435	0.3744	104
950	9.5	0.1583	61	0.61	0.0305	420	0.3617	100.47
1000	10	0.1666	60	0.60	0.03	413	0.3557	98.80
1050	10.5	0.175	59	0.59	0.0295	405	0.3489	96.91
1100	11	0.1833	58	0.58	0.029	403	0.3473	96.47

Mélange de M3 $\sigma_1=1\text{bar}(3.6\text{kg})$

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\epsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\epsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	80	0.80	0.04	82	0.0714	19.83
100	1	0,0166	75	0.75	0.0375	174	0.1516	42.11
150	1,5	0,025	72	0.72	0.036	286	0.2479	68.86
200	2	0,033	69	0.69	0.0345	368	0.3175	88.19
250	2,5	0,0416	62	0.62	0.031	430	0.3701	102.81
300	3	0,05	54	0.54	0.027	465	0.3997	111.02
350	3,5	0,0583	44	0.44	0.022	490	0.4206	116.83
400	4	0,0666	34	0.34	0.017	500	0.4289	119.13
450	4,5	0,075	22	0.22	0.011	495	0.4247	117.97
500	5	0,0833	8	0.08	0.004	445	0.3828	106.33
550	5.5	0.0916	-20	-0.20	-0.01	369	0.3183	88.42
600	6	0.1	-25	-0.25	-0.0125	329	0.2844	79
650	6.5	0.1083	-28	-0.28	-0.014	305	0.2640	73.33
700	7	0.1166	-32	-0.32	-0.016	287	0.2487	69.08
750	7.5	0.125	-35	-0.35	-0.0175	269	0.2334	64.83
800	8	0.1333	-38	-0.38	-0.019	262	0.2275	63.19
850	8.5	0.1416	-40	-0.40	-0.02	252	0.2190	60.83
900	9	0.15	-46	-0.46	-0.023	245	0.2131	59.19
950	9.5	0.1583	-48	-0.48	-0.024	240	0.2088	58
1000	10	0.1666	-50	-0.50	-0.025	234	0.2037	56.58
1050	10.5	0.175	-51	-0.51	-0.0255	197	0.1717	47.69
1100	11	0.1833	-51	-0.51	-0.0255	191	0.1664	46.22

Mélange de M3 $\sigma_2=2\text{bar}(7.2\text{kg})$

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\epsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\epsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	99	0.99	0.0495	138	0.1202	33.38
100	1	0,0166	102	1.02	0.051	284	0.2461	68.36
150	1,5	0,025	103	1.03	0.0515	397	0.3422	95.05
200	2	0,033	103.5	1.035	0.05175	473	0.4064	112.88
250	2,5	0,0416	104	1.04	0.052	536	0.4589	127.47
300	3	0,05	102	1.02	0.051	575	0.4915	136.52
350	3,5	0,0583	99	0.99	0.0495	607	0.5183	143.97
400	4	0,0666	95	0.95	0.0475	625	0.5333	148.13
450	4,5	0,075	91	0.91	0.0455	695	0.5918	164.38
500	5	0,0833	85	0.85	0.0425	669	0.5700	158.33
550	5.5	0.0916	80	0.80	0.04	651	0.5550	154.16
600	6	0.1	73	0.73	0.0356	644	0.5492	152.55
650	6.5	0.1083	67	0.67	0.0335	619	0.5283	146.75
700	7	0.1166	61	0.61	0.0305	580	0.4957	137.69
750	7.5	0.125	59	0.59	0.0295	538	0.4606	127.94
800	8	0.1333	57	0.57	0.0285	515	0.4415	122.63
850	8.5	0.1416	56	0.56	0.028	496	0.4256	118.22
900	9	0.15	56	0.56	0.028	494	0.4239	117.75
950	9.5	0.1583	56	0.56	0.028	493	0.4231	117.52
1000	10	0.1666	56	0.56	0.028	492	0.4223	117.30
1050	10.5	0.175	56	0.56	0.028	460	0.3956	109.88
1100	11	0.1833	56	0.56	0.028	440	0.3786	105.16

Mélange de M3 $\sigma_3=3\text{bar}(10.8\text{kg})$

ΔL (lect)	$\Delta L(\text{mm})$	$\epsilon_l=\Delta L/L$	ΔH (lect)	ΔH (mm)	$\epsilon_h\%$	T (lect)	T(KN)	ζ (kpa)*10(5)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,0083	121	1.21	0.056	87	0.0758	21.05
100	1	0,0166	130	1.30	0.065	229	0.1995	55.41
150	1,5	0,025	133	1.33	0.0665	363	0.3132	87
200	2	0,033	134	1.34	0.067	476	0.4089	113.58
250	2,5	0,0416	133.5	1.335	0.06675	561	0.4798	133.27

300	3	0,05	133	1.33	0.0665	630	0.5374	149.27
350	3,5	0,0583	133	1.33	0.0665	680	0.5792	160.88
400	4	0,0666	132	1.32	0.066	711	0.6057	168.25
450	4,5	0,075	128	1.28	0.064	722	0.6153	170.91
500	5	0,0833	124	1.24	0.062	721	0.6144	170.66
550	5.5	0.0916	121	1.21	0.0605	714	0.6083	168.97
600	6	0.1	118	1.18	0.059	706	0.6013	167.02
650	6.5	0.1083	114	1.14	0.057	697	0.5936	164.88
700	7	0.1166	110	1.10	0.055	688	0.5858	162.72
750	7.5	0.125	108	1.08	0.054	679	0.5783	160.63
800	8	0.1333	105	1.05	0.0525	671	0.5716	158.77
850	8.5	0.1416	103	1.03	0.0515	663	0.5650	156.94
900	9	0.15	102	1.02	0.051	660	0.5625	165.25
950	9.5	0.1583	100	1.00	0.05	659	0.5616	156
1000	10	0.1666	95	0.95	0.0475	590	0.5041	140.02
1050	10.5	0.175	95	0.95	0.0475	565	0.4832	134.22

Essai Proctor

Nature d'échantillon :M3(80% tuf+20% SC)

La date d'essai :23 /1/2017

	unité	1		2		3		4		5		6	
Quantité d'eau ajoutée Pour chaque essai	g	150		200		250		300		350		400	
Poids de moule vide M0	g	4611		4611		4611		4611		4611		4611	
Poids totale humide M1	g	6355.5		6388.5		6448		6566.5		6594		6620.5	
Volume de moule V	cm ³	948.99		948.99		948.99		948.99		948.99		948.99	
Poids de sol humide M1	g	1744.5		1777.5		1877.5		1955.5		1983		2009.5	
Poids volumique humide γ_h	g/cm ³	1.838		1.873		1.978		2.06		2.089		2.12	
N° de tare	g	D2	E2	L5	24	L38	6%	23	P1	D4	P2	2%	29
Poids de tare vide m0	g	21	18.5	30.5	18	27	31	30	15.5	12	15.5	32.5	12.5
Poids totale humide m1	g	61	70.5	77.5	72	79.5	88	78	51.5	58.5	62	89.5	61.5
Poids totale sec m2	g	58.5	67.5	73.5	68	73	82	73	47.5	50.5	58	82	57.5

Poids de sol sec M2	g	37.5	49	43	50	46	51	43	32	38.5	42.5	49.5	45
Poids d'eau M	g	2.5	3	4	4	6.5	6	5	4	8	4	7.5	4
Teneur en eau	%												
Moyen	%	5.11		7.56		9.76		12.06		13.6		15.15	
γ_d	g/cm ³	1.747		1.76		1.7948		1.838		1.813		1.7901	

Nature d'échantillon :M2 :100% SC

La date d'essai :23 /2/2017

N°d'essai	unité	1		2		3		4		5	
Quantité d'eau ajoutée Pour chaque essai	g	100		200		300		400		500	
Poids de moule vide M0	g	4611		4611		4611		4611		4611	
Poids totale humide M1	g	6446		6632.7		6723.4		6709.7		6596.1	
Volume de moule V	cm ³	948.99		948.99		948.99		948.99		948.99	
Poids de sol humide M1	g	1835		2021.7		2112.4		2098.7		1985.1	
Poids volumique humide γ_h	g/cm ³	1.93		2.13		2.23		2.12		2.09	
N° de tare	g	24	P2	L5	G	L38	23	6%	19A	15C	CC
Poids de tare vide m0	g	15	15.2	30.6	32.8	38.2	29.8	31	38.8	30.5	38.9
Poids totale humide m1	g	42.3	42.3	94.9	78.8	94.4	93.9	91.8	86.2	98.9	93.5
Poids totale sec m2	g	37.3	41	89.2	74.9	88.2	88.1	86.1	79.8	90.2	85.6
Poids de sol sec M2	g	22.3	25.6	58.6	42.1	50	58.3	47.3	48.8	51.3	55
Poids d'eau M	g	5	1.3	5.7	3.9	6.2	5.8	5.7	6.4	8.7	7.9
Teneur en eau	%	22.4	5.7	9.73	9.26	12.4	9.94	12.05	13.1	16.95	14.36
Moyen	%	5.7		9.5		11.17		12.58		15.65	
γ_d	g/cm ³	1.826		1.945		2.005		1.963		1.807	

Analyse granulométrique

M1 =80% tuf+20%S.c

Module AFNOR	Tamis mm	Refus partiels(g)	Refus cumulés Rn(g)	%Refus Rn.100/Ms	%Passant 100-Rn.100/Ms
38	5	0	0	0	100
34	2.5	289.1	289.1	11.564	88.44
32	1.25	538.9	828	33.12	66.88
31	0.63	438.2	1266.2	50.65	49.35
30	0.315	333.6	1599.8	63.99	36.008
28	0.16	359.3	1959.1	78.35	21.64
26	0.08	354.5	2313.6	92.55	7.456

M2 =100%Tuf

Module AFNOR	Tamis mm	Refus partiels(g)	Refus cumulés Rn(g)	%Refus Rn.100/Ms	%Passant 100-Rn.100/Ms
38	5	0	0	0	100
34	2.5	180.3	180.3	7.22	92.78
32	1.25	270	450.3	30.02	69.98
31	0.63	262	712.3	47.48	52.51
30	0.315	211.2	923.5	61.56	38.43
28	0.16	224	1147.5	76.5	23.5
26	0.08	150.7	1298.2	86.54	13.46

M6 =100%SC

Tamis mm	Refus partiels(g)	Refus cumulés Rn(g)	%Refus Rn.100/Ms	%Passant 100-Rn.100/Ms
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3.15	78	78	5.44	94.56
2.5	224	302	21.06	78.94
2	162	464	32.36	67.64
1.6	188	652	45.74	54.26
1.25	152	804	56.07	43.93
1	134	938	56.41	43.59
0.8	34	972	67.78	32.22
0.63	110	1082	75.45	24.55
0.5	42	1124	78.38	21.62
0.4	50	1174	81.87	18.13
0.315	46	1220	85.08	14.92
0.25	56	1276	88.98	11.02
0.2	46	1322	92.19	7.81
0.16	32	1354	94.42	5.58
0.125	34	1388	96.79	3.21
0.1	16	1404	97.9	2.1
0.08	18	1422	99.16	0.84

Cisaillements

Mélange de M4(80%T+20%Sc)



Photo 1 : Echantillon après cisaillement

80%T+20SC	
C (kPa)	18.91
φ(degré)	22.36