



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE CONSTANTINE 1
Faculté des Sciences et la technologie
Département de Génie Civil

Mémoire

Présentée pour l'Obtention du diplôme de magister en Génie Civil
Option : sol

Effets des polluants sur la consolidation d'un mélange sable/bentonite utilisé dans l'imperméabilisation d'une décharge

Par

LACHACHE RAFIKA

Devant le jury

Président : **Pr. HOUARI. H.**

Université Constantine 1

Rapporteur : **Dr. KOULOUGHLI.S**

Université Constantine 1

Examineur : **Dr. ABDOU. K**

Université Constantine 1

Examineur : **Dr. FERKOUS .S**

Université Constantine 1

Soutenue le 16 /06/2014

Remerciements

Je remercie profondément Monsieur : **KOULOUGHLIS** Maitre de conférences à l'université Constantine 1 de Constantine pour l'intérêt constant qu'il m'a porté à ce travail en acceptant de diriger cette étude ainsi que pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués pendant la préparation de ce mémoire.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur : **HOUARI.H** Professeur à l'université Constantine 1 de Constantine, d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je suis très honorée par la présence au jury de Monsieur : **ABDOU.K** Maitre de conférences à l'université Constantine 1 de Constantine, je le remercie vivement d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes reconnaissances les plus sincères vont à Monsieur : **FERKOUS.S** Maitre de conférences à l'université Constantine 1 de Constantine, d'avoir accepté de participer au jury et d'examiner ce mémoire.

Je tiens à remercier aussi Monsieur : **SAMALM.E** Professeur à l'Université Constantine 1 de Constantine, pour leur disponibilité et pour l'aide qu'il m'a apportée ainsi que pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués.

Mes pensées vont également à tous mes amis pour leurs soutient et leur encouragement permanents.

En fin à tous qui m'ont apporté leur aide, et contribué, de proche ou de loin dans l'élaboration de ce mémoire.....**Merci**

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. 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 : les couches sable/ bentonite qui doivent résister structurellement dans le temps aux attaques physiques et chimiques et offrir de bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques. L'aspect important pour un mélange sable/bentonite utilisé comme une barrière passive dans une décharge est la conductivité hydraulique où on doit toujours chercher une faible conductivité hydraulique ($K \leq 10^{-7}$ cm/s). Cette étude s'intéresse à étudier les effets des métaux lourds sur la conductivité hydraulique d'une barrière passive d'un centre d'enfouissement technique. Une caractérisation physique a été menée par des essais standards sur les deux matériaux afin de déterminer leurs propriétés physico-chimiques et des essais de compressibilité et de perméabilité ont été faits sur des mélanges préparés par 90% de sable et 10% de bentonite. Les résultats, qui ont été obtenus sont présentés en fonction du temps et du chargement sous forme de graphes.

Mots clés : environnement ; centre d'enfouissement technique ; sable/bentonite ; conductivité hydraulique ; effet des métaux lourds.

Abstract

Storage of waste into the environment is a major problem for engineers. The problem relates to the possible contamination of the groundwater with toxic contaminants such as heavy metals. With the production of large amounts of garbage and industrial waste, technical landfill became important. Among the main techniques used to ensure a good seal the bottom of a CET: layers sand / bentonite must resist structurally over time to physical and chemical attacks and offer good mechanical and physico-chemical properties. The important aspect for a sand / bentonite mixture used as a passive barrier in a landfill is the hydraulic conductivity where one should always look for a low hydraulic conductivity ($K \leq 10^{-7}$ cm / s). This study focuses on studying the effects of heavy metals on the hydraulic conductivity of a passive barrier of a CET. Physical characterization was

carried out by standard tests on two materials to determine their physico-chemical properties and tested for compressibility and permeability were made by preparing mixtures of 90% sand and 10% of bentonite. The results that were obtained are shown as a function of time and loading the form of graphs.

Keywords: environment; technical landfill; sand / bentonite; hydraulic conductivity; effect of heavy metals.

ملخص

تخزين النفايات ت في البيئة هو مشكلة رئيسية للمهندسين و تتعلق المشكلة باحتمال تلوث المياه الجوفية مع الملوثات السامة مثل المعادن الثقيلة مع إنتاج كميات كبيرة من القمامة و النفايات الصناعية أصبح الطمر التقني للنفايات مهما من بين التقنيات الرئيسية المستخدمة لضمان ختم جيد لعمق مركز النفايات : طبقات من خليط الرمل و البنتونيت التي يجب أن تكون مع الوقت مقاومة هيكليا لكل الهجمات الفيزيائية و الكيميائية و تقدم خواص ميكانيكية و فيزيائية جيدة.

الجانب المهم في خليط الرمل و البنتونيت الذي يستخدم كحاجز سلبي في مكب النفايات هو التوصيل الهيدروليكي أين يجب أن نبحت دائما عن توصيل هيدروليكي منخفض اقل أو يساوي (10^{-7} سم/ت)

تركز هذه الدراسة على دراسة اثار المعادن الثقيلة على التوصيل الهيدروليكي لحاجز سلبي في مركز دفن النفايات و لأجل هذا أجريت اختبارات قياسية على اثنين من المواد لتحديد خصائصهما الفيزيائية والكيميائية كما تم إجراء اختبارات لدراسة نفاذية و انضغاطية خليط مكون من 90% من الرمل و 10% من البنتونيت و قد اظهرت النتائج المحصل عليها على شكل رسوم بيانية بدلالة كل من الوقت و التحميل.

الكلمات المفتاحية : المحيط / مركز الطمر التقني للنفايات / رمل/بنتونيت / التوصيل الهيدروليكي / أثار المعادن الثقيلة

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	i
Liste des symboles.....	i
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux	
I.1.Introduction.....	5
I.2. Minéralogie, structure et classement des argiles.....	5
I.2.1 Minéralogie et cristalochimie des argiles.....	5
I.2.2 Type structuraux et classification des argiles.....	6
I.4.Origine de la bentonite.....	10
I.5. La micro structure de la bentonite.....	11
I.5.1 Le feuillet.....	14
I.5.2 La particule primaire.....	17
I.5.3L'agrégat.....	19
I.6.Conclusion.....	20
Chapitre II : Généralités sur les centres d'enfouissement techniques et les barrières étanches	
II .1.Introduction.....	21
II .2. Centre d'enfouissement technique.....	21
II .2.1Définitions.....	21
II .2.2 La structure d'un centre d'enfouissement.....	22
II .2.3 Le classement des centres d'enfouissement techniques (CET).....	23
II .2.4 Les principaux types de décharges.....	24
II .2.4.1 Décharges contrôlées pour matériaux inertes-classe 3.....	24
II .2.4.2 Décharges contrôlées pour les déchets ultimes-classe 2.....	24
II .2.4.3 Décharges contrôlées pour les déchets dangereux-classe 1.....	25
II .2.5 La mise en œuvre et mode d'exploitation d'un centre de stockage.....	27
II .2.6 Fonctionnement d'un centre d'enfouissement.....	28
II .2.7 Les différentes phases de l'évolution d'une décharge de déchets non dangereux.....	28
II .2.8 Les risques et les impacts d'un centre d'enfouissement.....	25

II .3. Lixiviat de décharge.....	31
II .3.1 Généralit.....	31
II .3.2 Classification de lixiviat.....	32
II .3.3 La composition globale d'un lixiviat.....	32
II .3.4 Production des lixiviats dans les centres d'enfouissement.....	34
II .4. Le biogaz.....	36
II .4.1 Définitio.....	36
II .4.2 Origine et composition du biogaz.....	36
II .4.3 Composition du biogaz.....	37
II .4.4 Les caractéristiques du biogaz.....	38
II .5. Les métaux lourds.....	39
II .5.1 Définition.....	39
II .5.1.1 Le cadmium.....	40
II .5.1.2 Le plomb.....	40
II .5.1.3 Le cuivre.....	40
II .5.2 Origine naturelles et humaines des métaux lourds dans l'environnement.....	42
II .5.3 Distribution et impact sur l'environnement.....	42
II .5.3.1 Contamination des sols.....	42
II .5.3.2 Contamination de l'eau.....	42
II .6. Généralité sur les barrières étanches.....	43
II .6.1 Barrière d'étanchéité active.....	44
II .6.2 Barrières d'étanche passive.....	45
II .7. Les différents types de barrières de confinement dans un CET.....	46
II .7.1 Les couches d'argile.....	46
II .7.2 Les membranes bentonite/géo syynthétique.....	46
II .7.3 Les géo membranes ou membranes synthétiques.....	47
II .7.4 Les couches sable/bentonite.....	48
II .8. Les matériaux composants de l'étanchéité du fond et des parois d'un CET.....	53
II .8.1 Argile compacté.....	53
II .8.2 Matériaux géo composites.....	54
II .8.3 Comparaison entre les couches d'argiles compactées et les GSB.....	55
II .9. Traitement des matériaux constituant la barrière passive.....	57
II .10. Mise en œuvre de la couche d'étanchéité en matériau naturel.....	58

II .1.1.conclusion.....	61
Chapitre III : Caractérisation et choix des matériaux	
III .1. Introduction.....	61
III .2. Préparation et caractérisation des matériaux.....	61
III .2.1 Nature et origine de l'échantillon argileux (la bentonite).....	61
III .2.2 Nature et origine de sable utilisé.....	62
III .2.3 Préparation du mélange.....	62
III .2.4 Les métaux lourds utilisés.....	63
III .3. Présentation des essais.....	63
III .4. Présentation des résultats.....	64
III .4.1 La granulométrie.....	64
III .4.1.1 Le sable.....	64
III .4.1.2 La bentonite.....	66
III .4.2 Les principales caractéristiques du mélange.....	67
III .4.2.1 La teneur en eau.....	67
III .4.2.2 La densité des grains solide.....	67
III .4.2.3 Les limites d'ATTERBERG.....	68
III .5. Conclusion.....	70
Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre	
IV .1. Introduction.....	71
IV .2. Effet des métaux lourds sur la perméabilité du mélange sable/bentonite.....	71
IV .2.1 Conditions expérimentales.....	71
IV .2.2 Présentation des essais.....	72
IV .2.3 Présentation des résultats.....	74
IV .2.3.1 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence d'eau distillé (référence).....	74
IV .2.3.2 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence du plomb.....	77
IV .2.3.3 La perméabilité d'un mélange sable/bentonite en présence de cadmium.....	80
IV .2.3.4 Perméabilité d'un mélange sable/bentonite en présence de cuivre.....	83
IV .2.4 L'effet de l'ensemble des métaux lourds utilisés sur la perméabilité d'un mélange sable/bentonite sous les trois chargements.....	86
IV 3. Conclusion.....	88

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre	
V .1. Introduction.....	89
V .2. Présentation des essais.....	89
V .3. Présentation des résultats.....	90
V .3.1 La méthode de Casagrande.....	90
V .3.1.1 La construction graphique.....	90
V .3.1.2 Calcul du coefficient de consolidation C_v	90
V .3.2 Calcul du coefficient de perméabilité d'un mélange sable/bentonite.....	91
V .3.2.1 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence d'eau distillée.....	91
V.3.2.2 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence des solutions polluante.....	92
V .3.3 Calcul de l'indice des vides pour chaque chargement.....	95
V .4. Conclusion.....	100
Conclusion générale.....	101
Références bibliographique.....	103
Annexe.....	107

Liste des figures

Figure 1. 1 : Représentation schématique d'un feuillet de Phyllosilicate 2 :1 (Luckham et Rossi 1999).....05

Figure1. 2 : Structures communes des argiles phylliteuses trouvées dans les sols, schématisées avec des feuillets de tétraédres et octaédres.....07

Figure1. 3 : a) Illustration de l'empilement des feuillets d'argile, montrant les surfaces basales, les bordures des particules, ainsi que les espaces inter feuillets [Viallis-Terrisse (2000)].....09

b) Représentation schématique [Luckham et Rossi (1999)] de l'empilement des feuillets unitaires dans une smectite.....09

Figure1. 4 : Représentation schématique de la couche interfoliaire dans le cas de cations interfoliaires hydratés[Jozja(2003)].....10

Figure1. 5 : Structure de la bentonite à différentes échelles, (d'après Karnland 1998, Pusch et Yong2003, cité par Kröhn 2003).....13

Figure1.6 : Structure multi-échelle de la montmorillonite [Le Pluart *et al.* (2004)].....13

Figure 1. 7 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité inter stratifiée(Jozja ;2003).....20

Figure 2. 1 : Centre d'enfouissement d'Ouled Fayet -Alger-(Y. KEHILA et al.2011).....22

Figure 2. 2 : La structure d'un centre d'enfouissement.....23

Figure 2. 3 Centre d'Enfouissement Technique type (Y. KEHILA et al.2011).....27

Figure 2. 4 : Production mensuelle de lixiviats CET Ouled Fayet (Alger, 2011).....36

Figure 2. 5 : Principe du confinement des centres de stockage de déchets (ADEME,1999).....44

Figure 2. 6 : Détail des barrières actives de la couverture et du fond du casier.....46

Figure 2.7 : La conductivité hydraulique d'un mélange S/B en fonction de pourcenta de bentonite(Tirée de Lundgren 1981).....51

Figure 2. 8 : Section typique d'une couche sable/bentonite Tirée de Chapuis (1990).....53

Figure 2. 9 : Différentes techniques de remaniement des sols.....54

Figure 2. 10 : Relation entre la perméabilité et la teneur en bentonite (Didier et Cavalcante Rocha, 1996).....58

Figure 3. 1 : Matériaux utilisés : sable et bentonite de Maghnia.....62

Figure 3. 2 : Préparation de mélange S/B.....63

Figure 3. 3 : courbe granulométrique du sable jaune utilisé.....65

Figure 3. 4 : Granulométrie de la bentonite utilisée.....66

Figure 3. 5 : La limite de liquidité pour un mélange sable/bentonite.....69

Figure 4.1 Schéma descriptif de l'appareillage utilisé dans l'essai de perméabilité.....72

Figure 4.2 : Préparation et le placement d'échantillon dans la cellule œdométrique.....73

Figure 4. 3. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé d'eau distillé pour un chargement de 100 KPa.....75

Figure 4. 3. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé d'eau distillé pour un chargement de 200 KPa.....75

Figure 4. 3. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé d'eau distillé pour un chargement de 400 KPa.....76

Figure 4. 4 : coefficient de perméabilité K en fonction de temps pour les 03 chargements.....	76
Figure 4. 5. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de plomb (Pb ⁺²) pour un chargement de 100 KPa..	78
Figure 4. 5. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de plomb (Pb ⁺²) pour un chargement de 200KPa...	78
Figure 4. 5. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de plomb (Pb ⁺²) pour un chargement de 400 KPa...	79
Figure 4. 6 : courbes coefficient de perméabilité « K » en fonction de temps pour les différents chargements.....	79
Figure 4. 7. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cd ⁺²) pour un chargement de 100 KPa.....	81
Figure 4. 7. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cd ⁺²) pour un chargement de 200 KPa.....	81
Figure 4. 7. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cd ⁺²) pour un chargement de 400 KPa.....	82
Figure 4. 8 : courbes coefficient de perméabilité « K » en fonction de temps pour 03 chargement.....	82
Figure 4.9. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cu ⁺²) pour un chargement de 100 KPa.....	84
Figure 4.9. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cu ⁺²) pour un chargement de 200 KPa.....	84
Figure 4.9. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cu ⁺²) pour un chargement de 400 KPa.....	85
Figure 4. 10 : courbes coefficient de perméabilité « K » en fonction de temps pour les 03 chargements.....	85
Figure 4.11-a : courbes coefficient de perméabilité en fonction de temps pour les différents polluants pour un chargement de 100 KPa.....	86
Figure 4. 11-b : courbes coefficient de perméabilité en fonction de temps pour les différents polluants pour un chargement de 200 KPa.....	87
Figure 4. 11-c : courbes coefficient de perméabilité en fonction de temps pour les différents polluants pour un chargement de 400 KPa.....	87
Figure 5.1 : Dispositif d'essai.....	89
Figure 5.2 : Coefficient de perméabilité (K) en fonction des contraintes pour un mélange S/B imbibé par eau distillé.....	92
Figure 5. 3. a : Evolution de (K) en fonction des contraintes appliquées pour un mélange S/B imbibé par une solution de plomb (Pb ⁺²).....	93
Figure 5. 3. b : Evolution de (K) en fonction des contraintes appliquées pour un mélange S/B imbibé par une solution de cuivre (Cu ⁺²).....	94
Figure 5. 3. c : Evolution de (K) en fonction des contraintes appliquées pour un	

mélange S/B imbibé par une solution de cadmium (Cd^{+2}).....	94
Figure 5. 4 : Evolution de coefficient de perméabilité en fonction des contraintes appliquées pour l'ensemble des mélanges S/B.....	95
Figure 5. 5 : L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par l'eau distillé.....	97
Figure 5. 6: L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par une solution de plomb.....	98
Figure 5. 7 : L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange(S/B) imbibé par une solution de cuivre.....	98
Figure 5. 8: L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par une solution de cadmium.....	99
Figure (5-9) : L'ensemble des courbes indice des vides en fonction de coefficients de perméabilité pour les 04 solutions.....	99

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Classification des phyllosilicate 2:1 [Jozja (2003)].	8
Tableau 1. 2 : Réserve des gisements d'argiles bentonitiques de Hammam Boughrara, Maghnia (Fiche technique, Bental Maghnia, ENOF).	11
Tableau 2.1 : Principaux types de décharges (Emilian Koller).	26
Tableau 2. 2 : Etude des dangers d'un CET (Source technique de l'ingénieur, traité Environnement).	31
Tableau 2. 3 : Classification des lixiviats en fonction de l'âge de la décharge d'après Chian (1977), Millot (1986).	33
Tableau 2. 4 : Les teneurs des différents polluants présents dans un lixiviat.	34
Tableau 2. 5 : production de lixiviat dans une décharge.	35
Tableau 2. 6 : Concentration dans le Biogaz (SPAQUE, 1991 Et D.P.E 1998, Gendebien, 1992).	37
Tableau 2. 7 : Points forts et faibles de différents types d'étanchéité. (Source: Techniques de l'ingénieur).	48
Tableau 2. 8 : Différences entre les couches d'argile compactée et les GSB, d'après Koerner et Daniel (1993).	55
Tableau 2. 9 : Comparaison entre les couches d'argile compactée et les GSB, d'après Stief (1995) et Trauger et Stam (1993).	56
Tableau 3. 1 : Granulométrie du sable utilisé.	64
Tableau 3. 2 : Granulométrie de la bentonite utilisée (Fiche technique, Bental Maghnia, ENOF).	66
Tableau 3. 3 : Teneur en eau du mélange sable/ bentonite utilisé.	67
Tableau 3. 4 : la densité de mélange sable/bentonite utilisée.	68
Tableau 3. 5 : Détermination de la limite de liquidité WL du mélange.	68
Tableau 3. 6 : Principales propriétés de la bentonite utilisée (Koloughli, 2006).	69
Tableau 3. 7 : Principales propriétés du sable utilisé.	70
Tableau 4. 1 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.	74
Tableau 4. 2 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.	77
Tableau 4. 3 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.	80
Tableau 4. 4 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.	83
Tableau 5.1 : les charges utilisées dans l'essai de compressibilité.	90
Tableau 5. 2 : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par l'eau distillé.	91
Tableau 5. 3. a : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par une solution de plomb.	92
Tableau 5. 3. b : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par une solution de cuivre.	93
Tableau 5. 3. c : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par une solution de cadmium.	93

Liste des tableaux

Tableau 5. 4 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par l'eau distillé.....	96
Tableau 5. 5 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par une solution de plomb.	96
Tableau 5. 6 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par une solution de cuivre.	96
Tableau 5. 7 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par une solution de cadmium.....	96

Liste des symboles

Symbole	Désignation
$\Delta h / H$:	Déformation axiale
Δh :	Variation d'hauteur (mm)
C_c :	Coefficient de courbure
C_u :	Coefficient d'uniformité
C_v :	Coefficient de consolidation (cm^2/s)
D_{10} :	Diamètre effectif (mm)
e_0 :	Indice des vides initial
G_s :	Densité des grains solides
H :	Hauteur initiale de l'éprouvette (mm)
h :	Lecture sur la règle (cm)
I_p :	Indice de plasticité (%)
K :	Coefficient de perméabilité (cm / s)
m_v :	Coefficient de compressibilité (cm^2/Kg)
N :	Effort axiale (Kn)
P_1 :	Poids de pycnomètre (g)
P_2 :	Poids de pycnomètre + sable (g)
P_3 :	Poids de pycnomètre + sable + eau (g)
P_4 :	Poids de pycnomètre + eau (g)
P_s :	Poids des grains solides (g)
P_w :	Poids de l'eau (g)
S :	Section de l'éprouvette (cm^2)
s :	Section de tube déterminé par tarage (cm^2)
t :	Temps en seconde

W :	Teneur en eau (%)
W_i :	Teneur en eau initiale (%)
WL :	Limite de liquidité (%)
W_m :	Teneur en eau moyenne (%)
γ_w :	Poids de l'eau (kg / cm ³)
σ :	Contrainte (KPa)

Liste des abréviations

AND :	Agence nationale des déchets
AGV :	Acides gras volatils
CEC :	Capacité d'échange cationique
CET 1 :	Centre d'enfouissement technique classe 1
CET 2 :	Centre d'enfouissement technique classe 2
CET 3 :	Centre d'enfouissement technique classe 3
CET :	Centre d'enfouissement technique
CITEPA :	Centre interprofessionnel technique d'étude de la pollution atmosphérique
CSD :	Centre de stockage de déchets
CSDMA :	Centre de stockage de déchets ménagères et assimilés
CSDU :	Centre de stockage de déchets ultime
CSPE :	Chlorosulfures de polyéthylène
DBO ₅ :	Demande biologique en oxygène
DMS :	Déchets municipaux solides
DOC :	Demande chimique en oxygène

Liste des symboles et abréviations

DPAX :	Diffusion aux petits angles des rayons X
GB :	Géotextile bentonitique
GSB :	Géo synthétiques bentonitique
HDPE :	High density polyéthylène
ICPE :	Installation classé pour la protection d'environnement
ISDND :	Installation de stockage de déchets non dangereux
LDPE :	Low density polyethylene
MEB :	Microscopie électronique à balayage
MET :	Microscopie électronique à transmission
NF :	Norme française
PVC :	Chlorures de polyvinyle
S/B:	Sable bentonite

Introduction générale

La préservation de l'environnement contre les pollutions de l'eau et du sol est devenue un sujet important dans la protection de notre fragile écosystème, ces pollutions qui ont été longtemps considérés comme des conséquences inévitables de l'activité humaine de production et de consommation. Avec la production des grandes quantités d'ordures ménagères et des déchets industriels par ans, en Algérie par exemple, Plus de 10 millions de tonnes de déchets municipaux solides (DMS) sont générées annuellement, selon un rapport de 2011 de l'Agence nationale des déchets (AND). Un volume qui dépassera, selon des estimations, les 12 millions de tonnes en 2015 et approchera les 17 millions de tonnes en 2025, pour cette raison l'enfouissement technique est devient important pour l'élimination de ces déchets. La filière d'élimination des déchets se fait dans des centres d'enfouissement technique (CET), cette technique est basée sur le confinement des matières polluantes et donc la préservation de l'environnement. Ce sont des couches physiques entre les déchets et l'environnement extérieur, ces dernières 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. Lorsque présents dans l'environnement, ces contaminants présentent une menace pour la santé et la liberté des êtres humains. Selon leur concentration, certains peuvent être mortels (Galvez-Cloutier, 1995). L'efficacité de ces couches étanches dépend de leur comportement hydraulique, de leur comportement mécanique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination (Lo et Liljestrang, 1996, Bouchard et Coll, 1995, Pohl et Coll, 1995).

En raison de leur importante capacité de rétention et de leur faible conductivité hydraulique, les argiles sont largement utilisées comme matériaux barrières dans les ouvrages de stockage des déchets pour assurer l'étanchéité à long terme. La performance des argiles barrières peut se dégrader durant leur fonctionnement à cause de l'interaction avec des polluants. Cette interaction se produit essentiellement du fait des propriétés d'échange cationique des argiles, pour cette raison beaucoup d'études ont été effectués sur l'influence des composants inorganique sur les propriétés hydromécaniques et physico-chimiques de ces argiles barrières (Shackelford et al, 2000 ; Egloffstien, 2001 ;

Jo, 2003 ; Jozja, 2003 ; Souli, 2006 ets). Ces couches doivent résister structurellement et dans le temps aux attaques physiques et chimiques et offrir de bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques pour cette raison certaines études ont été réalisées sur la modification de microstructure provoquée par la percolation en solutions métalliques à l'aide des analyses microstructurales (Gnanapragasam et al. 1995 ; Egloffstein, 2001 ; Jozja, 2003 ; Guyonnet et al., 2005 ; Yong et al., 2003 ; Souli, 2006 etc.).

Parmi les principales techniques utilisées à travers le monde pour assurer une bonne étanchéité du fond d'un CET : les couches Sable/Bentonite. Les contaminants organiques et inorganiques constituent une menace face à l'intégrité des couches sable bentonite. Ces contaminants se retrouvent à l'intérieur du lixiviat de décharge.

Plusieurs études ont été réalisées pour étudier les impacts des contaminants organiques sur la conductivité hydraulique des mélanges sable bentonite, par contre on retrouve peu d'information dans la littérature sur les impacts des contaminants inorganiques en particulier les métaux lourds. Pourtant selon certains chercheurs ces derniers provoquent une augmentation plus importante de la conductivité hydraulique des couches sable bentonite (Pascal thériault, 2000) comparée à l'augmentation produite par les contaminants organiques. La bentonite est l'élément actif à l'intérieur des couches sable bentonite, la présence des contaminants tels que les métaux lourds, diminueront les capacités de la bentonite de gonfler. Ce qui aura comme conséquence au niveau de la couche sable bentonite, d'augmenter sa conductivité hydraulique.

Ces liens entre le gonflement de la bentonite et la conductivité hydraulique des couches sont purement qualitatifs et la littérature offre très peu d'information et des exemples sur ce sujet.

Cette problématique qui pose les métaux lourds face aux propriétés de compressibilités des couches sable bentonite est d'une importance capitale pour leur comportement en tant que barrière passive.

Objectifs de la recherche :

Le travail accompli dans ce mémoire a abordé les sujets suivants :

- 1- Identification de la bentonite et de sable utilisé.
- 2- Variation du coefficient de perméabilité d'un mélange sable/bentonite en présence de l'eau distillée sous 03 chargements par un essai de perméabilité et un essai oedométrique.
- 3- Variation du coefficient de perméabilité d'un mélange sable/bentonite en présence des métaux lourds (Plomb, Cuivre, Cadmium) sou 03 chargements par un essai oedométrique et un essai de perméabilité.
- 4- Variation de l'indice des vides d'un mélange sable/bentonite en présence des solutions polluantes par des métaux lourds.

Méthodologie :

Un programme expérimental est mené pour évaluer les caractéristiques mécaniques des matériaux de mélange (sable, bentonite). La bentonite sodique est ramenée de Maghnia Ouest d'Algérie et mélangée avec le sable pour obtenir un mélange optimal. L'hypothèse de recherche émise pour cette étude est définie par l'étape suivante :

- La variation de coefficient de perméabilité (K) d'une couche sable/ bentonite en présence des métaux lourds.

Ce manuscrit regroupe deux grandes parties :

La première partie se décompose en 02 chapitres :

Chapitre 1 présente une revue bibliographique sur les matériaux argileux avec une référence spéciale aux argiles gonflantes de la famille des smectites : les bentonites.

Chapitre 2 est consacré à une représentation des centres d'enfouissement techniques (leur structure, classement, mise œuvre). Les lixiviats, les biogaz et les métaux lourds, caractérisation et leurs impacts sur l'environnement et une partie présentes les barrières de confinement, les différents types et une comparaison entre ces types.

La deuxième partie est dédiée aux matériels et méthodes utilisés pour la réalisation des différents essais et aux résultats de ces dernières accompagnées d'interprétations et discussions.

En fin une conclusion générale rassemble les résultats obtenus à partir de cette contribution.

I.1. Introduction:

Les minéraux argileux sont des silicates en feuillets (phyllo silicates) d'aluminium plus ou moins hydratés sous la forme de particules fine de l'ordre du micromètre (μm) [Besq et All. ; 2003].

Le terme « argile » n'aura pas le même sens en mécanique des sols, mécanique des roches, ou en physique du sol; il désigne, selon les cas, un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. [Kouloughli ; 2007].

Le type d'argile produit dépend directement de la nature de la roche, du climat et de la topographie du milieu [Besq et Al. 2003] (Ferhat ; 2012). Les processus de formation des minéraux argileux conditionnent alors la morphologie et la taille des particules ainsi que leur structure et leur composition chimique. Selon Chauvel et Monnier (1953) cette structure en feuillet et la composition chimique confèrent à ces types de matériaux des propriétés physico-chimiques d'intérêt commercial « surface spécifique, capacité d'échange cationique (CEC), potentiel de gonflement, plasticité, etc. » (Ferhat ; 2012).

L'argile qui fait l'objet de notre travail est connue sous le nom de « bentonite». Elle désigne généralement une poudre minérale constituée essentiellement de l'argile de montmorillonite (famille des smectites). À côté de la montmorillonite, la bentonite se compose du quartz, de la pyrite, de la calcite, des plagioclases, du feldspath et de plusieurs minéraux accessoires. Dans leur état naturel, la plupart des gisements de bentonite sont hétérogènes ; ils sont constitués de smectites mélangées ou inter stratifiées avec l'illite et/ou la kaolinite et d'autres impuretés [Laribi et al ; 2005]. La bentonite est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels (pharmacie, cosmétique, chimie, génie civil, agroalimentaire ...). Elle est utilisée sous forme pâteuse ou à l'état de poudre pour la réalisation de barrières étanches pour les déchets industriels et ménagers (géo membranes bentonitiques) et les déchets radioactifs (barrières ouvragées ; poudre compactées). A l'état liquide, la boue de bentonite se définit comme une suspension eau-argile. L'origine de l'usage de la boue est sans aucun doute les forages pétroliers [Besq ; 2000].

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la structure et les propriétés des matériaux argileux en général, afin de mieux distinguer les spécificités de la montmorillonite. Cette famille d'argile est la composante majeure de la bentonite commerciale utilisée dans le

présent travail. Nous présentons par la suite, une revue bibliographique sur la microstructure de la bentonite, son hydratation et ses propriétés de gonflement et de dispersion.

I.2. Minéralogie, structure et classement des argiles :

I.2.1 Minéralogie et cristallographie des argiles :

Les minéraux argileux font partie de la famille des phyllo silicates. Ils se présentent sous forme de particules de petites dimensions (Nevila ; 2003). Leur structure est composée de deux unités :

La couche tétraédrique.

La couche octaédrique.

Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de ces deux couches, (figure1.1). Les phyllo silicates sont également appelés plus simplement silicates lamellaires [Le Pluart (2002)]. L'organisation structurale des phyllo silicates est basée sur une charpente d'ions O^{2-} et OH^- [Caillère et al. (1982)]. Ces anions occupent les sommets d'assemblages octaédriques (O^{2-} et OH^-) et tétraédriques O^{2-} . Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) en position tétraédrique ou octaédrique.

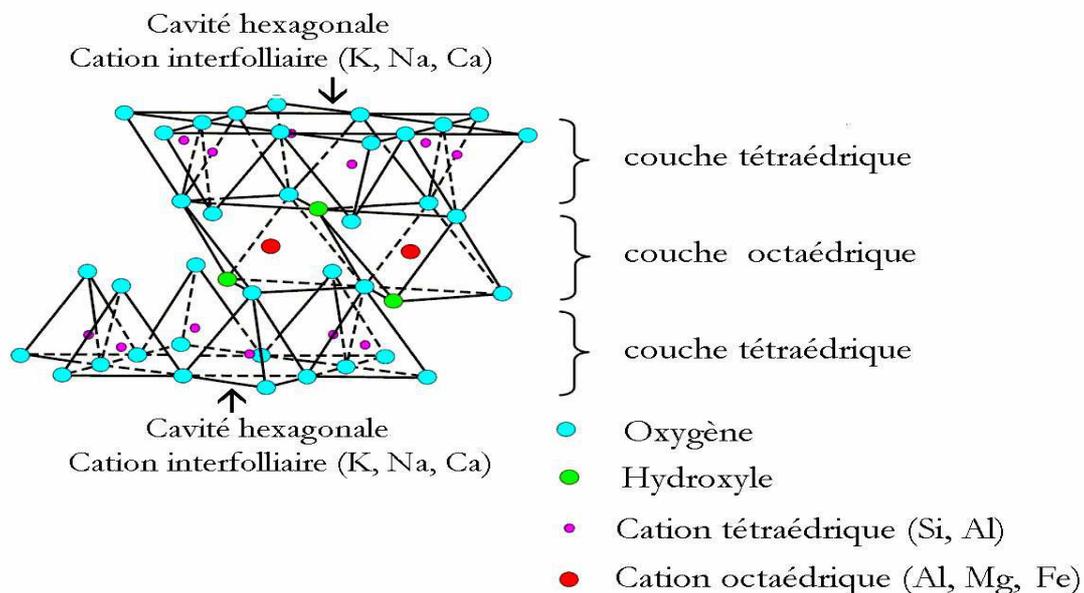


Figure 1. 1 : Représentation schématique d'un feuillet de Phyllosilicate 2 :1

(Luckham et Rossi 1999).

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

Selon Luckham et Rossi (1999), ces éléments s'organisent planairement pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace inter foliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{3+} (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est dénommée di octaédrique [Laribi et Al.2005]. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle tri octaédrique [Laribi et Al.2005]. Par ailleurs, il peut exister des substitutions iso morphiques dans les couches tétraédriques ($\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$, Fe^{3+}) et/ou octaédriques ($\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} , ou $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Li}^{+}$) [Caillère et Al.1981]. Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs.

I.2.2 Type structuraux et classification des argiles :

Selon Dion.P (1998). Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. Elles sont classées en quatre groupes :

i) Minéraux à 7 Å :

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1. Son épaisseur est d'environ 7 Å.

ii) Minéraux à 10 Å :

Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1. Son épaisseur est d'environ 10 Å.

iii) Minéraux à 14 Å :

Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques inter foliaires, cette couche octaédrique inter foliaire neutralise les charges portées par les feuillets T:O:T. le minéral type de ces phyllosilicates est le chlorite.

iv) Minéraux inter stratifiés :

Les minéraux inter stratifiés sont formés d'empilement régulier ou irrégulier de feuillets de deux types différents, (figure 1. 2). Ainsi, lorsque l'un des feuillets est de type sméctites, le comportement s'avérera gonflant c'est le cas de la montmorillonite-kaolinite, la saponite-chlorite, la montmorillonite-mica et l'illite-montmorillonite.

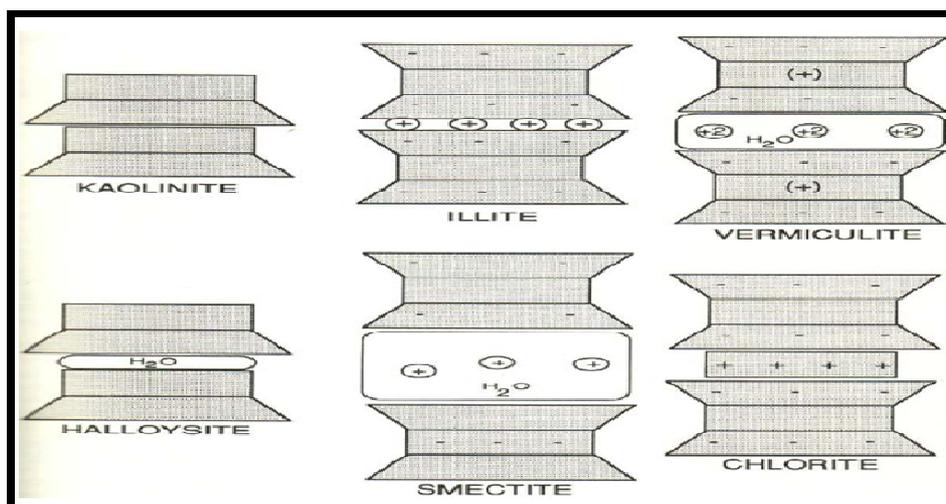


Figure1. 2 : Structures communes des argiles phylliteuses trouvées dans les sols, schématisées avec des feuillets de tétraédres et octaédres (Ferhat 2012).

Les positions usuelles des charges des structures et des cations échangeables sont indiquée par les signes – et + respectivement. Le Tableau1.1 présente une classification déduite des travaux de Brindley (1966) et Mc Kenzie (1975) qui donne la valeur de la charge permanente du feuillet qui a servi comme critère pour établir une classification des phyllosilicates 2:1 (famille qui nous intéresse dans la présente étude). Parmi l’ensemble des argiles citées dans le tableau 1.2, les trois familles les plus importantes sont les kaolinites, les illites et les smectites.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

Feuillet	Charge par maille	Diocatédrriques	Triocatédrriques
1: 1	0	Kaolinite (Si ₄)(Al ₄)O ₁₀ (OH) ₈	Antigorite (Si ₄)(Mg ₃)O ₁₀ (OH) ₈
	#0		Berthierines (Si _{4-x} Al _x)(Mg ²⁺ _{6-x} M ³⁺ _x)O ₁₀ (OH) ₈
	#0	Pyrophyllite (Si ₈)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₄	Talc (Si ₈)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₄
2: 1		SMECTITES	
	0.4 à 1.2	Montmorillonite (Si ₈)(Al _{4-y} Mg _y)O ₂₀ (OH) ₄ M _y ⁺	Hectorite (Si ₈)(Mg _{6-y} Li _y)O ₂₀ (OH) ₄ M _y ⁺
	1.2	Beidellite (Si _{8-x} Al _x)Al ₄ O ₂₀ (OH) ₄ M _x ⁺	Saponite (Si _{8-x} Al _x)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₄ M _x ⁺
	1.2 à 1.8	Illites (Si _{8-x} Al _x)(Al _{4-y} M ²⁺ _y)O ₂₀ (OH) ₄ K ⁺ _{x+y}	Vermiculites (Si _{8-x} Al _x)(Mg _{6-y} M ³⁺ _y)O ₂₀ (OH) ₄ K ⁺ _{x-y}
	2	MICAS	
		Muscovite (Si ₆ Al ₂)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₂ K ₂ ⁺	Phlogopite (Si ₆ Al ₂)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₂ K ₂ ⁺
4	Margarite (Si ₄ Al ₄)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₂ Ca ₂ ²⁺	Clintonite (Si ₄ Al ₄)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₂ Ca ₂ ²⁺	

Tableau 1. 1 : Classification des phyllosilicate 2:1 [Jozja (2003)].

I.3. Les minéraux argileux de la famille des smectites :

Le nom bentonite est utilisé, du point de vue technique, pour tout matériau argileux contenant suffisamment de smectite pour qu'elle lui impose ses propriétés physiques.

La structure de la plupart des minéraux argileux se compose de deux types d'unité structurale :
Unité structurale octaédrique.

Unité structurale tétraédrique.

La structure généralement acceptée pour les minéraux de la famille des smectites a été proposée en 1933 par Hofmann et coll. (1933), puis modifiée plus tard par Maegdefrau et Hofmann (1937), Marshall (1935), et Hendricks (1942). Selon ce modèle, le feuillet unitaire est composé de deux couches d'unité structurale tétraédrique entre lesquelles se trouve une couche d'unité structurale octaédrique. Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite [Jozja (2003)]. Cette famille d'argile est composée de particules plates d'une grande extension latérale avec des diamètres allant de quelques microns à plusieurs centaines de microns [Luckham et Rossi 1999] (figure 1.3).

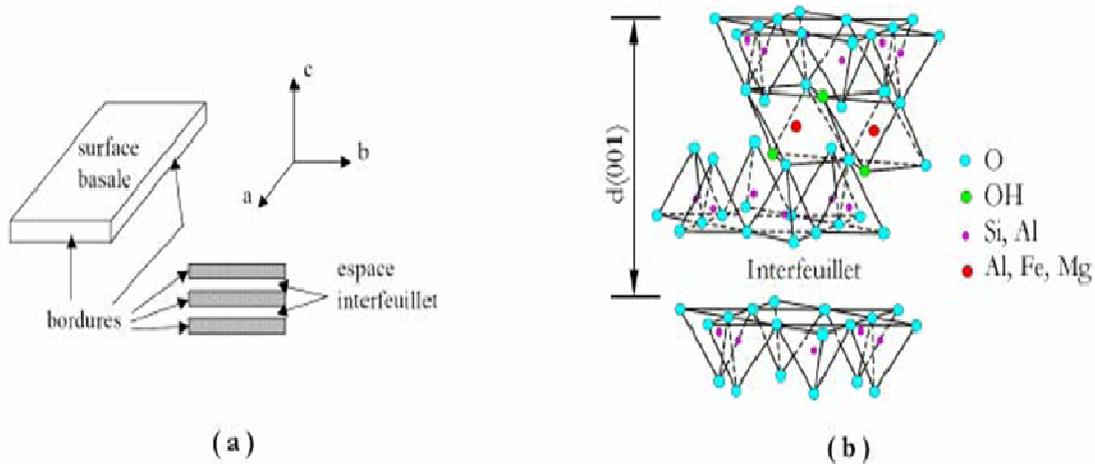


Figure1. 3 : a) Illustration de l'empilement des feuillets d'argile, montrant les surfaces basales, les bordures des particules, ainsi que les espaces inter feuillets [Viallis-Terrisse (2000)].

b) Représentation schématique [Luckham et Rossi (1999)] de l'empilement des feuillets unitaires dans une smectite.

Ces particules sont elles-mêmes constituées d'un empilement de feuillets unitaires, forment spatialement une structure de type « jeu de cartes » (FIG).l'épaisseur totale du feuillet et de l'espace inter feuillet associé est d'environ 14Å [Viallis-Terrisse,2000].la charge élevée de ces argiles due essentiellement à la substitution iso morphique cationique dans les couches octaédrique (Al $3+$ par Fe $2+$ ou Mg $2+$) et/ou dans les couches tétraédriques (Si $4+$ par Al $3+$ ou Fe $3+$)(Figure 1.4), entrainant un déficit de charges dans le feuillet, qui devient négativement chargé [Tombacz et al,2004]. Cette charge est donc permanente, négative et dépendante de PH.

Ainsi, des cations compensateurs viennent se loger dans l'espace interfoliaire afin de combler le déficit de charge [Tombacz et al, 2004]. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans l'espace inter foliaire (figure1.4) et le degré d'hydratation dépend de la nature du cation hydraté et d'humidité relative [Montes-H et al, 2005]. Cette possibilité de « gonflement » conduit à désigner ces argiles par le terme d'argiles gonflantes.

La montmorillonite est une argile dioctaédrique [Luckham et Rossi, 1999]. L'aluminium des couches octaédriques peut être remplacé par Mg, Fe, Zn, Ni, Li etc. il peut d'autre part remplacer jusqu'à 15% du silicium dans les couches tétraédriques.

La localisation des substitutions est un facteur déterminant dans les propriétés d'adsorption des smectites [Hajjaji et El Arfaoui, 2009].

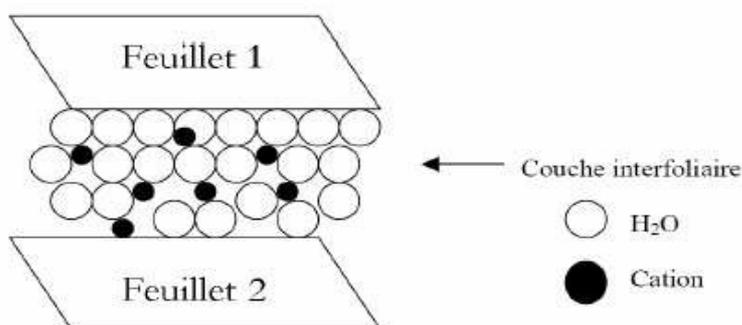


Figure1. 4 : Représentation schématique de la couche interfoliaire dans le cas de cations interfoliaires hydratés [Jozja (2003)].

I.4.Origine de la bentonite:

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riche en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux [Besq, 2003] qui font partie principalement du groupe des smectites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming- Etats unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite [Besq, 2003]. Cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France).

Les bentonites se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption d'échange ionique et de gonflement, ainsi que par des propriétés rhéologiques. Elles ont de ce fait de larges applications, toujours plus nombreuses et dans différents domaines (Ferhat ; 2012).

En Algérie, Les bentonites sont fréquentes dans le sous-sol. Certaines proviennent des cendres volcaniques comme celles de la vallée de la rivière du Chélif, alors que d'autres ont été formées par l'altération des roches rhyolites.

Les bentonites formées par les cendres volcaniques varient en épaisseur de 10 centimètres à environ 5 mètres. Elles représentent des sédiments créacé et tertiaire avec des alternances pyroclastiques et des coulées de lave. Cette stratification complexe indique une variation dans

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

l'homogénéité et la teneur en smectite. Certaines de ces bentonites possèdent une teneur élevée en smectite avec le sodium comme cation majeur.

Les bentonites d'âge Miocène sont également fréquentes sous la forme de couches de quelques centimètres d'épaisseur. Elles proviennent de cendres volcaniques. Hammam Boughrara, dans la région de Maghnia, est connu pour sa bentonite riche en smectite de haute qualité.

Les gisements d'argiles bentonitiques brutes de Hammam Boughrara sont situés à 15 Km à l'Est de la ville de Maghnia, (tableau 1.2). Les argiles bentonitiques se développent autour d'un dôme hypovolcanique de rhyolite de direction NO-SE et mis en place au Miocène. Les volcanites affleurent parmi des terrains mio-pliocènes, et des alluvions quaternaires. L'argile bentonitique provient de l'altération des rhyolites et des pyroclastites associées.

Gisements	Paramètre	Probable	Possible	Total
Dar Embarek I	Réserves en 10 ³ tonne	1860	2860	4720
Dar Embarek II			663	663
*Roussel I		1635	1510	3140
Roussel II		1640	740	2380
* Gisement en exploitation				

Tableau 1. 2 : Réserve des gisements d'argiles bentonitiques de Hammam Boughrara, Maghnia (Fiche technique, Bental Maghnia, ENOF).

I.5. La micro structure de la bentonite :

La bentonite est une argile qui se compose essentiellement de la smectite. Cette dernière est le nom d'un groupe des minéraux d'argile gonflante y compris la montmorillonite, les montmorillonites possèdent la propriété de gonflement la plus intéressante de tous les minéraux de la famille des phyllosilicates. Nous nous attachons dans cette partie à décrire leur structure à différentes échelles et leurs propriétés spécifiques. Ceci est rendu possible par l'utilisation de techniques expérimentales telles que la Diffusion aux Petits Angles des Rayons X (DPAX) [Pons (1980)], la Microscopie Electronique à transmission (MET) et la Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

Comme la bentonite proposée à la barrière ouvragée se compose essentiellement de la montmorillonite, les propriétés de ce minéral dominent les caractérisations de cette argile. Le feuillet de montmorillonite se constitue d'une unité structurale 2 :1 dont un niveau octaédrique inséré entre deux niveaux tétraédriques. Lors du remouillage, les molécules d'eau peuvent s'insérer entre les feuillets facilement et peuvent écarter donc ces feuillets. Cette propriété est le principal mécanisme qui engendre la haute activité et la propriété de gonflement au niveau macroscopique de la bentonite [Tang, A. (2005)].

Le schéma structural de la bentonite à différentes échelles est résumé sur la figure 1. 5. Au niveau microstructural, l'empilement des feuillets élémentaires constitue une particule.

L'épaisseur d'un feuillet est de 1 nm et sa largeur peut s'étendre jusqu'à 300 nm. L'espace inter-foliaire entre les feuillets, qui est de 0,95 nm pour une anhydre montmorillonite, peut atteindre de 1,25 nm à 1,92 nm suivant la quantité d'eau absorbée lors du remouillage, [Yong 1999]. Tessier (1990) a estimé cet espacement pour une Na-montmorillonite à 3,5–10 nm.

Chaque particule est composée de quelques feuillets à une centaine de feuillets [Saiyouri et al. 2000). Le nombre de feuillets d'une particule et l'épaisseur de la particule dépendent du cation inter-feuillets, de la teneur en eau, de la température et de la procédure de préparation d'argile [Tessier 1984, Saiyouri et al. 1998, Neaman et al. 2003, Stepkowska et al. 2004]. Les dimensions de la particule sont de l'ordre de 0,1 μ m. Les agrégats de bentonite sont constitués d'une agrégation de particules.

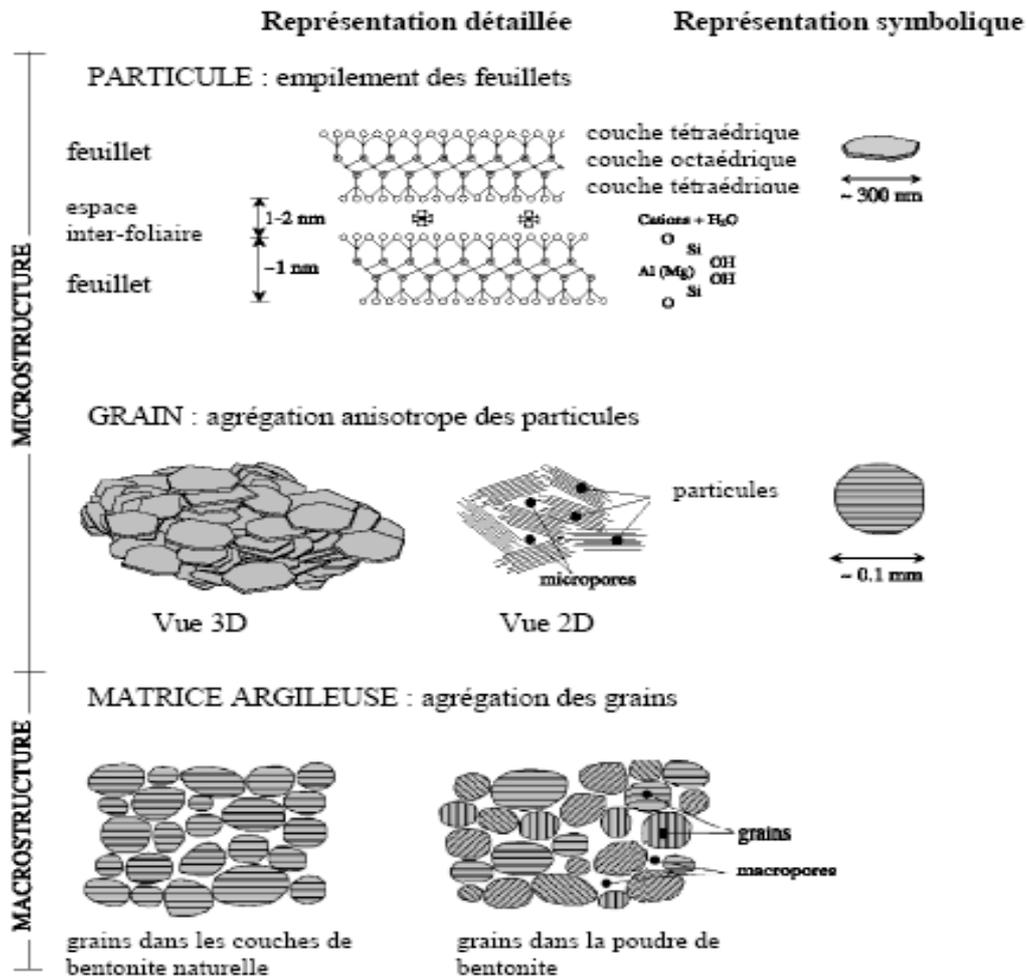


Figure 1.5 : Structure de la bentonite à différentes échelles, (d'après Karnland 1998, Pusch et Yong 2003, cité par Kröhn 2003)

Nous avons repris sur la figure 1.6 la présentation des différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation proposée par Le Pluart et al. (2004).

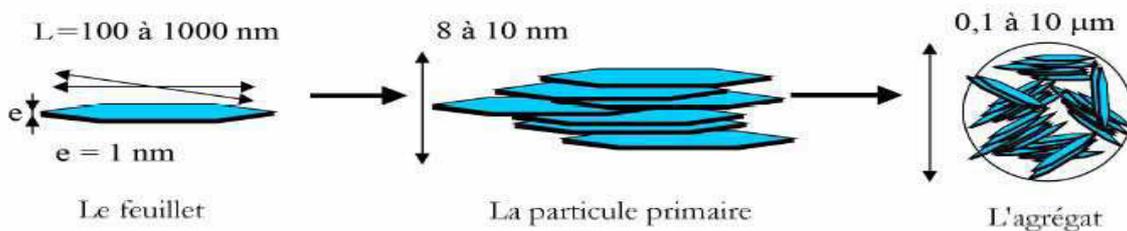


Figure 1.6 : Structure multi-échelle de la montmorillonite [Le Pluart et al. (2004)]

Nous présentons donc dans cette partie les trois différents "objets" caractéristiques de cette structure multi-échelle des montmorillonites.

I.5. 1 Le feuillet:

Les feuillets sont les unités structurales de base définissant la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique (Jozja ; 2003). Le feuillet représente la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y. Il est assimilable à un disque ou à une plaquette, possédant des dimensions latérales de l'ordre du micron, et faisant à peu près un nanomètre d'épaisseur. Ces plaquettes sont considérées comme souples et relativement déformables. L'anisotropie des feuillets est très importante. Dans la famille des smectites, la charge d'un feuillet varie de 0,2 à 0,6 électron par maille, selon la localisation des substitutions et le taux d'occupation des couches octaédriques. La montmorillonite possède environ 0,3 à 0,4 électron par maille [Le Pluart(2002)]. Les cations compensateurs à la surface des feuillets de montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium. On emploie généralement les termes de montmorillonite "calcique" et de montmorillonite "sodique" pour faire référence à la nature de ces cations [Benchabane (2006)].

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

(i) Empilement ordonné où les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait.

C'est le cas des phyllo silicates dont l'espace inter foliaire est vide ou anhydre (plutôt pour les kaolinites ou illites).

(ii) Empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel). Dans ce cas, les feuillets successifs présentent des translations "semi-définies". Ils sont séparés par quelques molécules d'eau, l'épaisseur de la particule est variable et dépend du degré d'hydratation. Ils peuvent glisser latéralement les uns sur les autres.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

(iii) Empilement désordonné (ou désordre turbostratique). Dans ce cas, des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans tout l'édifice. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule [Pons (1980) ; Pédro (1994)].

Il existe un nombre important de termes pour désigner les particules. Le plus petit élément cristallin (le plus petit volume cohérent) produisant des interférences dans un phénomène de diffraction X a été appelé par Mering et Oberlin (1971) "particule primaire". La particule plus grossière, obtenue après une dispersion dans certaines conditions, constituée par l'association de plusieurs particules primaires, a été désignée par les mêmes auteurs par le terme de "particule libre". La montmorillonite est généralement constituée par l'association de plusieurs particules primaires, dont l'extension latérale est particulièrement importante [Pons et al. (1982) ; Ben Rhaiem et al. (1986) ; Tessier (1984)]. Ces auteurs avaient été amenés à concevoir une juxtaposition, par les bords, des cristallites présentant une légère désorientation les unes par rapport aux autres. Toujours dans le cas de la montmorillonite, Aylmore et Quirk (1971) avaient introduit la formation, par chevauchement face-face à partir de particules libres ou primaires, d'édifices à extension latérale considérable : les "domaines".

Si nous nous limitons à la dimension des particules dans la direction perpendiculaire au plan des feuillets, l'épaisseur de ces particules a été évaluée, par l'analyse classique aux Rayons X des réflexions 001, à une dizaine de feuillets maintenus par les forces électrostatiques attractives entre les ions compensateurs et les feuillets. Elle fait généralement 8 à 10 nanomètres d'épaisseur (figure 1.4). La taille des particules est à peu près constante, c'est-à-dire que lorsqu'une montmorillonite est gonflée, l'espace inter foliaire est augmenté et il y a moins de feuillets dans une particule [Mathieu-Sicaud et Mering (1951) ; Le Pluart (2002) ; Jozja (2003)].

D'autre part, la montmorillonite présente des substitutions isomorphes de type di octaédrique [Luckham et Rossi (1999)]. Ce type de localisation des charges empêche les cavités hexagonales de deux feuillets adjacents de se superposer. L'arrangement global des feuillets, au sein d'une particule primaire de montmorillonite, est donc turbostratique. Ils présentent un désordre dans le plan latéral mais sont tous perpendiculaires à la direction z [Didier (1972)].

Cela a été bien confirmé dans le cas des montmorillonites calciques fortement hydratées en utilisant l'analyse de la diffusion aux petits angles et la microscopie électronique à

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

transmission [Pons et al. (1982) et (1987)]. Ces auteurs ont défini la particule comme étant un empilement parallèle quel que soit le degré d'ordre dans la répétition de ces feuillets à l'intérieur de l'empilement. Comme nous le verrons plus loin, ces particules constituent les "parois" du réseau de pores développé au sein de l'échantillon et ont une épaisseur extrêmement variable en fonction de la teneur en eau de l'échantillon.

Dans la littérature, on trouve souvent des travaux sur des bentonites constituées par des minéraux non homogènes dites "inter stratifiées" [Caillère et al. (1982) ; Laribi et al. (2005)]. Ces particules d'argile sont constituées par la superposition de feuillets qui sont : (i) soit de nature différente (illite-smectite, vermiculite-smectite, etc.), (ii) soit de même nature mais qui diffèrent par leurs remplissages inter foliaires comme le cas de la montmorillonite hydratée où l'espace inter foliaire peut contenir une, deux, trois ou quatre couches d'eau, (iii) ou par la nature et le remplissage inter foliaire à la fois, comme le cas de l'illite-smectite avec des feuillets de smectite dans des états d'hydratation variables [Ben Rhaiem et al. (1986) ; Jozja (2003)].

Parmi ces minéraux, les inters stratifiés illite/smectite sont les plus étudiés. On les trouve dans des bentonites couramment utilisées dans les boues de forage [Jozja (2003) ; M'bodj et al. (2004) ; Laribi et al. (2005)].

Dans le cas des minéraux inters stratifiés, l'empilement se caractérise essentiellement par le mode de succession des feuillets de nature différente suivant la normale à leur plan. Ainsi si on considère un minéral inter stratifié qui contient deux types de feuillets A et B, on peut envisager essentiellement trois types d'inter stratifiés :

(i) ségrégés : une particule donnée présente des séquences AAABBB (figure 1.5.a). Le diagramme de diffraction X est la superposition des diagrammes produits par chacun des constituants, **(ii) Réguliers** : une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB (figure 1.5.b). Une période de sur structure perpendiculairement au plan des feuillets égale à la somme des épaisseurs des deux feuillets apparaît ($dT=dA+dB$). Le diagramme de diffraction

X comporte alors des réflexions basales de sur structure correspondant à dT , **(iii) Aléatoires** : tous les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment (figure 1.5.c). Dans ce cas, les diagrammes de diffraction X présentent des réflexions (00l) irrationnelles [Mering (1949) ; Pédro (1994)] et leur interprétation est très délicate.

I.5. 2 La particule primaire:

Les particules constituent le premier niveau d'organisation. Elles sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet. Si on considère les principales espèces minéralogiques, la structure de la particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets peut se présenter suivant trois grands types d'empilements: (i) Empilement ordonné où les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait. C'est le cas des phyllo silicates dont l'espace inter foliaire est vide ou anhydre (plutôt pour les kaolinites ou illites). (ii) Empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel). Dans ce cas, les feuillets successifs présentent des translations "semi définies".

Ils sont séparés par quelques molécules d'eau, l'épaisseur de la particule est variable et dépend du degré d'hydratation. Ils peuvent glisser latéralement les uns sur les autres. (iii) Empilement désordonné (ou désordre turbostratique). Dans ce cas, des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans tout l'édifice. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule [Pons (1980) ; Pédro (1994)].

Il existe un nombre important de termes pour désigner les particules. Le plus petit élément cristallin (le plus petit volume cohérent) produisant des interférences dans un phénomène de diffraction X a été appelé par Mering et Oberlin (1971) "particule primaire". La particule plus grossière, obtenue après une dispersion dans certaines conditions, constituée par l'association de plusieurs particules primaires, a été désignée par les mêmes auteurs par le terme de "particule libre". La montmorillonite est généralement constituée par l'association de plusieurs particules primaires, dont l'extension latérale est particulièrement importante [Pons et al. (1982) ; Ben Rhaïem et al. (1986); Tessier (1984)].

Ces auteurs avaient été amenés à concevoir une juxtaposition, par les bords, des cristallites présentant une légère désorientation les unes par rapport aux autres. Toujours dans le cas de la montmorillonite, Aylmore et Quirk (1971) avaient introduit la formation, par chevauchement face-face à partir de particules libres ou primaires, d'édifices à extension latérale considérable : les "domaines". Si nous nous limitons à la dimension des particules dans la direction perpendiculaire au plan des feuillets, l'épaisseur de ces particules a été évaluée, par

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux argileux

l'analyse classique aux Rayons X des réflexions 001, à une dizaine de feuillets maintenus par les forces électrostatiques attractives entre les ions compensateurs et les feuillets. Elle fait généralement 8 à 10 nanomètres d'épaisseur (figure 1.6). La taille des particules est à peu près constante, c'est-à-dire que lorsqu'une montmorillonite est gonflée, l'espace interfoliaire est augmenté et il y a moins de feuillets dans une particule [Mathieu-Sicaud et Mering (1951) ; Le Pluart (2002) ; Jozja (2003)]. D'autre part, la montmorillonite présente des substitutions isomorphes de type di octaédrique [Luckham et Rossi (1999)]. Ce type de localisation des charges empêche les cavités hexagonales de deux feuillets adjacents de se superposer.

L'arrangement global des feuillets, au sein d'une particule primaire de montmorillonite, est donc turbostratique. Ils présentent un désordre dans le plan latéral mais sont tous perpendiculaires à la direction z [Didier (1972)]. Cela a été bien confirmé dans le cas des montmorillonites calciques fortement hydratées en utilisant l'analyse de la diffusion aux petits angles et la microscopie électronique à transmission [Pons et al. (1982) et (1987)]. Ces auteurs ont défini la particule comme étant un empilement parallèle quel que soit le degré d'ordre dans la répétition de ces feuillets à l'intérieur de l'empilement. Comme nous le verrons plus loin, ces particules constituent les "parois" du réseau de pores développé au sein de l'échantillon et ont une épaisseur extrêmement variable en fonction de la teneur en eau de l'échantillon.

Dans la littérature, on trouve souvent des travaux sur des bentonites constituées par des minéraux non homogènes dites "interstratifiées" [Caillère et al. (1982) ; Laribi et al. (2005)].

Ces particules d'argile sont constituées par la superposition de feuillets qui sont : (i) soit de 18 natures différentes (illite-smectite, vermiculite-smectite, etc...), (ii) soit de même nature mais qui diffèrent par leurs remplissages interfoliaires comme le cas de la montmorillonite hydratée où l'espace interfoliaire peut contenir une, deux, trois ou quatre couches d'eau, (iii) ou par la nature et le remplissage interfoliaire à la fois, comme le cas de l'illite-smectite avec des feuillets de smectite dans des états d'hydratation variables [Ben Rhaiem et al. (1986) ; Jozja (2003)]. Parmi ces minéraux, les interstratifiés illite/smectite sont les plus étudiés. On les trouve dans des bentonites couramment utilisées dans les boues de forage [Jozja (2003) ; M'bodj et al. (2004) ; Laribi et al. (2005)]. Dans le cas des minéraux inter stratifiés, l'empilement se caractérise essentiellement par le mode de succession des feuillets de nature différente suivant la normale à leur plan. Ainsi si on considère un minéral inter stratifié qui

contient deux types de feuillets A et B, on peut envisager essentiellement trois types d'inter stratifiés : (i) ségrévés : une particule donnée présente des séquences AAABBB (figure 1.5.a). Le diagramme de diffraction X est la superposition des diagrammes produits par chacun des constituants, (ii) Réguliers : une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB (figure 1.5.b). Une période de surstructure perpendiculairement au plan des feuillets égale à la somme des épaisseurs des deux feuillets apparaît ($dT=dA+dB$). Le diagramme de diffraction X comporte alors des réflexions basales de sur structure correspondant à dT , (iii) Aléatoires : tous les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment (figure 1.5.c). Dans ce cas, les diagrammes de diffraction X présentent des réflexions (00l) irrationnelles [Mering (1949) ; Pédro (1994)] et leur interprétation est très délicate.

I.5.3 L'agrégat :

C'est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions. Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns comme il est montré sur la figure 1.6 [Le Pluart (2002)].

Il s'agit d'un assemblage de particules dont l'arrangement est gouverné par le type de forces résultant des interactions entre particules (et du degré de compaction). En effet, lorsque les forces répulsives sont dominantes, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite dispersée. Ces particules s'assemblent au sein d'agrégats, plus au moins denses selon la texture et le nombre des particules, ainsi que les distances entre celles-ci. Tessier (1975), en prenant pour référence les données de Mering et Oberlin (1971) et de Van Olphen (1963), portant sur les minéraux expansibles, a proposé une nomenclature pour nommer les différents modes d'association des particules (détaillés plus loin) : l'agrégat constitué de plusieurs particules primaires a été nommé unité morphologique ; le dernier niveau d'organisation est constitué par les super-agrégats, où se regroupent les agrégats.

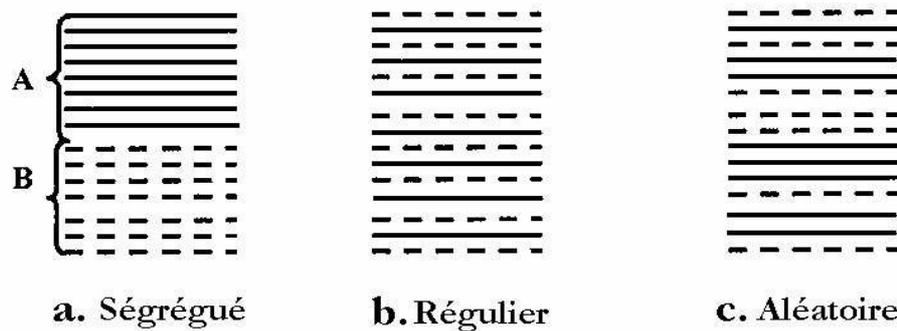


Figure 1. 7 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité inter stratifiée (Jozja ; 2003)

I.6. Conclusion:

Les argiles sont constituées d'un empilement de feuillets, chaque feuillet est constitué d'un arrangement de deux types de couches. Une tétraédrique à base de silice et une deuxième couche octaédrique à base d'hydroxyde d'aluminium. Les arrangements de ces deux types de couches définissent les catégories principales des minéraux argileux.

Certaines familles d'argile présentent la caractéristique d'être gonflante tels que la montmorillonite la composante majeure de la bentonite commerciale utilisée dans le présent travail. L'organisation de la microstructure de la bentonite (du feuillet à l'assemblage d'agrégats) ne peut être interprétée que si l'organisation de l'espace poral est prise en considération. La dimension, la forme et la distribution des espaces poraux dépendent de la granulométrie de l'argile, de son caractère gonflant et aussi du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise.

II.1. Introduction:

Quels que soient les procédés de traitement des déchets soit par les traitements physico-chimiques ou des traitements d'incinération il subsistera toujours des résidus.

La mise en décharge présente la première méthode d'élimination des déchets ; cette élimination qui peut être dans des décharges sauvages ou dans des décharges brutes.

Ces deux mauvaises façons de jeter présentent une nécessité de surveiller les effets et les impacts sur l'environnement et pour cette raison la décharge est devenue « contrôlée »

Par la suite et pour marquer certaines modernisations dans le choix des sites de confinement et dans la sélection des déchets admis ; la décharge c'est alors appelée « centre d'enfouissement technique » (CET).

Depuis les années 1990 des évolutions ont été remarquées dans le domaine et pour cette raison la réglementation donne un nouveau nom pour les (CET) c'est « les centres de stockage de déchets » « CSD » où 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'objectif essentiel du stockage est d'entreposer les déchets ultimes en veillant à garantir les conditions nécessaires pour maîtriser l'impact des déchets stockés sur l'environnement, notamment à moyen et à long terme. Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la structure et le classement des centres d'enfouissement techniques ainsi que la mise en œuvre et le fonctionnement d'un CET, afin de parler sur l'origine et la composition globale de lixiviat et du biogaz d'un centre de stockage. Nous avons parlé aussi sur les métaux lourds et leurs impacts sur l'environnement ces derniers qui rentrent sous forme de solutions polluantes dans le présent travail. Nous présentons par la suite, une revue bibliographique sur les barrières étanches et les matériaux composants l'étanchéité du fond et des parois d'un centre d'enfouissement technique.

II.2. Centre d'enfouissement technique :

II.2. 1 Définitions:

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 (figure2.1).

Ils sont indispensables pour accueillir les résidus pour les quels aucune valorisation ou traitement n'est envisageable dans les conditions techniques et économique 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 circulation 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.

L'Europe dispose d'une directive concernant la mise en décharge des déchets, et une directive sur les déchets, imposant une déclinaison dans le droit français avant la fin 2010.D'autre directives sont concernées dont la directive1999/13/CE relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations (Emilian koller, 2010).



Figure 2. 1 : Centre d'enfouissement d'Ouled Fayet -Alger-(Y. KEHILA et al.2011)

II.2. 2 La 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 ou 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 2-2).

Le biogaz est éliminés par une torchère afin d'éviter le rejet du méthane dans l'air, au mieux, il est valorisé en chaleur et/ou en électricité.

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

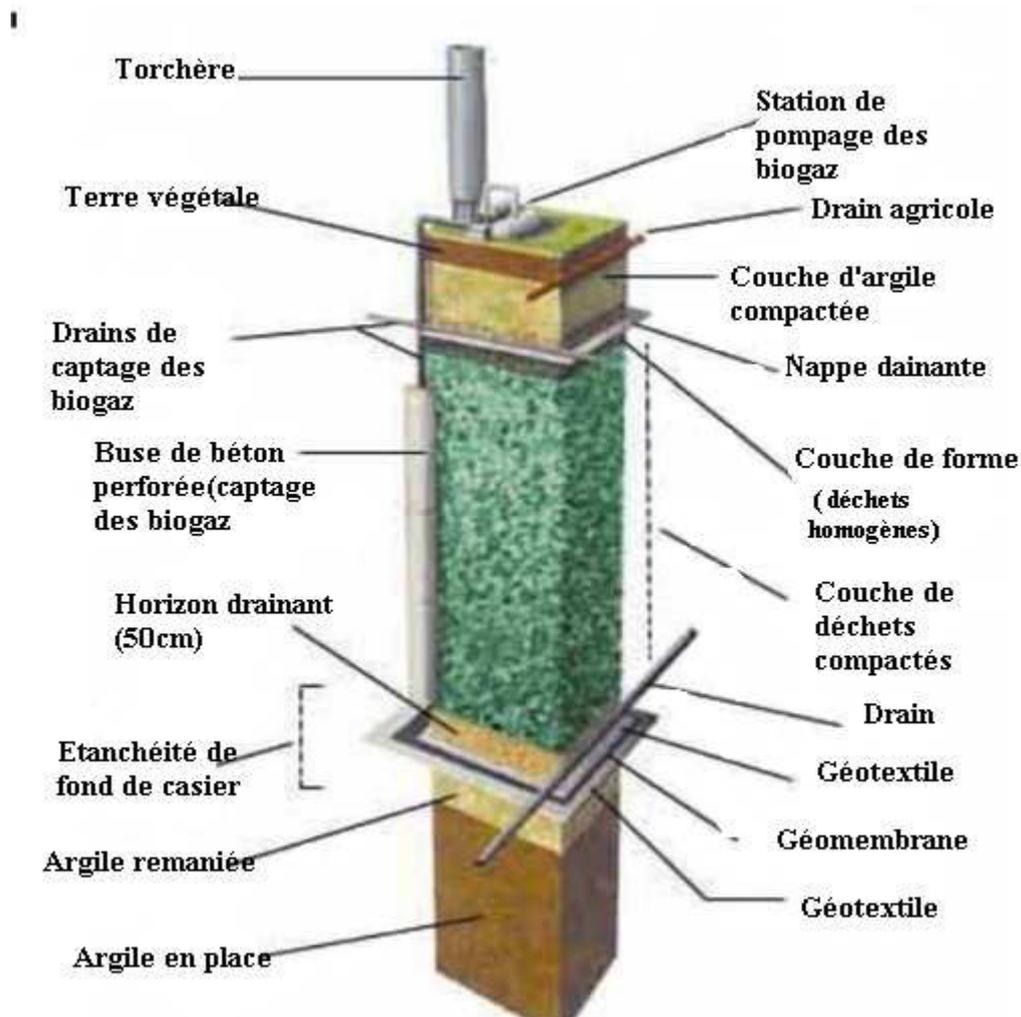


Figure 2. 2 : La structure d'un centre d'enfouissement.

II.2. 3 Le classement des centres d'enfouissement techniques (CET) :

Les centres d'enfouissements peuvent prendre divers noms :

- Un CET est un centre d'enfouissement technique.
- Un CSDU est un centre de stockage de déchets ultimes (terme qui remplace celui de CET)
- Un CSDMA : centre de stockage de déchets ménagères et assimilés.
- Une ISDND : installation de stockage de déchets non dangereux

Il existe trois types de CET :

- CET 1 (ou de classe 1) : destiné à accueillir les déchets dangereux. le déversement dans ces centres est précédé d'analyse des déchets à déverser.
- CET 2 (ou de classe 2) : qui reçoivent les ordures ménagères et déchets assimilés à celles-ci (reliefs de repas de restaurants...).
- CET 3 (ou de classe 3) : qui reçoivent les déchets inertes : terre, gravats, béton concassé, etc.

II.2. 4 Les principaux types de décharges :

Les déchets, les eaux météoriques et les matériaux constitutifs de l'installation sont les matières qui entre dans un centre de stockage, la quantité et la qualité des flux sortants seront directement influencées par la qualité et la quantité des flux entrants. De ce fait il est primordial de différencier les trois types d'installation existants, compte tenu de la nature différente des déchets stockés (inertes, ménagères et assimilés, dangereux) et des infrastructures différentes mise en place.

A l'heure actuelle, on distingue trois types de stockage, selon la nature des déchets concernés :

II.2. 4. 1 Décharges contrôlées pour matériaux inertes - classe 3 :

Les déchets admissibles en centre de stockage de classe 3 sont les déchets inertes c'est-à-dire les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et qui ne sont pas biodégradables. La nature chimique de ces déchets est stable et proche de la composition de la croûte terrestre.

Ces décharges servent au stockage de déchets minéraux faiblement pollués (teneur maximal de 5 % en matière organique) provenant essentiellement du secteur de la construction.

Les matériaux inertes, peu réactifs, comprennent notamment : les déchets de chantier comme le béton et le gravats, le verre, les déblais provenant de la réfection de routes, les matériaux d'excavation non pollués.

Leur émission de substances polluantes est négligeable. Ce type de décharge peut être installée sur les terrains perméables donc il n'a pas besoin d'être étanchéifiée et pour les conditions d'acceptabilité et de stockage des déchets dans ce type de décharge un guide technique est défini (Emilian Koller 2010).

II.2. 4. 2 Décharges contrôlées pour les déchets ultimes -classe 2 :

Installation destinée à stocker des déchets dits ultimes car ne pouvant pas faire l'objet d'une valorisation dans des conditions technologiques et économiques optimum.

Dans le cas des centres de classe II, les déchets sont stockés dans des casiers régulièrement recouverts. Les jus de lixiviation sont drainés, récupérés et traités avant rejet. Le biogaz produit est capté et valorisé ou brûlé en torchère.

II.2. 4. 3 Décharges contrôlées pour les déchets dangereux - classe 1 :

Installation destinée à stocker des déchets dits ultimes car ne pouvant pas faire l'objet d'une valorisation dans des conditions technologiques et économiques optimum.

Dans le cas des centres de classe I, les déchets sont issus des activités industrielles et sont classés comme dangereux.

Ces installations sont soumises à des réglementations et font l'objet d'une demande d'autorisation et d'une enquête publique.

Pour chaque CET 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. Elle doit respecter des prescriptions techniques légales, visant à garantir une bonne protection de l'environnement.

Chapitre II : Généralité sur les centres d'enfouissements techniques et les barrières étanches

Le tableau (2.1) présente les différents types de CET et les déchets admis dans chaque centre d'enfouissement :

Type de centre de stockage	Déchets inertes (ex-classe 3)	Déchets municipaux Déchets DIB (ex-classe 2)	DIS ou dangereux (ex-classe 1)
Critères d'admission	Non organique. Ne rélargissent pas par lixiviation des composés indésirables.	Prétraitement d'extraction. Provenance urbaine ou d'industries non toxiques.	* Tous déchets contaminé par des métaux lourds ou radioactifs lixiviables micropolluant organiques toxiques, contenant des substances inflammables, cancérigènes, corrosives, infectieuses...
Type de traitement	Dépôt en l'état	Mise en alvéole avec récupération du biogaz et des rejets liquides	Enfouissement en alvéoles étanches après interagie. Surveillance poussée.
Remarques	Sites perméables. Sans danger pour le sous- sol.	Sites semi-perméables. Nappes aquifères surveillées.	* Sites imperméables particulièrement protégés, notamment en ce qui concerne le sous-sol
Exemple	Graviers. Matériaux de construction. Sols non pollués. Déchets de concassage.	Boues d'eau potable. Ordures ménagères. Déchets de voiries et déchets verts. Déchets d'industries agroalimentaires, du bois, papier....	Boues de traitement de surface. Déchets agro-chimiques. Déchets de solutions acides ou alcalines, etc

Tableau 2.1 : Principaux types de décharges (Emilian Koller 2010).

II.2. 5 La mise en œuvre et modes d'exploitation d'un centre de stockage :

Plusieurs étapes ont été faites pour la mise en œuvre d'un centre de stockage :

Etape -1- Aménagement du site ; étanchéification du fond et des flancs (apport d'argile, géo membrane.....) division en casiers et mise en place d'une couche drainante (figure 2-3).

Etape -2- Admission ; les déchets font l'objet avant leur admission sur un site de classe 1 d'un certificat d'acceptation préalable, et sont soumis à un contrôle d'admission visuel à une analyse de laboratoire et à un contrôle de non radioactivité. Les déchets non-conformes sont renvoyés à leurs productrices ou orientés vers d'autres filières.

Etape -3- Remblaiement ; les déchets sont déchargés au fur et à mesure de la progression du chantier.

La reprise par des compacteurs qui les poussent et les tassent sous leur poids et leurs passages répétés parmi les modes les plus répandus (technique non utilisés par les décharges de classe 1). En tant que de besoin, les déchets sont recouverts (sable et terre végétale) pour éviter les envoles de déchets ou l'intrusion d'animaux (uniquement en classe 2).

Etape -4- Suivi ; l'exploitation est tenu d'assurer le suivi à long terme de la décharge (30 ans) il doit intervenir en cas d'accidents (glissement, rupture de digue.....) des garanties financières sont mises en place pour pallier les défaillances de l'exploitant.

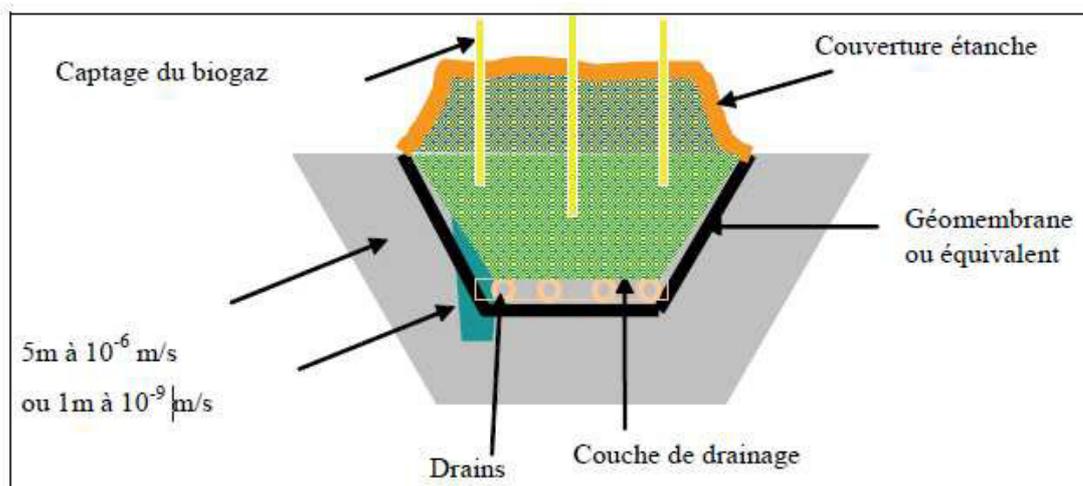


Figure 2. 3 Centre d'Enfouissement Technique type (Y. KEHILA et al.2011).

II.2. 6 Fonctionnement d'un centre d'enfouissement :

Les matières qui entrent dans un centre d'enfouissement sont: les déchets, les eaux météoriques et les matériaux constitutifs de l'installation. Ainsi, la quantité et la qualité des flux sortants seront directement influencées par la qualité et la quantité des flux entrants. L'eau est le vecteur principal de l'évolution d'une décharge [Aina M.2006], [Damien A.2004], [Kehila Y., Mezouari F., Matejka .2009].

Les déchets sont contrôlés à l'entrée du site et transportés jusqu'au casier en exploitation. Ils sont ensuite, déversés sur une aire de réception, puis poussés à l'aide d'un engin à chenilles et étalés par couches fines. Le remplissage s'effectue par une succession de couches de 40 cm compactées jusqu'à atteindre la hauteur de 1,4 m. Elles sont ensuite recouvertes par une couche de terre inerte d'environ 10 cm. Une fois la capacité maximale des casiers atteinte, on procède à la fermeture, en installant un recouvrement favorisant l'apparition de végétation. Les eaux pluviales sont récupérées par un système de drainage périphérique autour de chaque casier. Le compactage des déchets permet de réduire leur volume final et augmenter la durée de vie du centre d'enfouissement [Aliouche S.2006]. Les matériaux de couverture représentent environ 20% du volume total de remplissage. Le volume restant est occupé par les déchets compactés, soit environ 80%.

Le fonctionnement d'une décharge peut être assimilé à un réacteur bio physico chimique donnant lieu à des réactions et à des évolutions complexes qui aboutissent à la transformation chimique, physique et biologique des déchets. Du fait des conditions géologiques et hydrologiques du site, de la nature des déchets stockés et du mode de gestion de l'exploitation, chaque centre de stockage est un cas unique, il est donc pas envisageable de déterminer avec précision un mode d'évolution qui serait applicable à tous les centres.

II.2. 7 Les différentes phases de l'évolution d'une décharge de déchets non dangereux :

En fonction de l'évolution biologique de la matière organique fermentescible, certains auteurs ont proposé des modèles théoriques globaux qui découpent la vie d'une décharge en différentes étapes. Ces auteurs ont identifié cinq phases dont les paramètres indicatifs sont basés sur les variations qualitatives et quantitatives des lixiviats et des gaz produits.

Le modèle suivant est basé principalement sur les paramètres d'évolution des lixiviats [Polhand, 1985 ; Chian, 1985] :

- Phase 1 – Phase initiale ou de latence :
 - Remplissage des déchets et accumulation de l'humidité.
 - Début du tassement et fermeture des alvéoles.
 - Détection des premiers changements des différents paramètres.
- Phase 2 – Phase de transition :
 - Capacité de rétention en eau des déchets dépassée et formation de lixiviats.
 - Passage des conditions aérobies aux conditions anaérobies ; l'accepteur d'électrons passe petit à petit de l'oxygène aux nitrates et sulfates (le milieu devient réducteur).
 - Des teneurs mesurables en métabolites intermédiaires tels les AGV (acides gras volatils) commencent à apparaître dans les lixiviats.
 - Une tendance nette à des conditions réductrices est observable.
- Phase 3 – Phase de formation acide :
 - Les AGV deviennent prépondérants ainsi que la fermentation des constituants biodégradables des lixiviats.
 - Une diminution du pH se produit avec une mobilisation et une possible complexation des espèces métalliques.
 - La consommation de l'azote et du phosphore pour la croissance de la biomasse augmente.
 - L'hydrogène peut être détecté et affecter la nature et le type des produits intermédiaires formés.
- Phase 4 – Phase de fermentation méthanique :
 - Les produits intermédiaires apparus pendant la phase acide sont transformés en méthane et en dioxyde de carbone.
 - Remontée du pH à une valeur élevée contrôlée par la capacité tampon du système carbonate.
 - le potentiel d'oxydo-réduction est au plus bas et les nutriments continuent à être consommés.
 - la complexation et la précipitation des métaux se poursuivent ;

- la charge organique des lixiviats décroît beaucoup et la production de gaz augmente proportionnellement.

• Phase 5 – Phase de maturation finale :

- Stabilisation des constituants organiques disponibles dans les déchets et solubilisés dans les lixiviats.

- Les concentrations en nutriments deviennent limitantes.

- La production de biogaz chute puis cesse.

- L'oxygène et les espèces oxydées réapparaissent lentement avec une augmentation du potentiel d'oxydoréduction.

- Les matières organiques plus résistantes à la biodégradation sont converties très lentement en molécules telles les acides humiques et acides capables de complexer et solubiliser les métaux lourds.

De la même manière, d'autres auteurs ont découpé l'évolution des décharges en fonction de la production des gaz. Ainsi, quatre phases ont d'abord été identifiées [Farquhar, 1973] auxquelles une cinquième a été ajoutée [Rees, 1980] :

• Phase I – Phase aérobie.

• Phase II – Phase anaérobie non méthanogène.

• Phase III – Phase anaérobie méthanogène instable.

• Phase IV – Phase anaérobie méthanogène stable.

• Phase V – Phase terminale de maturation.

En terme de durée, les phases IV et V sont considérées comme étant les plus longues.

II.2. 8 Les risques et les impacts d'un centre d'enfouissement :

L'étude des risques et des impacts qu'un centre d'enfouissement peut engendrer vis-à-vis de l'environnement et de la santé des personnes se réalise par l'examen :

Des dangers : « effets maximums potentiels qu'un déchet peut, en théorie, produire ».

Des risques : « part de danger qui peut être effectivement attendue dans un scénario donné, « multipliée » par la probabilité que l'événement se produise »

Le tableau 2- 2 résume l'étude des dangers d'un CET :

Dangers potentiels	Mesures de réduction des dangers
Pollution des eaux superficielles	Choix de site : implantation si contexte hydrogéologique favorable. Confinement des déchets y compris sur les flancs. Collecte et contrôle des eaux de ruissellement.
Pollution des eaux souterraines	Présence d'une barrière passive géologique, d'imperméabilité importante ($K = 10^{-9}$ m/s). Positionnement fond de sites/niveau connu d'eaux souterraines. Barrière passive non sollicitée, c'est-à-dire collecte, traitement et rejet des lixiviats s'accumulant au fond par le système d'étanchéité drainage (barrière active)
Pollution de l'air	Réduction des quantités de déchets évolutifs (classe 1) et fermentescibles valorisables (classe 2). Collecte et traitement avant rejet du biogaz formé. Interdiction de déchets inflammables, explosifs.

Tableau 2. 2 : Etude des dangers d'un CET (Source technique de l'ingénieur, traité Environnement).

II.3. Lixiviat de décharge :

II.3. 1. Généralités :

La percolation de l'eau à travers les déchets donne un liquide résiduel qui s'appelle le lixiviat. Ce liquide est l'un des problèmes les plus importants qui concerne la conception d'un centre d'enfouissement de déchets.

Le lixiviat comprend une masse de composants organique minéraux et métalliques différents qui peuvent être ou dissous ou suspendus. La variabilité des lixivians se situe aussi au niveau des volumes produit quotidiennement d'où l'intérêt d'anticiper leur production par le calcul d'un (bilan hydraulique). Le climat qui agit sur le terrain d'enfouissement des déchets est parmi nombreux facteurs qui influencent sur la production et la composition de lixiviat- par exemple, là où le climat enregistre les plus hauts niveaux de précipitations, il aura plus d'eau qui entrera dans les déchets et donc on aura plus de lixiviat.

La topographie du site d'enfouissement et un autre facteur qui influera sur les modes d'écoulement d'eau dans le site.

Le lixiviat pose un problème de pollution potentiel sur les terrains locaux et les eaux de surface. Le rejet de ces effluents dans le milieu naturel étant soumis à des normes, il est nécessaire d'envisager un traitement par des procédés flexibles de haute performance capables d'éliminer l'ensemble des polluants, une station d'épuration collective urbaine ou industrielle assure le plus souvent, le traitement des lixiviats. La collecte des lixiviats recueillis par un réseau des drains est assurée soit par un écoulement gravitaire dans ou plusieurs collecteurs, soit par pompage à travers un regard dans une fosse d'accumulation placée au point bas du casier. Leur traitement sur le site du centre de stockage fait appel à de nombreux procédés qui dépendent du volume et de la composition des lixiviats.

II.3. 2 Classification de lixiviat :

Les lixiviats sont le résultat de la percolation des eaux météoriques aux travers des déchets.

Avec ce processus les eaux se chargent mécaniquement et surtout chimiquement en substances minérales et organiques.

Trois types de lixiviats ont été distingués [Milot, 1986] :

1. les lixiviats jeunes,
2. les lixiviats intermédiaires,
3. les lixiviats âgés ou stabilisés.

Les lixiviats jeunes se caractérisent par une charge organique élevée. Ils peuvent être chargés en métaux (jusqu'à 2g/l) du fait de leur pH relativement bas (< 6,5).

Les lixiviats intermédiaires présentent une charge organique un peu moindre avec une biodégradabilité assez faible. En effet, les acides carboxyliques ne représentent que 20 à 30 % de cette charge. De ce fait le pH est voisin de la neutralité et la charge en métaux devient négligeable.

Les lixiviats âgés sont caractérisés par une faible charge organique, ces lixiviats stabilisés correspondent à la phase de maturation de la décharge (voir tableau 2.3).

En résumé, les teneurs en métaux des lixiviats diminuent rapidement en fonction de l'ancienneté de la décharge [Jean Germain Poujouly (2004)].

	Jeunes –Type 1 -	Intermédiaires – Type 2-	Vieux – Type 3 -
Age	< à 5 ans	5 à 10 ans	> 10 ans
PH	6.5	6.5 à 7.5	> 7.5
DCO (mg/l)	DCO > 10.000	4.000 < DCO > 10.000	DCO < 4.000
DBO ₅ /DCO	> 0.3	0.1 à 0.3	< 0.3
	biodégradable		Faiblement biodégradable
Matière organique	80% = acide gras volatils	5% à 30% d'AGV+ acides fulviques+ acides humiques	Acides humiques, fulviques
Métaux lourds	Fiable à moyenne		faible

Tableau 2. 3 : Classification des lixiviats en fonction de l'âge de la décharge d'après : Chian (1977), Millot (1986).

II.3. 3. La composition globale d'un lixiviat :

Les auteurs relèvent classiquement quatre types de polluants [Pronost, Matejka, 2000] :

1. La matière organique dissoute ou en suspension, issue de la biomasse, exprimée généralement en DCO (demande Chimique en Oxygène),
2. Les micropolluants organiques (hydrocarbures, composés aromatiques...),
3. Les composés minéraux majeurs (Ca, Mg, Na, K, NH₄, Fe, Cl,.....) ainsi que d'autres composés,
4. Les cations de métaux lourds à l'état de traces, sous forme majoritairement complexée par des ligands minéraux ou organiques.

Les lixiviats peuvent également contenir certains micro-organismes pathogènes [Sillet et al, 2001]. Compte tenu que la composition des lixiviats est fonction des déchets enfouis, de l'âge

de la décharge, de la météorologie et des techniques utilisées, les teneurs des différents polluants varient énormément d'un lixiviat à l'autre.

Il convient de noter que les niveaux de concentrations mesurées sont liés à la mobilisation possible des métaux lourds présents au sein des déchets ainsi qu'à la présence de matière organique (tableau 2-4).

Métaux	Teneur des métaux	
	Mini	Max
Cd	0.2	6µg/l
Ni	10	170µg/l
Zn	0.003	9µg/l
Cu	2	270µg/l
Pb	< 5	188µg/l
Cr	0.002	1.6µg/l

Tableau 2. 4 : Les teneurs des différents polluants présents dans un lixiviat

Il paraît nécessaire de retenir :

- La composition des lixiviats des CET des déchets ménagers dépend de l'âge de la décharge, de la nature et de la composition des déchets et de la gestion du site. En conséquence, présenter une composition standard de lixiviat de décharge de déchets ménagers semble illusoire. [Jean Germain Poujouly (2004)].

II.3. 4. Production des lixiviats dans les centres d'enfouissement :

Les contraintes réglementaires (arrêté du 09/09/1997) ont fait évoluer la production des lixiviats. Une étude a permis d'établir cette production en trois phases :

- 1ère phase : ~ 20 % de la pluviométrie et pouvant aller jusqu'à 30 %, durée ~ 1 à 2 ans,
- 2ème phase : dont la durée moyenne serait ~ 10 ans, production de l'ordre de 6 à 7 %,
- 3ème phase : Au delà de 10 ans, la couverture réduit considérablement les infiltrations d'eau et la production de lixiviats n'est plus que de 0,2 % de la pluviométrie (tableau 2-5).

Chapitre II : Généralité sur les centres d'enfouissements techniques et les barrières étanches

Une étude de l'Agence de l'eau montre que sur 8 sites de (classe2) étanchés en fond de casier la quantité mensuelle de lixiviats collectée est de :

- 177 m³/ha avec un écart type de 122 m³/ha [Agence de l'eau, 1997] qui correspondrait à une infiltration efficace de 212 mm/an. [Jean Germain Poujouly (2004)].

Age de la décharge	1.5 ans	10 ans	> 10 ans
Gestion de l'alvéole	Début d'exploitation (sans couverture)	En cours d'exploitation (couverture intermédiaire)	Fin d'exploitation (couverture finale)
Production de lixiviats (en% de la pluviométrie)	20% (jusqu'à 30%)	7%	0.2%

Tableau 2. 5 : production de lixiviat dans une décharge.

Le cas du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouled Fayet (Alger) est représentatif pour la région nord du pays (zone humide) (figure 2-4). La production moyenne journalière dépasse 100 m³. Une tonne de déchets ménagers et assimilés enfouis, produit en moyen environ 31 litres de lixiviats. La quantité de déchets déversés et les précipitations enregistrées ont une influence considérable sur la production des lixiviats [Kehila. Y ; Mezouari.F ; Matejka.G(2011)].

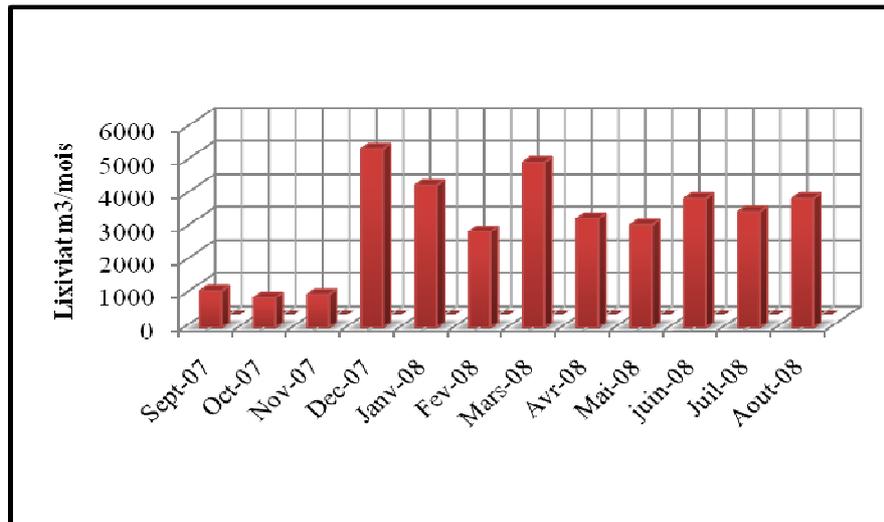


Figure 2. 4 : Production mensuelle de lixiviat CET Ouled Fayet (Alger, 2011).

II.4. Le biogaz:

II.4. 1 Définition:

Le biogaz est un sous-produit de dégradation de la matière organique fermentescible, le cycle complet s'articule en 5 phases :

Phase 1 : elle est le départ du cycle ; lors de la courte phase aérobie, l'oxygène et l'azote de l'air y compris le principal produit de dégradation de la matière organique fermentescible, le gaz carbonique (CO₂), sont les composants essentiels.

Phase 2 : durant cette phase à lieu l'hydrolyse, l'acidogène et l'acétogénèse, il y a production d'acides gras volatils, d'alcools, d'ammoniac, de CO₂ et d'H₂.

Phase 3 : la méthanogénèse démarre, parallèlement le taux de CO₂ diminue et les autres gaz ou produits volatils majeurs disparaissent.

Phase 4 : elle est appelée phase méthanogène stable et dure plusieurs années au cours de laquelle la production de méthane atteint son maximum.

Phase 5 : dans cette dernière phase la production de biogaz chute pour finalement cesser au profit d'un retour des conditions aérobies [Synthèse des travaux du Conseil scientifique de l'InVS (2001/2004)].

II.4. 2 Origine et composition du biogaz :

La majorité du biogaz produit vient du processus anaérobie qui est très complexe et qui

dépend de nombreux paramètres. Notons que 90% de la production de méthane d'une décharge se fait au départ de la cellulose contenue dans les papiers, cartons, bois, etc. la dégradation est toutefois incomplète et limitée à environ 75% (Gendebien, 1992).

II.4.3 La composition du biogaz :

La composition du biogaz est très variable et dépend notamment de :

- L'âge de la décharge.
- Les conditions de mise en décharge (compactage).
- La composition des déchets.

	Modena (I)	Eberstadt (A)	Anton (B)	Mont St Guibert (B)	Maximum
CH ₄	51	53.6	60	54	85
CO ₂	38	38.8	30	24	88
CO	0.5	0.034			3
N ₂	5	6.2			82.3
O ₂	1	1.4			31
H ₂ S	0.005	0.023		0.001	0.007

Tableau 2.6 : Concentration dans le Biogaz (SPAQUE, 1991 Et D.P.E 1998, Gendebien, 1992)

Le tableau (2-6) reprend les principaux constituants du biogaz produit dans une décharge et donne les concentrations mesurées dans différents sites européens ainsi que les valeurs extrêmes rencontrées.

Le méthane, CH₄, et le gaz carbonique, CO₂, sont les deux produits majeurs de la méthanogénèse, étape finale et la plus long du processus anaérobie.

Le monoxyde de carbone, CO, vient de la dégradation biologique des déchets et est aussi produit lors de combustions réalisées en défaut d'oxygène.

L'oxygène, O₂, et l'azote, N₂, ne sont présents que s'il y a infiltration d'air frais dans le cœur de la décharge.

L'origine du sulfure d'hydrogène, H₂S, s'explique par la présence simultanée de sulfate (provenant notamment des déchets de construction) et de bactéries sulfato-réductrices. Ces dernières travaillent en compétition avec les bactéries méthanogènes.

Autre ces composants majeurs il existe une multitude de substances organiques à l'état de traces. La nature de ces produits est très variées : aldéhydes, cétones, alcools, composés aromatiques, composés halogénés et composés organo-sulfurés.

Les origines de ces substances sont les dégradations biologique et chimique des déchets ainsi que le relargage de gaz provenant de la mise en décharge de déchets les contenant : frigos, solvants, aérosols, etc. leur part dans la production de biogaz est faible et leurs proportions relatives sont très variables [Atlas des décharges d'ordures ménagères dans les pays en développement (2001)].

II.4. 4 Les caractéristiques du biogaz:

Les caractéristiques du biogaz sont les suivantes :

- Combustible : le méthane est le principal combustible contenu dans le biogaz, dont le pouvoir calorifique est fonction de sa teneur ;
- Odorant : le biogaz est composé d'éléments malodorants présents sous forme de traces, comme les mercaptans ou le sulfure d'hydrogène ;
- Explosif : lorsque la teneur en méthane est comprise entre 5 et 15 %, l'oxygène entre 15 et 20 % avec un taux de dioxyde de carbone ne dépassant pas 25 % ;
- Corrosif : les composés soufrés additionnés à l'humidité rendent le biogaz corrosif ;
- Participant à l'effet de serre : le méthane et le dioxyde de carbone sont les deux principaux gaz à effet de serre additionnel.

Le bilan national édité annuellement par CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) fait apparaître une contribution de 25 % du biogaz des décharges pour 2000 et 17 % pour 2001. D'après ces données si l'on considère les seules émissions de méthane par rapport au PRG (Pouvoir de Réchauffement Global exprimé en équivalent CO₂), la contribution des décharges aux émissions nationales de gaz à effet de serre représenterait à elle seule environ 3% en 2000 et 2,2 % en 2001. On constate que cette participation diminue progressivement avec la réglementation qui oblige au captage du biogaz [Synthèse des travaux du Conseil scientifique de l'InVS (2001/2004)].

II.4. 5 Les risques environnementaux et sanitaires du biogaz:

Les risques liés au biogaz peuvent être classés de la façon suivante :

- Risque pour les humains :
 - Toxicité des substances
 - Asphyxie
 - Explosion incendies
- Risques de pollution de l'atmosphère :
 - Effet de serre.
 - Smog.

II.5. Les métaux lourds:

Dans cette étude nous avons utilisé cinq solutions chimiques une solution de cuivre (Cu^{+2}), solution de plomb (Pb^{+2}) et une solution de cadmium (Cd^{+2}) avec une concentration de 01g/l.

II.5.1 Définition:

Les définitions des métaux lourds sont multiples et dépendent du contexte dans lequel on se situe ainsi que de l'objectif de l'étude à réaliser.

D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être également définis comme :

- Tout métal ayant une densité supérieure à 5.
- Tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium ($Z=11$).
- Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques.

Certains chercheurs utilisent des définitions plus spécifiques encore. Le géotechnicien, par exemple, considérera comme métal lourd tout métal réagissant avec la pyrimidine ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$).

Dans le traitement des déchets liquides, les métaux lourds indésirables auxquels on s'intéresse principalement sont : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se), le zinc (Zn).

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), le zinc (Zn).

Enfin, dans l'industrie en général, on considère comme métal lourd tout métal de densité supérieure à 5, de numéro atomique élevé et présentant un danger pour l'environnement et/ou pour l'homme.

Dès lors que l'on aborde la problématique des métaux lourds, il faut avoir présent à l'esprit que ces éléments se retrouvent dans notre environnement quotidien sous des formes chimiques très diverses, pouvant chacune conférer une propriété particulière (solubilité, toxicité...) au métal étudié. En effet, à côté des formes minérales les plus simples (exemple : Pb^{2+}), les métaux lourds peuvent aussi exister sous forme organique, c'est-à-dire combinés à un atome de carbone (exemple : le plomb tétraéthyl des essences) mais aussi sous forme de complexes (exemple : le salicylate de plomb, provenant de la complexation du plomb avec une substance humique des sols) ou encore sous forme de chélates (exemple : complexe de plomb-EDTA). Toutes ces formes, même si elles sont présentes en quantité minime, et quelles que soient les transformations qu'elles subissent lors de leur cheminement dans l'environnement, doivent être prises en compte lorsque l'on étudie les métaux lourds et ceci confère à ce sujet toute sa complexité. L'étude de toutes ces formes de métaux lourds constitue une discipline à part entière, connue actuellement sous le terme d'étude de la spéciation des métaux lourds.

II.5.1.1 Le cadmium :

Le cadmium est récupéré lors de l'élaboration du zinc, du plomb et du cuivre.

Appliqué en couche mince, il protège l'acier contre la corrosion. Il constitue les plaques négatives des accumulateurs au nickel-cadmium. Le cadmium entre dans la composition d'alliages dont il abaisse le point de fusion et d'alliages antifriction.

Absorbant fortement les neutrons lents, le cadmium est utilisé pour la commande des réacteurs nucléaires et le blindage d'appareils de mesure. Les sels de cadmium sont employés dans la photographie, la fabrication des feux d'artifice, les caoutchoucs, la porcelaine, etc.

Les oxydes de cadmium sont utilisés dans l'industrie chimique, pour la galvanoplastie, dans les accumulateurs électriques, comme stabilisants pour matières plastiques, et pigment pour émaux.

II.5.1.2 Le plomb :

La fabrication des accumulateurs constitue la principale utilisation du plomb (environ 50 % de la consommation totale). Les caractères d'imprimerie, les gaines de câbles électriques et les

tuyaux pour les canalisations d'eau et de gaz constituaient des marchés importants qui ont considérablement diminué. D'autres comme les bandes et les tables de plomb laminé pour les couvertures et l'insonorisation dans le bâtiment, le plomb de chasse, les capsules de bouteilles et les métaux d'apport pour soudures se maintiennent ou éventuellement progressent. Les plaques de plomb sont utilisées dans la lutte contre la corrosion (industrie chimique) et dans la protection contre les rayonnements (installations utilisant les rayons X ou énergie nucléaire). Le plomb entre dans la composition de nombreux alliages à bas point de fusion et d'alliages antifriction (avec de l'étain ou du cuivre). Les composés chimiques du plomb sont importants pour leurs applications industrielles: matière active des accumulateurs, cristallerie, verrerie technique (tubes de télévision), fabrication des pigments, de peintures anticorrosion, de stabilisants pour les plastiques, de glaçures pour les céramiques et les poteries, etc. Les additifs à base de plomb (plomb tétra éthyle) ont joué un rôle important dans l'industrie des carburants grâce à leurs propriétés antidétonantes, mais sont de moins en moins employés à cause de la pollution atmosphérique qu'ils engendrent.

Les principales sources de plomb se trouvent en Australie, aux Etats-Unis, au Canada, au Mexique, au Pérou et en Russie. Les Etats-Unis consomment la moitié de la production mondiale. Le plomb est le métal non ferreux le plus récupéré et recyclé.

Le plomb et ces composés sont reconnus comme étant toxique pour les êtres humains. Le plomb peut être ingéré par les voies gastro-intestinales par la nourriture et l'eau contaminée. Le plomb a une forte tendance à la bioaccumulation dans les os et le sang.

II.5.1.3 Le Cuivre :

C'est un métal de couleur rougeâtre, il possède une haute conductivité thermique et électrique (à température ambiante, le seul métal pur ayant une meilleure conductivité électrique est l'argent). Le cuivre pourrait bien être le premier métal à avoir été utilisé, étant donné que des pièces datant de 8700 avant J-C ont été trouvées. Le cuivre est un des rares métaux qui existe à l'état natif. Ce fait d'ailleurs expliquant probablement qu'il fut le premier métal utilisé par les hommes. L'occurrence du cuivre natif est cependant assez faible. On le trouve le plus fréquemment sous forme de sulfure ou de sulfosel. Autrefois on considérait le cuivre comme un poison mortel, notamment sous sa forme oxydée le vert-de gris. Actuellement on sait au contraire qu'il s'agit d'un oligo-élément indispensable à la vie. Il est nécessaire à la formation de l'hémoglobine et possède des vertus bactéricides. Le cuivre est rarement utilisé pur, sauf

pour les conducteurs électriques et dans le cas où l'on souhaite une grande conductivité thermique. Les alliages de cuivre, par contre, sont très largement utilisés dans de nombreux domaines. Des peintures à base de cuivre par exemple sont utilisées dans diverses applications industrielles, contaminant par la même occasion les eaux qu'elles traversent.

II.5. 2 Origines naturelles et humaines des métaux lourds dans l'environnement :

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement par l'intermédiaire de sources naturelles et humaines. Cette contamination a plusieurs origines telles que la combustion de fossiles, les gaz d'échappement des véhicules, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture et les déchets liquides et solides. Mais elle peut également être d'origine naturelle via les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion, l'infiltration, etc. Le tableau suivant (tiré d'une étude de Lantzy et Mackenzie) montre le rapport entre le flux lié à l'activité humaine et le flux naturel. D'autre part, le cadmium, l'arsenic, et surtout le mercure et le plomb sont introduits dans l'environnement, de façon quasi exclusive par l'homme.

II.5. 3 Distribution et impact sur l'environnement :

II.5. 3. 1 Contamination des sols :

Les surfaces concernées par la pollution métallique sont estimées, en France, à 200 000 ha le long des axes routiers et à 400 000 ha à proximité des sites industriels. Les métaux peuvent être soit fixés dans les roches et les sédiments, soit mobiles.

Dans le premier cas, les quantités disponibles sont infimes et ils n'ont aucune signification sur l'environnement. Mais lorsque les conditions changent de telle manière que les métaux redeviennent solubles, l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes. En outre, depuis quelques années, les pluies acides augmentent la mobilité des métaux dans le sol et causent donc une augmentation de leur concentration dans les produits agricoles.

II.5. 3. 2 Contamination de l'eau :

Il est assez difficile de prévoir l'évolution des métaux dans l'environnement car ils peuvent subir un grand nombre de transformations (oxydation, réduction, complexations, etc.), et car cette évolution dépend fortement du milieu. En effet, la migration des métaux lourds vers la nappe phréatique est fonction de nombreux paramètres:

- la forme chimique initiale du métal,

- la perméabilité du sol et du sous-sol,
- la porosité du sol,
- le pH: dans un milieu acide, les métaux risquent de se solubiliser, alors que dans un milieu alcalin, ils peuvent former des hydroxydes métalliques,
- l'activité biologique: certains micro-organismes ont la capacité d'ingérer des métaux, alors que d'autres les solubilisent par acidogènes,
- le potentiel redox du sol,
- la composition minéralogique du sol: il peut y avoir formation de composés,
- la teneur en matières organiques du sol: (complexations des métaux par les substances humiques). Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes: les eaux usées domestiques et industrielles, la production agricole, les polluants atmosphériques, les anciennes décharges, l'utilisation de substances dangereuses pour l'eau, la navigation, etc.

II.6 .Généralités sur les barrières étanches :

Tout un chacun a une idée de ce que représente une « décharge », car toute société a toujours eu besoin, pour se débarrasser de ses déchets, d'un moyen, d'un lieu, faisant office de « dépotoir ». Les plus initiés savent que les habitudes de nos grands-pères de jeter leurs ordures, et plus généralement tous les déchets, sans précaution, dans le premier trou venu, ont bien changé au cours des dernières décennies. Durant cette période, le domaine des décharges s'est modernisé par l'application des principes de précaution et de prévention pour protéger l'environnement. Il est devenu technique, économique, et continue pourtant de faire l'objet de « passions » diverses et pour le moins controversées. Le stockage des déchets se fait 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 ». Les barrières de sécurité ou le fond d'un site de stockage doit permettre d'assurer deux fonctions essentielles et complémentaires :

- La protection du sous-sol vis à vis des infiltrations de polluants (fonction d'atténuation et de rétention), c'est-à-dire le rôle de barrière.
- L'évacuation vers l'extérieur des lixiviats, durant la période où les flux sont les plus importants, c'est-à-dire le rôle de drainage.

Le stockage des déchets s'appuie sur le principe des barrières multiples (principe retenu au niveau Européen). Une barrière dite « active » est installée à la base des déchets : il s'agit

d'un système d'étanchéité drainage, constitué typiquement d'un horizon drainant surmontant une géo membrane (figure 2-5). Cette barrière surplombe la barrière dite « passive », qui est soit constituée par le milieu géologique naturellement en place, ou alors qui peut être « rapportée » (reconstituée artificiellement).

Dès la fin du comblement d'un casier ou du site de stockage en lui-même, ce dernier est rendu plus ou moins étanche par la pose d'une barrière de couverture minérale et/ou synthétique. Cette couverture doit limiter les infiltrations d'eau à travers le massif de déchets lors de la phase de post exploitation [Bastien Bonte. (2007)].

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

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

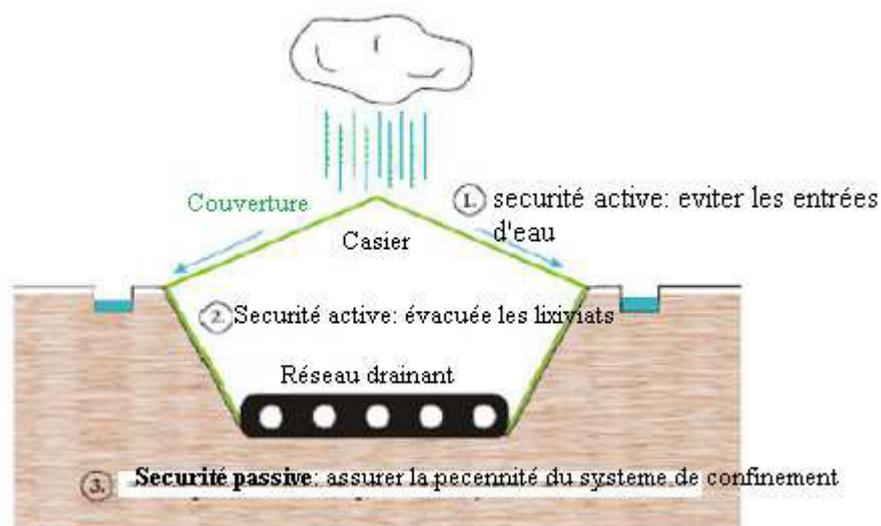


Figure 2. 5 : Principe du confinement des centres de stockage de déchets (ADEME, 1999).

II.6. 1 Barrière d'étanchéité active :

Elle est constituée successivement de haut en bas, d'un système de collecte et de drainage des lixiviats, d'un géotextile de protection et d'une géomembrane. Son rôle est de préserver la barrière d'étanchéité passive des sollicitations, mais aussi d'isoler hydrauliquement les différents casiers du centre de stockage. Enfin, elle assure la collecte et l'évacuation des lixiviats.

II.6. 2 Barrière d'étanchéité passive :

La barrière passive est destinée à garantir l'étanchéité des casiers en cas de défaillance de la barrière de sécurité active sous laquelle elle se trouve. Pour les installations de classe 2, elle est au minimum constituée de bas en haut par 5 mètres de matériaux présentant une perméabilité inférieure à 10^{-6} m/s, et 1 mètre de matériaux présentant une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s (figure 2-6).

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

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

Une autre solution consiste à renforcer ou à remplacer une partie de la barrière minérale par un géo synthétique bentonitique. Les géo synthétiques bentonitiques (GSB) sont des produits manufacturés sous forme de nappe dans laquelle une couche de bentonite est comprise entre deux lames de géotextile. La bentonite est l'élément principal des GSB puisqu'elle leur confère leur fonction essentielle, l'étanchéité, alors que les autres composants ont pour objet de donner une tenue mécanique au matériau et en constituent le squelette. Les GSB assurent leur fonction d'étanchéité uniquement après hydratation et confinement.

La bentonite est l'appellation commerciale d'une argile constituée essentiellement de montmorillonite, minéral siliceuse formée de feuillets. La bentonite sodique, grâce à la présence de son cation échangeable Na^+ , possède un très fort potentiel de gonflement en présence d'eau (18 fois son volume initial).

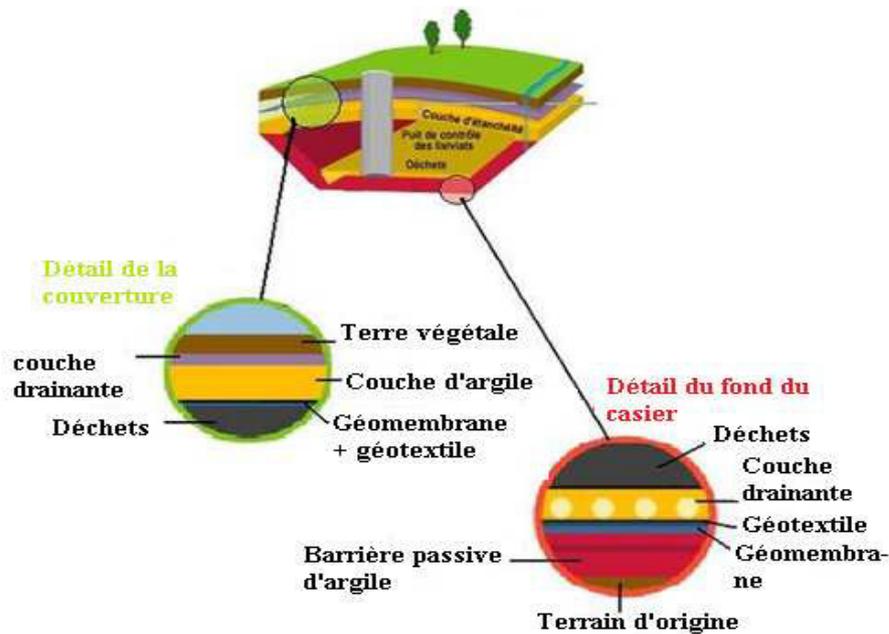


Figure 2. 6 : Détail des barrières actives de la couverture et du fond du casier.

II.7. Les différents types de barrières de confinement dans un CET :

II.7. 1 Les couches d'argile :

Les couches d'argile sont utilisées lorsque des matériaux argileux en quantité suffisante, relativement homogènes et compactables, sont disponibles à un coût raisonnable. La pérennité de ces couches est très bonne en 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 (Bouchard et coll.1995).

II.7. 2 Les membranes bentonite/géo synthétique :

Les membranes bentonite/géo synthétique sont formées d'une couche d'environ 5 kg/m² de 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 3×10^{-10} et 4×10^{-9} cm/s, avec une tendance à décroître lorsque la contrainte appliquée augmente. Il y a peu d'information concernant la

pérennité des membranes bentonite/géo synthétiques étant donné que ce sont des produits nouveaux. En ce qui concerne la bentonite, la résistance aux produits chimiques est la même que celle des couches sable bentonite décrite plus bas. Les géotextiles ou géo membranes résistent assez bien à la plupart des agents chimiques (Bouchard et coll.1995).

II.7. 3 Les géo membranes ou membranes synthétiques :

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

Cependant, la performance réelle d'une géo membrane dépend principalement des défauts de fabrication et de mise en place (joints imparfaits) ou encore de l'altération physique (perforations) ou chimique qu'elle subira au cours de sa vie utile. Les points importants à considérer lors de l'évaluation de la pérennité des géo membranes sont la résistance aux produits chimiques, la résistance à l'action bactérienne, la résistance aux rayons ultraviolets du soleil, la résistance aux intempéries et la résistance à l'enfouissement. La résistance aux produits chimiques varie selon le type de géo membrane. Il est important de tenir compte de la résistance chimique des joints. Lorsqu'elles sont soumises aux rayons ultraviolets du soleil, certaines géo membranes, comme les PVC et les polyéthylènes, subissent une dégénérescence polymérique qui affecte leurs propriétés mécaniques, en particulier leur flexibilité. De façon générale, les matériaux CSPE, HDPE et PVC conservent 80 % et plus de leur résistance après qu'ils ont été enfouis.

Dans le tableau (2.7) nous avons résumé les points faibles et les points forts de différents types d'étanchéité :

Types d'étanchéités	Points forts	Points faibles
Géomembrane bitumineuse	Facilité de mise en œuvre soudabilité	Sensibilité aux hydrocarbures
Géomembrane PVC	Facilité de mise œuvre Facilité pour réparer	Sensibilité aux hydrocarbures, aux solvants acides ou basiques : perte de plastifiants.
Géomembrane PEHD	Inertie chimique	Mise en œuvre délicate : manque de souplesse ; dilatation ; thermiques ; soudure.
Géomembrane PP	Souplesse Inertie chimique.	A l'étude
Géosynthétique bentonitique	Facilité de mise en œuvre Auto cicatrisation	Hydratation nécessaire Echanges d'ions

Tableau 2. 7 : Points forts et faibles de différents types d'étanchéité.

(Source: Techniques de l'ingénieur).

II.7. 4 les couches sable/bentonite :

Les barrières en sol qui consistent en un mélange de sable bentonite sont largement utilisées à travers le monde et également en Amérique du Nord (Edil ,2002).cette solution a été utilisé (mélange S/B) lorsque les sols en place sont trop grossiers pour être utilisés comme couche étanche et qu'il n'y a pas d'argile compactable disponible a proximité. Leurs efficacités dépend de leur comportement mécanique, de leur comportement hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination (Lo et Lijstrand, 1996 ; Bouchard et coll., 1995, Pohl et coll., 1995). Bien que les barrières en sable bentonite sont appropriées pour entraver les fuites de contaminants dans une décharge d'une manière économique,

certaines précautions doivent être prises afin d'assurer les niveaux de performances requises (Bonaparte et Gross, 1990). Rowe (2001) a résumé les considérations de base pour la sélection de la bentonite et les méthodes de désigne de ces barrières par la granulométrie du sol de base (Evans, 1991 ; Alston et al, 1997), la quantité de bentonite (Kenney et al. ,1991 ; Alston et al, 1997 ; Santucci de Magistris et al, 1998 ; Silvapullaiah et al, 2000) et la minéralogie de la bentonite (Edil et Erikson, 1994 ; Buettner, 1995). 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 spécimens de sable bentonite ont montrés 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-degel et la dessiccation.

Choix des matériaux :

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

- Leurs propriétés de gonflement qui assurent un bon contact avec la roche hôte et permettent le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient à posteriori;
- Une très faible perméabilité;
- Des propriétés d'échange et d'adsorption aptes à retenir préférentiellement certains polluants;
- Une stabilité physique du matériau lors d'un contact avec de l'eau. Canada Environment (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 la décharge 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). Les pourcentages de bentonite utilisés varient généralement entre 4 et 15 % (CCME, 1991). L'épaisseur typique pour ce genre de couche varie entre 15 et 30 cm (projets Nord Américains). 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. La figure 2.7 de Lundgren (1981) montre l'influence du pourcentage de bentonite sur la conductivité hydraulique d'un mélange sable bentonite. Lorsque le pourcentage de bentonite défini en poids est augmenté, k décroît selon une relation qui est approximativement linéaire dans un diagramme $\log k$ vs b/s , jusqu'à un palier qui correspond à la conductivité hydraulique de la bentonite.

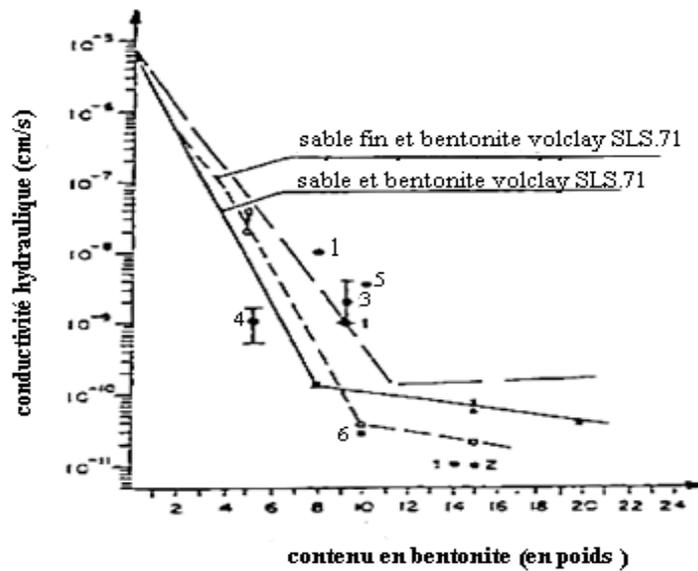


Figure 2.7 : La conductivité hydraulique d'un mélange S/B en fonction de pourcentage de bentonite -Tirée de Lundgren (1981)-

En faisant varier le pourcentage de particules fines contenues dans le sable, on peut diminuer la quantité de bentonite requise pour atteindre la conductivité hydraulique désirée (Alston et coll. 1997). Dans la pratique, l'on cherchera à obtenir le mélange le moins coûteux, qui satisfasse les conditions hydrauliques tout en n'assurant aucune perte de particules par lessivage. En général, 10⁻⁷ cm/s représentent l'ordre de grandeur de la conductivité hydraulique maximale habituellement requise pour les sites d'enfouissement, les étangs de traitement, etc.

Comportement a long terme 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.

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. 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. Certaines bentonites commerciales sont traitées pour accroître leur résistance à ces différents facteurs, mais leur comportement à long terme reste incertain. 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 (Mesn et Olson 1971, D'appolonia 1980, Anderson et coll. 1985, Wu et Khera IWO). 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 variations 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 coll. (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. Les essais au laboratoire doivent vérifier la stabilité à long terme de la couche étanche entière, ce qui inclut les couches de protection au-dessus et en dessous de la couche sable/bentonite (Alston et coll. 1997, Chapuis 1990). Selon leur composition, les couches protectrices peuvent influencer la conductivité hydraulique en créant des échanges d'ions avec la couche s/b. Dépendant de l'épaisseur de la couche du haut, celle-ci

provoque une pression de consolidation plus ou moins grande qui peut aussi influencer la conductivité hydraulique (figure2.8).

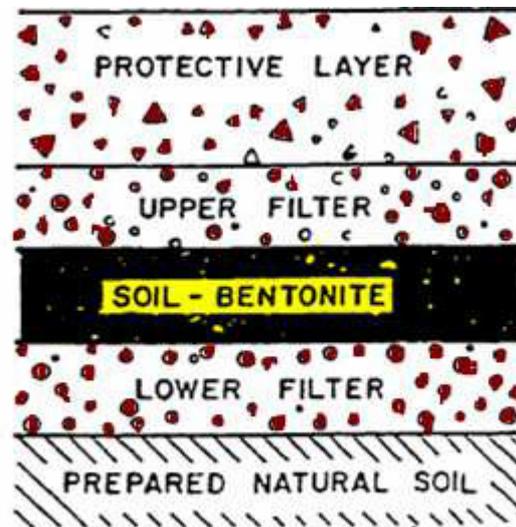


Figure 2. 8 : Section typique d'une couche sable/bentonite
Tirée de Chapuis (1990).

II.8. Les matériaux composants de l'étanchéité du fond et des parois d'un CET :

II.8. 1 Argile compacté :

En général l'étanchéité du fond et des parois d'un centre de stockage des déchets est assurée par des matériaux naturels. On utilise l'argile du site ou est implantée la décharge, afin de limiter les coûts de transports. Donc l'argile compactée est le composant important de l'étanchéité des CET. . Le substratum du site doit présenter de haut en bas une faible perméabilité .Lorsque la perméabilité naturelle du substratum n'est pas inférieure à 10^{-6} m/s, il est possible de reconstituer la barrière de sécurité passive par l'apport complémentaire d'un matériau naturel ou artificiel de substitution sur une épaisseur d'au moins 1m.Celà peut être obtenu par des techniques de remaniement de sol (figure2.9). Ce sont des traitements mécaniques (décapage, réglage, compactage...) qui peuvent être employés seuls ou conjointement à un apport de matériaux possédant des propriétés d'imperméabilité, en surépaisseur ou en tant qu'adjuvant. Une barrière doit présenter aussi une forte capacité de

rétenion. A cet égard, le meilleur matériau est une bentonite base de montmorillonite Na. Malgré des propriétés de gonflement moins performantes la bentonite-Ca est aussi assez utilisée. Elle a l'avantage d'être moins sensible concernant les attaques de cations polyvalents organiques ou inorganiques (Koch, 2002).

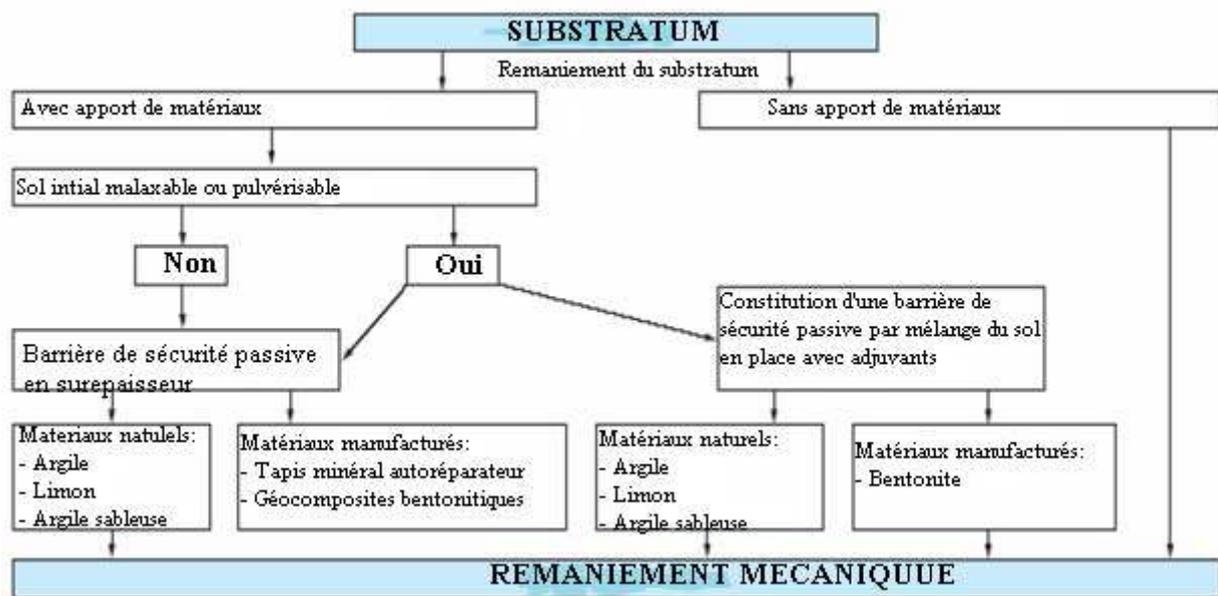


Figure 2. 9 : Différentes techniques de remaniement des sols (Kouloughli 2006).

II.8. 2 Matériaux géo composites:

A l'heure actuelle, les géo synthétiques bentonitiques (GSB) peuvent complètement remplacer les barrières d'argiles ou compléter une barrière compactée. Ils constituent la plus récente technologie utilisée dans les dispositifs d'étanchéification de fond mis en oeuvre en CET Les GSB sont des produits manufacturés en forme de nappe associant des géosynthétiques à de la bentonite, selon la définition du Comité Français des Géosynthétiques. Pratiquement ils sont constitués d'une couche mince d'argile bentonitique maintenue en sandwich entre deux couches de géotextile. Les GB existant peuvent être classés en 2 catégories. Les géotextiles bentonitiques, composée par au moins un géotextile et de la bentonite. Les géofilms bentonitiques, composés d'un film d'une couche de bentonite, et d'un géotextile. La bentonite sodique prédomine dans les GSB fabriqués aux Etats Unis, tandis que de la bentonite calcique est aussi utilisée en Europe. (Koerner et Daniel, 1995).

Chapitre II : Généralité sur les centres d'enfouissements techniques et les barrières étanches

Le GSB contiennent approximativement 5 kg/m^2 de bentonite. La bentonite est généralement conditionnée à une très faible teneur en eau (5-10 %) ou à sec. Son fort potentiel de gonflement et aussi sa grande capacité à absorber de l'eau confèrent aux GSB une conductivité hydraulique de l'ordre de $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$. Cette propriété fait que les GSB peuvent jouer le rôle de barrières hydrauliques (à un flux adventif) comparable à celui de couches d'argile compactée. Il y a une variation de la réglementation concernant les dispositifs d'étanchéité d'un pays à un autre (Kouloughli 2006).

II.8 .3 Comparaison entre les couches d'argiles compactées et les GSB :

Le tableau 2.8 présente quelques éléments de comparaison entre les GSB et les couches d'argiles compactée selon Koerner et Daniel (1993) :

Caractéristiques	GSB	Argile compactée
matériaux	Bentonite, géotextiles et géofilms	Sol présent ou mélange du sol et bentonite
épaisseur	Typiquement 7 à 10mm (hydraté)	300 à 900 mm
Coefficient de perméabilité	$< (1 \text{ à } 5) \times 10^{-11} \text{ m/s}$	$< 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
Rapidité de construction	rapide	lente
Qualité de fabrication	Fournie par le fabricant	Matériaux naturels
Qualité de construction	Procédures relativement simples	Personnel qualifié et équipements lourds
Sensibilité à la dessiccation	Pas de dessiccation si pas d'hydratation prématurée	Argile saturée, peut dessécher pendant la construction
Disponibilité des matériaux	Facilement transportable	Dépend du site
Coût d'installation	Très variable	variable
Expérience	Produits encore nouveaux	Utilisé depuis plusieurs années

Tableau 2. 8 : Différences entre les couches d'argile compactée et les GSB, d'après Koerner et Daniel (1993).

Le tableau 2.9 indique les avantages et les inconvénients de l'argile compactée par rapport aux GSB au niveau de la conception, de la construction et des caractéristiques pendant le fonctionnement (Stief, 1995 et Trauger et Stam 1993).

Chapitre II : Généralité sur les centres d'enfouissements techniques et les barrières étanches

	Argile compactée	GSB
Conception		
Volume requis	Grand	Faible
Spécifications	Spéciales, relatives au site	Données par le producteur
Coût	Variable	Prévisibles et moins élevé
Réglementation	Technique approuvée	Pas encore disponible
Tests	Eventuellement planche d'essai	Pas de tests in situ requis
Stabilité	Variable mais mieux maîtrisé	Interfaces à examiner
Construction		
Maniement	Poids des matériaux	Produits légers
Equipement	Equipement de compactage lourd	Matériel de pose léger
Personnel	Encadrement qualifié sur site	Main d'œuvre qualifiée
Homogénéité des matériaux	Difficile à établir	Facile à vérifier
Préparation des sols	Moins exigeant	Très important
Temps de réalisation	Mise œuvre lente	Installation rapide
Influence du climat	Sensible	Moins sensible
Besoin en eau	Requise	Pas nécessaire
Epaisseur	Nécessité d'une épaisseur minimale	Produits finis
Pénétration	Pas de problèmes de pénétration	Possible (poinçonnement)
Objectif qualité	Difficilement maîtrisable	Facilement atteint
Sol de protection	Mise œuvre difficile	Facilement installée avec précaution
Caractéristiques		
Infiltration	Généralement importante	Faible
Fissurations	Possibilité de fissures dues à la dessiccation	Pas de fissures si l'humidité est suffisante
Sensibilité au gel	Oui, augmentation de la perméabilité	Perméabilité moins sensible au gel
Réparation	Difficultés de réparation	Facilement réparable
Tassement	Sensible aux tassements	Moins sensible aux tassements

Tableau 2. 9 : Comparaison entre les couches d'argile compactée et les GSB, d'après Stief (1995) et Trauger et Stam (1993).

II.9 .Traitement des matériaux constituant la barrière passive :

Devant la difficulté à trouver des formations argileuses homogènes, d'extension suffisante et présentant des caractéristiques mécaniques appropriées pour y implanter des sites destinés au naturel, soit pour les matériaux rapportés.

Les traitements visent essentiellement à améliorer :

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

Pour améliorer le comportement hydraulique d'un matériau naturel, la solution de traitement la plus couramment retenue passe par l'adjonction de bentonite (Haddour, 1993 ; Didier et al, 1996). L'ajout de quelques pourcents de bentonite améliora nettement les performances hydrauliques du matériau que l'on souhaite traiter (figure 2-10). A titre d'information, le gonflement d'une bentonite sodique est de 13.8 fois alors qu'il est limité à 5 fois au maximum pour la bentonite calcique. Cette propriété tient à une capacité d'échange cationique plus élevée qui favorise les processus d'hydratation par gonflement des espaces inter foliaires.

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

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

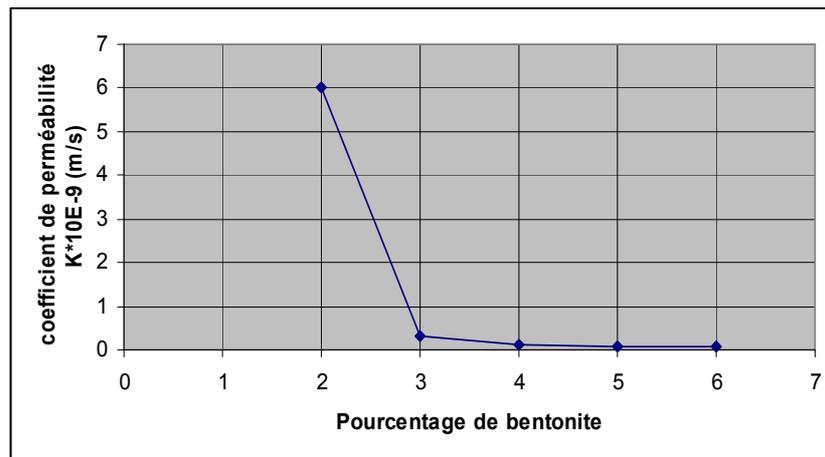


Figure 2. 10 : Relation entre la perméabilité et la teneur en bentonite (Didier et Cavalcante Rocha, 1996).

II.10. Mises en œuvre de la couche d'étanchéité en matériau naturel :

Le contexte géologique du site potentiel d'implantation d'un nouveau centre de stockage ne satisfait pas forcément aux caractéristiques géométriques et hydromécaniques exigées par la législation. Dans ce cas, deux solutions peuvent se dégager pour constituer une barrière de sécurité passive qui présente des caractéristiques hydrauliques satisfaisantes :

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

La première solution, si elle offre l'avantage d'utiliser un matériau de carrière, souvent homogène, peut se révéler très onéreuse si le gisement n'est pas localisé près du chantier.

Dans le second cas, on envisage le traitement d'un matériau étranger ou existant sur le site.

Quatre cas peuvent être distingués :

- Traitement en place du matériau du site.
- Traitement en place d'un matériau rapporté.
- Traitement en centrale du matériau du site.
- Traitement en centrale d'un matériau rapporté.

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

atteinte pour une teneur en eau supérieur à teneur en eau optimale. Normalement on recherche $W_{opt} + 2$ à 6% en fonction de la composition et de la granulométrie du sol.

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

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

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

La planche d'essai permet de fixer les conditions de mise en œuvre, notamment la teneur en eau la plus appropriée en fixant éventuellement les limites d'utilisation, mais aussi le poids volumique sec nominal à atteindre avec les engins mis à disposition. Si ceux-ci ne conviennent pas, la planche d'essai doit être reprise avec d'autres moyens.

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

Les principaux paramètres de mise en œuvre sont :

- le type de compacteur : pour la réalisation des étanchéités minérales les compacteurs à « pied de mouton » sont souvent utilisés. Ce type de compacteur permet la bonne interpénétration des couches successives. Pour les argiles, il faut des pieds de mouton de grande longueur et de faible surface de contact, car ils fragmentent les mottes molles, un compacteur lourd avec des pieds de petite longueur et de grande surface de contact peut donner de meilleurs résultats. Pour la réalisation des étanchéités en mélange sable-bentonite, l'utilisation des compacteurs lourds à rouleaux lisses ou à pieds de petite longueur est à privilégier.

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

II.11.conclusion:

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 dans le long terme. Le confinement des déchets et des fluides polluants engendrés par la percolation des eaux de pluie à travers les déchets, appelés lixiviats, est réalisé grâce à des structures d'étanchéité-drainage. Ce confinement a pour rôle de limiter le transfert de polluants vers le milieu environnant (sous-sol, nappes aquifères).

L'impact minimum sanitaire et environnemental des centres d'enfouissement repose sur l'efficacité des barrières d'étanchéité alors que de nombreux doutes persistent quant à leur durabilité. Le dispositif d'étanchéité doit former d'une barrière de sécurité passive surmontée d'un niveau de sécurité active dont la complémentarité constitue, en théorie, une technique capable d'assurer un niveau de protection maximal vis-à-vis de l'environnement. Cependant,

l'étanchéité parfaite n'est jamais atteinte et les éléments polluants peuvent s'écouler à travers le dispositif d'étanchéité composite.

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

III.1 .Introduction :

Les mélanges sable/ bentonite (S/B) sont fréquemment utilisés comme barrière de confinement dans la construction de centre de stockage de déchets solides, particulièrement 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 (Pascal Thériault, 2000). La complémentarité des propriétés des deux (02) matériaux, la bentonite et le sable, les rend très appropriés pour la réalisation des fonds étanches de ces centres. La présence du sable constitue le 'squelette' qui donne au mélange sa résistance et sa stabilité, La bentonite remplit les vides entre les particules de sable et assure ainsi au mélange sa faible conductivité. Dans ce chapitre nous présentons les principales propriétés de sable et de la bentonite utilisée dans les essais expérimentales ainsi que les propriétés de mélange sable/bentonite.

III.2. Préparation et caractérisation des matériaux:

III.2.1 Nature et origine de l'échantillon argileux (la bentonite) :

L'argile brute utilisée au cours de notre étude a été prélevée sur le site dénommé Roussel du gisement de Hammam Boughrara. Ce gisement est situé à 25 km au nord est de Maghnia et ses réserves actuelles d'argile sont estimées à 8.2 millions de tonnes. Le gisement est exploité actuellement par l'entreprise nationale des produits miniers non ferreux et des substances utiles (ENOF).

L'échantillon argileux que nous avons utilisé, est extrait du gisement se forme de blocs de diamètre supérieur à 1 cm et inférieur à 15 cm, il se présente en masse onctueuse, blanche à blanc grisâtre, friable par temps sec et bourgeonnant en gonflant par temps humide. Après traitement mécanique, l'échantillon brut, est réduit en grains de diamètre inférieur ou égale à 0.2 mm.

Le diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de bentonite montre que le minéral argileux prédominant est la montmorillonite avec la présence du quartz, de la calcite, des traces de kaolinite et d'illite (Figure 3.1). Des analyses chimiques montrent que, les principaux constituants minéralogiques sont :

La silice SiO_2 (65,2 %) et l'alumine Al_2O_3 (17,25 %). Le rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ de la bentonite de Maghnia est égale à 3,77. Les bentonites se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement ainsi que par des propriétés rhéologiques. Elles ont de ce fait de larges application, toujours plus nombreuses et dans différents domaines (kouloughli 2006).

III.2. 2 Nature et origine de sable utilisé :

Le sable est un matériau local de la région de Constantine qui rentre dans les travaux de construction. Il est fin et propre, visuellement et de façon qualitative, il possède une granulométrie uniforme, figure (3. 1).



Figure 3. 1 : Matériaux utilisés : sable et bentonite de Maghnia.

III.2. 3 Préparation du mélange :

Le mélange utilisé est une mixture de deux matériaux (sable/bentonite), le choix du pourcentage de chaque matériau se fait sur la base de plusieurs études ou l'objectif recherché est toujours d'avoir une faible conductivité hydraulique du mélange.

La conductivité hydraulique des mélanges sable bentonite est liée au gonflement de cette dernière. L'accroissement du gonflement s'accompagne d'une diminution de la conductivité hydraulique. Cependant l'utilisation d'un pourcentage de bentonite supérieur à 10% n'apporte pas une réduction significative de la conductivité hydraulique des mélanges. Par contre l'ajout de plus de 10% de bentonite provoque une diminution de la résistance au cisaillement et un plus grand gonflement des mélanges (Kouloughli, Benchikhe-Elhocine, 2005)

Pour cette raison nous avons utilisé un mélange de 10% de la bentonite et 90% du sable.

L'échantillon est saturé, préparé sous forme de pâte à une teneur en eau initiale égale à 34%, la pâte étant mise dans un sac en plastique environ (24 heures) pour une bonne maturation (figure3-2).



Figure 3. 2 : Préparation de mélange S/B.

III.2. 4 Les métaux lourds utilisés:

Dans cette étude nous avons utilisé cinq solutions chimiques une solution de cuivre (Cu^{+2}), solution de plomb (Pb^{+2}) et une solution de cadmium (Cd^{+2}) avec une concentration de 01g/l.

III.3. Présentation des essais :

- La granulométrie du sable jaune a été déterminée par l'analyse granulométrique par tamisage. Cet essai est fait suivant la norme française NF XP P-94-041, ou nous avons utilisé une masse totale sèche de 300g de sable comme échantillon soumis à l'analyse avec une série des tamis de 0.5-0.4-0.25-0.20-0.10-0.08 mm.
- La granulométrie de la bentonite a été déterminée par l'analyse granulométrique par sédimentation. L'essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins est en fonction de leur dimension. la loi de Stokes donne, dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules. les particules inférieures à 80 μm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un dé flocculant. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. la distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données. cet essai est fait suivant la norme française.

- La détermination de la densité des grains solides du mélange sable/bentonite se fait selon la norme NF P 94 -059 ou La densité de matières solides est le rapport du poids dans l'air d'un volume donné de matières solides sèches du sol au poids du même volume d'eau.
- Pour la limite de liquidité, les échantillons de mélange sable/ bentonites ont été mélangés et gardés dans des récipients étanches pour au moins 12 heures. La détermination des limites de liquidité a été conduite en accordance avec la norme française NF P 94-051.
- Le calcul de la teneur en eau du mélange se fait selon la norme française NF P 94-050.

III.4. Présentation des résultats :

III.4. 1 la granulométrie :

Deux méthodes ont été utilisées pour établir les courbes granulométriques du sable et de la bentonite pour le sable, le tamisage sec selon la norme (NF P-94-041) et la sedimentometrie pour la bentonite. Les tableaux (3. 1) et (3. 2) avec les figures (3. 3) et (3. 4) montres les résultats obtenus respectivement pour le sable et la bentonite.

III.4. 1. 1 Le sable:

Matériau : sable jaune			Masse sèche : 300g		Date d'essai :17-04-2013	
Tamis (mm)	0.50	0.40	0.25	0.20	0.10	0.08
Poids des refus partiels (g)	7.329	31.674	209.514	36.524	13.315	0.222
Poids des refus cumulés (g)	7.329	39.003	248.517	285.041	298.356	298.578
Poids des refus cumulés (%)	2.443	13.001	82.839	95.014	99.452	99.526
Compliment à 100% des refus cumulés	97.557	86.999	17.161	4.986	0.548	0.474

Tableau 3. 1 : Granulométrie du sable utilisé.

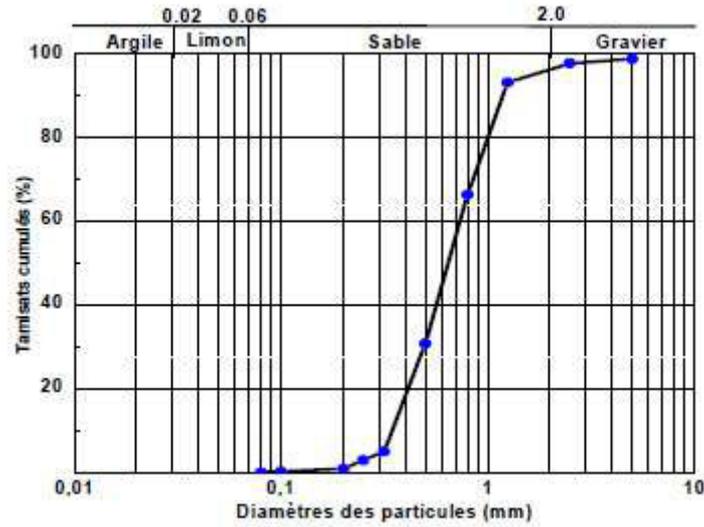


Figure 3. 3 : courbe granulométrique du sable jaune utilisé.

Le sable jaune utilisé dans cette étude est un sable local. D'après les résultats de l'analyse granulométrique, les coefficients d'uniformité et de courbure sont respectivement :

$$C_u = 1.50 \text{ et } C_c = 1.004.$$

Le sable jaune qui provient de la région de Constantine se classe parmi les sables propres mal gradués, de granulométrie moyenne. Sa courbe est uniforme et très peu étalée.

C_c : Coefficient de courbure $C_c = (D_{30})^2 / D_{60} \cdot D_{10}$

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

III.4. 1. 2 La bentonite :

Diamètre (mm)	% des tamis
0.4250	100.00
0.3000	99.99
0.2100	99.87
0.1500	99.40
0.0658	97.78
0.0630	97.73
0.0472	92.89
0.0334	92.89
0.0238	90.46
0.0168	90.46
0.0088	85.56
0.0039	80.87
0.0023	75.78
0.0013	70.89
0.0010	68.45
0.0008	66.01
0.0006	66.01
0.0005	63.56
0.0004	63.56

Tableau 3. 2 : Granulométrie de la bentonite utilisée (Fiche technique, Bental Maghnia, ENOF).

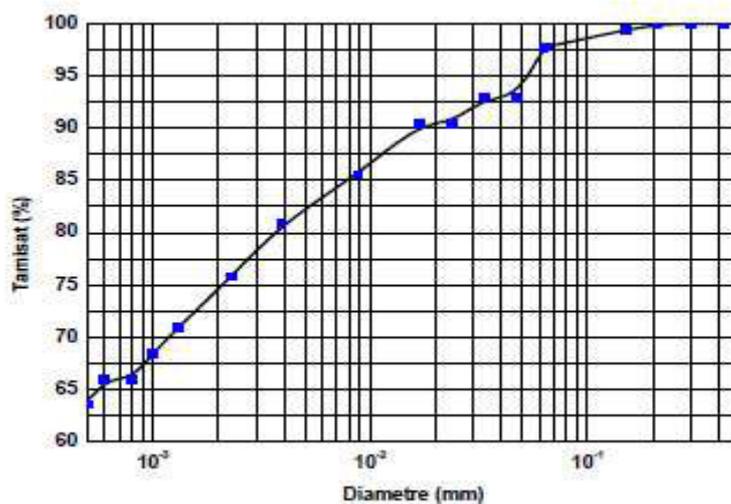


Figure 3. 4 : Granulométrie de la bentonite utilisée.

Les résultats de l'analyse granulométrique de la bentonite montrent que le taux des éléments inférieur à 2 µm (C2) est de l'ordre de 60 %. D'après les résultats des limites d'Atterberg, la bentonite de Maghnia est classée parmi les sols très argileux très plastiques avec une limite de liquidité (WL) de 141 % et un indice de plasticité (IP) de

93 % (Gueddouda et al 2007). D'après la classification de Skempton et al. (1953), basée sur l'activité ($A = IP/C2$), la bentonite de Maghnia présente un fort pourcentage en Montmorillonite calcique (Ca^{2+}).

III.4. 2 Les principales caractéristiques du mélange :

Des essais ont été effectués pour déterminer les caractéristiques Physico-mécaniques du mélange optimum 90% S + 10% B tel que la teneur en eau, le calcul de la densité, les limites d'Atterberg.

III.4. 2. 1 La teneur en eau :

Le calcul se fait selon la norme française NF P 94-050 et avec la formule suivante :

$$W = P_w / P_s$$

W : La teneur en eau

P_w : Le poids d'eau

P_s : Le poids des grains solide

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (3.3) se dessous :

Matériau : mélange sable/bentonite(S/B)	Date et heure d'essai : 06-05-2013 /08h:45min	
Numéro des tares	167	168
Poids de tare	15.025	15.504
Poids de tare+ poids de sol humide	30.181	35.220
poids de sol humide	15.156	19.716
Poids de tare+ poids de sol sec	30.013	34.985
poids de sol sec	14.988	19.481
Poids d'eau	0.168	0.235
Teneur en eau	1.120	1.200

Tableau 3. 3 : Teneur en eau du mélange sable/ bentonite utilisé.

Les poids sont exprimés en gramme et la teneur en eau moyenne $W_m = 1.16\%$.

III.4. 2. 2 La densité des grains solide :

La détermination de la densité se fait selon la norme NF P 94 -059 et avec la formule si dessus :

$$G = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_2 - P_1) - (P_3 - P_4)}$$

P_1 : le poids de pycnomètre

P_2 : le poids de pycnomètre + 200g de sable

P_3 : le poids de pycnomètre + 200g de sable + l'eau

P_4 : le poids de pycnomètre rempli avec de l'eau

Chapitre III : Caractérisation et choix des matériaux

Numéro d'échantillon	P ₁ (g)	P ₂ (g)	P ₃ (g)	P ₄ (g)	La densité Gs
1	146.7	346.6	784.3	662.2	2.569
2	154.7	355.4	798.2	675.4	2.576
3	146.8	346.7	784.9	662.0	2.596
La moyenne					2.580

Tableau 3. 4 : la densité de mélange sable/bentonite utilisée

III.4. 2. 3 Les limites d'ATTERBERG :

Le tableau (3.5) représente les résultats de 05 essais pour déterminer la limite de liquidité (WL) du mélange :

Essais	01		02		03		04		05	
Numéro de la tare	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319
Poids de tare (g)	15.491	15.516	14.781	15.130	15.138	15.538	15.113	15.245	15.050	15.460
Poids sol humide + poids de tare (g)	21.285	22.326	21.377	20.034	23.405	21.898	21.344	20.929	19.755	20.216
Poids de tare + sol sec (g)	20.309	20.555	19.575	18.818	21.591	20.532	19.936	19.669	18.643	19.092
Poids de sol sec (g)	4.818	5.039	4.976	3.688	6.453	4.994	4.823	4.424	3.593	3.632
Poids de sol humide (g)	6.404	6.810	6.596	4.904	8.267	6.360	6.231	5.684	4.705	4.756
Poids de l'eau (g)	1.586	1.771	1.620	1.216	1.814	1.366	1.408	1.260	1.112	1.124
Teneur en eau (W) %	32.92	35.14	32.57	32.97	28.11	27.35	29.19	28.48	30.95	30.95
Nombre de coups	15		18		30		34		20	
W moyenne %	34.03		32.77		27.73		28.83		30.95	

Tableau 3. 5 : Détermination de la limite de liquidité WL du mélange.

Le mélange utilisé 90% Sable + 10 % Bentonite présente une limite de liquidité de 30% à 25 coups (figure 3.5). D'après la classification de Casagrande, ce mélange apparaît comme un sol moyennement argileux peu plastique.

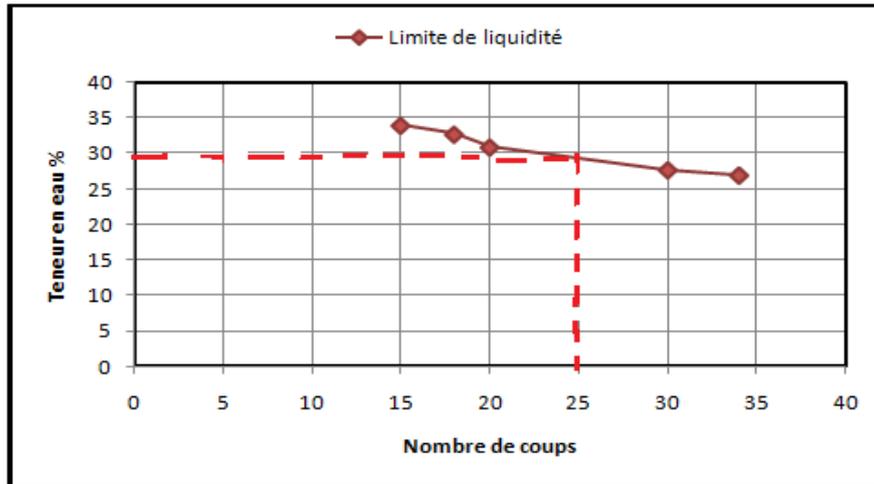


Figure 3. 5 : La limite de liquidité pour un mélange sable/bentonite.

Les propriétés physico-mécaniques de la bentonite et sable utilisé dans cette étude sont regroupées dans le tableau (3. 6) et (3. 7) respectivement :

Propriétés	Valeurs
Surface spécifique	872 m ² /g
Masse volumique (G _s)	2.72
Indice de gonflement (Free Swell Index) (résultat de l'essai de gonflement libre modifié)	35cm ³ /g
Absorption d'eau à la plaque (Plate Water Absorption)	900%
Valeur au bleu	29.41
PH	10.1
Limite de liquidité	216%
Limite de plasticité	120%
Limite de retrait	11%
Teneur en eau-à la livraison-	12%

Tableau 3. 6 : Principales propriétés de la bentonite utilisée (Koloughli, 2006).

Les propriétés	valeur
Diamètre effectif (D_{10})	0.22 mm
Facteur d'uniformité (C_u)	1.5
Facteur de courbure (C_c)	1.004
La teneur en eau (W)	0.1%

Tableau 3. 7 : Principales propriétés du sable utilisé.

III.5. conclusion :

Les expériences effectuées dans ce chapitre permettent, de déterminer les différentes propriétés du sable et de la bentonite utilisée dans le mélange pour la suite du travail. Permettre d'observer l'effet des métaux lourds (Plombe, Cuivre et Cadmium) sur la perméabilité d'un mélange sable/bentonite.

IV.1. Introduction :

La perméabilité est la propriété la plus importante d'un mélange dans le contexte de son utilisation comme barrière d'étanchéité dans une décharge. Dans le cas des centres de stockage de déchets ou des bassins de lixiviats, les argiles (bentonite dans notre cas) seront soumises au contact de solutions complexes. La composition chimique des solutions peut changer la performance et le comportement macroscopique de l'argile, les substances chimiques présentes dans le lixiviat peuvent avoir certains effets nocifs sur la perméabilité.

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet des métaux lourds sur la perméabilité d'un mélange préparé par 90 % de sable et 10 % de bentonite. Les résultats présentés sont obtenus à partir d'un essai de perméabilité.

IV.2. Effet des métaux lourds sur la perméabilité du mélange sable/bentonite :

IV.2.1 Conditions expérimentales :

Pour étudier l'effet des métaux lourds sur la perméabilité d'un mélange sable/bentonite utilisé comme barrière étanche dans un centre d'enfouissement ; on a choisi d'introduire les métaux lourds sous forme de solutions chimiques avec des concentrations de 01g/l. Trois métaux lourds ont été utilisés pour préparer les solutions expérimentales :

Le plomb (Pb^{2+}), le cuivre (Cu^{2+}) et le cadmium (Cd^{2+}). L'argile brute utilisée dans notre étude a été prélevée sur le site dénommé Roussel du gisement de Hammam Boughrara. Ce gisement est situé à 25 km au nord est de Maghnia et ses réserves actuelles d'argile sont estimées à 8.2 millions de tonnes. Le gisement est exploité actuellement par l'entreprise nationale des produits miniers non ferreux et des substances utiles (ENOF). L'échantillon argileux que nous avons utilisé, est extrait du gisement sous forme de blocs de diamètre supérieur à 1 cm et inférieur à 15 cm, il se présente en masse onctueuse, blanche à blanc grisâtre, friable par temps sec et bourgeonnant en gonflant par temps humide. Après traitement mécanique, l'échantillon brut, est réduit en grains de diamètre inférieur ou égale à 0.2 mm.

Le sable est un matériau local de la région de Constantine qui rentre dans les travaux de construction. Il est fin et propre. Visuellement et de façon qualitative, il possède une granulométrie uniforme.

Les essais de perméabilité ont été effectués avec un perméamètre à charge variable intégré dans l'appareil oedométrique (le principe de ce essai est bien détaillé dans

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

l'annexe), Le fonctionnement de l'oedomètre, et le mode opératoire de l'essai de perméabilité sont présentés également dans l'annexe. Son schéma simplifié est présenté dans la figure 4-1.

Les essais ont été réalisés sous une pression de compactage de 100, 200 et 400 KPa. L'épaisseur initiale de l'échantillon dans la cellule oedométrique est de 20 mm et après compactage d'environ 16 mm. La masse d'échantillon est d'environ 144 g. Nous rappelons que la densité des grains solides du mélange est de 2.58 et la teneur en eau d'environ de 30%. Les solutions utilisées sont toujours fraîchement préparées.

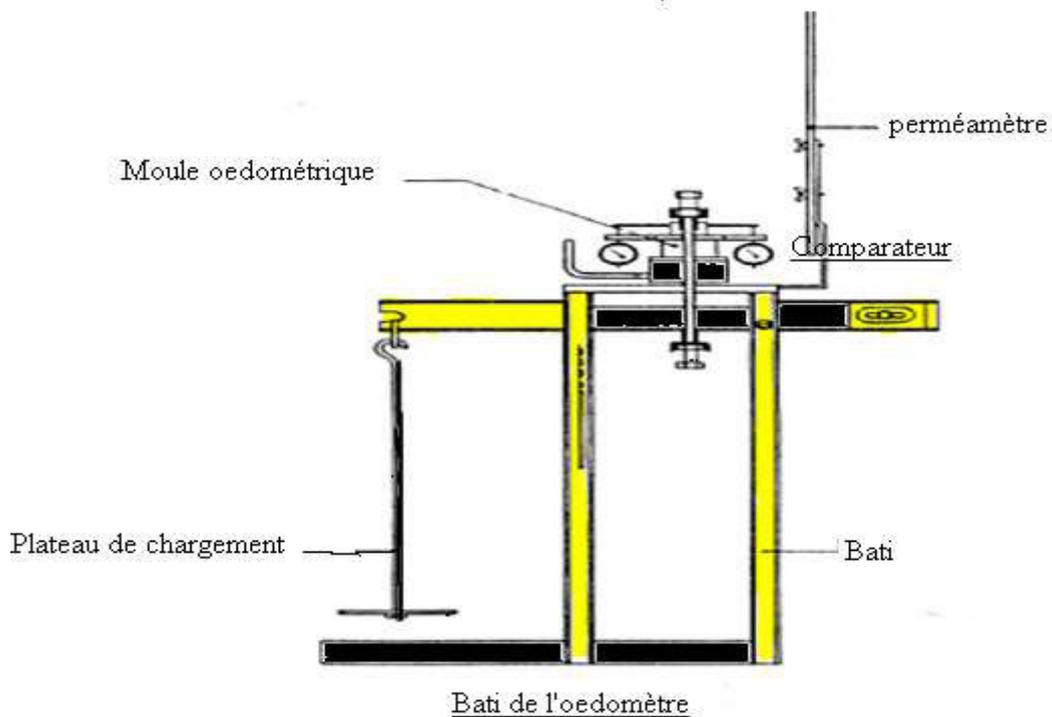


Figure 4.1 Schéma descriptif de l'appareillage utilisé dans l'essai de perméabilité.

IV.2.2 Présentation des essais :

Pour étudier l'effet des métaux lourds sur la perméabilité d'un mélange sable/bentonite un essai de perméabilité avec l'eau distillée a été fait (essai de référence) ensuite 03 essais ont été effectués pour 03 métaux lourds différents sous forme de solutions avec une concentration de 01 g/l. Le premier essai a été effectué sur un échantillon de 2cm de hauteur et 7cm de diamètre préparé par un mélange de 90% de sable et 10% de bentonite.

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

Ce dernier est placé dans un anneau cylindrique et imbibé par l'eau distillée. La procédure de chargement se fait selon une progression géométrique (Norme NF 94-090-1). La figure 4.2 illustre la préparation et le placement de l'échantillon.



Figure 4.2 : Préparation et le placement d'échantillon dans la cellule œdométrique.

Cette expérience effectuée uniquement avec de l'eau distillée a servi de référence. Pour les autres essais, le mélange a d'abord été préparé avec de l'eau distillée et l'eau de percolation dans le perméamètre a été remplacée par une solution de plomb (Pb^{+2}) pour le premier échantillon, une solution de cuivre (Cu^{+2}) pour le deuxième échantillon et enfin avec une solution de cadmium (Cd^{+2}) pour le troisième échantillon.

Rappelant que Le mélange utilisé est une mixture de deux matériaux (90% sable ; 10% bentonite), le choix du pourcentage de chaque matériau s'est fait sur la base de plusieurs études ou l'objectif recherché est toujours d'avoir une faible conductivité hydraulique du mélange. La conductivité hydraulique des mélanges sable bentonite est liée au gonflement de cette dernière. L'accroissement du gonflement s'accompagne d'une diminution de la conductivité hydraulique. Cependant l'utilisation d'un pourcentage de bentonite supérieur à 10% n'apporte pas une réduction significative de la conductivité hydraulique des mélanges. Par contre l'ajout de plus de 10% de bentonite provoque une diminution de la résistance au cisaillement et un plus grand gonflement des mélanges (Kouloughli, Benchikh-Elhocine, 2005).

IV.2.3 Présentation des résultats :

Le principe de l'essai de perméabilité consiste à créer une différence de charge entre le bas et le haut de l'échantillon qui conduit à un écoulement. Après avoir mesuré

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

l'abaissement du niveau d'eau dans le tube de section connue pour un temps déterminé, on peut déduire le débit volumique. En connaissant la section de l'échantillon, on peut donc calculer le coefficient de perméabilité avec la formule :

$$K = 2.3 \frac{s}{S} \text{Log} \frac{h_0}{h_1} \frac{H-\Delta h}{t} \dots\dots\dots \text{cm/s}$$

s : section du tube déterminé par tarage en cm².

S : section de l'éprouvette en cm².

H : épaisseur de l'éprouvette en cm.

Δh : variation de la pression en cm.

h : lecture sur la règle graduée en cm.

log : logarithme décimale.

t : temps en seconde.

k : conductivité hydraulique en cm/s.

IV.2. 3. 1 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence d'eau distillée (référence) :

Les valeurs de coefficient de perméabilité (K) du mélange sable/bentonite calculé par la formule (1) pour les différents chargements sont indiquées dans le tableau (4.1) :

Essai 01 : chargement de 100 KPa		Essai 02 : chargement de 200 KPa		Essai 03 : chargement de 400 KPa	
Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)
0.50	9.790*10 ⁻⁹	0.50	8.468*10 ⁻⁹	0.50	9.460*10 ⁻⁹
1.15	5.820*10 ⁻⁹	1.12	4.786*10 ⁻⁹	1.00	4.830*10 ⁻⁹
1.42	3.620*10 ⁻⁹	1.92	2.608*10 ⁻⁹	1.50	2.750*10 ⁻⁹
2.00	3.490*10 ⁻⁹	2.38	1.982*10 ⁻⁹	2.32	2.130*10 ⁻⁹
2.33	2.300*10 ⁻⁹	2.87	1.672*10 ⁻⁹	2.83	1.340*10 ⁻⁹
3.00	2.040*10 ⁻⁹	3.28	1.322*10 ⁻⁹	3.17	0.825*10 ⁻⁹
4.00	1.850*10 ⁻⁹	3.63	0.821*10 ⁻⁹	3.50	0.530*10 ⁻⁹
6.00	0.423*10 ⁻⁹	4.15	0.909*10 ⁻⁹	3.92	0.674*10 ⁻⁹
6.30	0.423*10 ⁻⁹	6.00	0.943*10 ⁻⁹	4.92	0.894*10 ⁻⁹
7.00	0.423*10 ⁻⁹	6.30	0.943*10 ⁻⁹	5.57	0.341*10 ⁻⁹
7.30	0.423*10 ⁻⁹	7.00	0.943*10 ⁻⁹	6.25	0.545*10 ⁻⁹
7.45	0.423*10 ⁻⁹	7.30	0.943*10 ⁻⁹	7.30	0.545*10 ⁻⁹
8.00	0.423*10 ⁻⁹	8.00	0.943*10 ⁻⁹	8.00	0.545*10 ⁻⁹

Tableau 4. 1 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

Les courbes expérimentales du coefficient de perméabilité du mélange S/B imbibé d'eau distillée sous les différents chargements sont portées sur les figures 4-3-a, 4-3-b, 4-3-c.

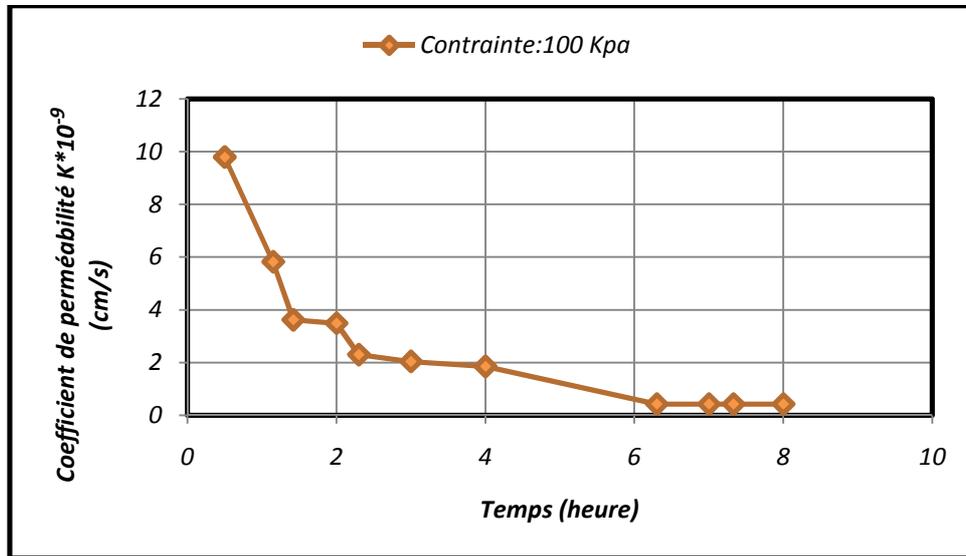


Figure 4. 3. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé d'eau distillé pour un chargement de 100 KPa.

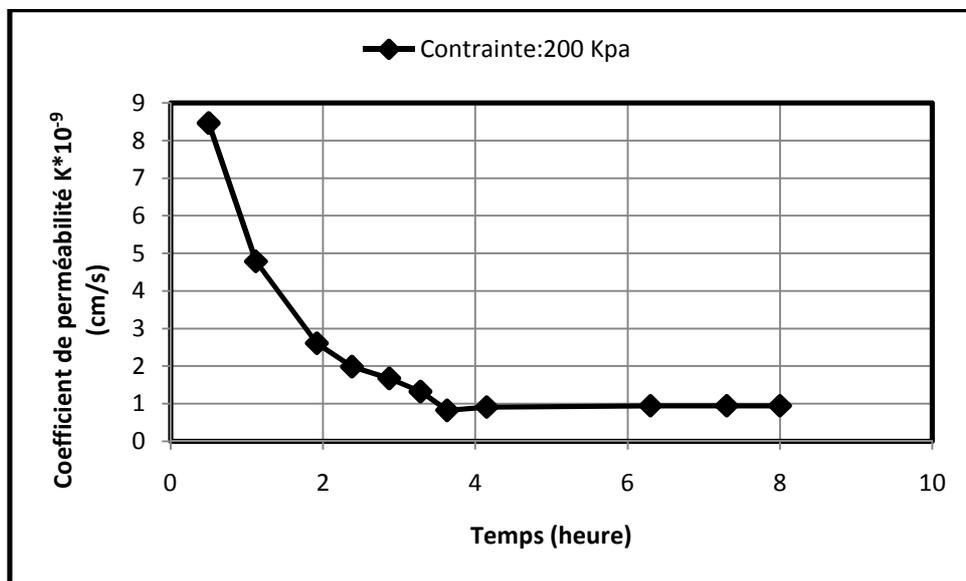


Figure 4. 3. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé d'eau distillé pour un chargement de 200 KPa.

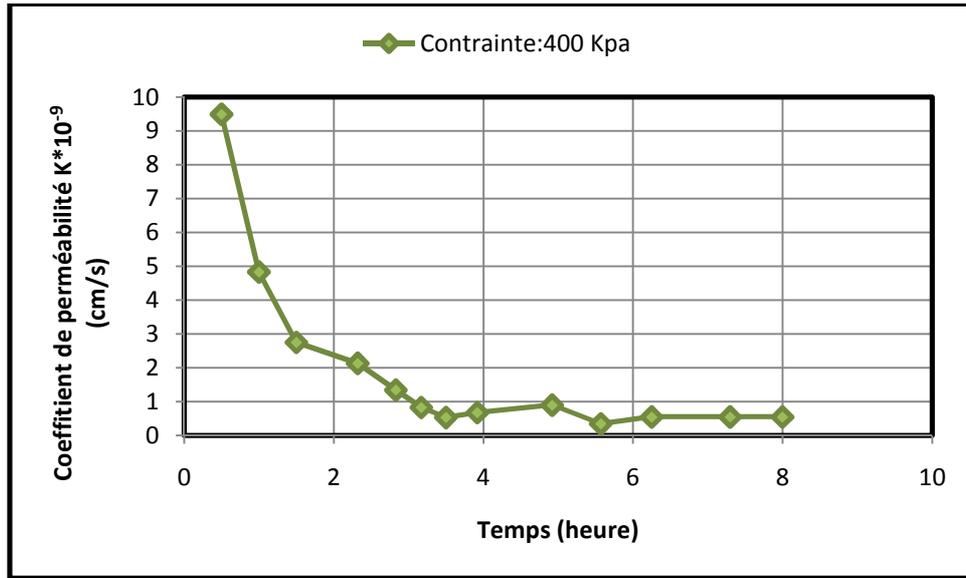


Figure 4.3. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé d'eau distillé pour un chargement de 400 KPa.

Les résultats obtenus pour les 03 chargements sont regroupés dans la figure 4.4 sous forme de courbe représentant le coefficient de perméabilité en fonction du temps pour le cas du mélange sable / bentonite imbibé par l'eau distillé.

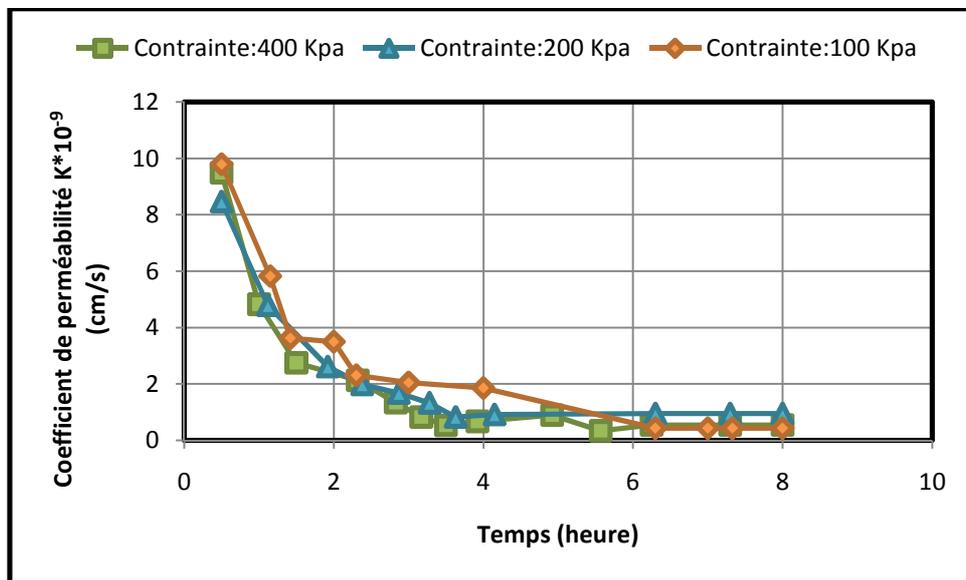


Figure 4.4 : coefficient de perméabilité K en fonction de temps pour les 03 chargements.

A partir de la figure 4.4, on observe une diminution remarquable dans la valeur du coefficient de perméabilité K sous l'effet des chargements respectifs. Cette diminution atteint un palier où elle finit par se stabiliser après environ 04 heures de chargement. Les chargements appliqués dans notre campagne d'essais semblent

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

apporter une amélioration dans la valeur du coefficient de perméabilité qui atteint pratiquement un cycle (10^{-9} à 10^{-10} cm/s). On notera que cette série d'essais a été réalisé pour servir de témoins pour le reste de la campagne d'essais avec les métaux lourds.

IV.2. 3. 2 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence du plomb :

Dans Le tableau 4-2 sont récapitulés les résultats des essais de perméabilité réalisés sur trois échantillons imbibés par une solution de plomb (Pb^{+2}) avec une concentration de 01 g/l.

Essai 01 : chargement de 100 KPa		Essai 02 : chargement de 200 KPa		Essai 03 : chargement de 400 KPa	
Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)
0.33	$11.10 \cdot 10^{-9}$	0.67	$11.1 \cdot 10^{-9}$	0.33	$11.33 \cdot 10^{-9}$
1.10	$4.25 \cdot 10^{-9}$	1.17	$5.46 \cdot 10^{-9}$	1.08	$2.74 \cdot 10^{-9}$
1.43	$2.37 \cdot 10^{-9}$	1.67	$5.34 \cdot 10^{-9}$	1.58	$1.29 \cdot 10^{-9}$
2.13	$1.94 \cdot 10^{-9}$	2.75	$1.27 \cdot 10^{-9}$	2.43	$1.26 \cdot 10^{-9}$
2.50	$1.72 \cdot 10^{-9}$	3.00	$1.17 \cdot 10^{-9}$	2.93	$1.18 \cdot 10^{-9}$
3.50	$1.20 \cdot 10^{-9}$	3.50	$1.46 \cdot 10^{-9}$	3.33	$0.64 \cdot 10^{-9}$
4.00	$1.20 \cdot 10^{-9}$	5.50	$1.42 \cdot 10^{-9}$	4.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
5.33	$1.20 \cdot 10^{-9}$	6.33	$1.42 \cdot 10^{-9}$	5.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
6.00	$1.20 \cdot 10^{-9}$	7.00	$1.42 \cdot 10^{-9}$	6.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
7.00	$1.20 \cdot 10^{-9}$	7.30	$1.42 \cdot 10^{-9}$	7.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
8.00	$1.20 \cdot 10^{-9}$	8.00	$1.42 \cdot 10^{-9}$	8.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$

Tableau 4. 2 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.

Les figures 4-5 (a, b, c) présentent les résultats obtenus pour chaque chargement ou les échantillons sont imbibés avec de plomb (Pb^{+2}).

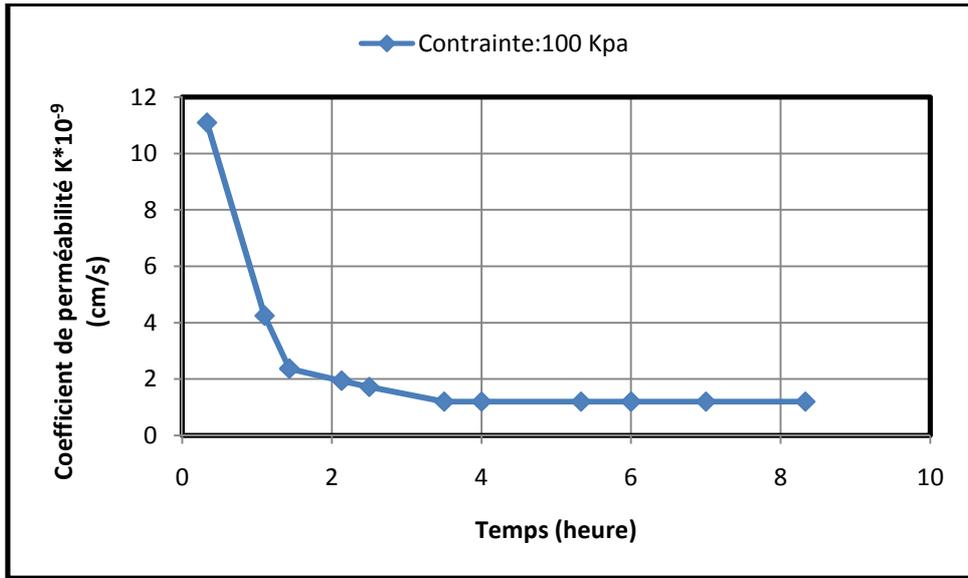


Figure 4. 5. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de plomb (Pb^{+2}) pour un chargement de 100 KPa.

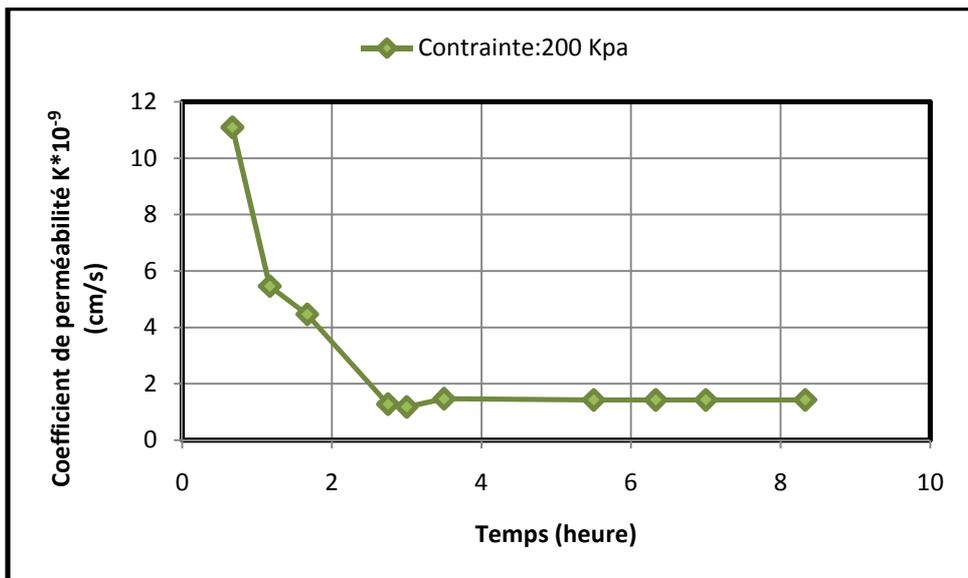


Figure 4. 5. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de plomb (Pb^{+2}) pour un chargement de 200KPa.

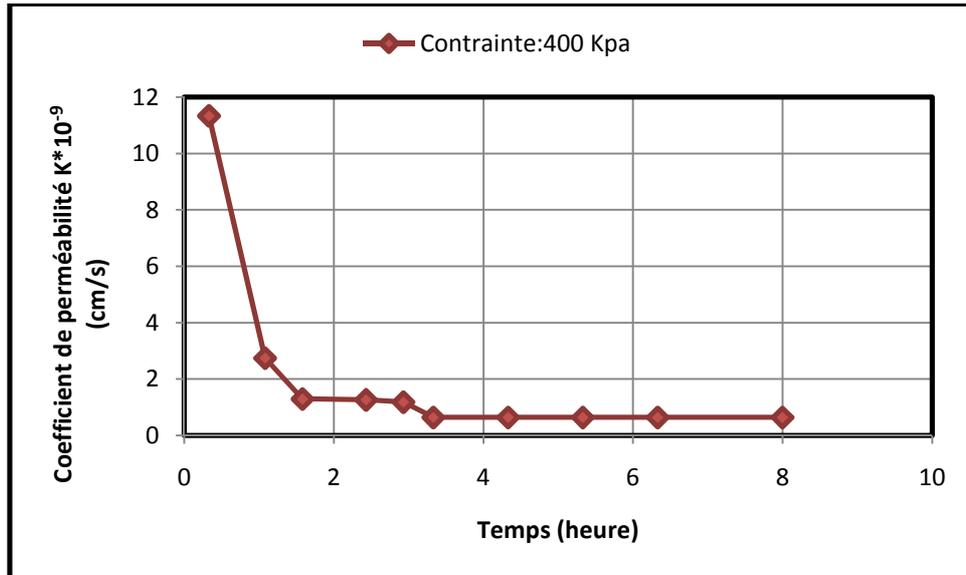


Figure 4. 5. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de plomb (Pb^{+2}) pour un chargement de 400 KPa.

La figure 4.6 représente l'ensemble des courbes, coefficient de perméabilité en fonction de temps, pour les différents mélanges(S/B) imbibé par une solution de plomb avec une concentration de 1g/l sous les différents chargements.

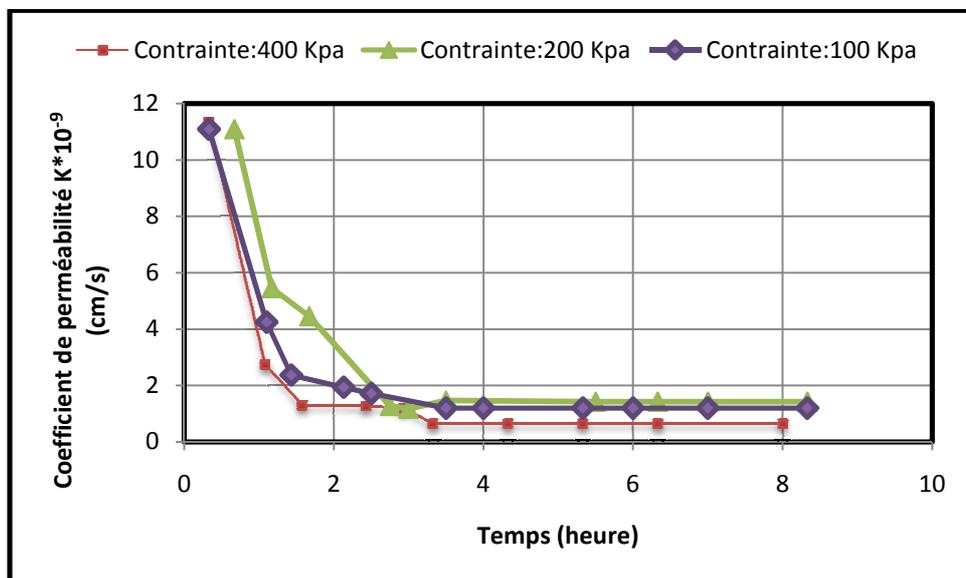


Figure 4. 6 : courbes coefficient de perméabilité « K » en fonction de temps pour les différents chargements.

Les courbes obtenues pour les essais avec du plomb comme solution polluante ne diffèrent pas beaucoup de celles obtenues pour les essais à l'eau distillée. Puisque les différents chargements ont donné la même amélioration dans la valeur de K d'une

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

part. D'autre part la solution polluante au Pb^{+2} ne semble avoir provoqué aucune altération visible sur le comportement du mélange S/B vis-à-vis de la perméabilité puisqu'on retrouve la même allure des courbes que pour les essais à l'eau distillée.

IV.2. 3. 3 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence de cadmium :

Dans Le tableau 4-3 sont récapitulés les résultats des essais de perméabilité réalisés sur trois échantillons imbibés par une solution de cadmium (Cd^{+2}) avec une concentration de 01 g/l.

Essai 01 : chargement de 100 KPa		Essai 02 : chargement de 200 KPa		Essai 03 : chargement de 400 KPa	
Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)
0.52	$8.97 \cdot 10^{-9}$	0.50	$9.76 \cdot 10^{-9}$	0.33	$10.33 \cdot 10^{-9}$
0.75	$8.42 \cdot 10^{-9}$	0.70	$3.56 \cdot 10^{-9}$	1.08	$4.74 \cdot 10^{-9}$
0.98	$6.60 \cdot 10^{-9}$	1.00	$3.37 \cdot 10^{-9}$	1.58	$3.29 \cdot 10^{-9}$
1.50	$3.37 \cdot 10^{-9}$	1.50	$3.30 \cdot 10^{-9}$	2.43	$2.26 \cdot 10^{-9}$
1.83	$3.53 \cdot 10^{-9}$	2.00	$2.53 \cdot 10^{-9}$	2.93	$1.18 \cdot 10^{-9}$
2.00	$2.60 \cdot 10^{-9}$	2.25	$2.40 \cdot 10^{-9}$	3.33	$1.16 \cdot 10^{-9}$
2.25	$2.50 \cdot 10^{-9}$	2.75	$2.42 \cdot 10^{-9}$	4.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
2.50	$2.82 \cdot 10^{-9}$	3.00	$2.40 \cdot 10^{-9}$	5.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
2.75	$2.71 \cdot 10^{-9}$	4.25	$2.30 \cdot 10^{-9}$	6.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
3.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	5.00	$2.02 \cdot 10^{-9}$	7.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
3.25	$1.82 \cdot 10^{-9}$	5.25	$2.02 \cdot 10^{-9}$	8.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
3.50	$1.82 \cdot 10^{-9}$	6.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	9.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
4.00	$1.82 \cdot 10^{-9}$	6.25	$1.92 \cdot 10^{-9}$	10.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
6.00	$1.82 \cdot 10^{-9}$	7.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	11.30	$0.63 \cdot 10^{-9}$
8.00	$1.82 \cdot 10^{-9}$	8.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	11.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$

Tableau 4. 3 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.

Les figures 4-7 (a, b, c) présentent les résultats obtenus pour chaque chargement ou les échantillons sont imbibés avec une solution contaminante (cadmium).

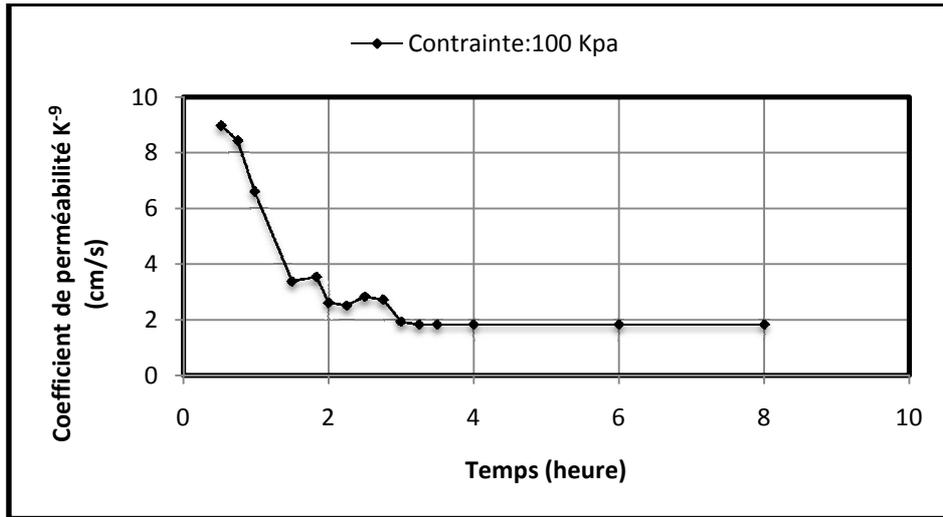


Figure 4. 7. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cd^{+2}) pour un chargement de 100 KPa.

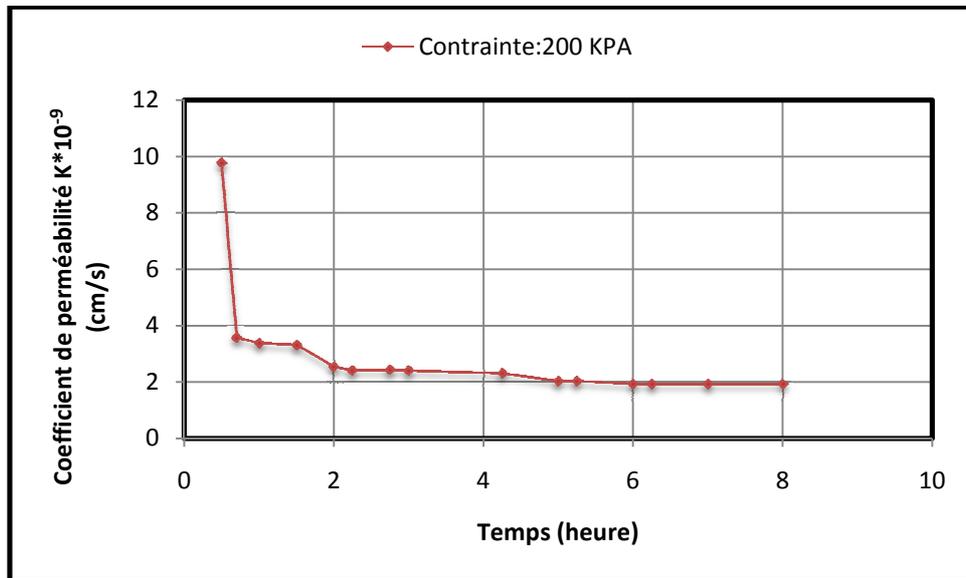


Figure 4. 7. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cd^{+2}) pour un chargement de 200 KPa.

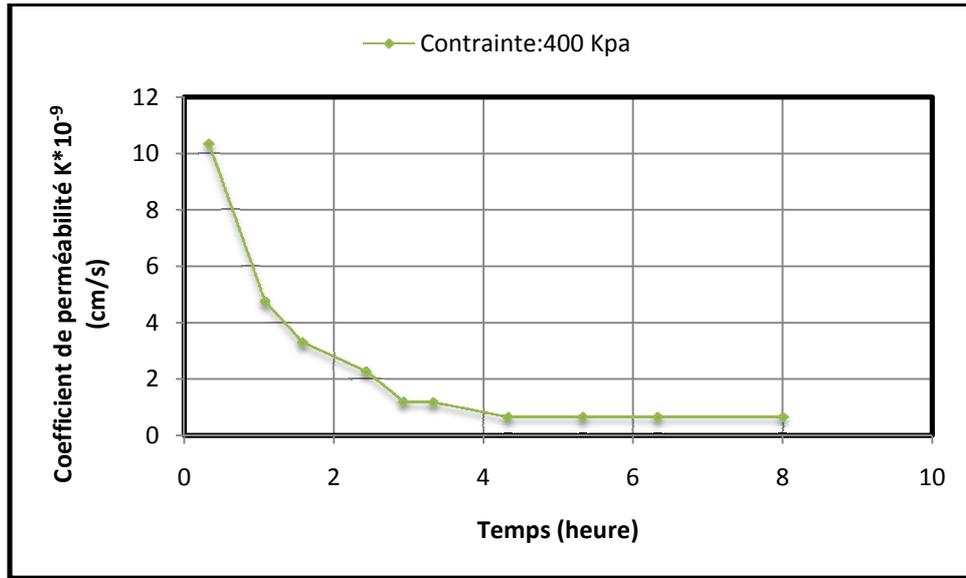


Figure 4. 7. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cd^{+2}) pour un chargement de 400 KPa.

La figure 4-8 représente l'ensemble des courbes, coefficient de perméabilité en fonction de temps, pour les différents mélanges(S/B) imbibé par une solution de cadmium avec une concentration de 1g/l sous les différents chargements.

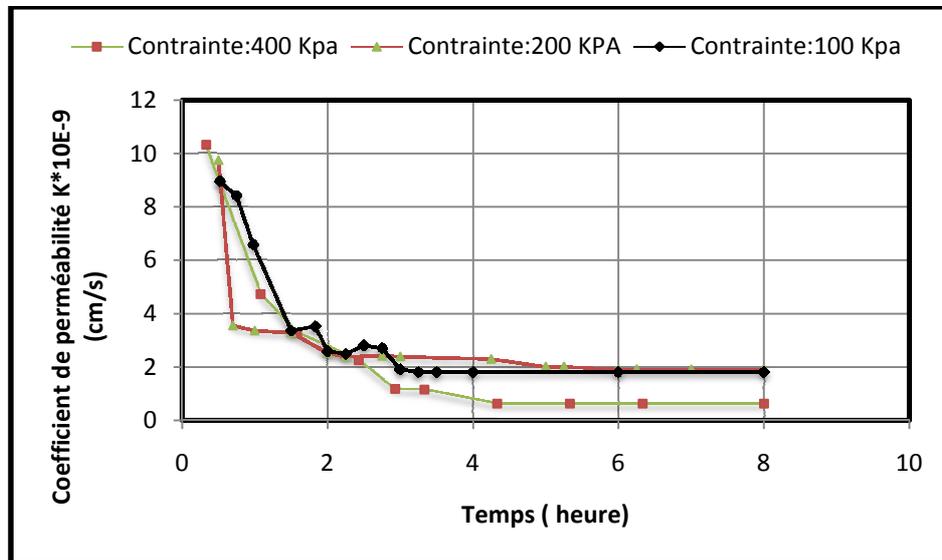


Figure 4. 8 : courbes coefficient de perméabilité « K » en fonction de temps pour 03 chargements.

Les essais de perméabilité sur le mélange S/B sous 03 chargements avec une solution polluante au cadmium (Cd^{+2}) présentent et suivent le même comportement dans l'ensemble que ceux pour l'eau distillée .La pollution ne semble donc pas introduire un changement visible sur le coefficient de perméabilité (K).

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

IV.2. 3. 4 Perméabilité d'un mélange sable/bentonite en présence de cuivre :

Dans Le tableau 4-4 sont récapitulés les résultats des essais de perméabilité réalisés sur trois échantillons imbibés par une solution de plomb (Cu^{+2}) avec une concentration de 01 g/l.

Essai 01 : chargement de 100 KPa		Essai 02 : chargement de 200 KPa		Essai 03 : chargement de 400 KPa	
Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Temps (heure)	Coefficient de perméabilité (cm/s)
0.52	$8.97 \cdot 10^{-9}$	0.50	$9.76 \cdot 10^{-9}$	0.33	$10.33 \cdot 10^{-9}$
0.75	$8.42 \cdot 10^{-9}$	0.70	$3.56 \cdot 10^{-9}$	1.08	$4.74 \cdot 10^{-9}$
0.98	$6.60 \cdot 10^{-9}$	1.00	$3.37 \cdot 10^{-9}$	1.58	$3.29 \cdot 10^{-9}$
1.50	$3.37 \cdot 10^{-9}$	1.50	$3.30 \cdot 10^{-9}$	2.43	$2.26 \cdot 10^{-9}$
1.83	$3.53 \cdot 10^{-9}$	2.00	$2.53 \cdot 10^{-9}$	2.93	$1.18 \cdot 10^{-9}$
2.00	$2.60 \cdot 10^{-9}$	2.25	$2.40 \cdot 10^{-9}$	3.33	$1.16 \cdot 10^{-9}$
2.25	$2.50 \cdot 10^{-9}$	2.75	$2.42 \cdot 10^{-9}$	4.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
2.50	$2.82 \cdot 10^{-9}$	3.00	$2.40 \cdot 10^{-9}$	5.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
2.75	$2.71 \cdot 10^{-9}$	4.25	$2.30 \cdot 10^{-9}$	6.33	$0.63 \cdot 10^{-9}$
3.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	5.00	$2.02 \cdot 10^{-9}$	7.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
3.25	$1.82 \cdot 10^{-9}$	5.25	$2.02 \cdot 10^{-9}$	8.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
3.50	$1.82 \cdot 10^{-9}$	6.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	8.30	$0.63 \cdot 10^{-9}$
4.00	$1.82 \cdot 10^{-9}$	6.25	$1.92 \cdot 10^{-9}$	9.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$
6.00	$1.82 \cdot 10^{-9}$	7.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	9.30	$0.63 \cdot 10^{-9}$
8.00	$1.82 \cdot 10^{-9}$	8.00	$1.92 \cdot 10^{-9}$	10.00	$0.63 \cdot 10^{-9}$

Tableau 4. 4 : Variation du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps pour 03 chargements.

Les figures 4-9 (a, b, c) présentent les résultats obtenus pour chaque chargement ou les échantillons sont imbibés avec une solution contaminée par un métal lourd le cuivre. Cu^{+2} .

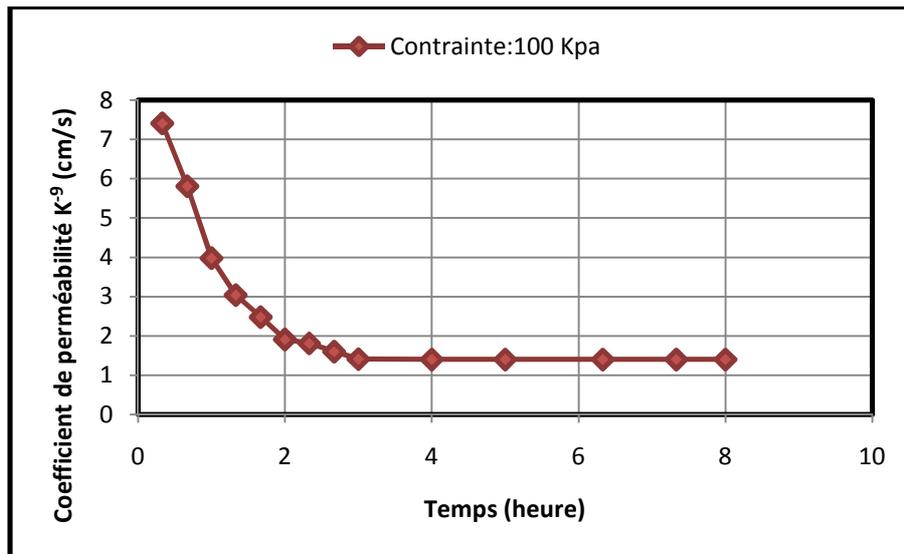


Figure 4.9. a : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cu^{+2}) pour un chargement de 100 KPa.

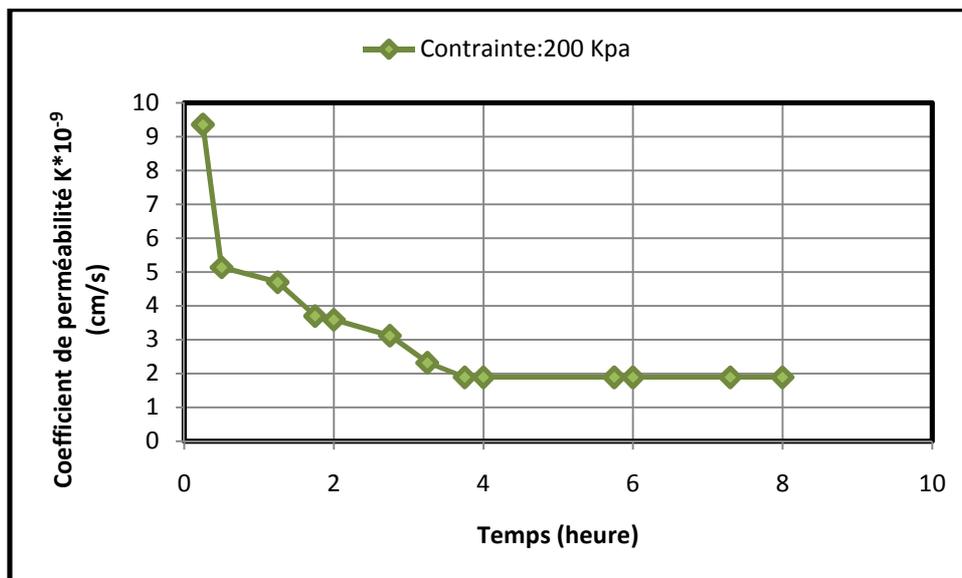


Figure 4.9. b : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cu^{+2}) pour un chargement de 200 KPa.

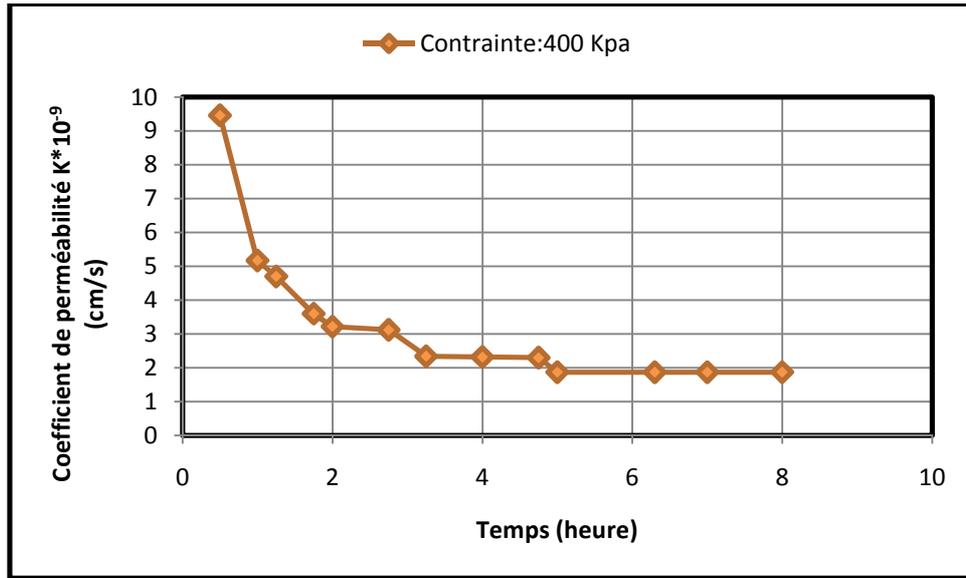


Figure 4.9. c : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur un mélange sable/ bentonite imbibé par une solution de cadmium (Cu^{+2}) pour un chargement de 400 KPa.

La figure 4-10 représente l'ensemble des courbes, coefficient de perméabilité en fonction de temps, pour les différents mélanges(S/B) imbibé par une solution de cuivre avec une concentration de 1g/l sous les différents chargements.

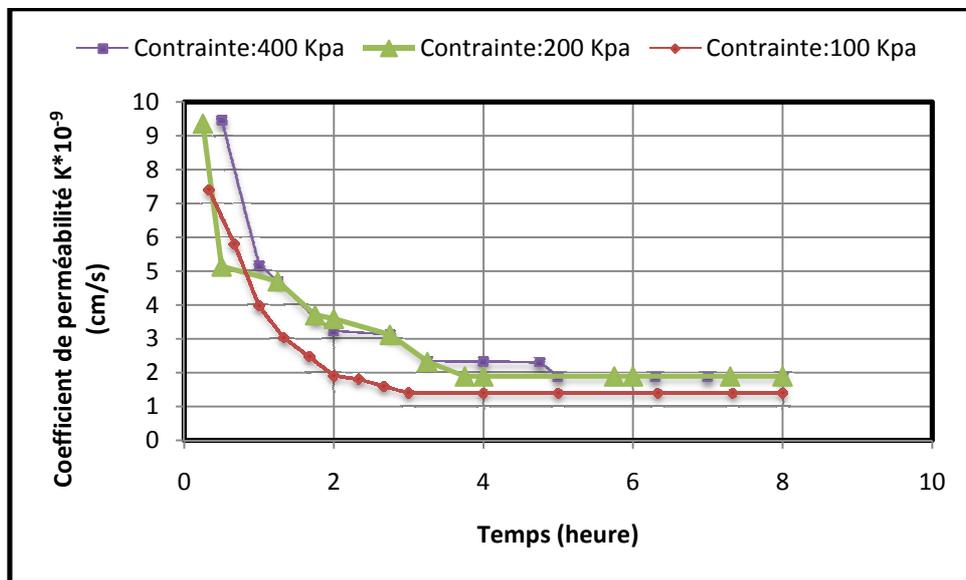


Figure 4. 10 : courbes coefficient de perméabilité « K » en fonction de temps pour les 03 chargements.

Les essais de perméabilité avec une solution polluante de cuivre (Cu^{+2}) sur les mélanges sable/bentonite ont suivis le même comportement que celui des essais témoins à l'eau distillé. Ce comportement a montré une diminution importante du

coefficient K sous l'effet du chargement et aucune altération dans la valeur de coefficient en présence des ions de cuivre dans la solution.

IV.2.4 L'effet de l'ensemble des métaux lourds utilisés sur la perméabilité d'un mélange sable/bentonite sous les trois chargements:

La figure 4.11 (a, b, c) présente l'ensemble des courbes de coefficient de perméabilité (K) en fonction de temps pour les différents mélanges (S/B). Un de ces mélanges est imbibé par l'eau distillée (essai de référence) et les l'autres sont imbibé par des solutions contaminant des métaux lourds (Cu^{+2} , Cd^{+2} , Pb^{+2}). Ces courbes résument les résultats obtenus par un essai de perméabilité sous 03 chargements (100, 200 et 400 KPa).

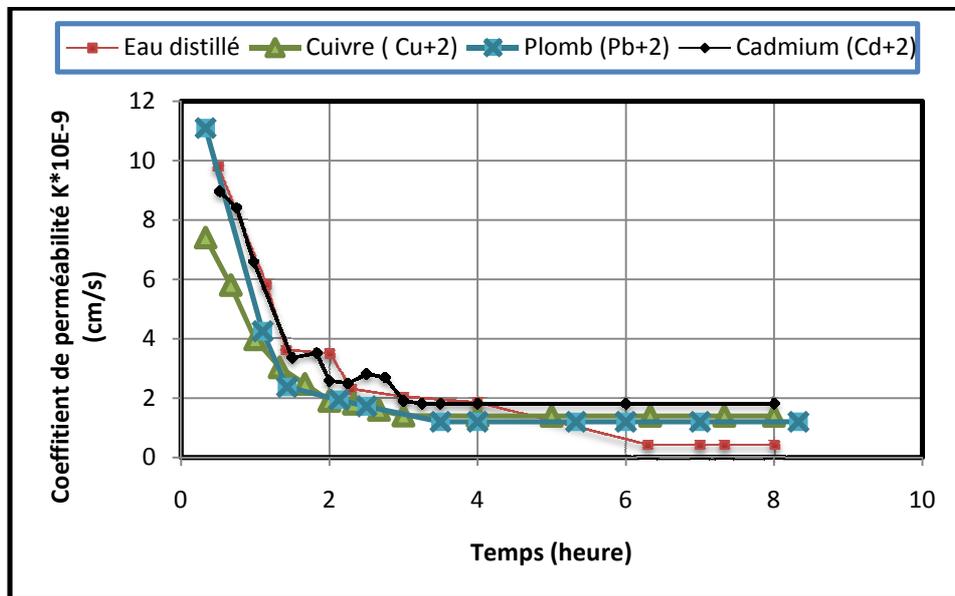


Figure 4.11-a : courbes coefficient de perméabilité en fonction de temps pour les différents polluants pour un chargement de 100 KPa

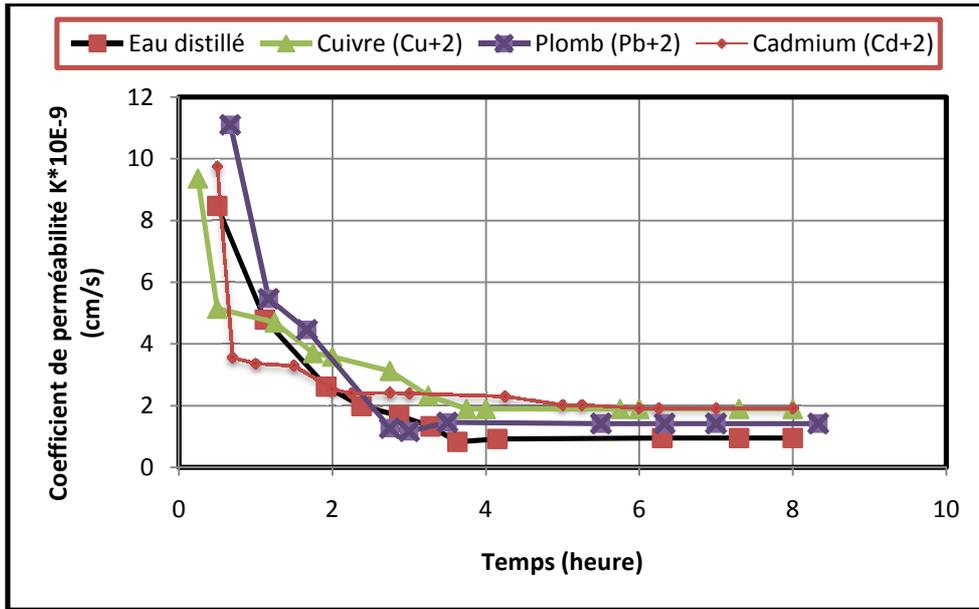


Figure 4. 11-b : courbes coefficient de perméabilité en fonction de temps pour les différents polluants pour un chargement de 200 KPa.

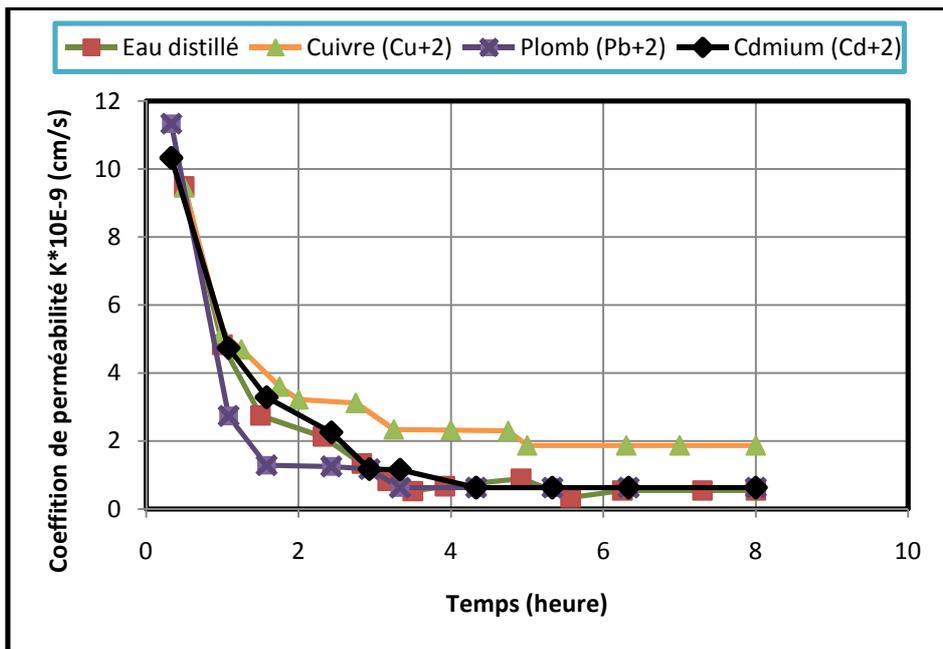


Figure 4. 11-c : courbes coefficient de perméabilité en fonction de temps pour les différents polluants pour un chargement de 400 KPa

Les courbes des 03 figures montrés ci-dessus représentent une synthèse de tous les essais de perméabilité effectués sous 03 chargements d'une part et dans 03 solutions polluantes d'autre part. Les résultats visibles à partir de la lecture de ces graphes montrent la bonne tenue du mélange S/B lorsqu'il est en présence de solutions

Chapitre IV: Détermination du coefficient de perméabilité (K) au perméamètre

porteuses de polluants telles que celles qu'on retrouve dans les lixiviats issus des déchets solides d'un CET .On constate également que sous les chargements consécutifs le comportement vis-à-vis de l'infiltration en générale du lixiviats se trouve amélioré après un laps de temps très court (environ 04 heures).

IV.3. Conclusion :

Les résultats rapportés dans se chapitre sont :

- Une diminution remarquable dans la valeur de K (coefficient de perméabilité) sous l'effet de chargement ou les chargements appliqués dans notre compagne d'essai semblent apporter une amélioration dans la valeur de K qui attient pratiquement un cycle de 10^{-9} et 10^{-10} cm/s pour les essais à l'eau distillé.
- Les solutions polluantes avec plombe, cuivre et cadmium ne semblent avoir provoqué aucune altération visible sur le comportement du mélange S/B vis-à-vis de la perméabilité puisqu'on retrouve la même allure des courbes que pour les essais à l'eau distillé.

Donc les résultats obtenus à partir de l'ensemble des essais de perméabilité effectués présentent la bonne tenue du mélange sable/bentonite l'orsqu'il est en présence de solutions porteuses de polluants telle que qu'on retrouve dans les lixiviats issus des déchets solide d'un CET.

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

V.1. Introduction :

Nous avons étudié l'effet des métaux lourds sur la perméabilité d'un mélange préparé de 90 % de sable et 10 % de bentonite. Les résultats présentés sont obtenus à partir d'un essai de compressibilité à l'oedomètre sur un mélange sable/bentonite, avec chargement par paliers.

V.2. Présentation des essais :

Pour étudier l'effet des métaux lourds sur la perméabilité d'un mélange sable/bentonite un essai de compressibilité avec l'eau distillée a été fait (essai de référence) et 03 essais ont été effectués pour 03 métaux lourds différents (plomb, cuivre, cadmium) sous forme de solutions avec une concentration de 01 g/l.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placé dans une enceinte cylindrique rigide de 5cm de diamètre et 2cm de hauteur (Oedomètre).

Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial, l'éprouvette étant drainé en haut et en bas et maintenu saturée pendant l'essai (figure 5.1).



Figure 5.1 : Dispositif d'essai

L'effort vertical maximum est de 1.6kn (obtenu avec 16kg de poids sur le levier) ce qui conduit à une contrainte verticale maximale de 800kPa pour un échantillon de 19.63 cm² de surface.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissant.

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

Les charges appliquées sont données dans le tableau (5.1) :

Les contraintes en kg/cm^2	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Les charges en kg	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00

Tableau 5.1 : les charges utilisées dans l'essai de compressibilité.

V.3. Présentation des résultats :

Dans cette partie nous avons utilisé un essai de compressibilité (essai oedométrique) a charge variable, pour calculer le coefficient de consolidation « Cv » avant de calculer le coefficient de perméabilité « K ».

Le calcul de Cv se fait selon une méthode graphique qui est la méthode de Casagrande (la norme NF, P94-090-1).

V.3. 1 La méthode de Casagrande :

V.3. 1. 1 La construction graphique :

- Pour un palier de chargement donne, le tassement conventionnel Sc est obtenu en déduisant du tassement obtenu à 0.1 min, la différence des tassements entre 0.4 min et 0.1 min.
- On trace sur la courbe (courbe de variation de hauteur de l'éprouvette en fonction du logarithme du temps)
- On lire sur le graphe le temps t50 nécessaire pour obtenir 50% de consolidation, c'est-à-dire pour un tassement :

$$S_{50} = 0.5 (S_c + S_{100})$$

Sc : Tassement conventionnel

S₁₀₀: Tassement pour un degré de consolidation de 100 %

V.3. 1. 2 Calcul du coefficient de consolidation Cv :

Le coefficient de consolidation d'une éprouvette saturée est déterminé pour un degré de consolidation de 50 % à partir de la formule suivante :

$$C_v = T_v \times h^2 / t$$

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Avec :

$$T_v = 0.197$$

$$T = t_{50}$$

h : est la distance de drainage égale à la demi épaisseur de l'éprouvette au moment où $t = t_{50}$, lorsque le drainage se produit par les deux faces.

V.3. 2 Calcul de Coefficient de perméabilité d'un mélange sable/bentonite:

Une méthode indirecte a été utilisée pour déterminer le coefficient de conductivité hydraulique (K). Cette méthode a été basée sur les résultats d'un essai oedométrique. Dans cette méthode les coefficients de variation de volume m_v (cm²/kg) et les coefficients de consolidation c_v (cm²/s) sont déduits à partir des courbes de compressibilités et de consolidation respectivement. Ces derniers ont été utilisés pour déterminer K.

Un échantillon de 50 mm de diamètre et 20 mm d'hauteur est placé dans un anneau cylindrique et saturé pendant 24 heures. La procédure de chargement se fait selon une progression géométrique.

Le coefficient de perméabilité k (cm /s) a été déterminé par la formule suivante :

$$K = C_v m_v \gamma_w$$

γ_w : Poids de l'eau (10 KN /m³).

V.3. 2. 1 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence d'eau distillée :

Les valeurs de coefficient de perméabilité (K) du mélange sable/bentonite imbibé d'eau distillée, calculé à l'aide de la méthode de Casagrande pour les différents chargements sont indiquées dans le tableau 5.2 :

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Δh (mm)	1.515	1.860	2.745	3.390	3.930	4.380
e	0.839	0.805	0.716	0.653	0.599	0.554
m_v (cm ² /kg)	0.315	0.07	0.101	0.037	0.016	7.14×10^{-3}
C_v (cm ² /s)	2.92×10^{-7}	4.74×10^{-6}	1.10×10^{-7}	1.47×10^{-6}	5.79×10^{-7}	5.79×10^{-7}
K(cm/s)	8.57×10^{-11}	3.32×10^{-11}	1.10×10^{-11}	5.45×10^{-11}	9.27×10^{-12}	4.13×10^{-12}

Tableau 5. 2 : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par l'eau distillé.

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

La figure 5-2 présente l'évolution du coefficient de perméabilité d'un mélange S/B imbibé par l'eau distillée en fonction des contraintes appliquées.

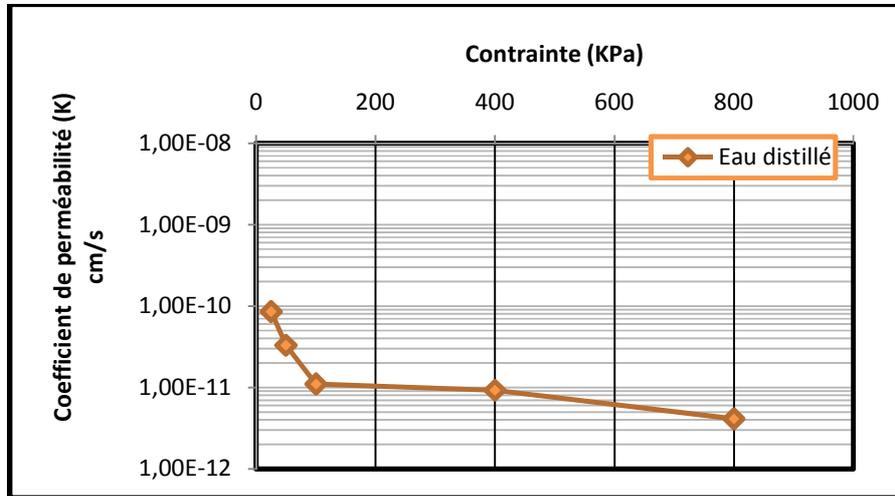


Figure 5.2 : Coefficient de perméabilité (K) en fonction des contraintes pour un mélange S/B imbibé par eau distillée.

La courbe montre une diminution du coefficient de perméabilité (K) avec l'augmentation du chargement. Cette diminution est relativement importante sur l'échelle de ce coefficient

V.3. 2. 2 Perméabilité du mélange sable/bentonite en présence des solutions polluantes:

Dans le tableau 5.3 (a, b, c) sont récapitulées les valeurs de coefficient de perméabilité (K) du mélange sable/bentonite imbibé par une solution de plomb, de cuivre et de cadmium, calculé à l'aide de la méthode de Casagrande pour les différents chargements :

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Δh (mm)	1.300	1.970	2.750	3.310	3.800	4.250
m _v (cm ² /kg)	0.208	0.145	0.09	0.032	0.015	7.09x10 ⁻³
C _v (cm ² /s)	3.84x10 ⁻⁷	3.74x10 ⁻⁶	2.57x10 ⁻⁷	3.58x10 ⁻⁶	4.37x10 ⁻⁷	5.78x10 ⁻⁵
K(cm/s)	7.99x10 ⁻¹¹	5.42 x10 ⁻¹¹	2.31 x10 ⁻¹¹	1.15x10 ⁻¹¹	6.56x10 ⁻¹²	4.09x10 ⁻¹²

Tableau 5.3. a : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par une solution de plomb.

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00
Δh (mm)	1.11	1.40	1.77	2.70	3.62
m _v (cm ² /kg)	0.227	0.062	0.040	0.052	0.027
C _v (cm ² /s)	1.58x10 ⁻⁷	9.86x10 ⁻⁸	4.74x10 ⁻⁷	1.11x10 ⁻⁶	1.16x10 ⁻⁷
K(cm/s)	3.59x10 ⁻¹¹	6.11 x10 ⁻¹²	1.90 x10 ⁻¹¹	5.77x10 ⁻¹²	3.13x10 ⁻¹²

Tableau 5. 3. b : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par une solution de cuivre.

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Δh (mm)	1.59	2.03	3.50	4.20	4.62	5.08
m _v (cm ² /kg)	0.33	0.048	0.172	0.049	0.013	7.70x10 ⁻³
C _v (cm ² /s)	2.47x10 ⁻⁷	6.35x10 ⁻⁷	5.25x10 ⁻⁷	2.52x10 ⁻⁷	2.12x10 ⁻⁶	3.16x10 ⁻⁷
K(cm/s)	8.15x10 ⁻¹¹	3.04 x10 ⁻¹¹	9.03 x10 ⁻¹⁰	1.23x10 ⁻¹¹	2.75x10 ⁻¹²	2.43x10 ⁻¹²

Tableau 5. 3. c : Coefficient de perméabilité (K) pour un échantillon imbibé par une solution de cadmium

La figure 5-3(a, b, c) présentent l'évolution de coefficient de perméabilité de 03 mélanges S/B imbibé par des solutions contaminant des métaux lourds : plomb (Pb⁺²), cuivre (Cu⁺²) et cadmium (Cd⁺²) respectivement avec une concentration de 01g/l, en fonction des contraintes appliquées.

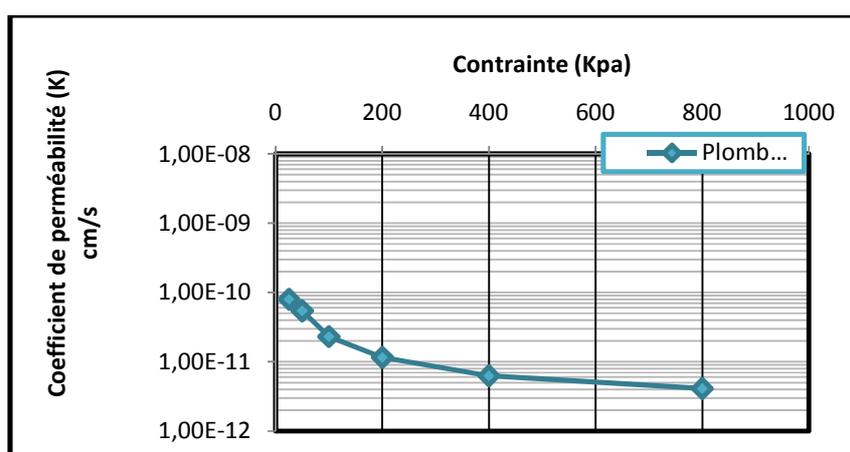


Figure 5. 3. a : Evolution de (K) en fonction des contraintes appliquées pour un mélange S/B imbibé par une solution de plomb (Pb⁺²).

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

L'évolution du coefficient de perméabilité (K) dans une solution polluante en plomb (Pb^{+2}) est semblable à celle de (K) dans la solution de référence (eau distillé).

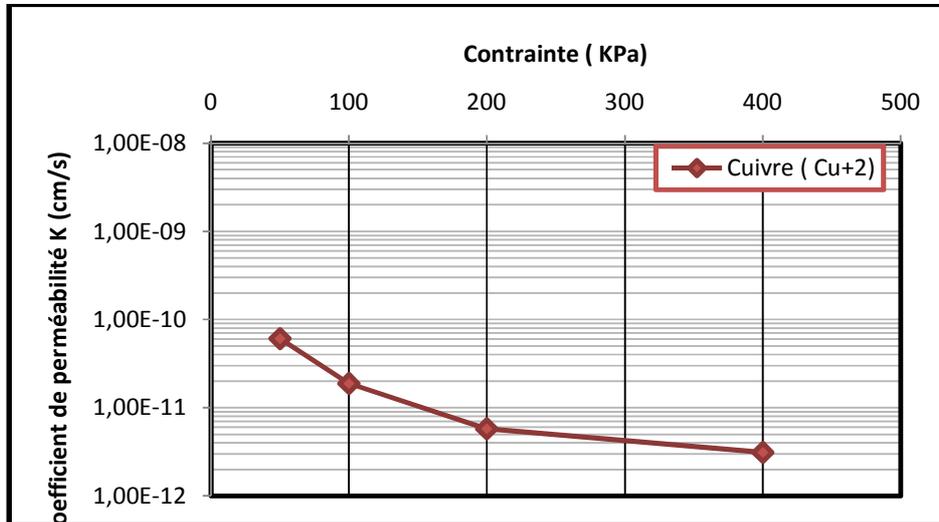


Figure 5. 3. b : Evolution de (K) en fonction des contraintes appliquées pour un mélange S/B imbibé par une solution de cuivre (Cu^{+2}).

La variation du coefficient de perméabilités (k) dans la solution en cuivre montre le même comportement que des la solution de référence, c'est-à dire une diminution importante.

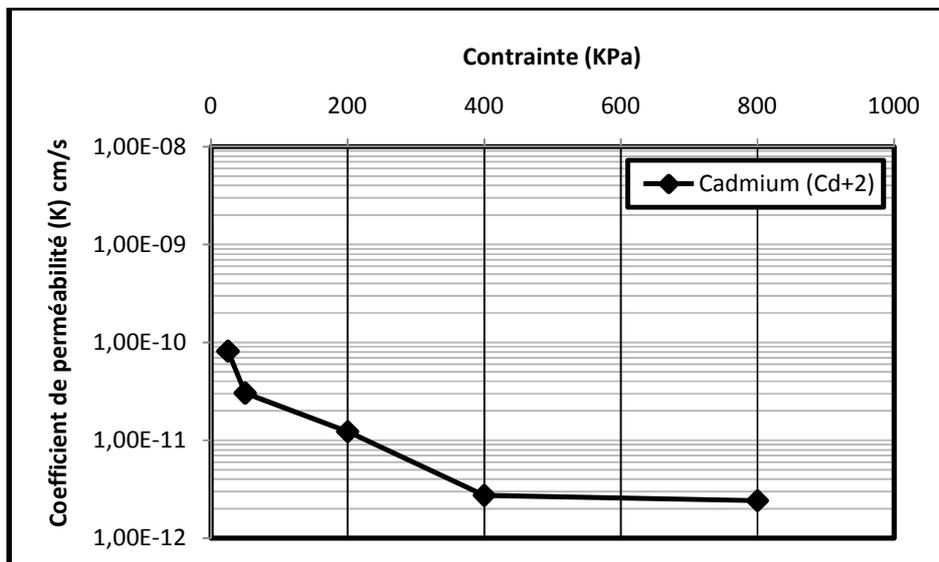


Figure 5. 3. c : Evolution de (K) en fonction des contraintes appliquées pour un mélange S/B imbibé par une solution de cadmium (Cd^{+2}).

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Le coefficient de perméabilité(K) dans une solution de Cd a également subi une diminution sous l'effet du cycle chargement ici aussi la diminution reste appréciable.

La figure 5. 4 résume toutes les résultats obtenus par un essai oedométrique sur les différents mélanges S/B, ces résultats ont été représentés sous forme des graphes. Rappelons que l'abscisse graphique présente les contraintes en (KPa) et que l'ordonnée présente le coefficient de perméabilité (K) correspondant en cm/s.

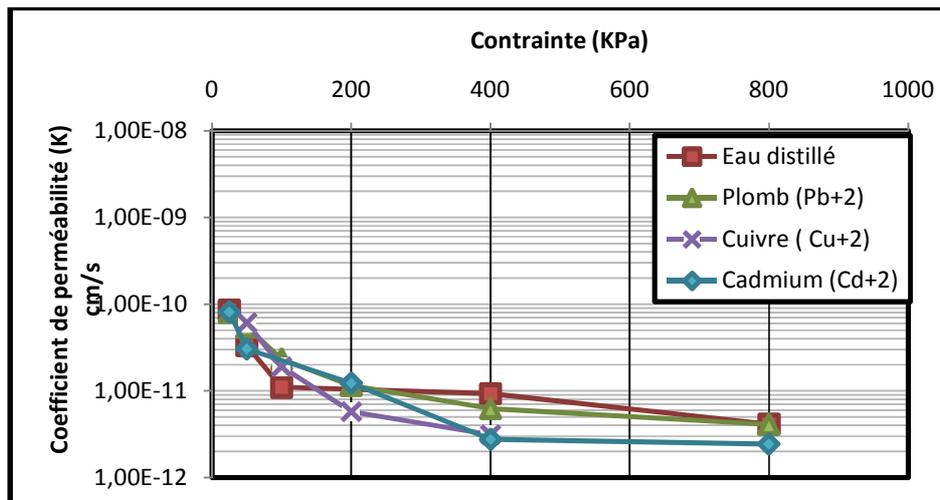


Figure 5. 4 : Evolution de coefficient de perméabilité en fonction des contraintes appliquées pour l'ensemble des mélanges S/B.

La figure 5.4 présente une récapitulation du comportement du coefficient de perméabilité (K) du mélange sable/bentonite sous l'effet d'un chargement progressif. On constate une diminution du coefficient. La diminution est importante et la solution polluante ne semble pas avoir d'effet sur ce dernier.

V.3.3 Calcul de l'indice des vides pour chaque chargement :

Connaissant la teneur en eau initiale de mélange S/B, on peut donc calculer l'indice des vides initial. Il est donné par la formule suivante :

$$e_0 = w_i \times G_s$$

w_i : la teneur en eau initiale de mélange ; $w_i = P_w / P_s$

G_s : la densité des grains solides

Pour le mélange sable/ bentonite la densité prise égale à 2.58, après l'essai, l'indice des vides est déterminé par la relation :

$$\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{\Delta h}{H}$$

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Δh : le changement d'hauteur

H = 2 cm ; l'hauteur initiale

D'après la formule on peut calculer l'indice des vides pour chaque palier de chargement et pour chaque polluant, les résultats sont donnés dans les tableaux suivants :

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Δh (mm)	1.515	1.860	2.745	3.390	3.930	4.380
e	0.839	0.805	0.716	0.653	0.599	0.554
K(cm/s)	8.57×10^{-11}	3.32×10^{-11}	1.10×10^{-11}	5.45×10^{-11}	9.27×10^{-12}	4.13×10^{-12}

Tableau 5. 4 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par l'eau distillé.

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Δh (mm)	1.300	1.970	2.750	3.310	3.800	4.250
e	0.856	0.790	0.712	0.657	0.608	0.563
K(cm/s)	7.99×10^{-11}	5.42×10^{-11}	2.31×10^{-11}	1.15×10^{-11}	6.56×10^{-12}	4.09×10^{-12}

Tableau 5. 5 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par une solution de plomb

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00
Δh (mm)	1.11	1.40	1.77	2.70	3.62
e	0.882	0.853	0.816	0.723	0.632
K(cm/s)	3.59×10^{-11}	6.11×10^{-12}	1.90×10^{-11}	5.77×10^{-12}	3.13×10^{-12}

Tableau 5. 6 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par une solution de cuivre

Les contraintes (Kg/cm ²)	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
Δh (mm)	1.59	2.03	3.50	4.20	4.62	5.08
e	0.773	0.731	0.589	0.522	0.482	0.437
K(cm/s)	8.15×10^{-11}	3.04×10^{-11}	9.03×10^{-10}	1.23×10^{-11}	2.75×10^{-12}	2.43×10^{-12}

Tableau 5. 7 : Indice des vides pour un échantillon imbibé par une solution de cadmium.

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Les figures (5-5), (5-6), (5-7) et (5-8) présentent le coefficient de perméabilité en fonction de l'indice des vides pour un essai oedométrique réalisé sur quatre échantillons préparé par un mélange de 90% de sable et 10% de bentonite. Pour l'échantillon 01 nous avons utilisé l'eau distillée et pour les autres des solutions contaminant des métaux lourds (Pb^{+2} , Cu^{+2} , Cd^{+2}).

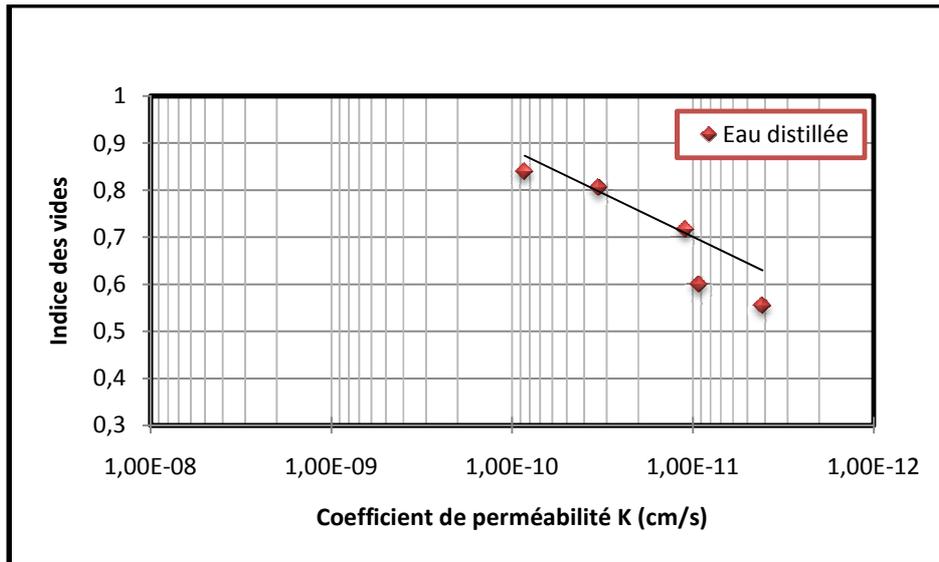


Figure 5. 5 : L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par l'eau distillé

On constate à partir de la figure 5.5 que la diminution de l'indice des vides pendant l'essai s'accompagne par la diminution du coefficient de perméabilité.

Ce phénomène reste logique car il s'explique par un réarrangement des particules du mélange (densification) ; ce qui entraîne une diminution du coefficient de perméabilité.

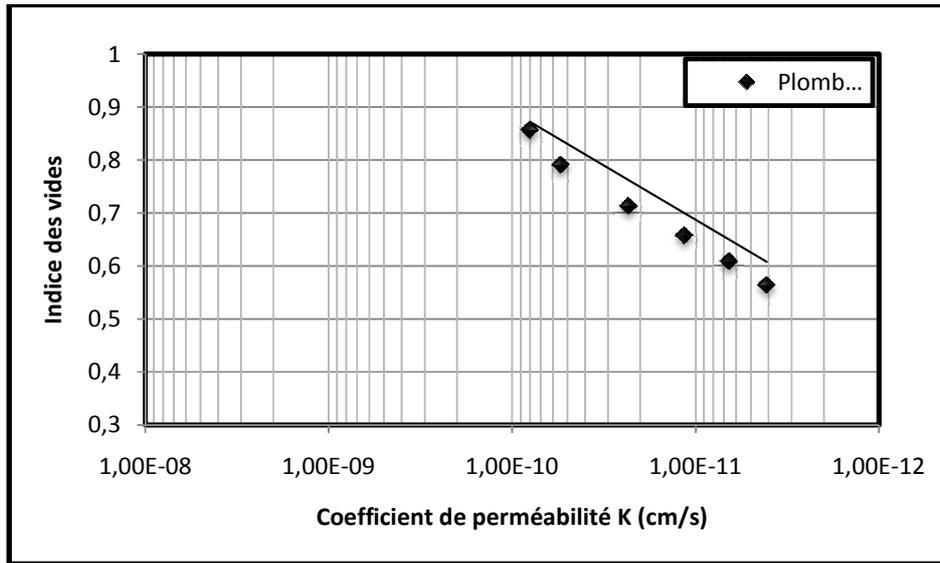


Figure 5. 6: L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par une solution de plomb

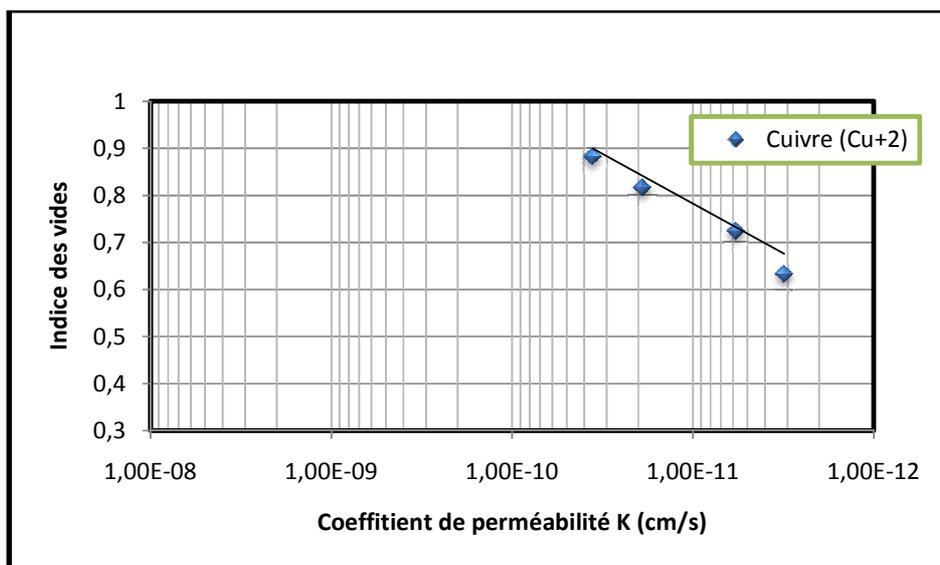


Figure 5. 7 : L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par une solution de cuivre.

Le phénomène constaté pour l'essai réalisé avec la solution de plomb et de cuivre est semblable à celui réalisé avec l'eau distillée, c'est à dire une réduction de l'indice des vides au cours de l'essai avec un effet identique sur (K).

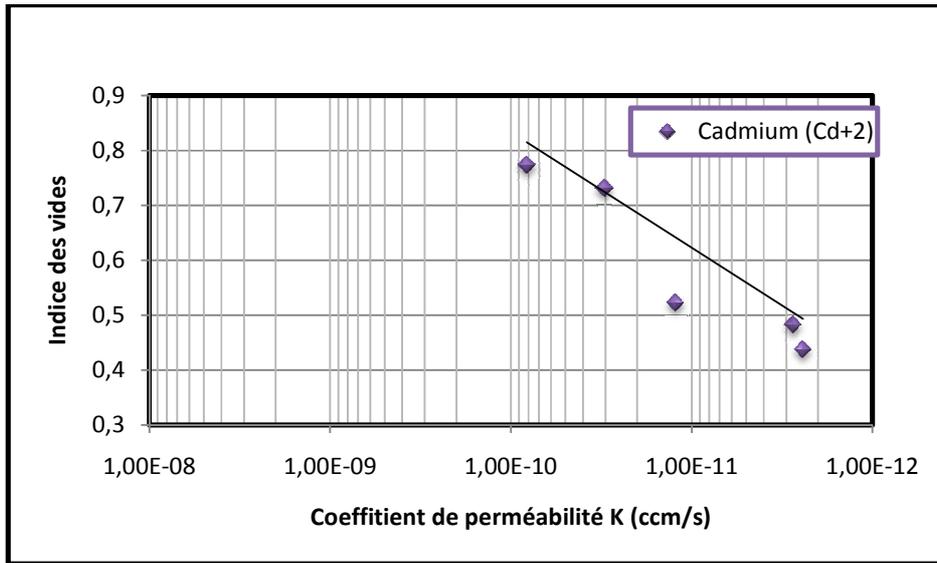


Figure 5. 8: L'indice des vides en fonction de coefficient de perméabilité pour un mélange (S/B) imbibé par une solution de cadmium

L'essai avec la solution de cadmium, est semblable aux autres essais, le resserrement des vides entraîne une faible perméabilité (K).

La Figure (5-9) présente L'ensemble des courbes indice des vides en fonction de coefficients de perméabilité pour les 04 solutions.

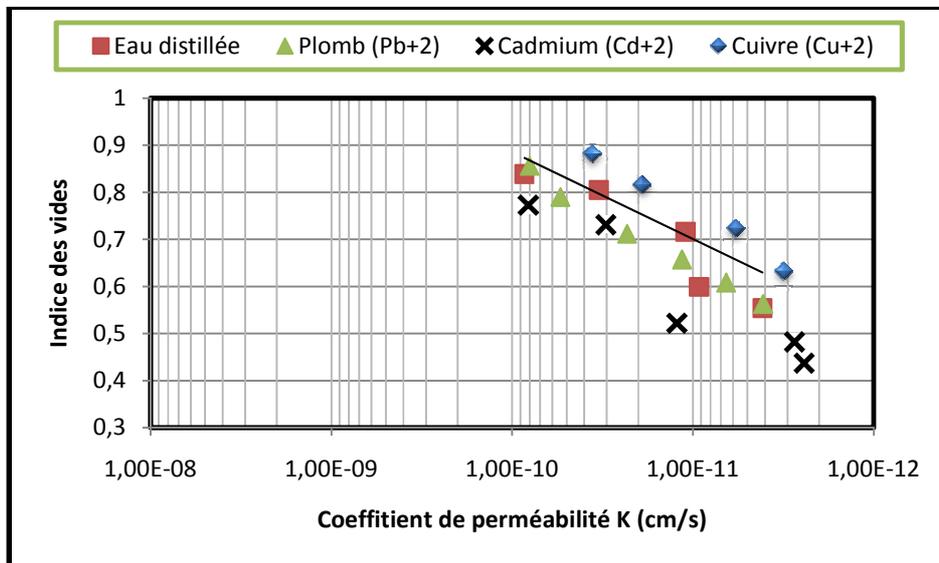


Figure (5-9) : L'ensemble des courbes indice des vides en fonction de coefficients de perméabilité pour les 04 solutions.

Chapitre V: Détermination du coefficient de perméabilité (K) à l'oedomètre

Le schéma de récapitulation ; illustre l'effet de la diminution de l'indice des vides sur le coefficient de perméabilité (K) pour l'ensemble des essais.

V.4. conclusion :

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont :

- L'évolution du coefficient de perméabilité (K) dans une solution polluante est semblable à celle de K dans la solution de référence (eau distillé) c'est-à-dire une diminution importante dans la valeur de K du mélange sable/bentonite sous l'effet d'un chargement progressif et la solution polluante ne semble pas avoir d'effet sur ce dernier.
- Le phénomène constaté pour un essai de compressibilité réalisé avec une solution polluante est semblable à celui réalisé avec l'eau distillé, c'est-à-dire une réduction de l'indice des vides au cours de l'essai avec un effet identique sur le coefficient de perméabilité. Ce phénomène est logique car il s'explique par un réarrangement des particules de mélange (densification).

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'effet des polluants tels que les métaux lourds sur la conductivité hydraulique (la perméabilité) du mélange sable/ bentonite utilisé dans l'imperméabilisation d'une décharge.

Le pourcentage de chaque matériau dans le mélange est de 90% sable et 10% bentonite, ce choix est basé sur les résultats d'études où l'ajout de plus de 10% de bentonite provoque une diminution de la résistance au cisaillement et un plus grand gonflement des mélanges.

La variation du coefficient de perméabilité (K) du mélange S/B en fonction du temps pour 03 chargements (100, 200, 400 KPa) en présence des solutions polluantes par des métaux lourds tels que (cuivre, cadmium, plomb), il a été établi que la présence d'une solution polluante soit par des ions de cuivre, plomb ou cadmium ne semble avoir provoqué aucune altération visible sur le comportement du mélange S/B vis-à-vis de la perméabilité et le comportement a montré une diminution importante du coefficient K sous l'effet du chargement.

L'étude expérimentale de la variation du coefficient de perméabilité du mélange S/B en présence des solutions polluantes a nécessité un travail préliminaire en utilisant l'eau distillée comme une solution type (essai de référence). L'eau distillée a été choisie parce qu'elle est (neutre, elle ne contient pas des ions). Il a été établi que la diminution est remarquable dans la valeur du coefficient de la perméabilité (K) sous l'effet du chargement. Cette diminution atteint un palier où elle finit par se stabiliser après environ 04 heures de chargement. Les chargements appliqués dans notre campagne d'essais semblent apporter une amélioration dans la valeur du coefficient de perméabilité qui atteint pratiquement un cycle de (10^{-9} à 10^{-10} cm/s). Les valeurs de perméabilités sont estimées toujours inférieures à celle mesurée (Olson, 1986).

La dernière partie de la mémoire a été dédiée à l'étude de l'effet des métaux lourds sur le coefficient de perméabilité et l'indice des vides du mélange S/B par un essai de compressibilité à l'oedomètre :

Un essai de compressibilité avec l'eau distillée a été fait et 03 essais ont été effectués pour 03 métaux lourds différents (Pb^{+2} , Cu^{+2} , Cd^{+2}) sous forme de solutions polluantes avec une concentration de 1g/l. La charge est appliquée par paliers maintenus constant

successivement croissant (contrainte verticale maximale de 800KPa pour un échantillon de 19.63cm²).

On a établi que la diminution est relativement importante sur l'échelle de coefficient de perméabilité avec l'augmentation de chargement et l'effet de la pression de chargement appliquée sur la conductivité hydraulique est moins important une fois devenu plus de 400KPa, d'autres auteurs sont trouvés ces valeurs limités d'environ 100 et 200KPa (Wus et Kheras, 1990) ; (Alston et al, 1997). On notera que cette série d'essais a été réalisé pour servir de témoins pour le reste de la campagne d'essais avec les métaux lourds.

La variation du coefficient de perméabilité (K) dans les solutions polluantes par les métaux lourds montre le même comportement que la solution de référence (eau distillée) c'est-à-dire une diminution importante sous l'effet de cycle de chargement.

L'indice des vides pendant l'essai de compressibilité subit une diminution qui s'accompagne par la diminution du coefficient de perméabilité, ce phénomène reste logique car il s'explique par un réarrangement des particules du mélange (densification), ce qui entraine une diminution du coefficient de perméabilité, ces résultats sont obtenues à partir d'un essai de référence avec l'eau distillée.

Le phénomène constaté pour l'essai réalisé la solution de plomb et de cuivre est semblable à celui réalisé avec l'eau distillée, c'est-à-dire une réduction de l'indice des vides avec un effet identique sur K. l'essai avec la solution de cadmium, est semblable aux autres essais, le resserrement des vides entraine une faible perméabilité (K).

Parmi les recommandations que nous proposons pour l'approfondissement de ce travail :

- 1- L'utilisation d'un lixiviat de CET comme solution polluante et voir son effet sur les propriétés de perméabilité et de compressibilité du mélange sable/bentonite.
- 2- Concevoir un montage spéciale dans le but d'utiliser des échantillons plus grand afin de se rapprochée à l'échelle réelle du modèle de terrain.
- 3- Examiner l'interaction polluant/mélange du point de vue phénomène physico-chimique.

Bibliographie

- Aina. M, « Expertises des centres d'enfouissement des déchets urbains dans les PED : contributions à l'élaboration d'un guide méthodologiques et à sa validation sur sites » thèse de doctorat- université de limoges (2006).
- Aliouche.S « Gestion des déchets urbains et diagnostic d'une décharge contrôlée : cas du CET d'ouled Fayet, Alger » mémoire de magister Alger, (2006) P 220.
- Alston.C, Daniel.D.E et Devroy.D.J « Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario, can geotech.J » N° 34 (1997).
- Anh-Minh Tang Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement thèse de doctorat école nationale des ponts et chaussées (2005) P 12.
- Bastien Bonte « Mise en évidence de la vulnérabilité des barrières géologiques et géo synthétiques utilisées pour le confinement hydraulique des centres d'enfouissement de déchets de classe 2 » septembre (2007).
- Benchabane.A « Etude du comportement rhéologique de mélange argiles-polymères. Effet de l'ajout de polymères » Thèse de doctorat, univercité Louis Pasteur-Strasbourg I, 2006.
- Besq. A « Ecoulements laminaires de suspensions de bentonite industrielles. Caractérisation rhéométrique- Ecoulements en conduites axisymétriques- Applications aux activités de génie civil » Thèse de doctorat (2000) de l'université de poitiers.
- Damiem- A « Guide de traitement des déchets » 3^{eme} édition Dunod (2004) P 431.
- Egloffstein. T.A, « Natural bentonites--influence of the ion exchange and partial desiccationon permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs», Geotextiles and Geomembranes
- Emilian Koller « Traitement des pollutions industrielles Eau, Air, Sols, Boues » 2^{eme} édition Dunod.
- Ferhat.M « Co-Adsorption des métaux lourds sur la bentonite modifiée en présence de flocculants minéral et biologique » thèse de magister université Mouloud Mammeri-Tizi-ouzou (2012) P18.24.

- Geddouda. M.K, I. Goual, M. lamara, N. Aboubateur « hydraulique conductivity and shear strenght of compacted dune sand – bentonite miscture » ICCBT , 2008-E-(12)-P 139.150.
- Geddouda. M.K, Md. Lamara, Nabil.A, Said Taibi « hydraulic conductivity and Shear Strength of dune sand-bentonite mixtures.ejge , 2008.
- Guyonnet. D et al. « Geosynthetic Clay Liner Interaction with Leachate: Correlation between Permeability, Microstructure, and Surface Chemistry », Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 131, n° 6, 2005,
- Hajjaji.M et El Arfaoui. H « Adsorption of methylene blue and zinc ions on raw and acid-acti vated bentonite from Marocco » Applied clay science 46 (2009) pp 418-421.
- Jean Germain.P « Synthèse des travaux du conseil scientifique de l'InVs sur le stockage des déchets et la santé publique » période (2001/2004) P 11.18.19.
- Jo. H « Cation exchange and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners (GCLs) permeated with inorganic salt solutions » Thèse de doctorat, Université deWisconsin—Madison, Wis, 2003.
- Kehila.Y, Mezouari.F, Matejka.G « Impact de l'enfouissement des déchets solides urbains en Algérie : Expertise de deux centres d'enfouissement technique (CET) à Alger et Beskra » un revue francophone d'écologie industrielle, sciences and techniques № 56, 4^{eme} trimestre, déchets (2009).
- Kouloughli .S, Benchikh elhoucine.M « Les mélanges sable-bentonite dans la construction de barrières de confinement de déchets solides » juin 2005.
- Kouloughli.S « Etude expérimentale des mélanges sable bentonite- leurs performances comme barrières de confinement dans les CET » thèse de doctorat université mentouri Constantine (2006) P 8.16.17.18.
- Laribi, S, J-M. Fleureau, J-L. Grossiord and N. Kbir-Ariguib, « Comparative yield stress determination for pure and interstratified smectite clays Rheol » Octa 44, 262-269 (2005).
- Le Pluart, L., « Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite : Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et

- les propriétés mécaniques des réseaux » Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2002).
- Le Pluart, L., J. Duchet, H. Sautereau, P. Halley and J.-F. Gerard, "Rheological properties of organoclay suspensions in epoxy network precursors" *Appl. Clay Sci.* 25, 207-219 (2004).
 - Luckham.P.F and S. Rossi « Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions *Adv Colloid Interface Sci.*82 (1999).
 - Montes-H.G, Geraud.Y, Duplay.J, Reuschlé.T « ESEM observation of compacted bentonite submitted to hydration/ dehydration conditions » *colloids and surfaces A: Physicochemical Eng. Aspects* 262 (2005) 14-22.
 - Nevila Jozja « Etude de matériaux argileux albanais caractérisation « Multi-échelle » d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité » thèse de doctorat université d'orléans (2003) P 7.9.11.14.17.
 - Pascal thériault « Etude de l'influence des matériaux lourds sur la conductivité hydraulique de couche sable/bentonite » Thèse de doctorat, université Laval, 2000.
 - Shackelford. CD, Benson. C.H., Katsumi. T., Edil. T.B., Lin. L., « Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with nonstandard liquids » *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 18, 2000, P. 133.161.
 - Souli. H « Études hydromécanique et physico-chimique de deux argiles en présence de cations métalliques » Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 2006.
 - Stepkowska, E. T., Pérez-Rodriguez, J. L., Maqueda, C., et Starnawska, E. 2004. Variability in water sorption and in particle thickness of standard smectites. *Applied Clay Science*, 24: 185-199.
 - Tessier, D. 1990. Chapitre III – Organisation des matériaux argileux en relation avec leur comportement hydrique. Dans *Matériaux argileux – Structure, propriétés et application*. Sous la direction de A. Decarreau. p. 387-445.
 - Tompacz. E, Liborz, illés. E, Majzi kaetklumppe. « The role of reactive surface sites and complexation by humic acids in the interaction of clay mineral and iron oxide particles, organic geochemistry » , 2004 . vol. 35 pp 257-267.

- Viallis- Terrisse H, « Interaction des silicates de calcium hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins, Analogie avec les argiles » Thèse de doctorat (2000). Université de Bourgogne.
- Winiarski.T « Analyse systémique du fonctionnement de l'interface système naturel et système anthropisé exemple de l'interface décharge/ aquifère » thèse de doctorat, université Claud Bernard-Lyon 1 (1994).
- Xianfergel. L, Saiyouri. N.Yves Hicher.P « Une approche microstructure pour le transfert du Plomb dans une bentonite consolidée et saturée », XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011, P 584.585.
- Yong R. N. 1999. Overview of modelling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance. Engineering Geology, 54 : 83-91.
- Youcef Kehila, Fatiha Mezouari « Intérêt des matériaux géo synthétiques dans la conception des centres d'enfouissement technique (CET) en Algérie » 2011 .P 54, 56.

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Détermination de la perméabilité à l'oedomètre (essai à charge variable) :

1. Matériel :

Le perméamètre est fixé sur le support solidaire du bâti à l'aide de vis et d'écrous à oreilles. Il importe de bien régler la hauteur du tableau. L'échelle du perméamètre est graduée de 10 à 60 cm. Le niveau de sortie de l'eau de la cellule est celui du trou de la goupille, c'est le niveau 0. Le bas de l'échelle (10) doit être exactement à 10 cm au-dessus du niveau 0. Le perméamètre ne sera donc pas à la même hauteur selon que l'échantillon a une épaisseur de 12 ou 24 mm.

Pour ce réglage, il est prévu un index de réglage que l'on pose sur le bâti à la place de la cellule. Il suffit alors de placer le « 10 » de la règle sur le « 12 » ou le « 24 » repéré sur l'index. Le perméamètre a fait l'objet d'un tarage, afin de déterminer la section du tube calibré.

2. Tarage du perméamètre :

- Prendre un petit tube en caoutchouc muni d'un robinet terminé par une partie effilée et le brancher sur le perméamètre.
- Remplir d'eau distillée par l'entonnoir et faire couler jusqu'à purge complète de l'air dans le circuit.
- Fermer les robinets du tube rallonge R2 et du perméamètre R1.
- Tarer un petit cristalliseur à 0.001 pré.
- Ouvrir le robinet R2 pour laisser s'écouler l'eau jusqu'à la graduation 60 exactement. Ne pas recueillir cette fraction de liquide.
- Ouvrir le robinet R2 et recueillir l'eau qui coule dans le cristalliseur taré. Refermer le robinet R2 quand le niveau est exactement à 50.
- Peser le cristalliseur à 0.001 gr près si possible. Calculer le volume en mm³ et en déduire le volume moyen par mm de graduation entre 60 et 50 (tenir compte de la température pour déterminer la masse spécifique de l'eau.).
- Recommencer l'opération entre 50 et 40 ; 40 et 30 ; 30 et 20 et 20 et 10.
- La section du tube varie toujours légèrement et il est impossible de garantir une section rigoureuse d'un bout à l'autre.

3. Manipulations :

- Accrocher le tube souple.
- Remplir le récipient du perméamètre avec de l'eau distillée. Les deux tubes (calibré et souple) vont se purger et déborder.
- Fermer le robinet R1 et remplir le récipient du perméamètre.
- Remplir le tube coudé avec de l'eau distillée.
- Saisir entre le pouce et le majeur, le bouchon de caoutchouc en fermant avec l'index l'extrémité du tube souple.
- Ouvrir R1 et d'un mouvement rapide introduire le bouchon dans le tube coudé sans emprisonner d'air. Fermer le robinet R1.
- Vérifier qu'aucune bulle d'air ne s'est introduite dans le circuit, sinon on recommence l'opération.
- Le tube étant rempli d'eau à l'aide du robinet R1. Observer le niveau de l'eau h_0 et le temps t_0 .
- Laisser l'appareil jusqu'à ce que le niveau de l'eau arrive dans la partie inférieure de l'échelle ce qui nécessite plusieurs heures.
- Noter le niveau h_1 et le temps t_1 .
- Lorsque l'essai est terminé, vérifier que les lectures sur les comparateurs n'ont pas variées.
- Noter la température T de l'eau au début et à la fin de l'essai en plongeant un thermomètre dans le tube coudé plein d'eau.

A1.14 Calcul.

- La formule utilisée pour le calcul du coefficient de conductivité hydraulique est sous la forme.

$$K = 2.3 \frac{s}{S} \text{Log} \frac{h_0}{h_1} \frac{H - \Delta h}{t} \dots\dots\dots \text{cm/s}$$

s : section du tube déterminé par tarage en cm^2 .

S : section de l'éprouvette en cm^2 .

H : épaisseur de l'éprouvette en cm .

Δh : variation de la pression en cm .

h : lecture sur la règle graduée en cm.

\log : logarithme décimale.

t : temps en seconde.

k : conductivité hydraulique en cm/s.



Figure: Perméamètre type M&O