

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Minier

PROJET DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
D'ETAT EN GENIE MINIER

Présenté par: Mlle Yasmine ARJOUN

Thème

**Etude d'un Centre d'Enfouissement
Technique**

Soutenu le 26/06/2011 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------|----------------|--------------------------------|
| Président: | Mr M.OULHAMOU | Docteur, ENP |
| Examineurs: | Mme S.CHABOU | Docteur, ENP |
| Promoteur: | Mr N.E NEBACHE | Assistant, ENP |
| Invité: | Mr A. MELBOUCY | Ingénieur Hydraulique, AMENHYD |

Promotion 2011

« On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres : mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison ».

Henri Poincaré

DEDICACES

Je dédie ce modeste ouvrage

A mes parents et mon frère, qui ont éclairé mon chemin et qui m'ont encouragé
et soutenu tout au long de mes études.

A Isma qui m'a inspirée et aidée tout au long de mon travail en veillant tard la
nuit.

A Binche qui a collaborée à la réalisation de ce projet.

A tous mes amis, camarades, et à toutes les personnes ayant contribué de près ou
de loin à la réalisation de cet ouvrage.

REMERCIEMENTS

J'exprime toute ma gratitude à mon promoteur Mr N.E NEBACHE, pour la totale confiance qu'il m'a accordée, ainsi que le soutien qu'il m'a apporté pour la réalisation de ce modeste travail.

Je tiens à remercier Mr M. OULD HAMOU, qui me fait un grand honneur en acceptant de présider ce jury.

Je remercie très sincèrement, Mme S. CHABOU qui a acceptée de participer à la valorisation de ce travail.

Je remercie aussi Mr L. CHANAN qui m'a été d'une grande aide dans mon travail.

Je tiens à remercier aussi Mr A. MELBOUCY qui m'a offert l'opportunité de travailler sur un sujet de l'entreprise AMENHYD.

J'adresse également mes remerciements, à tous mes enseignants, qui m'ont donnée les bases de la science.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

MERCI A TOUS.

Résumé

Le but de ce travail est la reconnaissance d'un terrain, en étudiant sa géologie ainsi que ses propriétés afin qu'il puisse contenir un Centre d'Enfouissement Technique.

Pour cela, nous avons effectué des essais géologiques et géotechniques sur le terrain en question.

Des puits ont été forés et des échantillons ont été pris pour les essais. Dans un premier lieu, nous avons procédé à une reconnaissance géologique en se basant sur les puits forés, ensuite des essais géotechniques, granulométrique et les limites d'Atterberg, ont été effectués afin de définir la nature du terrain.

Nous avons pu conclure que le terrain d'étude est apte à contenir un CET.

Mots clés: Déchets, CET, limites d'Atterberg, stabilité des talus.

Abstract

The aim of this work is the recognition of a field, by studying its geology and its properties so that it can contain a landfill site.

For this, we carried out geological and geotechnical testing in the field in question.

Wells were drilled and samples were taken for testing. In a First, we conducted a geological reconnaissance based on wells drilled, then geotechnical testing, grading and Atterberg limits were performed to define the field.

We concluded that the field of study is able to contain a landfill site.

Keywords: wastes, landfill site, Atterberg limits, slope stability

ملخص

الهدف من هذا العمل هو الاعتراف بالميدان، من خلال دراسة الجيولوجيا، وخصائصه بحيث يمكن أن تحتوي على CET.

لهذا، أجرينا التجارب الجيولوجية والجيوتقنية في الميدان.

تم حفر الآبار وأخذت عينات لفحصها. أجرينا استطلاع الجيولوجية استنادا إلى حفر الآبار، ثم أجرينا الاختبارات الجيوتقنية، الدرجات و نهايات Atterberg لتحديد التضاريس.

استنتجنا أن ميدان الدراسة قادر على احتواء CET.

كلمات المفتاح : النفايات، ميدان لدفن النفايات، نهايات Atterberg، ثبات المنحدر.

Table des matières :

Glossaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....1

Chapitre I : Etude Bibliographique

I-1 Les déchets

I-1.1 Définitions.....3

I-1.2 classification des déchets.....4

I-1.3 Nature des déchets.....5

I-1.4 Caractéristiques des ordures ménagères.....5

a) Densité.....5

b) Le taux d'humidité.....5

c) Le pouvoir calorifique.....6

d) Le rapport carbone/azote (C/N).....6

I-1.5 Tri écologique ou sélectif.....6

I-2 Généralité sur les CET

I-2.1 Définition.....7

I-2.2 Classification.....9

I-2.3 Structure.....9

I-2.4 Installation.....9

I-2.5 Conception d'ensemble.....10

I-2.6 Casier.....12

I-2.7 Géo-membrane.....13

I-2.7.1 Définition13

I-2.7.2 Domaines d'emploi.....13

I-2.8 Pente du talus.....14

I-2.9 Réhabilitation des casiers et récupération du Biogaz.....15

| | |
|---|----|
| I-2.10 Revégétalisation..... | 15 |
| I-3 Choix du site | |
| I-3.1 Méthodes de sélection du site..... | 16 |
| I-3.2 Définition des critères..... | 17 |
| I-3.3 Procédure de sélection des sites..... | 20 |
| I-4 Impact sur l'environnement | |
| I-4.1 Les nuisances et les risques..... | 22 |
| I-4.2 Impact des interférences sur les particules argileuses..... | 25 |
| I-4.2.1 Au niveau macroscopique..... | 25 |
| I-4.2.2 Au niveau microscopique..... | 25 |
| <i>Chapitre II : Matériels et méthodes</i> | |
| II-1 Carottage | |
| II-1.1 Définition..... | 26 |
| II-1.2 Méthodes..... | 26 |
| II-1.2.1 Carottage en rotation..... | 26 |
| II-1.2.2 Matériels..... | 26 |
| II-1.2.2.1 Carottiers..... | 27 |
| II-1.2.2.2 Tiges de carottage..... | 29 |
| II-1.2.2.3 Outils de carottage..... | 30 |
| II-1.3 Récupération de la carotte..... | 30 |
| II-1.4 Rangement des carottes..... | 31 |
| II-2 Propriétés du sol | |
| II-2.1 Description..... | 31 |
| II-2.2 Détermination des caractéristiques physiques..... | 33 |
| II-2.2.1 Détermination de la teneur en eau (pondérale w)..... | 33 |
| II-2.2.2 Détermination du poids volumique γ | 34 |
| II-2.2.3 Détermination du poids volumique des particules solides γ_s | 34 |

| | |
|---|----|
| II-2.3 Définition et caractéristiques principales des sols..... | 35 |
| II-2.3.1 Les sols grenus..... | 35 |
| II-2.3.2 Les limons (silts)..... | 36 |
| II-2.3.3 Les argiles..... | 36 |
| II-2.4 Structure des argiles..... | 36 |
| II-2.5 Identifications des sols par courbe granulométrique..... | 37 |
| II-2.5.1 Définition..... | 37 |
| II-2.5.2 Analyse granulométrique et sédimentométrique..... | 37 |
| II-2.5.3 Coefficient de conformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique | 38 |
| II-2.6 Identification propre aux sols grenus..... | 39 |
| Essai d'équivalent de sable..... | 39 |
| II-2.7 Identification propre aux sols fins..... | 40 |
| Les limites d'Atterberg..... | 40 |
| II-2.7.1 Etat de consistance..... | 40 |
| II-2.7.2 Indice de plasticité et de consistance..... | 41 |
| II-2.8 Détermination des caractéristiques de plasticité c et ϕ | 41 |
| II-2.8.1 Scissomètre | 41 |
| II- 2.8.2 Boite de cisaillement (Boite de Casagrande) | 44 |
| II-2.9 Classification des sols..... | 45 |
| II-2.9.1 But de la classification..... | 45 |
| II-2.9.2 Classification LPC des sols..... | 45 |
| II-3 Stabilité des talus | |
| II-3.1 Les mouvements des terrains..... | 47 |
| II-3.2 Généralité sur les glissements..... | 47 |
| II-3.2.1 Aspect général du glissement..... | 47 |
| II-3.2.2 Causes du glissement..... | 48 |

| | |
|---|-----------|
| a) Diminution des moments résistants..... | 48 |
| b) Augmentation des moments moteurs | 49 |
| II-3.2.3 Mécanisme de mouvement | 49 |
| II-3.3 Analyse de stabilité..... | 50 |
| II-3.3.1 Glissement plan..... | 50 |
| II-3.3.2 Méthode de FELLENIUS (1927)..... | 54 |
| II-3.3.3 Méthode de BISHOP (1955)..... | 56 |
| II-3.3.4 Méthode du cercle de frottement..... | 57 |
| II-3.4 Choix des caractéristiques mécaniques à prendre en compte..... | 59 |
| II-4 Présentation du site | |
| II-4.1 Contexte général..... | 59 |
| II-4.2 Description des formations locales..... | 60 |
| II-4.3 Raisons du choix du site..... | 62 |
| II-4.4 Implantation générale..... | 62 |
| II-4.5 Conception et réalisation du CET..... | 63 |
| II-4.5.1 Les casiers d'enfouissement..... | 63 |
| II-4.5.2 Réseaux de drainage des lixiviats et des biogaz..... | 64 |
| <i>Chapitre III : Résultats et interprétations</i> | |
| III-1 Etude géologique..... | 66 |
| III-2 Etude géotechnique..... | 68 |
| Echantillon n°1 : | |
| a) L'essai granulométrique..... | 69 |
| b) Les essais des limites d'Atterberg..... | 70 |
| Echantillon n°2 : | |
| a) L'essai granulométrique | 71 |
| b) Les essais des limites d'Atterberg..... | 73 |
| Conclusion générale..... | 75 |
| <i>Références bibliographique</i> | |
| <i>Annexes</i> | |

Glossaire

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur : C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible. Cette énergie comprend la chaleur sensible, mais aussi la chaleur latente de vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion. Cette énergie peut être entièrement récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée, c'est-à-dire si toute l'eau vaporisée se retrouve finalement sous forme liquide

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur : C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible sous forme de chaleur sensible, à l'exclusion de l'énergie de vaporisation (chaleur latente) de l'eau présente en fin de réaction.

Compostage : Fabrication de compost (engrais naturel) à partir des déchets ménagers. Cette transformation se fait par des micro-organismes.

Déchèterie : Site où les ménages et commerces peuvent apporter leurs déchets encombrants (autres que les déchets ménagers) et les vider dans des conteneurs ou bennes spécifiques à chaque matériau.

Forces électriques : Des molécules électriquement neutres peuvent constituer des dipôles (les centres des charges positives et négatives sont distincts). Les forces électriques s'exercent entre les dipôles.

Forces de Van Der Waals : Forces d'attraction entre molécules dues aux champs électriques résultant du mouvement des électrons sur leurs orbites ; varie inversement proportionnellement à une puissance élevée de la distance.

Valorisation : Définition englobant, la réutilisation, le recyclage, la mise en valeur organique ou énergétique des déchets.

Aérobic : Organisme ou moteur ayant besoin d'air pour vivre ou fonctionner.

Anaérobic : Organisme ou mécanisme n'ayant pas besoin d'air ou d'oxygène pour vivre ou fonctionner.

Pont bascule : Le pont à pesées permet de produire des statistiques fiables de production des déchets. Afin d'utiliser ces statistiques au mieux, il est primordial d'associer les pesées à une origine et une nature des déchets (ce point est particulièrement important pour l'estimation de la production de biogaz). Chaque camion doit idéalement être accompagné d'un bordereau de transport (Le bordereau est un formulaire qui a pour objet d'assurer la traçabilité des déchets dangereux et de constituer une preuve de leur élimination pour le producteur responsable).

Tout pont à pesée de précision exige une vérification et un calibrage tous les 6 mois, et si possible être de type « hors-sol », posés sur une dalle de béton plane et horizontale.

Casier : Subdivision de la zone à exploiter délimitée par une digue périmétrique stable et étanche, hydrauliquement indépendante.

Alvéole : subdivision du casier.

Lixiviat : Liquide émanant des déchets ménagers et chargé de polluants bactériologiques et chimiques.

Biogaz : Gaz résultant de la décomposition biologique des matières organiques en milieu non oxygéné (comme les déchets ménagers enfouis dans un casier).

Composition des biogaz: 45-65% de méthane (CH_4), 25-45% de gaz carbonique (CO_2), 4-8% d'azote (N_2), et 1% d'oxygène (O_2). Le reste consiste en vapeur d'eau pour une densité de 11.7g/m^3 , en hydrogène sulfuré (H_2S) pour 0.4g/m^3 , en composés halogènes (chlore, fluor) pour 1.4mg/m^3 , composés organiques volatils, dits COV (benzène, toluène, cétones, alcools, aldéhydes, esters, chloroéthylènes et autres composés organiques volatils) pour $0.1\text{-}5\text{mg/m}^3$ (selon le site et le type de déchets accumulés), et traces de métaux lourds volatils.

Torchère : Installation de brûlage des biogaz.

Suie : La suie est un ensemble de composés chimiques résultant de la combustion incomplète de combustibles fossiles (essence, gazole, fioul, kérosène) et de biomasse (bois, végétaux). Les suies se présentent sous la forme de substances solides ou goudroneuses d'aspect noirâtre et riches en carbone.

Liste des tableaux

Tableau I-1.2 : Classification des déchets.

Tableau I-2.2 : Classification des CET.

Tableau I-3.2 : Critères d'un bon choix du site.

Tableau II-2.6 : Ordres de grandeur de l'E.S.

Tableau II-2.7.1 : Classification de l'argilité d'un sol selon l'indice de plasticité I_p .

Tableau II-2.7.2 : Etat du sol en fonction de l'indice de consistance.

Tableau II-2.9 : Classification LPC.

Tableau III-1 : Sondage géologique n°1

Tableau III-2 : Essais géotechniques sur le puits n°1

Liste des figures :

Figure I.2.1: Centre de tri.

Figure I.2.4 : Centre de stockage des déchets non dangereux.

Figure I.2.5 : Coupe d'un CET.

Figure I.2.7 : Mise et soudure de la Géo-membrane.

Figure I.2.10 : Casier de stockage en fin d'exploitation.

Figure II.1.2.1 : Exemples de carottiers doubles.

Figure II.1.2.2 : Exemples de carottiers à câble.

Figure II.1.4 : Disposition des carottes.

Figure II.2.1 : Poids et volumes des différentes phases.

Figure II.2.2.3 : Pycnomètre.

Figure II.2.4 : Particule de sol très fin.

Figure II.2.5.2 : Exemple de courbe granulométrique.

Figure II.2.6 : Equivalent de sable.

Figure II.2.7.1 : Etats de consistance d'un sol.

Figure II.2.8.1.1 : Scissomètre.

Figure II.2.8.1.2 : Axe de rotation du scissomètre.

Figure II.2.8.1.3 : Courbe scissométrique.

Figure II.2.8.2.1 : Boîte de Casagrande.

Figure II.2.8.2.2 : Courbe contraintes/déformation.

Figure II.2.8.2.3 : Courbe intrinsèque (détermination de c et φ).

Figure II.2.9 : Classification LPC : diagramme de plasticité.

Figure II.3.2.1 : Forces-glissements.

Figure II.3.2.3 : Mécanismes de mouvement différents dans le développement aux talus.

Figure II.3.3.1 : Glissement plan.

Figure II.3.3.2 : Forces agissant sur la tranche de terrain ABCD.

Figure II.4.1 : Image satellite de la localisation du CET de Hamissi.

Figure II.4.2 : Carte géologique du Nord de l'Algérie (1/500.000°).

Figure II.4.5.1.1 : Casier d'enfouissement-vue en coupe.

Figure II.4.5.1.2 : Caniveau de drainage des lixiviats.

Figure II.4.5.2.1 : Conduites de drainage.

Figure II.4.5.2.2 : Torchères.

Figure II.4.5.2.3 : Vue de coupe d'un casier d'enfouissement.

Figure III.2.1 : Graphe de la granulométrie de l'échantillon n°1

Figure III.2.2 : Graphe de la limite de liquidité W_L pour l'échantillon n°1

Figure III.2.3 : Abaque de Casagrande pour l'échantillon n°1

Figure III.2.4 : Graphe de la granulométrie de l'échantillon n°2

Figure III.2.5 : Graphe de la limite de liquidité W_L pour l'échantillon n°2

Figure III.2.6 : Abaque de Casagrande pour l'échantillon n°2

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale :

La planète Terre est le seul endroit de l'univers où la vie est possible, ceci est grâce à sa position par rapport au Soleil, l'atmosphère qui l'entoure mais aussi les ressources naturelles en provenance de son sol. Pour notre survie et la préservation de notre existence, il faudra protéger notre planète.

Seulement avec l'explosion démographique et industrielle, cette tâche est de plus en plus difficile.

L'humain par sa nature engendre différents types de déchets : industriels mais aussi et surtout des déchets ménagers provenant de la vie de tous les jours.

Ces derniers sont stockés dans des endroits appelés : « décharge publique ».

Par le passé, ces décharges étaient quasiment sauvages, citons comme exemple la décharge de Oued Smar, qui a créé pas mal de nuisances autour d'elle de plus de la dégradation du paysage.

La gestion des déchets dans les pays en développement (PED) rencontre de très nombreuses difficultés, tant du point de vue technique, économique, que méthodologique et organisationnel.

Le problème des ordures au niveau de la wilaya de Tipasa a pris une proportion alarmante. L'exode des populations vers la bande littorale, d'une part, et l'inculture des citoyens en matière d'éducation environnementale, l'insouciance et le manque de réflexion chez les gestionnaires communaux dans le chapitre relatif à la préservation de l'environnement, d'autre part, sont autant de points noirs qui ont permis à la pollution de « se développer » dans une wilaya dont l'une des principales vocations est le tourisme.

Jusqu'à présent, bon nombre de sites de stockage ne faisaient l'objet d'aucun suivi ni d'aucune étude préalable. Ces sites étaient à l'origine de pollutions et de nuisances de nature à détériorer les milieux récepteurs et à générer une mauvaise acceptation sociale de ce type d'infrastructure de service public.

Des mesures d'atténuation, tant à l'implantation qu'à l'exploitation sont donc indispensables à une meilleure protection de l'environnement.

Un CET est donc un lieu de stockage des déchets pour lequel la conception, l'implantation et l'exploitation sont menées de manière à minimiser l'impact environnemental et social de cette infrastructure de service public.

La connaissance de tout un ensemble de données est nécessaire au choix d'un site pour l'implantation d'un centre d'enfouissement technique, de façon à prévenir tout échange avec les milieux environnants (eaux, sols, atmosphère). Elles relèvent aussi bien de la géologie, l'hydrogéologie et la topographie du lieu, que de l'environnement urbain et d'autres éléments économiques. Ces données permettent non seulement de choisir le site et de définir les aménagements initiaux à réaliser, mais également de déterminer les modes d'exploitation et sa gestion post-exploitation.

En particulier, la qualification des sols par des moyens d'investigation « in situ » et en laboratoire guide le choix de construction de la barrière passive, son renforcement si besoin, jusqu'à son remaniement si nécessaire.

La conception du centre de stockage lui-même est donc déterminée dans un premier temps par son site d'implantation, mais aussi par la catégorie de déchets admis (classes I, II, III ou IV). Une bonne sécurité est mise en place, par prévention, en réalisant notamment le système d'étanchéité, drainage des lixiviats et la couverture finale du site. Leurs caractéristiques de conception sont notamment : géométrie du fond de forme, dimensionnement de la couche drainante et choix des matériaux. La couverture du centre de stockage assure quant à elle l'isolement des déchets de l'environnement extérieur, aussi bien pour contrôler les infiltrations d'eau que pour empêcher les émanations de biogaz.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser plus spécialement aux critères permettant le bon choix du terrain pour l'implantation d'un CET.

Ce mémoire se décompose en trois chapitres :

Le premier chapitre consacré à la recherche bibliographique, porte sur la définition, la classification ainsi que la caractérisation des déchets, mais aussi une généralité sur les CET, les critères du choix du site et enfin l'impact des CET sur l'environnement.

Ensuite, un chapitre présentant les méthodes utilisées pour la détermination du terrain sélectionné et une présentation du site de l'étude, suivi d'un dernier chapitre contenant les résultats des études effectuées.

Enfin, une conclusion générale résumant l'essentiel du travail ainsi que quelques suggestions et recommandations.

CHAPITRE I :
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

I-1 Les déchets

En Algérie, dans les grandes et petites villes, les problèmes posés par les déchets urbains semblent échapper à toute maîtrise.

La multiplication des décharges sauvages dans et aux abords des villes et les nuisances qui en résultent en sont la meilleure illustration. Sur le territoire national 2000 à 3000 décharges sauvages sont répertoriées, parmi lesquelles 350 au niveau de 40 grandes villes du pays [1].

I-1.1 Définitions :

La notion de déchets peut être définie de différentes manières selon le domaine et l'intérêt d'étude et parfois l'origine et l'état du déchet.

Parmi les nombreuses définitions existantes, nous pouvons mentionner celles qui nous paraissent les plus intéressantes [2]:

- Le déchet est un résidu abandonné par son propriétaire, car inutilisable, sale ou encombrant.
- Est considéré comme déchet, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.
- Les déchets sont des résidus de l'emploi de matières solides qui peuvent être putrescibles ou non putrescibles.
- Les déchets sont des matières normalement solides ou semi-solides résultant des activités humaines et animales qui sont indésirables ou dangereuses.

La Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit [3]:

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

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

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

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

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

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

Déchets inertes : tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et/ou à l'environnement [3].

I-1.2 Classification des déchets :

Le Tableau I est une représentation des diverses possibilités de classification des déchets illustrées à chaque fois par des exemples [4].

| | |
|---|---|
| <p>Classification selon l'état physique</p> | <p>-Déchets solides : ordures ménagères, déchets des métaux, déchets inertes de caoutchouc et plastique, paille,...</p> <p>-Boue : boues de stations de traitement des eaux résiduaires, boues d'origine diverse (de traitement de surface, d'hydrocarbures, de peinture,...)</p> <p>-Déchets liquides ou pâteux : goudrons, huiles usagées, solutions résiduaires, divers,...</p> <p>-Déchets gazeux : biogaz.</p> |
| <p>Classification selon la nature chimique</p> | <p>-Déchets acides : solutions résiduaires, acides divers (HCl, H₂SO₄, HNO₃,...), acides organiques, acides à l'état de gaz.</p> <p>-Déchets basiques : soude et potasse résiduaires, liqueurs ammoniacales, chaux résiduaires.</p> <p>-Sels résiduaires : sulfate de calcium, carbonate de calcium, sulfate ferreux.</p> <p>-Métaux : ferraille, carcasses de véhicules, déchets de métaux précieux, câbles,...</p> <p>-Déchets organiques : solvants usés, huiles usagées, boues d'hydrocarbures, liqueurs résiduaires, phénols,...</p> <p>-Déchets polymériques : déchets de caoutchouc et de plastique.</p> <p>-Déchets minéraux : déchets siliceux, déchets de silicates ou silico-aluminates, déchets de calcaires.</p> |
| <p>Classification par source de production</p> | <p>-Activités ménagères : ordures ménagères, déchets encombrants.</p> <p>-Déchets industriels spécifiques : laitiers, scories.</p> <p>-Distribution et activité de service : déchets commerciaux (emballages).</p> <p>-Déchets assimilables aux ordures ménagères : emballage, chiffon, balayures.</p> <p>-Déchets provenant de la distribution et des activités de service : déchets de commerce alimentaire, déchets des hôpitaux.</p> <p>-Déchets provenant du secteur primaire : déchets agricoles, déchets d'élevage, déchets végétaux, déchets des industries extractives, déchets des mines (stérile de charbon), déchets de carrières (calcaire, ardoise, marbre, argiles,...).</p> <p>-Déchets provenant du traitement des effluents liquides et gazeux : boue de traitement de l'influent liquide, poussière et cendres volantes de traitement de l'air.</p> |

Tableau I-1.2 : Classification des déchets.

I-1.3 Nature des déchets :

Les déchets peuvent être classés selon leur nature en quatre (04) grandes classes [5] :

Classe I : Les déchets inertes : sans odeurs, non fermentescibles, non toxiques, ils ne présentent pas de risque pour l'homme et pour son environnement.

On y trouve notamment : déblais, gravats, ... etc.

Classe II : Les déchets ménagers et assimilés : ils comprennent les déchets des ménages et les déchets industriels banals (DIB) des entreprises. Non toxiques eux aussi, ils présentent certaines caractéristiques de fermentescibilité. Ce type de déchets (contenant les ordures ménagères et les ordures assimilables) est acheminé vers les Centres d'Enfouissement Technique.

Classe III : Les déchets spéciaux : contenant des éléments nocifs en plus ou moins grandes quantités, ils présentent de grands risques pour l'homme et son environnement et doivent être éliminés avec des précautions particulières. En plus des grandes quantités produites par les petites et moyennes entreprises (PME), certaines quantités de ces déchets sont aussi produites par les ménages. Ce sont par exemples des solvants, peintures, acides, ... etc.

Sont aussi considérés comme des déchets spéciaux, les déchets radioactifs issus pour la plupart des hôpitaux et des centres d'imagerie.

Classe IV : Les déchets ultimes : ce sont des déchets qui ne peuvent plus faire l'objet d'une valorisation.

I-1.4 Caractéristiques des ordures ménagères (Classe II) :

Afin de choisir le mode de valorisation ou d'élimination adéquat, il est impératif de connaître les caractéristiques des déchets. Divers facteurs influent sur la composition et les caractéristiques des ordures ménagères [6]:

- Le caractère de l'agglomération: zone urbaine ou zone industrielle ... etc.
- Le climat et la saison.
- Le type d'habitat et le niveau de vie de la population.

Les ordures ménagères sont en général caractérisées par les paramètres suivants :

a) La densité :

Elle varie suivant les pays et le mode de consommation entre 0,12 et 0,40. On estime que dans le cas des villes algériennes, la densité en poubelle est comprise entre 0,22 et 0,30 ; elle s'élève à environ 0,35 lorsque les ordures sont entassées dans les véhicules traditionnels (bennes basculantes, tracteurs agricoles,...) et atteint 0,45 à 0,55 dans les bennes tasseuses ; enfin, elle retombe entre 0,28 et 0,32 après foisonnement en fosse [6].

b) Le taux d'humidité :

Les ordures ménagères contiennent une grande quantité d'eau qui varie considérablement d'un lieu géographique à un autre et d'une saison à une autre. Le taux d'humidité moyen des

ordures algériennes est estimé à 60 %. Ce taux augmente sensiblement à la saison où les fruits deviennent très abondants [6].

c) Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique des ordures ménagères considérées comme combustibles, s'exprime soit par leur pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui prend en compte la chaleur de vaporisation de l'eau contenue dans les ordures, soit par leur pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui n'inclue pas cette dernière. Les ordures ménagères n'ont jamais été un bon combustible, mais lorsqu'elles contiennent plus de 50 % d'humidité, elles sont peu adaptées à l'incinération [6].

La connaissance des deux paramètres qui sont l'humidité et le PCI est essentielle pour le choix du mode de traitement, incinération ou compostage. L'incinération n'est pas recommandée lorsque le PCI est inférieur à 7200 KJ/Kg, quand au compostage, il est possible pour un taux d'humidité compris entre 45 et 65% [7].

d) Le rapport carbone/azote (C/N) :

La matière organique des ordures ménagères abandonnées à l'air libre, entre rapidement en fermentation sous l'action des milliards de micro-organismes que chaque gramme de déchets renferme. Le traitement par compostage est basé sur une fermentation contrôlée qui aboutit à une perte de carbone sous forme d'anhydride carbonique et enrichissement relatif du milieu en azote [7]. Le rapport C/N est un paramètre qui permet d'apprécier aussi bien l'aptitude des ordures au compostage que la qualité du composte [8]. Expérimentalement, les ordures brutes ont un rapport C/N compris entre 20 et 35, après compostage, il se situe entre 10 et 20 [9].

I-1.5 Tri écologique ou sélectif

Le tri écologique des déchets consiste à séparer et récupérer les déchets selon leur nature pour leur donner une « seconde vie », le plus souvent par le recyclage évitant ainsi leur simple destruction par incinération ou abandon en décharge. L'expression pléonastique tri sélectif est aujourd'hui remplacée par la notion de « collecte sélective des déchets » ou celle de « tri écologique des déchets » [10].

Principe

La mise en pratique du tri des déchets connaît de nombreuses variations d'une commune à l'autre [11]:

- Il est possible de collecter les ordures ensemble et d'effectuer ensuite le tri dans un centre de tri. Cette méthode est rarement employée car le tri est alors compliqué (déchets souillés) et coûteux (main-d'œuvre).
- **La collecte par « apport volontaire »** : les habitants apportent leurs déchets recyclables jusqu'aux points de collecte, les "PAV" (Point d'Apport Volontaire) en général des conteneurs ou des bacs spécifiques installés sur la voirie, ou bien rendent leurs équipements électroniques et électriques au magasin. Cette méthode de collecte permet de récupérer papier, métaux, cartons, plastique et verre mais aussi les piles, vêtements, disques compact ... De la même façon, les déchèteries reçoivent ces

déchets ainsi que des déchets qui ne sont pas acceptés par la collecte en porte-à-porte ou sur les voiries dans les PAV (gros cartons de colis par exemple).

- **La collecte sélective en porte-à-porte** : la commune met à la disposition de ses habitants plusieurs poubelles (deux à quatre selon le niveau de tri) généralement différenciées à l'aide d'un code couleur, ou bien des "poches jaunes" permettant de mettre les 4 principaux déchets dans cette poche directement (papier, carton, plastique et métal). C'est ensuite à eux de trier leurs déchets en fonction de leur nature (organique, métal, plastique, verre, carton ou papier) et de les placer dans la poubelle correspondante. La collecte sélective en porte-à-porte permet de collecter de plus grands volumes que l'apport volontaire, mais son inconvénient est que le tri comporte souvent des erreurs.
- **La collecte mixte** : la collecte est partagée entre apport volontaire et collecte sélective en porte à porte. Par exemple, les emballages et déchets non recyclables sont récupérés en porte à porte, tandis que le verre et le papier peuvent être apportés dans des conteneurs centralisés. La collecte mixte est le plus souvent la solution retenue.
- A noter que la collecte du verre est réalisée quasi exclusivement en apport volontaire dans des colonnes de tri prévues à cet effet en bord de route afin d'éviter aux ouvriers chargés du tri des sacs jaunes dans les centres de tri de se blesser.

Par la suite la commune ou le syndicat intercommunal se charge de la collecte en respectant les différentes filières [11].

Ces déchets, triés ou non, sont généralement stockés dans des endroits spécifiques appelés « Décharges ».

La décharge est le moyen d'évacuation le plus satisfaisant et le plus économique, mais uniquement si le terrain approprié est assez grand et qu'il n'est pas trop éloigné du lieu de production des déchets. Généralement, le ramassage et le transport représentent 75% du coût total de la gestion des déchets solides [12].

Mais ces décharges, après tassement des couches d'ordures, contribuent à la dégradation du paysage et génèrent des nuisances et pollutions comme par exemple : la défiguration du site, la prolifération des rongeurs et des moustiques, dégagements de gaz nocifs...etc.

C'est pour cela que de nos jours, l'enfouissement des ordures est de plus en plus utilisé du fait de ses multiples avantages. Ceci est réalisé dans des centres appelés « Centre de Stockage des Déchets » ou encore « Centre d'Enfouissement Technique ».

I-2 Généralité sur les CET

I-2.1 Définition

Un centre d'enfouissement technique (CET) est une décharge conçue pour le stockage de déchets ultimes en minimisant les risques de pollutions ou contamination de l'environnement [13].

C'est une installation classée pour la protection de l'environnement soumise à autorisation et qui réceptionne les déchets ménagers pour les enfouir dans des fosses appelées « Casiers d'enfouissement ».

Les centres d'enfouissement 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 Ménagers et Assimilés*.
- une ISDND : *Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux* [13].

Le CET est composé de [13]:

- Une zone de service où le contrôle, l'admission et la pesée des déchets se font.
Cette zone abrite également les bureaux, vestiaires et autres locaux.
- La zone d'enfouissement qui comporte les casiers d'enfouissement et la station de traitement des lixiviats.
- Un réseau de voiries (bitumé) relie l'ensemble des éléments composant le CET.

Il est également possible d'installer un centre de tri au niveau d'un CET (dans la zone de service), ce qui permettrait [13]:

- La réduction des volumes de déchets à enfouir ;
- La valorisation des fractions récupérables à partir des déchets ;
- L'amélioration de la qualité des lixiviats qui devront être traités (en l'absence de piles, batteries et métaux récupérés, les lixiviats seront moins chargés en polluants dangereux et donc plus faciles à traiter).

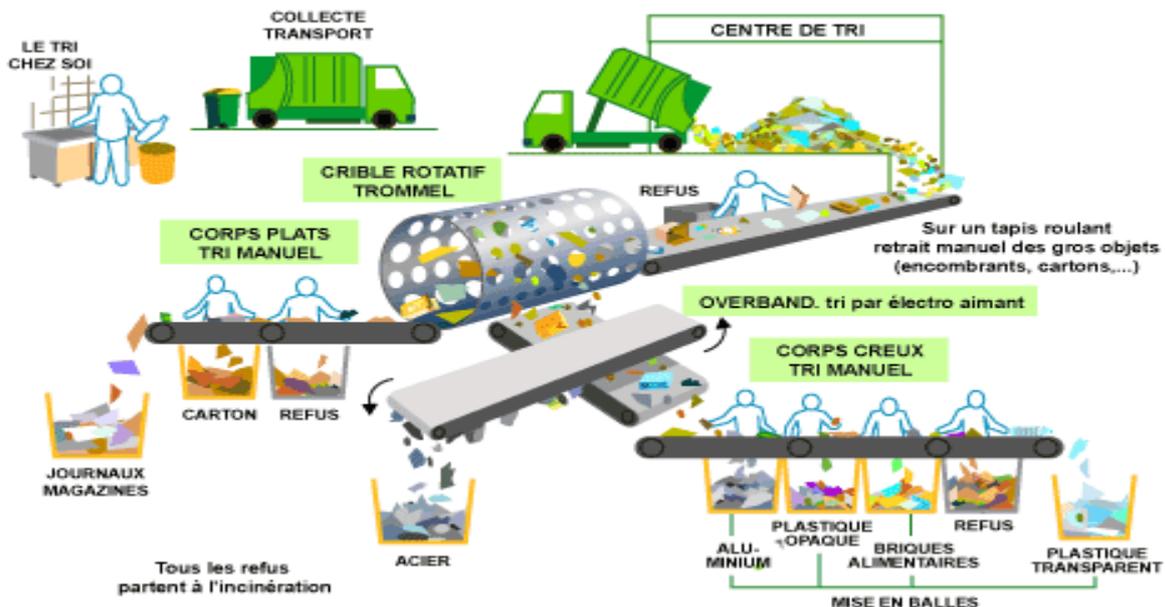


Figure I.2.1 : Centre de tri.

En règle générale, le centre d'enfouissement technique est réalisé pour une population de

100 000 habitants et plus. Il reste cependant possible de réaliser un CET dans une zone de moins de 100 000 habitants mais qui, compte tenu d'activités économiques particulières, produits des quantités anormalement importantes de déchets ménagers et assimilés.

Un centre d'enfouissement technique devrait pouvoir rester en exploitation au moins 20 ans. Il est donc impératif de disposer de la surface de terrain nécessaire et de planifier l'exploitation du site sur la durée de vie minimale sus citée [14].

I-2.2 Classification des CET

| Classe | Type de déchets |
|----------|---|
| Classe 1 | Déchets dangereux |
| Classe 2 | Déchets industriels non dangereux et aux déchets ménagers et assimilés |
| Classe 3 | Déchets inertes |
| Classe 4 | Matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait des travaux de dragage ou de curage |

Tableau I-2.2 : Classification des CET [15].

I-2.3 Structure

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 géo-membrane où sont déversés les déchets. Les casiers, une fois pleins, sont recouverts par un matériau étanche et un système de drainage des lixiviats et de captage du biogaz (explosif et puissant gaz à l'effet de serre est créé). Au pire, le biogaz est éliminé par une torchère afin d'éviter le rejet du méthane dans l'air. Au mieux, il est valorisé en chaleur et/ou en électricité [13].

I-2.4 Installations

Un site de CET comprend plusieurs éléments indispensables à l'enfouissement contrôlé des déchets.

Tout d'abord, son accès est limité aux seules personnes autorisées, ce qui implique une délimitation du site à l'aide de clôtures et la réduction du nombre de points d'accès. Généralement, un seul point d'accès suffit à une exploitation ordinaire.

Un CET comprend généralement plusieurs casiers, exploités successivement, de manière à profiter des équipes d'exploitation pour assurer la post-gestion des casiers précédents, qui se poursuit parfois jusqu'à 30 ans après leur fermeture.

Chaque site peut subir des influences négatives de son environnement, en particulier en matière de ruissellement des eaux pluviales, vis-à-vis desquels toutes les infrastructures du site seront protégées afin de réduire les risques de dégradations et de pollutions accidentelles.

Une surveillance et un contrôle de ces déchets puis leur nivellement selon un programme défini à la conception de la zone de stockage nécessitent la possibilité d'une circulation aisée à l'intérieur du site, ce qui implique la création de routes et de pistes internes. Les déchets sont ensuite déversés dans un casier où ils vont subir une fermentation aérobie puis anaérobie.

Celles-ci sont à l'origine de la production de lixiviats et de biogaz. Le lixiviat chargé en substances organiques polluantes sera épuré avant rejet ou sera évaporé et le biogaz sera capté et incinéré, avec ou sans valorisation de son contenu énergétique, ou bien brûlé à l'aide d'une torchère.

Par ailleurs, afin d'assurer un suivi d'exploitation et environnemental permettant de capitaliser l'expérience acquise et de modéliser les phénomènes biologiques et physico-chimiques actifs dans les casiers et le site, des mesures sont indispensables. Une station météorologique, un pont à pesée, des campagnes de caractérisations des déchets, du biogaz et du lixiviat constituent des outils indispensables à l'amélioration des connaissances et à la professionnalisation du secteur.

Des bureaux, des locaux techniques et sanitaires permettent aux équipes de travailler dans des conditions acceptables [16].

Ci après, un schéma montrant l'ensemble d'un CET avec les structures et installations qu'il comprend est présenté.



1. Contrôle des véhicules à l'entrée et à la sortie du site (identification de la nature des déchets, le pesage et la détection de la radioactivité)
2. Etanchéité active et passive des casiers
3. Collecte et traitement des lixiviats
4. Récupération et valorisation énergétique du biogaz
5. Intégration paysagère du site et suivi de la post-exploitation

Figure I.2.4 : Centre de stockage des déchets non dangereux.

I-2.5 Conception d'ensemble

Dans le contexte Algérien, où l'on cherche à initier des filières contrôlées des déchets, il est important de prévoir des infrastructures dont le coût de fonctionnement, les amortissements et

les charges financières, correspondent à la capacité contributive de la population et des autres producteurs de déchets. Le CET constitue donc, à ce jour, l'élément principal, d'un site de traitement des déchets mais d'ici quelques années, pourrait ne constituer qu'un des maillons d'une gestion des déchets privilégiant le recyclage et la valorisation des déchets [16].

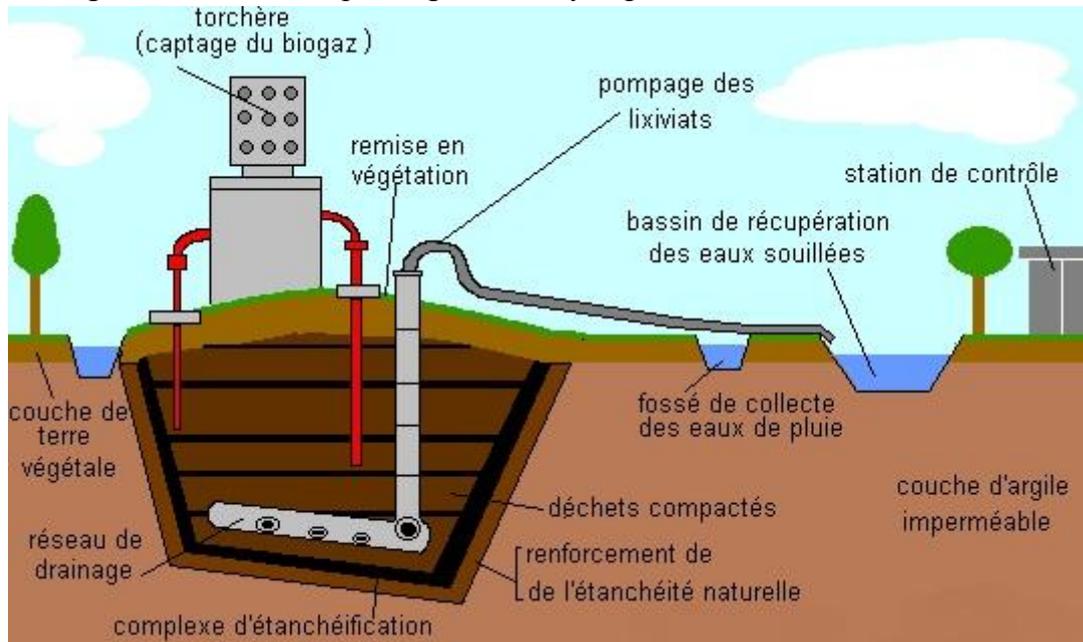


Figure I.2.5 : Coupe d'un CET

Dans la mesure où l'exploitant peut intervenir dans la conception du site, il devrait solliciter l'ingénieur conseil ou le bureau d'étude afin que celui-ci envisage [16]:

- Les casiers du CET (tous les casiers doivent être conçus avant l'équipement du premier casier);
- La circulation et les zones de manœuvre des camions de collectes;
- Le système de collecte, de stockage et éventuellement de traitement des lixiviats et des eaux de voirie;
- Le système de collecte et de stockage des eaux de ruissellement;
- Les zones de circulation des véhicules;
- Un ou plusieurs engins de compaction des déchets;
- Les modalités de maintenance et de réparation des engins;
- Des bureaux, des locaux pour le personnel ouvrier;
- Un pont à pesées équipé d'un système informatique permettant de comptabiliser les apports, leur nature et leur origine;
- La possibilité ultérieure d'un raccordement au réseau de distribution d'électricité, si possible en moyenne tension (15,000 Volts);
- Les modalités d'intervention des services de secours (ambulances, pompiers,...) en cas d'incendie ou d'accident sur les lieux de travail;
- Les zones de stockage des matériaux de couvertures intermédiaire et finale;
- Les unités de traitement ou de valorisation des déchets permettant un détournement des flux mis en CET;

- Au moins deux bornes géodésiques permettant de suivre l'évolution des volumes de déchets et la stabilité des digues [16].

I-2.6 Casier

L'élaboration des casiers étanches répond à des normes précises de sécurité.

Dans un premier temps, une alvéole est creusée.



Elle est ensuite rendue totalement étanche grâce à une épaisse membrane en plastique imperméable entourée par plusieurs couches de matériaux protecteurs. Trois alvéoles superposées composent ce casier.



Ces cavités creusées dans le sol sont équipées d'un système permettant de collecter les lixiviats, alimentés par le ruissellement des eaux de pluie à travers les déchets en cours de dégradation, et d'un autre système de torchère permettant la récupération du biogaz.

Les déchets sont déversés dans le casier depuis un quai de vidage, puis compactés à l'aide d'un engin spécialisé de manière à réduire leur volume mais aussi pour minimiser les odeurs et la prolifération de rongeurs et d'insectes [17].



I-2.7 Géo-membrane

I-2.7.1 Définition

Les géo-membranes sont des géo-synthétiques assurant une fonction d'étanchéité. Elles sont généralement utilisées pour remédier aux pertes d'eau par infiltration, ou pour éviter la migration de polluants dans le sol.

Dans l'état actuel des techniques, ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (inférieure à 1mm), ni les produits dont l'étanchéité est assurée uniquement par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géo-membranes [18].

Les géo-membranes sont généralement fabriquées en polyéthylène, haute et basse densités (PEHD, PEBD), en bitume élastomère, en polypropylène (PP) ou en chlorure de polyvinyle (PVC) [18]. Elles sont généralement stockées sous forme de rouleaux de longueurs et largeurs différentes, pouvant aller de 1m par 10m pour les géo-membranes bitumineuses à 7,5m par 200m pour les géo-membranes en polyéthylène par exemple, et sont souvent thermo-soudables pour réaliser les joints dans des conditions de qualité et de fiabilité optimales [13].

I-2.7.2 Domaines d'emploi

Le plus souvent, les géo-membranes sont utilisées pour assurer [13] :

- L'étanchéité des bassins d'eau ;
- L'étanchéité des retenues collinaires ;
- L'étanchéité des bassins de rétention anti-pollution ;
- L'étanchéité de murs enterrés ;
- Une barrière active des casiers de stockage de déchets;
- Le confinement de déchets liquides.

L'utilisation de la géo-membrane dans la construction des casiers assure une imperméabilité, évitant ainsi toute contamination possible du sol ainsi que des eaux superficielles et souterraines. En fond de décharge, la géo-membrane doit jouer le rôle de barrière étanche et favoriser le drainage des lixiviats. Seules les géo-membrane en PEHD seraient chimiquement résistantes aux lixiviats. Mais elles sont moins faciles à manipuler que celles qui sont en PVC, en EPDM (éthylène propylène diène monomère) ou en bitume [13].

La géo-membrane en PEHD est résistante à la plupart des acides, aux produits pétroliers, aux bases et aux solutions du sel ; elle peut être en contact avec l'eau potable. Elle se dissout seulement dans quelque solution quand la température est plus élevée. Grâce à l'adjuvant de la suie, elle est résistante aux rayons U.V.

Cependant les géo-membrane parfaites n'existent pas. Des défauts peuvent apparaître au cours de la fabrication, du transport, du stockage, de la mise en œuvre (pose et soudure), de la période de fonctionnement. Un nombre typique de 25 défauts par hectare (on suppose la présence d'un défaut tout les 4000m²) a été mesurée dans le fonds de décharges, et les débits de fuites des lixiviats au niveau de ces perforations peuvent être importants.

Une géo-membrane présentant des perforations, des soudures imparfaites, une mauvaise mise en œuvre ne remplit pas son rôle de barrière étanche. Les lixiviats la traversent et atteignent la barrière de sécurité passive. Si la couche argileuse arrive à saturation, les lixiviats pourront atteindre l'aquifère puis, à terme, contaminer les nappes d'eau souterraines. Pour tenter de limiter cette contamination, un système de drainage peut être mis en place sous la géo-membrane pour recueillir les lixiviats [18].

La géo-membrane ne doit pas être considérée comme un élément intervenant dans la stabilisation des pentes naturelles ou artificielles sur lesquelles elle est mise en place.

La pente maximum d'une géo-membrane sur talus ne doit pas dépasser 2 horizontal pour 1 vertical. Dans le cas de pentes plus fortes, ne dépassant pas toutefois 1 pour 1, des dispositifs intermédiaires d'ancrage de la géo-membrane doivent être installés par paliers de 10 mètres maximum sur la hauteur [19].



Figure I.2.7 : Mise et soudure de la Géo-membrane.

I-2.8 Pentes de talus

Les pentes finales de talus des casiers, après compaction, doivent être de 1V pour 3H pour les déchets avant couverture. Le profilage des déchets doit être correctement initié dès le début de l'exploitation en intégrant un tassement de 20%. Le plan d'exploitation fournira les cotes de nivellement et les cotes après tassement de 20%, de manière à permettre l'exploitation

maximale du casier tout en conservant des pentes de talus stables pour la réhabilitation et la post-gestion [16].

I-2.9 Réhabilitation des casiers et récupération du biogaz

Lorsqu'un casier est plein, il est hermétiquement fermé à l'aide d'une membrane puis recouvert de terre pour que la nature puisse y reprendre ses droits. Le casier réhabilité est équipé d'un réseau de récupération du biogaz, issu de la fermentation naturelle (méthanisation) de matières organiques, animales ou végétales, lorsqu'elles sont privées d'oxygène [17].

I-2.10 Revégétalisation

La végétation doit remplir deux fonctions essentielles :

- ◆ Permettre la réintégration paysagère du site dans son environnement ;
- ◆ Protéger le sol contre l'érosion par le développement du système racinaire.

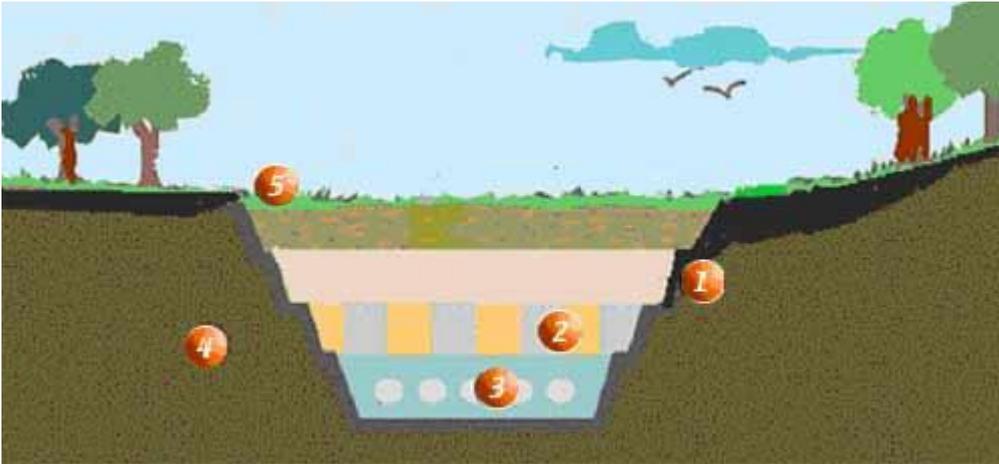
Pour atteindre ce double objectif, il convient de :

- Fournir aux végétaux des conditions pédologiques optimales : humidité, qualité du sol, épaisseur, et de bonnes conditions de milieu : absence de biogaz ;
- Sélectionner des végétaux adaptés aux conditions du milieu.

La revégétalisation ne doit pas être le résultat d'une décision trop simpliste, basée uniquement sur des considérations de choix de plantes disponibles ou économiques à court terme. C'est désormais une démarche réfléchie prenant en compte l'esthétique, l'écologie appliquée, et les considérations économiques sur le long terme.

Ainsi, la conception tient compte à la fois des coûts d'investissement liés à l'achat des plantes, mais surtout aux charges d'entretien et de maintenance sur au moins 30 ans. Il devient alors plus rare de ne prendre en considération qu'une seule forme de revégétalisation pour privilégier un ensemble différencié de différents modes « complémentaires », participant à un équilibre général, compromis entre les intérêts d'esthétique, d'économie et d'acceptation sociale et culturelle notamment [14].

Un casier de stockage des déchets à la fin de son exploitation est schématisé ci-dessous :



1. Aménagement du C.S.D.U. pour confiner le site et protéger l'environnement des infiltrations : une barrière de sécurité naturelle en argile de 5 mètres, une barrière géotextile haute résistance, 3 autres couches de protection (membrane plastique, membrane géotextile, pierre concassée).
2. Stockage dans des alvéoles au sein du centre d'enfouissement technique.
3. Récupération et traitement des lixiviats.
4. Contrôles environnementaux durant l'exploitation et pendant 30 ans à l'issue de l'exploitation.
5. Réhabilitation : à mesure que les alvéoles sont remplies, elles sont recouvertes et revégétalisées.

Figure I.2.10 : Casier de stockage en fin d'exploitation.

I-3 Choix du site

I-3.1 Méthodes de sélection du site

Depuis quelques temps, les procédures de sélection dans la planification de la gestion des déchets utilisent la méthode cartographique par "éliminations successives". Cette méthode permet de déterminer les zones et surfaces qui, en raison de différents critères, ne conviennent absolument pas, celles qui conviennent, mais avec certaines restrictions, et celles qui conviennent à l'aménagement d'une décharge ou un CET. En premier lieu, les critères suivants sont évalués :

- Critères hydrologiques, et en particulier la protection des eaux,
- Critères d'utilisation des surfaces, y compris habitations et transports,
- Critères de protection de la nature.

Dans ce type de procédure, les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques, ne sont considérées que de façon secondaire. Elles ne sont appréciées à leur juste valeur que dans la phase de planification finale. En conséquence, pour des raisons, par exemple, de barrières géologiques ou autres, absentes, ou de conditions hydrogéologiques

défavorables, des sites potentiels de décharge peuvent être abandonnés dans un stade avancé de sélection et de planification, et donc dans un stade avancé de travail préalable. De même, la non prise en compte de la géologie peut encourager des productions sur sites inadaptés. De nombreux exemples, fort coûteux, en font preuve.

Une autre méthode de sélection de sites préconise de mettre en œuvre, en premier lieu, tous les critères non - géologiques. Ensuite, les "surfaces positives" restantes sont jugées en fonction de leurs caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.

Pourtant, cette méthode est source de difficultés, des zones peuvent être éliminées suite à la première phase de sélection (pour des raisons parfois secondaires comme par exemple:

- Distances aux habitations ;
- Plan d'aménagement des forêts.

Alors que du point de vue hydrogéologique, ces mêmes zones auraient été très avantageuses.

Cette expérience montre que des considérations approfondies sur les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques doivent précéder l'ensemble des autres étapes de sélection de sites, ce qui correspond aux recommandations des directives législatives. Par conséquent, dans la procédure de choix de sites, un repérage consciencieux et exhaustif des conditions géologiques, hydrogéologiques et de l'économie de l'eau, doit être la base de toute procédure, que ce soit l'approche par "élimination successive" ou celle par "sélection des surfaces à restrictions" [20].

I-3.2 Définition des Critères

La recherche de sites doit généralement suivre une façon de procéder commune. En premier lieu un catalogue de critères d'exclusion et de restriction relatifs aux intérêts concurrents devrait être dressé. Dans le cadre de la recherche de sites, les termes « exclusion », « restriction » et « considération » signifient:

- Des critères d'exclusion conditionnent à priori l'exclusion d'une zone comme absolument inappropriée, car dans une telle zone l'emplacement d'une décharge causerait d'importantes nuisances pour l'environnement qui ne peuvent ni être exclues ni être efficacement limitées.

- Des critères de restriction aussi nommés critères de « pondération » sont donnés là où, des nuisances pour l'environnement ne peuvent pas être exclues, mais où il est possible d'empêcher par des mesures appropriées une évaporation à longue portée de polluants.

- Critères de considération : Dans le cadre de la recherche de site il faut en plus prendre en considération des aspects qui peuvent avoir de l'influence sur la décision.

Le tableau ci-dessous nous montre les critères dont on doit tenir compte pour un bon choix du site [20].

| | Critères d'exclusion | Critères de restriction | Critères de considération |
|---|---|--|---|
| Critères Généraux | <ul style="list-style-type: none"> -Zones militaires d'exclusion -Parcs nationaux -Zones naturelles protégées -Zones avec une distance entre les limites du site et les zones d'habitation le plus proche inférieur à deux cents (200) mètres -Zones avec une distance entre les limites du site et les zones de protection du patrimoine naturel ou culturel inférieur à deux cents (200) mètres. -Zones avec une distance à un aéroport inférieur à 5 km. -Zones avec mines souterraines. -Marécage | <ul style="list-style-type: none"> -Relief topographique. -Situation morphologique. -Volume disponible. -Nuisances préalables. -Plan régional. -Réserve naturelle. -Distance à urbanisations. -Opposition du public. -Effet des émissions (odeur, bruit, vermine, poussière). | <ul style="list-style-type: none"> -Météorologie. -Distance au lieu principal de production de déchets. -Transit d'agglomération humain. -Réseau de transport. -Propriétaire du terrain. -Utilisation du site. -Nuisances générales du panorama, visibilité. -Protection des espèces et des biotopes. -Présence d'électricité et autre infrastructure. -Distance à une station de traitement des eaux usées. -Présence d'argile. |
| Critères géologiques - géotechniques | <ul style="list-style-type: none"> -Priorité des matières premières et surfaces de réserves de matières premières (le cas échéant aussi uniquement comme critère de restriction); -Zone avec risque de tremblement de terre; -Risque de glissement, d'effondrement et de | <ul style="list-style-type: none"> -Barrière géologique manquante ou bien insuffisante; -Terrain accidenté (surface en pente, incision de vallée); -Couche de surface aquifère au dessus d'une barrière géologique ; -Emergence d'eau de source, stratifié et de | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | <p>cavités souterraines qui ne peuvent pas être éliminées ;</p> <p>-Situation morphologique extrême (escarpement, haute montagne) ;</p> <p>-Monument naturel géologique.</p> | <p>penne dans la zone de la décharge;</p> <p>-Zone avec risque de glissement et avec forte sensibilité d'abaissement ;</p> <p>-Carrière en exploitation ou désaffecté avec importantes failles, qui ne peuvent pas être étanchées (par ex. par pression de ciments);</p> <p>-Distance trop petite par rapport à des carrières en exploitation (ou éventuellement à remettre en exploitation), où l'exploitation se fait par explosion ;</p> <p>-Faible connaissance et peu de données de base sur la géologie et l'hydrologie ;</p> <p>-Zones failleuses.</p> | |
| <p>Critères de la gestion de l'eau</p> | <p>-Périmètres de protection de ressources en eau potable existantes où planifiées ;</p> <p>-Zone prioritaire de gestion d'eau, plan régional ;</p> <p>-Zone avec une distance à la nappe phréatique plus haute inférieure 1m ;</p> <p>-Zone karstique avec une faible couverture peu perméable, ainsi que karst ouvert ;</p> <p>-Zones dans lesquelles</p> | <p>-Périmètre de protection de sources thermales (médicinales);</p> <p>-Zone avec une faible profondeur (< 2m) de la nappe libre ou captive.</p> | <p>-Clarté sur la situation des eaux souterraines ;</p> <p>-Possibilités de dérivation des eaux d'infiltration en pente libre ;</p> <p>-Milieu récepteur suffisamment grand pour les eaux de surfaces et les eaux pluviales collectées ;</p> <p>-Pas de barrage des écoulements naturels existants par l'emplacement de la décharge;</p> <p>-Evacuation assurée du lixiviat de la décharge.</p> |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | se trouvent des roches fissurées perméables sans une couverture difficilement perméable avec une épaisseur suffisante ; -Zone d'inondation | | |
|--|--|--|--|

Tableau I-3.2 : Critères d'un bon choix du site

I-3.3 Procédure de sélection des sites

En premier lieu, il est nécessaire de regrouper le matériel cartographique (topographique ; géologique ; hydrogéologique ; plans régionaux ; etc.) significatif pour l'ensemble de l'étude. En effet, la disponibilité des données et informations est la condition première pour une recherche effective et utilisable. Souvent il est possible de recourir à du matériel déjà existant: par exemple en recourant à des cartes géologiques et hydrogéologiques, à des cartes des sols et sous-sols, à des mémoires et thèses ainsi qu'à toute évaluation des données résultant des forages et autres interventions similaires.

A côté des structures et institutions de la zone d'étude, il convient de considérer comme partenaires locaux les offices de planification, les offices et institutions nationales, les offices des eaux et forêts, les sociétés de forages et les universités [20].

La procédure suivante est proposée [20] :

- Acquisition et évaluation des données géologiques et hydrogéologiques, si possible exhaustives ;
- Saisie de toutes surfaces pour lesquelles des critères d'élimination géologiques-géotechniques, et/ou relatifs à l'économie de l'eau: hydrogéologiques, peuvent être appliqués ;
- Recherche des domaines avec existence de barrières géologiques ou autres conditions géologiques favorables (sites positifs) ;
- Intégration des critères restrictifs/limitatifs et évaluation de leurs conséquences sur la qualification des surfaces nommées précédemment, y compris saisie des critères d'exclusion relatifs à des petites surfaces à éliminer (par exemple: monuments géologiques naturels).

Sur la base de ces évaluations : Elaboration de cartes de base [Echelle = 1 : 50.000; 1 : 25.000; et dans des cas particuliers si nécessaire 1 : 5.000], sur lesquelles sont reportées [20] :

- Les surfaces offrant des conditions favorables, i.e. candidates à des examens approfondis (catégorie I).
- Les surfaces offrant des conditions favorables mais avec certaines restrictions, i.e. candidates à des examens approfondis avec certaines réserves (catégorie II),

- Les surfaces offrant des conditions défavorables, i.e. qui, du moins dans un premier temps, ne sont pas retenues comme candidates à des examens approfondis (catégorie III),

Selon des critères géologiques, géotechniques, hydrogéologiques-d'économie de l'eau.

Bien évidemment, il est possible de procéder à des différenciations supplémentaires. Mais ceci peut conduire à des confusions. Le système cartographique résultant des procédures décrites précédemment constitue la base de toute représentation cartographique de surfaces et sites potentiels.

La carte de base peut, le cas échéant, être divisée en représentations individuelles, par exemple [20] :

- Des cartes hydrogéologiques-d'économie de l'eau avec aperçu de la situation générale des eaux souterraines dans la zone d'étude. Dans la mesure du possible, ces représentations doivent mettre en évidence les courbes de niveau des eaux souterraines, en particulier dans les domaines où, en cas de construction de décharge, des conséquences néfastes sur l'approvisionnement en eau potable (déjà existants ou prévus) sont à craindre.

- Des cartes géologiques et géotechniques, des cartes représentatives des matières premières existantes, sur lesquelles, par exemple, les domaines et zones à barrières géologiques avantageuses apparaissent de façon explicite.

Sur la base des enquêtes précitées, il est possible d'établir une représentation cartographique des zones favorables, ou favorables sous réserve (carte positive) à la création d'une décharge. Cette carte peut servir, si elle est imprimée sur un transparent, à compléter les deux cartes détaillées ci-dessus.

Lorsque ces "cartes de base" sont disponibles, il est généralement raisonnable d'intégrer aux "surfaces potentielles" (c'est-à-dire ayant des conditions favorables ou favorables sous réserve), souvent en faible nombre, les autres surfaces à restrictions, telles celles relatives à la protection des émissions, à la protection de la nature, à l'utilisation des surfaces etc. Dans la plupart des cas, on peut constater que les surfaces restantes ont fortement diminuées [20].

C'est à ce stade de l'étude qu'il convient de faire des propositions exactes de sites pour décharges.

S'il est possible de faire, parmi les surfaces restantes, des propositions concrètes de site, il importe, dans une optique d'aménagement de l'espace, de procéder à des pas supplémentaires dans les domaines: géologiques - géotechniques, hydrogéologiques - économie de l'eau. Par exemple [20] :

- Visite des sites choisis avec évaluation approfondie du terrain, s'il y a lieu avec jugement des représentants des offices sectoriels concernés,

- Premiers pré-examens géologiques et hydrogéologiques dans le but de confirmer les appréciations dont il a été tenu compte jusqu'à présent (forages, aménagements d'échelles d'eau),
- Seconde évaluation des sites potentiels à l'aide des résultats des examens effectués,
- Rédaction d'un rapport d'expertise à joindre à la demande d'aménagement de l'espace ; le rapport devrait inclure:
 - ◆ Description de tous les sites retenus, avec explication de la procédure de sélection suivie,
 - ◆ Description rapide, avec explication, de tous les sites ayant été pris en compte lors de la procédure de sélection, mais non retenus par la suite.

Dans le même contexte, il s'est avéré approprié de procéder à une coopération précoce entre l'élaborateur du rapport d'une part, et les offices sectoriels d'autre part. Dans le passé il était fréquent de proposer un grand nombre de sites (au premier abord) potentiels. Les offices sectoriels effectuaient alors des études étendues, précises, nécessitant beaucoup de temps, pour ensuite rejeter tous, ou dans le meilleur des cas, presque tous, les sites proposés. Ainsi, il va de soi, que les travaux présentés ci-dessus, ne peuvent être effectués que par des experts compétents, ayant des connaissances approfondies des particularités régionales et locales [20].

I-4 Impact sur l'environnement

I-4.1 Les nuisances et les risques

La mise en décharge de déchet, quelle que soit leur nature, s'accompagne de phénomènes complexes relevant des interactions entre les constituants des déchets, les eaux de pluie qui s'infiltrent dans la masse des déchets, et le substrat constitutif du site. La décharge en elle-même doit être considérée comme un milieu en perpétuelle évolution, siège de réactions physico-chimiques et biologiques. Les conséquences directes de ces réactions sont la libération de gaz et la formation de lixiviats.

On va voir dans ce qui suit les effets de ces conséquences non seulement sur le site lui-même mais aussi sur ce qui l'entour. Cette étude a été divisée en deux :

- ◆ Les nuisances
- ◆ Les risques
- **Les nuisances :**

Pollution olfactive: les odeurs fortes, putrides, irritantes ou irrespirables générées par les fuites de biogaz (et aussi par leur combustion), avec des pics intolérables associés au vent (directions privilégiées, ou bien chutes prolongées), à la température, ou à certaines conditions saisonnières.

Pollution mécanique: ballet aériens de sacs en plastique et nuages de poussières s'accumulant sur les cultures, les vergers, potagers et propriétés individuels; boues liquides, lixiviats et

détritus divers s'échappant des bennes de camions et se répandant sur les routes d'accès. Les habitations les plus proches sont servies par les déjections de mouettes et goélands, et quotidiennement recouvertes d'une couche de fine poussière. Le trafic intense et incessant des camions provoque annuellement une dégradation substantielle des routes.

Pollution routière: trafic intense et continu de camions sur les petites routes, mobilisant parfois la seule route d'accès aux villages et ralentissant le trafic normal des usagers et riverains sans possibilité de dépasser. A cela il faut ajouter la pollution produite par les gaz d'échappement des camions (poussières d'émission diesel, monoxyde de carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP], plomb..).

Pollution sonore: liée au va-et-vient incessant des camions, incluant les inévitables "nocturnes", produisant sur une petite départementale autant de bruit qu'une nationale et un sifflement très perceptible parfois jusqu'à 2km.

Sur le site: les bruits divers de déchargement, klaxons de recul et de manœuvres de chantier, broyeuse de déchets, compactages par les bulldozers et tirs de canon réguliers pour effaroucher les oiseaux.

Multiplication des prédateurs: prolifération d'espèces animales telles que mouettes, goélands, corbeaux, corneilles, rapaces, rats, lapins, chiens errants, mouches, moustiques et autres insectes, attirés par la nourriture et la chaleur de fermentation du sol (35°C à 80°C); ils apportent déjections et fientes comme des risques d'épidémies dans les villages avoisinants; ils détruisent les plantations environnantes à tout moment du cycle agricole (plantation, jeunes pousses, récolte). Les colonies d'oiseaux introduisent également des risques épidémiologiques graves pour la santé des enfants et des personnes fragiles, et les rongeurs de décharge sont porteurs de maladies transmissibles à l'homme [21].

Effet sur la végétation : Il arrive que le mélange gazeux s'exhale à la périphérie de la décharge. Dans ce cas, il entraîne une altération de la végétation existante dans la zone avoisinante. Le même mélange gazeux peut également nuire au reverdissement d'une décharge après exploitation (asphyxie des racines) [22].

Impact paysager: dégradation liée à la pollution mécanique, au trafic intense des camions sur les petites routes; mais aussi le spectacle hideux du monticule (dôme) avec ses torchères et son nuage de mouettes, visible à plusieurs kilomètres, sur une période que l'on peut estimer à au moins 100 ans [21].

Dévaluation des biens: la valeur de l'immobilier et des commerces chute de 30% à 50% dans un rayon d'au moins 10km.

➤ Les risques :

Maladies bactériologiques et virologiques introduites par les prédateurs: les colonies d'oiseaux, en particulier de mouettes et goélands, sont avantagés par leur accès aérien et

journalier à la surface de la décharge (le "front des déchets"), autrement recouverte de terre chaque semaine.

A ce jour, toutes les diverses mesures prises contre ces colonies d'oiseaux sont restées sans succès: mise en place de fils ou filets, stérilisation des œufs, abattage périodique sur site, pyrotechnie, tirs de canon au propane, introduction de faucons et buses. Les bactéries véhiculées par les oiseaux sont du type *Listeria*, *Salmonella*, *Campylobacter* ou *Yersinia*. De telles bactéries provoquent des pathologies sur l'animal (avortements chez les ovins et bovins) et sur l'homme (diarrhées aiguës, céphalées, crampes abdominales, nausées, syndrome de Guillain-Barré et septicémies) avec un risque sensiblement plus élevé chez les jeunes enfants. Les rongeurs de décharge (en particulier les colonies de rats) sont porteurs de maladies bactériennes transmissibles à l'homme (zoonose). Parmi elles existe la redoutable leptospirose. Les symptômes associent fièvre, frissons, douleurs musculaires et céphalées. Les signes évoluent en quelques jours avec atteintes viscérales, jaunisse, insuffisance rénale et même méningite hémorragique. Il faut être vacciné contre elle, car l'antibiothérapie, sauf très précocement appliquée, reste sans cure [23].

Production et récupération des lixiviats: les lixiviats ou "jus de percolation" résultent du passage des eaux de pluie à travers les déchets, et le drainage comme la formation de différents composés toxiques qui en résulte. Il faut se représenter un liquide noirâtre constitué de bactéries en tous genres, d'hydrocarbures, de substances chimiques corrosives (sulfates, chlorures, nitrates, et acides apparentés), et de métaux lourds (plomb, cadmium, mercure, nickel). Les lixiviats transportent également, sous forme dissoute et donc concentrée, les dangereux composants des biogaz [24].

Pollution de la nappe phréatique: celle-ci est causée par ruptures, perforations accidentelles et attaques chimiques sur la géo-membrane, et donc sa mise en contact à terme avec les lixiviats. Le matériau constituant celle-ci (PEHD) peut être fragilisé chimiquement par des produits présents dans les lixiviats et mécaniquement par effet de cisaillement ou percement par des déchets tranchants (déchirure de la géo-membrane), la possibilité d'éclatement sous la pression locale (effet de pente) aux différences de densité et aux tassements naturels mais hétérogènes des masses en décomposition ou mécaniquement induits à partir de la surface par le passage des camions ou des bulldozers (pour le compactage des déchets). Mais aussi la difficulté de manipulation des géo-membranes : défauts de fabrications, transport, stockage et le soudage [25].

Caractéristiques et toxicité des biogaz. Les biogaz contiennent certaines substances hautement toxiques et cancérigènes, qui les rendent très dangereux à respirer directement. L'idée est de les brûler (car ils sont inflammables à cause de leur composition en méthane) sur place au moyen de torchères. Mais leur combustion à une température en-dessous de 1200°C génère différentes dioxines et hydrocarbures lourds.

Une autre solution étant de les valoriser par recyclage en énergie électrique, pour alimenter l'éclairage du site ou la station d'épuration des lixiviats. Mais il existe un problème important qui est la pollution résultant d'un tel recyclage: les gaz d'échappement des moteurs à biogaz

sont notoires pour la production de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures hors-méthane (dits NMHC, tels benzène, toluène, xylène, ethyl-benzène), composés halogénés (chlore, fluor) ou soufrés (mercaptans), dont les différentes caractéristiques sont malodorantes, irritantes, asphyxiantes, toxiques et/ou cancérogènes [26].

Explosions : Des risques d'explosions existent essentiellement à la surface du dépôt car le mélange air-méthane peut s'avérer dangereux quand l'hydrocarbure atteint des proportions de l'ordre de 5 à 15 %. Cependant, ce biogaz peut représenter une source d'énergie du fait qu'il est composé en partie de méthane dont la PCI est de 8.56 th/m^3 . À 60 % en méthane, il présente un PCI de 21468 kJ/m^3 , d'où l'intérêt de son captage et de sa valorisation [22].

Pathologies liées à l'exposition aux biogaz (et effets similaires ou croisés, dus à la pollution de l'eau par les lixiviats): celles-ci affectent les yeux, la peau et voies respiratoires, le cœur, le foie, et le système nerveux central. Certaines sont également accompagnées de cancers, d'affaiblissement du système immunitaire, voire de malformations congénitales [23].

I-4.2 Impact des interférences sur les particules argileuses :

I-4.2.1 Au niveau macroscopique :

Il peut y avoir altération des argiles au cours du temps lié à la solubilisation de la silice par des solvants acides ou basiques provoquant par exemple des microfissures [27].

I-4.2.2 Au niveau microscopique :

Il peut se produire une évolution de la perméabilité des argiles. En effet deux phénomènes sont susceptibles de se produire [27] :

- Diminution du coefficient de perméabilité qui s'expliquerait par une décroissance de la taille des pores, due au gonflement des particules argileuses entraînant un retard de la transmission des fluides ;

Ou :

- Augmentation du coefficient de perméabilité due d'une part à une contraction des particules argileuses lorsque l'eau inter-feuillet est chassée en créant des mini-canaux par lesquels les fluides s'écoulent plus rapidement et d'autre part à un agrandissement de la taille des pores de la matrice qui peut être constaté après passage continu de solutions plus ou moins corrosives.

CHAPITRE II :
MATERIELS ET
METHODES

II-1 Carottage

II-1.1 Définition

Le carottage est une technique de prélèvement d'échantillons qui consiste à forer un substrat à l'aide d'une tarière pour obtenir un cylindre de matière.

L'analyse de la stratification de ce cylindre permet alors de reconstituer la nature d'un sol (carotte de sédiments), une chronologie (carotte de bois) ou encore la composition de l'atmosphère du passé (carotte de glace) [28].

II-1.2 Méthode

II-1.2.1 Carottage en rotation

Il s'agit de découper un échantillon de roche et le remonter en surface pour identification visuelle et passage, en tout ou partie, en laboratoire pour essais (géotechnique), ou évaluation (recherche minière).

Les premiers échantillons complets ont pu être obtenus en mettant en rotation un tube épais, fendu sur la partie au contact de la roche. Cette fente permet de laisser passer l'eau destinée à refroidir le métal en contact avec la roche et de remonter les débris de découpage. Le découpage se fait en introduisant de la grenaille d'acier (grains de 1,5 à 4 mm de diamètre), par l'intermédiaire des tiges. En ajustant au mieux les paramètres de rotation et poussée, la roche est découpée par usure. Il en est de même pour le tube et les grains de grenaille à renouveler régulièrement, ainsi que pour la fente, approfondir.

Pour récupérer l'échantillon découpé, il faut le coincer dans le tube en introduisant, par l'intermédiaire de l'injection, des grains de sable ou petit gravier, entre la carotte et les parois du tube [29].

Depuis, les outils de découpage et les équipements destinés à récupérer les échantillons de roche ont beaucoup évolué. Une amélioration significative a été apportée en 1923 par l'apparition d'un métal très dur (positionné entre 9 et 9,2 sur l'échelle de MOHS). Il s'agit du Widia, mélange de poudre de tungstène et de noir de fumée, auquel on ajoute du cobalt. Positionné sous forme de prismes et de façon judicieuse, il permet le carottage dans les roches. Son usure rapide dans les roches abrasives présente cependant un handicap important.

Les premières couronnes, utilisant les diamants impropres en joaillerie, ont permis d'augmenter de manière significative les performances dans les roches les plus dures.

Mais, la véritable révolution dans le domaine du carottage dans les roches a été l'apparition des couronnes à imprégnation diamantée ou couronnes à concrétion diamantée [29].

II-1.2.2 Matériels

Nous nous intéresserons successivement aux [29]:

- Carottiers, conteneurs dans lequel la carotte est retenue ;
- Tiges entraînant le carottier ;
- Outils de découpage de la carotte.

II-1.2.2.1 Carottiers

Ils sont répartis en trois groupes principaux [29]:

- simple ;
- double ;
- à câble.

Le diamètre, exprimé en millimètres pour les systèmes métriques et par des lettres dans les systèmes anglo-saxons, fait toujours référence au diamètre extérieur de l'outil de coupe. La longueur du carottier (système métrique ou anglo-saxon) exprime la capacité de l'échantillon pouvant être reçu.

Ces carottiers se trouvent en différentes longueurs, s'adaptant aux machines qui les mettent en œuvre ou pour répondre à certains impératifs de limitation de place en hauteur.

- **Carottier simple**

Dans ce type de carottier, l'échantillon découpé pénètre directement dans le tube et subit donc l'action de l'injection, ainsi que la rotation du tube.

Les carottiers simples sont répartis en deux groupes : B et T.

- Dans le type T, l'extracteur servant à retenir la carotte lors de la remontée est logé dans un système appelé « porte-extracteur ». Ce système rend plus efficace le maintien de l'échantillon lors des manœuvres du train de tiges.
- Diamètres normalisés pour les carottiers de type B et T : 46-56-66-76-86-101-116-131-146 (mm).

- **Carottier double**

Dans ce type de carottier, la carotte découpée pénètre rapidement dans un deuxième tube, nommé « tube intérieur ». Elle se trouve donc protégée de l'érosion éventuelle provoquée par l'injection. De plus, le tube intérieur est fixé sur une tête pivotante (butées à billes), qui évite à l'échantillon de se mettre en rotation et le préserve des frottements avec le tube porteur.

Les carottiers doubles sont répartis en 4 groupes : T2 – T6 – T6S – K2.

- Les carottiers doubles de types T2, T6 et T6S se différencient surtout par le diamètre intérieur de la couronne. Il est préférable de choisir un carottier T6 ou T6S pour la traversée de roches fracturées.

Un autre avantage des carottiers T6 est qu'ils peuvent être modifiés en carottiers triple enveloppe, par l'introduction d'une enveloppe translucide à l'intérieur du tube interne.

Les carottiers de type T2 sont fournis dans les diamètres 46 à 101 mm.

Ceux des types T6, T6S et K2 de 76 à 146 mm.

- Les carottiers de type K2 ont des enveloppes extérieures plus épaisses et sont surtout utilisés pour le carottage dans les roches très dures et fracturées. En contrepartie, les « lèvres » de la couronne sont plus épaisses, ce qui a une incidence sur la poussée nécessaire pour pénétrer et un coût plus élevé (figure II-1.2.1).

DT2
double pivotant

Le carottier double tube, conçu pour l'emploi de couronnes à paroi mince peu chargées en diamants et donc peu coûteuses, assure une vitesse de pénétration élevée. L'échappement du fluide, qui s'opère à quelques millimètres de la base de la couronne, réduit les risques d'érosion de la carotte.

| Carottiers dimensions | Couronnes | | | | Aléseurs | |
|-----------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | Ø extérieur | | Ø intérieur | | Ø extérieur | |
| | mm | in | mm | in | mm | in |
| 46 | 46,1 | 1,815 | 31,9 | 1,256 | 46,6 | 1,835 |
| 56 | 56,1 | 2,209 | 41,9 | 1,650 | 56,6 | 2,228 |
| 66 | 66,1 | 2,602 | 51,9 | 2,043 | 66,6 | 2,622 |
| 76 | 76,1 | 2,996 | 61,9 | 2,437 | 76,6 | 3,016 |
| 86 | 86,1 | 3,390 | 71,9 | 2,831 | 86,6 | 3,409 |
| 101 | 101,1 | 3,980 | 86,9 | 3,421 | 101,6 | 4,000 |

DB.GC
double pivotant

Ce carottier ne diffère du carottier à câble CABL-O-MATIC qu'au niveau de la tête : le système de verrouillage et la tête d'accrochage du CABL-O-MATIC y sont remplacés par une tête de carottier double conventionnel qui peut recevoir des tiges DCDMA, métriques ou wireline. Le carottier DB.GC permet la détection immédiate du blocage des carottes. Son système à soupape réglable permet, en trou sec, de maintenir le train de tiges rempli d'eau. Il peut être utilisé comme carottier à triple tube ou à trouse coupante. Il permet enfin l'utilisation de couronnes à décharge faciale (bottom discharge).

| Carottiers dimensions | Couronnes | | | | Aléseurs | |
|------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | Ø extérieur | | Ø intérieur | | Ø extérieur | |
| | mm | in | mm | in | mm | in |
| DB.GC à paroi normale | | | | | | |
| ADB.GC | 47,6 | 1,874 | 27,0 | 1,063 | 48,0 | 1,890 |
| BDB.GC | 59,6 | 2,346 | 36,4 | 1,433 | 60,0 | 2,362 |
| NDB.GC | 75,3 | 2,965 | 47,6 | 1,874 | 75,7 | 2,980 |
| HDB.GC | 95,6 | 3,764 | 63,5 | 2,500 | 96,1 | 3,783 |
| PDB.GC | 122,2 | 4,811 | 85,0 | 3,346 | 122,7 | 4,831 |
| SDB.GC | 145,3 | 5,720 | 108,2 | 4,260 | 146,1 | 5,752 |
| DB.GMC à paroi mince | | | | | | |
| 46DB.GMC | 46,1 | 1,815 | 30,3 | 1,193 | 46,6 | 1,835 |
| ADB.GMC | 47,6 | 1,874 | 30,3 | 1,193 | 48,0 | 1,890 |
| BDB.GMC | 59,6 | 2,346 | 42,0 | 1,654 | 60,0 | 2,362 |
| NDB.GMC | 75,3 | 2,965 | 57,1 | 2,248 | 75,7 | 2,980 |

Les dimensions données sont des moyennes approximatives

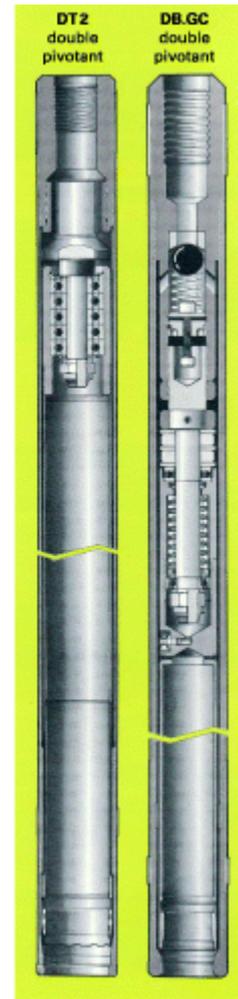


Figure II.1.2.1 : Exemples de carottiers doubles

- **Carottier à câble**

Ce carottier, connu en anglais sous la dénomination de *Wire Line Core Barrel*, est un carottier double (figure II.1.2.2). Mais, contrairement aux équipements précédents, il n'est pas indispensable de remonter le carottier en surface pour récupérer la carotte. Le tube intérieur est désolidarisé du tube extérieur au moyen d'un système de déverrouillage (*overshot* ou pince de repêchage), qui est descendu à l'intérieur des tiges au moyen d'un câble.



Figure II.1.2.2 : Exemples de carottiers à câble

Ce système présente un avantage certain sur les systèmes de carottiers dits « conventionnels » :

- Gain de temps incontestable dans la récupération de l'échantillon ;
- Moins de perturbations dans le sondage, en particulier dans les horizons fracturés.

Cependant, au vu de l'investissement financier, son achat, s'il se justifie dans le domaine de la recherche minière, ne présente d'intérêt, en géotechnique, qu'à partir d'une profondeur de carottage de 40 mètres.

II-1.2.2.2 Tiges de carottage

On distingue principalement deux groupes de tiges [29] :

- Pour carottage conventionnel ;
 - Pour carottage au câble.
- Les tiges conventionnelles se présentent principalement sous deux formes :
 - En acier avec raccord séparé, proposées dans les diamètres suivants : 32, 42 et 50 mm ;

- En acier avec raccord soudé, proposées dans les diamètres suivants : 60, 76, 89 et 114 mm.

Afin de répondre aux différentes interventions, toutes ces tiges sont proposées en différentes longueurs.

- Les tiges de carottage au câble sont spécifiques pour ce type de prélèvement. Afin de permettre le libre passage du tube intérieur et du système de déverrouillage de ce dernier, ces tiges sont absolument lisses à l'intérieur, y compris au niveau de leur connexion. Ceci est obtenu grâce au filetage légèrement conique taillé dans l'épaisseur du métal.

Les diamètres ne sont plus exprimés en millimètres, mais se retrouvent dans la dénomination anglo-saxonne : AQ – BQ – NQ – HQ – PQ.

Pour simplifier, une tige BQ, par exemple, entraînera un carottier BQ.

II-2.2.2.3 Outils de carottage

Par son impact financier, l'outil de carottage tient une place importante dans le calcul du prix de revient du mètre carotté dans les roches. Contrairement au matériel tubulaire, où les choix ne sont dictés que par le type de machine et la profondeur à atteindre, l'évolution technique des outils de carottage et, en particulier des outils diamantés, impose un choix basé sur une connaissance précise des matériels, tant la variété des outils est importante.

Cette large variété permet d'améliorer les performances (durée de vie, donc métrage plus important) mais, en contrepartie, elle introduit des possibilités d'erreur [29].

II-1.3 Récupération de la carotte

La carotte est l'image fidèle du terrain traversé, l'échantillon est donc très précieux et doit être traité avec beaucoup de soin. Il est donc recommandé de :

- a. Embaucher des foreurs expérimentés.
- b. Si les trous doivent être longs, ou la roche de mauvaise qualité, choisir un fort diamètre pour avoir la possibilité de diminuer en cours de forage. Plus le diamètre est gros, meilleure est la récupération.
- c. Le foreur doit surveiller la pression exercée sur la foreuse, la vitesse de rotation, le débit et la nature du fluide.
- d. A l'approche du minerai, il faut diminuer la longueur des passes pour éviter la perte de carottes par usure (fragments coincés).
- e. En cas de perte de carotte, demander au foreur de recueillir les boues du passage dans le minerai.
- f. Dans les terrains difficiles (friables), utiliser une boue légère à la place de l'eau (eau + argile, bentonite, huile) qui assure la remontée des débris plus gros et dépose un film protecteur qui consolide les parois. On peut aussi utiliser un tube carottier à paroi triple qui empêche le contact de l'eau avec la carotte à la base du sondage [30].

II-1.4 Rangement des carottes

Les carottes sont placées par le foreur dans des boîtes rainurées spécialement conçues à cette fin. Chaque boîte, d'une longueur de 5' peut contenir cinq rangées, soit 25' de carottes. Il est très important pour le géologue de bien s'entendre avec ses foreurs sur la façon de disposer les carottes dans les boîtes. La méthode la plus courante consiste à les disposer selon l'ordre naturel de lecture, i.e. :

$$0' >>>>> 5'$$

$$5' >>>>> 10'$$

Chaque passe de 10' de longueur occupe deux rangées de la boîte. Lorsque des sections de carottes ne sont pas récupérées, il faut placer des baguettes (préparées à l'avance) ou des bouts de branche à la place.

La lecture doit toujours donner la distance précise du collet du trou.

Ainsi, avec 80' de mort-terrain, les trois premières boîtes de 25' sont inexistantes puisqu'on commence à compter au collet du trou. La boîte n°4 doit porter à l'intérieur et à l'extérieur (dans le bout) une note indiquant la non-existence des trois premières boîtes.

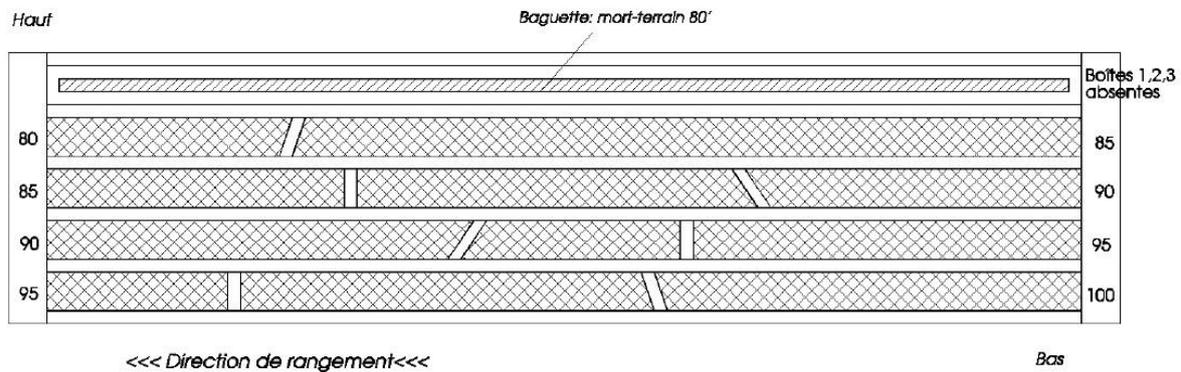


Figure II.1.4 : Disposition des carottes

N.B. Le carottier à câble (Wireline) peut être ouvert par le haut (plus fréquent) ou par le bas. Il faut donc disposer les carottes en conséquence.

Le rangement des carottes et l'étiquetage des boîtes est la responsabilité du foreur, mais le géologue doit s'assurer que les indications dans le bout des boîtes sont rigoureusement fidèles à la réalité. La moindre erreur de disposition des carottes ou d'identification des boîtes risque de compromettre la pertinence de l'information recherchée. L'étiquette doit porter le nom du projet, le n° du trou et la profondeur couverte à partir du collet [30].

II-2 Propriétés du sol

II-2.1 Description

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est nécessaire de définir certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent le squelette solide, l'eau et l'air constituant le sol [31].

Pour cela considérons la représentation suivante d'un sol dans laquelle les trois phases sont séparées (figure : II.2.1).

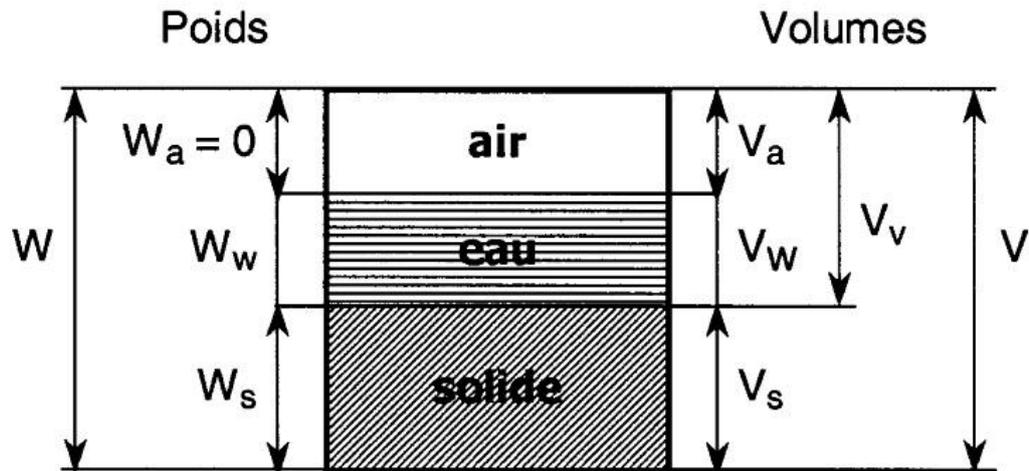


Figure II.2.1 : Poids et volumes des différentes phases

Notations conventionnelles [31]:

W : poids total du sol

W_s : poids des particules solides

W_w : poids de l'eau

V : Volume total (apparent)

V_s : Volume des particules solides

V_v : volume des vides entre les particules

V_w : volume de l'eau

V_a : volume de l'air

Avec les relations:

$$W = W_s + W_w$$

$$V_v = V_w + V_a$$

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

On définit en outre les poids volumiques qui, avec les poids et volumes, constituent les paramètres dimensionnels :

- le poids volumique des particules solides (de la matière constituant les grains solides)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \text{sable et argile} \approx 26 \text{ à } 27 \text{ kN/m}^3$$

La phase solide des sols est constituée principalement de silice et d'alumine. Les éléments simples Si et Al ayant des masses atomiques très voisines, le poids volumique des sols évolue dans une plage très étroite. Les sols organiques et les sols métallifères font exception à ces valeurs [31].

- le poids volumique de l'eau

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

On prend souvent $\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$. Ce qui entraîne d'emblée 2% d'erreur relative [31].

- le poids volumique du sol (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide). C'est la somme des poids des particules solides et de l'eau d'un volume unité de sol.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{sable} \approx 17 \text{ à } 20 \text{ kN/m}^3 ; \text{ argile} \approx 16 \text{ à } 22 \text{ kN/m}^3$$

- le poids volumique du sol sec

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \text{sable} \approx 14 \text{ à } 18 \text{ kN/m}^3 ; \text{ argile} \approx 10 \text{ à } 20 \text{ kN/m}^3.$$

Si le sol est sec : $\gamma = \gamma_d$.

- le poids volumique du sol saturé : lorsque tous les vides sont remplis d'eau.

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + \gamma_w V_v}{V} \quad \text{sable et argile} \approx 19 \text{ à } 22 \text{ kN/m}^3$$

- le poids volumique du sol déjaugé

Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède [31]:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad \text{sable et argile} \approx 9 \text{ à } 12 \text{ kN/m}^3$$

On introduit aussi la notion de masse volumique et plus rarement celle de densité par rapport à l'eau [31]:

$$\text{Densité : } D_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_w} \quad \Rightarrow \quad \text{densité sèche : } D_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

La teneur en eau est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Elle s'exprime en pourcent. Elle est facilement mesurable en laboratoire.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad \text{sable: } w = 1 \text{ à } 15\% ; \text{ argile: } w = 10 \text{ à } 20\%$$

La teneur en eau peut dépasser 100% et même atteindre plusieurs centaines de pourcents [31].

Le degré de saturation indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en pourcent.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad \text{Le degré de saturation peut varier de } 0\% \text{ (sol sec) à } 100\% \text{ (sol saturé) [31].}$$

II-2.2 Détermination des caractéristiques physiques

II-2.2.1 Détermination de la teneur en eau (pondérale w) (norme NFP 94-050)

C'est la caractéristique la plus facile à déterminer.

La teneur en eau se détermine par deux pesées. Une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m de l'échantillon humide et une deuxième pesée, après passage à

l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon m_s [31].

$$W = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad \text{Avec } m_w = m - m_s$$

II-2.2.2 Détermination du poids volumique γ (norme NFP 94-053)

Il faut déterminer la masse m et le volume total V de l'échantillon. Pour déterminer ce dernier on utilise l'une des trois méthodes suivantes [31]:

- Méthode par immersion dans l'eau :

Un échantillon de forme simple, de masse comprise entre 0,1 et 0,5 kg est pesé (m) puis recouvert d'une couche de paraffine ($\rho_{\text{paraffine}} = 0,88 \text{ g/cm}^3$). Une deuxième pesée (m_p) permet de déterminer la masse de la couche de paraffine et de calculer son volume. Une troisième pesée, hydrostatique, de l'échantillon recouvert de paraffine (m'_p) permet de calculer son volume. Le volume de paraffine étant connu, on en déduit le volume V de l'échantillon :

$$V = V_{\text{sol+paraffine}} - V_{\text{paraffine}} = \frac{m_p - m'_p}{\rho_w} - \frac{m_p - m}{\rho_p}$$

L'échantillon de sol n'est pas remanié, il est à l'état naturel.

- Méthode de la trousse coupante:

On effectue un poinçonnement avec une trousse coupante dans l'échantillon. Les faces de la prise d'essai sont arasées aux extrémités. Le volume V de la prise d'essai est égal au produit de l'aire de la section d'entrée de la trousse coupante par sa hauteur.

L'échantillon de sol est légèrement remanié par le passage de la trousse coupante, il est cependant considéré à l'état naturel.

- Méthode du moule:

L'échantillon, préparé selon un processus défini, remplit le moule jusqu'à débordement.

L'extrémité supérieure du moule, de dimensions connues, est arasée à la règle.

L'échantillon de sol est remanié.

II-2.2.3 Détermination du poids volumique des particules solides γ_s , (norme NFP g4-0S4)

Le problème est de mesurer le volume des grains solides, V_s , constituant l'échantillon de sol. Cette mesure est effectuée généralement au pycnomètre (figure II.2.2.3).

Une masse connue m_s de sol séché (par passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante) est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. Un agitateur magnétique sépare les particules les unes des autres. Les bulles d'air libérées sont aspirées par un vide d'air (trompe à eau). Après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les particules solides, on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacée par les particules solides [31].

Le volume de la phase solide V_s , égal au volume d'eau déplacée par le sol, est déterminé par pesée.

m_1 : masse du pycnomètre contenant l'eau distillée et le barreau magnétique,

m_2 : masse du pycnomètre contenant le sol, l'eau distillée et le barreau magnétique.

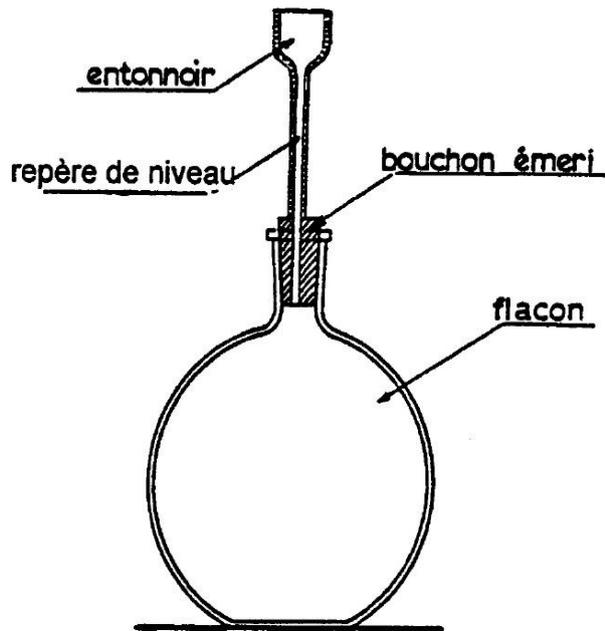


Figure II.2.2.3 : Pycnomètre

$$m_2 = m_1 + m_S - \rho_W \cdot V_S$$

Avec

- m_S : masse des particules solides,
- ρ_W : masse volumique de l'eau distillée,
- V_S : volume des particules solides.

$$V_S = \frac{m_1 + m_S - m_2}{\rho_W}$$

$$\rho_S = \frac{m_S}{V_S} = \frac{m_S}{m_1 + m_S - m_2} \cdot \rho_W \Rightarrow \gamma_S = \rho_S \cdot g$$

L'erreur relative sur le résultat est de l'ordre de quelques 10^{-4} [31].

II-2.3 Définition et caractéristiques principales des sols

Les grains d'un sol ne sont pas liés par un ciment comme c'est le cas du béton, mais ils peuvent être soumis à des forces d'attraction inter-granulaires diverses : des forces électriques, des forces de Van der Waals,... Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance entre les grains augmente. Elles n'influencent que le comportement des sols à dimensions très faibles. Dans ce cas le sol est doté d'une cohésion.

Cette constatation nous permet de définir deux grandes familles de sol [32]:

- Les sols grenus qui sont de dimension supérieure à 20μ ($0,02 \text{ mm}$),
- Les sols fins de dimensions inférieures à 20μ .

II-2.3.1 Les sols grenus

Les sols grenus sont ceux pour lesquels les caractéristiques géotechniques sont déterminées par des forces de volume ou de pesanteur. Ils sont en général pulvérulents. Ils sont surtout définis granulométriquement.

On distingue principalement deux sous-familles :

- Sables 50% des grains au moins sont compris entre $0,02$ et 2 mm
- Graviers 50% des grains au moins sont compris entre 2 et 20 mm

A noter : Les dimensions extrêmes varient légèrement suivant le système de classement.

Ainsi de part leurs altérations mécaniques on distingue [32]:

- ♦ Les sables éoliens : transportés par le vent, se rencontrent généralement sous forme de dunes marines ou continentales.

- ◆ Les sables fluviatiles : se rencontrent dans les alluvions fluviatiles quelques fois sous forme de terrasses.
- ◆ Les sables marins : Comprennent aussi bien les sables littoraux que les sables marins anciens.
- ◆ Les sables résiduels ou arènes : Produits de la fragmentation sur place d'une roche mère propice.

II-2.3.2 Les limons (ou Silts)

La définition la plus admise est celle d'un sol dont la majeure partie des grains est comprise entre 2 et 20 μ . Ils sont en grande partie formés de quartz.

On distingue suivant leurs origines [32]:

- Les limons éluviaux formés par altération sur place d'un substratum favorables (à l'altération),
- Les limons de ruissellement et d'inondation qui se présentent en strates.

II-2.3.3 Les argiles

On peut les définir granulométriquement comme une roche dont les grains sont compris entre 2 et 0,2 μ .

C'est une roche sédimentaire terreuse faisant pâte avec l'eau. On la dit plastique.

La plasticité d'un matériau est caractérisée par le fait qu'il peut être déformé d'une façon permanente, à volume constant, sans perdre sa cohésion interne [32].

On distingue suivant leur origine [32]:

- Les argiles d'altération : formées principalement par l'altération des calcaires en climat tempérés ou l'altération des latérites en climat chaud et humide,
- Les argiles fluviatiles : elles se déposent surtout dans le lit majeur des fleuves, lors des décrues,
- Les argiles lacustres : déposées dans les lacs et étangs,
- Les argiles marines : ce sont des argiles d'origine continentale déposées en milieu marin, et généralement modifiées par la diagénèse.

II-2.4 Structure des argiles

Les particules restent collées les une aux autres. Le sol présente une cohésion : il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces appliquées.

Les particules sont formées par un empilement de feuillets. Elles ont une forme de plaquettes.

La surface des plaquettes étant chargée négativement, les particules sont soumises à des forces d'attraction inter-granulaires diverses: forces électriques et forces de Van der Waals.

Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance augmente, on admet qu'elles sont négligeables à partir d'une distance de 0,4 μ m. Pour qu'elles puissent avoir une influence sur le comportement du sol il est nécessaire que les grains de ce sol aient des dimensions très petites.

Il se crée autour des particules de sol une pellicule d'eau adsorbée ou eau liée d'épaisseur à peu près constante (0,01 μ m) (figure II.2.4) [31].

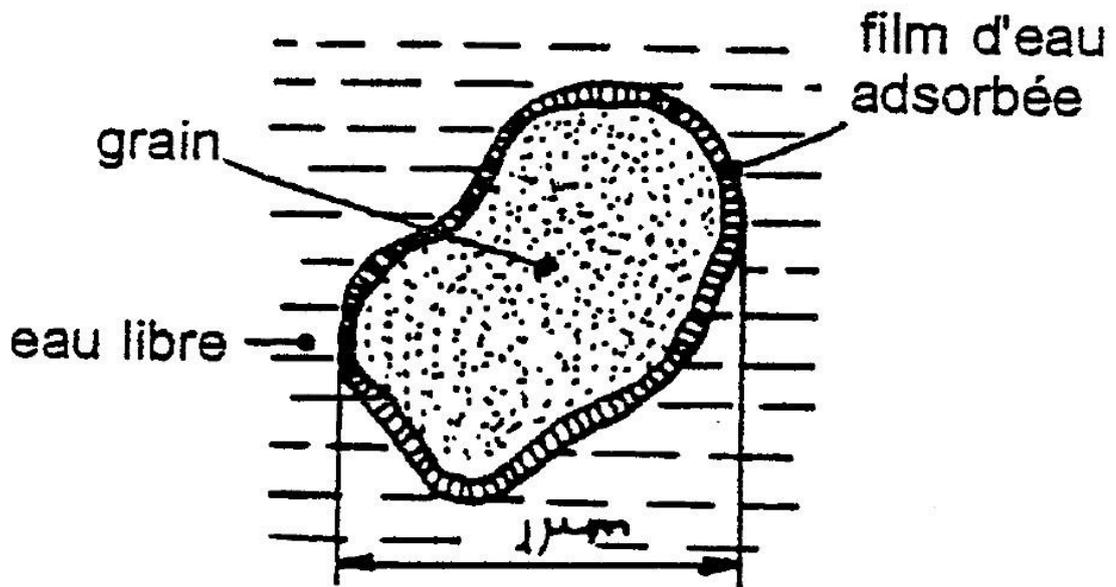


Figure II.2.4 : Particule de sol très fin

Elle est maintenue à la surface des grains par des forces d'attraction moléculaires. Les dipôles d'eau sont orientés perpendiculairement à la surface des grains. Cette eau présente des propriétés très différentes de celles de l'eau libre [31]:

- ◆ Elle a une très forte densité: 1,5
- ◆ Elle est liée à la particule (elle ne se déplace pas sous l'effet de la gravité),
- ◆ Sa viscosité très élevée, qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un liquide et celles d'un solide, est à l'origine de certains comportements des sols argileux: fluage, compression secondaire...
- ◆ Elle ne s'évacue qu'à température élevée (vers 300°C).

La couche d'eau adsorbée joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est considérable sur les propriétés mécaniques du sol.

II-2.5 Identification des sols par Courbe granulométrique (NF P 94-056 & -057)

II-2.5.1 Définition

La granulométrie a pour objet la mesure de la taille des particules élémentaires qui constituent les ensembles de grains de substances diverses, telles que farines, poudres, sables, etc., et la définition des fréquences statistiques des différentes tailles de grains dans l'ensemble étudié [33].

II-2.5.2 Analyse granulométrique et sédimentométrie

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue [32]:

- Par tamisage mécanique (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80µ,

- Par sédimentométrie pour les grains plus fins.

Un mode de représentation commode des résultats de l'analyse granulométrique est la Courbe granulométrique. Elle représente pour chaque dimension «%» de particule, le poids (ou masse) «%» des particules de cette taille ou de tailles inférieures. Ce poids est exprimé en pourcentage par rapport au poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié. Cette courbe est tracée en coordonnées semi-logarithmique [32].

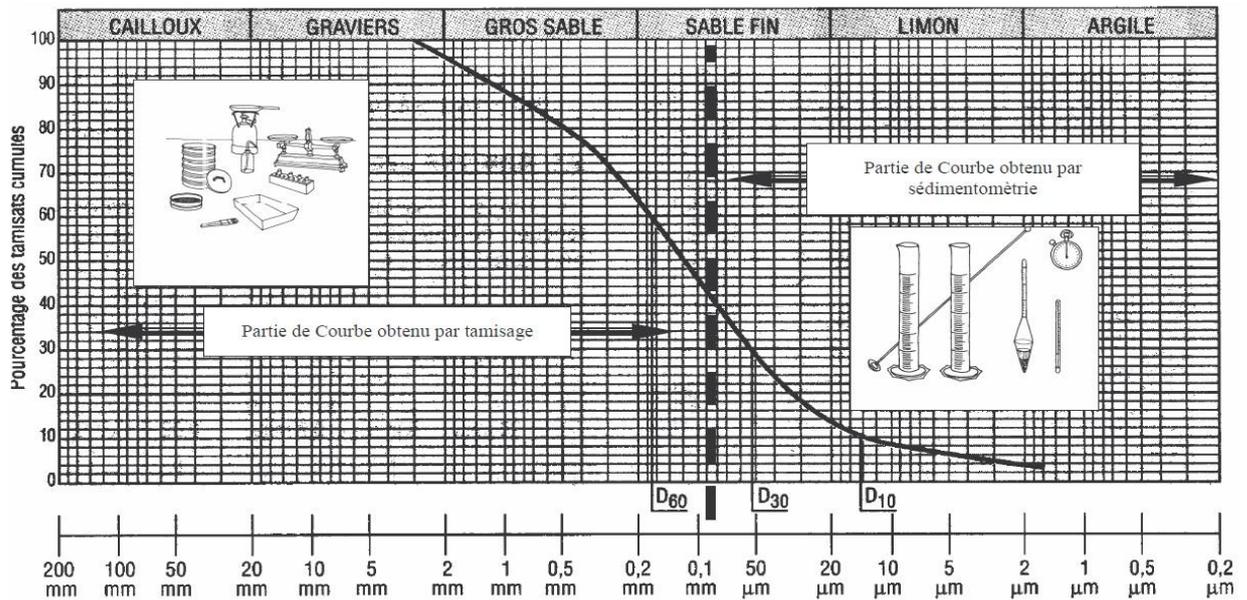


Figure II.2.5.2 : Exemple de courbe granulométrique.

II-2.5.3 Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique

La forme de la courbe granulométrique permet de préciser le degré d'étalement de la granulométrie ou encore son uniformité. Cette uniformité est exprimée par le Coefficient d'uniformité ou Coefficient de HAZEN C_u défini par le rapport [32] :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

d_y : dimension du tamis correspondant à %y de passants.

Ce coefficient est donc immédiatement calculé à partir de la courbe granulométrique.

- si $C_u < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée),
- si $C_u > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

On définit également le coefficient de courbure [31]:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} - d_{60}}$$

A noter : Un sol est bien gradué si C_c est compris entre 1 et 3.

II-2.6 Identification propre aux sols grenus.

Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu. Cet essai est important, car la présence d'éléments fins peut modifier le comportement de ces sols. En particulier la présence de particules argileuses dans le sable d'un mortier ou béton, en abaissant l'adhérence « pâte de ciment/granulats », est défavorable à la mise en œuvre et aux performances finales du béton ou mortier (microfissuration).

Il est effectué sur les éléments de dimensions inférieures à 5 mm (fraction 0/5 mm du sol) [32].

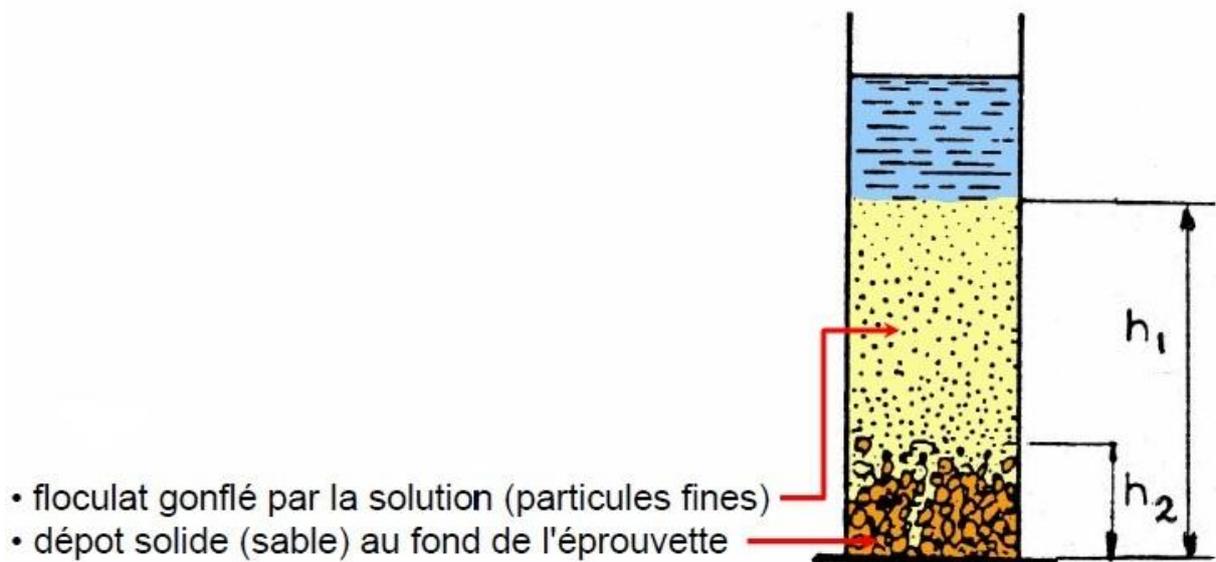


Figure II.2.6 : Equivalent de sable

$$E.S = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$$

La valeur de l'équivalent de sable chute très rapidement dès qu'il y a un faible pourcentage de limon ou d'argile dans le sol pulvérulent.

| Nature | Equivalent de sable |
|-------------------|---------------------|
| Argile pure | E.S=0 |
| Sol plastique | E.S=20 |
| Sol non plastique | E.S=40 |
| Sol pur et propre | E.S=100 |

Tableau II-2.6 : Ordres de grandeur de l'E.S

II-2.7 Identifications propres aux sols fins

Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

II-2.7.1. Etats de consistance

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

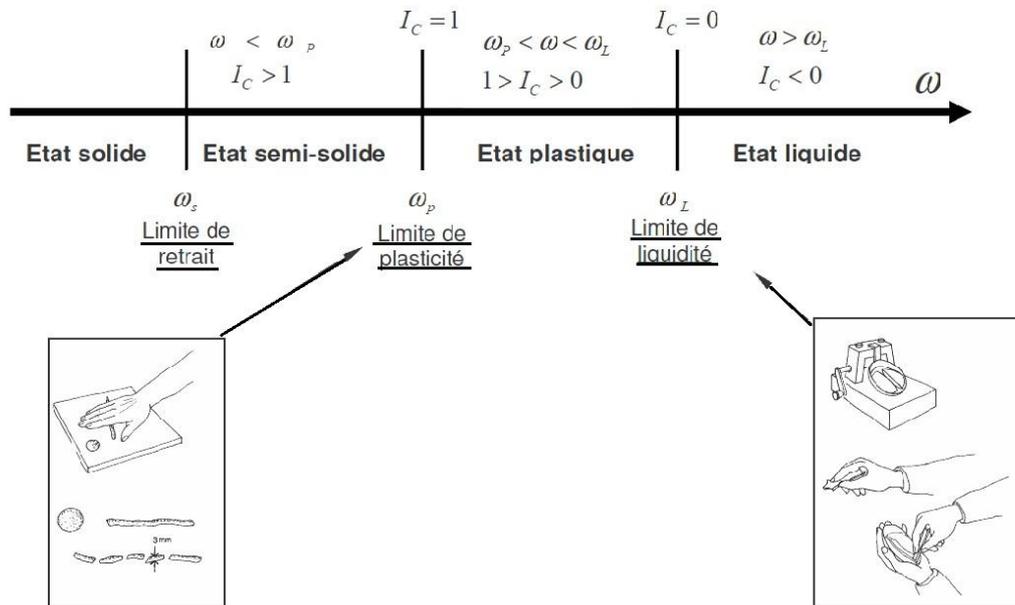


Figure II.2.7.1 : Etats de consistance d'un sol

Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide. On détermine plus particulièrement les valeurs suivantes [32]:

- ◆ La limite de plasticité (w_p)
- ◆ La limite de liquidité (w_L)

La limite de plasticité (w_p) est définie comme la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide. En générale elle ne dépasse pas 40% [32].

La limite de liquidité (w_L) est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique [32].

La connaissance de ces limites est importante pour l'exécution de travaux de terrassements (fouille, tranchée, ...). En particulier, si le matériau doit être utilisé après remaniement (remblais, barrage en terre, ...), leur détermination revêt une importance considérable.

II-2.7.2. Indices de plasticité et de Consistance

L'indice de plasticité I_p : C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation [32]:

$$I_p = W_L - W_P$$

L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

| Indice de plasticité I_p | Etat- du sol |
|----------------------------|----------------|
| 0 - 5 | Non-plastique |
| 5 - 15 | Peu-plastique |
| 15 - 40 | Plastique |
| >40 | Très plastique |

Tableau II-2.7.1 : Classification de l'argilité d'un sol selon l'indice de plasticité I_p

Indice de consistance I_c : La comparaison de la teneur en eau naturelle w d'un sol et des limites D'ATTERBERG permet de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractériser par son indice de consistance [32]:

$$I_c = \frac{W_L - W}{W_L - W_P} = \frac{W_L - W}{I_p}$$

| Indice de consistance I_c | Etat du sol |
|-----------------------------|-------------|
| $I_c > 1$ | Solide |
| $0 < I_c < 1$ | Plastique |
| $I_c < 0$ | Liquide |

Tableau II-2.7.2 : Etat du sol en fonction de l'indice de consistance

L'indice de consistance croît en même temps que la consistance du sol. A partir de 1, le sol peut être éventuellement réutilisé en remblai (on peut travailler).

II-2.8 Détermination des caractéristiques de plasticité c et ϕ

Plusieurs types d'essais sont utilisés pour déterminer les caractéristiques de plasticité ; on distingue [32]:

- Les essais de mesure in situ (scissomètre, rhéotest, pénétromètre...)
- Les essais de laboratoire (compression simple, essai de cisaillement rectiligne ou boîte de Casagrande, essai de compression triaxial)

II-2.8.1. Scissomètre

L'essai au scissomètre de chantier peut être considéré comme l'essai de référence pour l'étude de la stabilité des ouvrages sur sols mous. Un moulinet cruciforme de hauteur H et de diamètre D est introduit dans le sol jusqu'au niveau où l'on veut exécuter la mesure. La rotation du moulinet, auquel on applique un moment de torsion, cisaille le sol suivant une surface cylindrique circonscrite au moulinet [34].

Figure II.2.8.1.1 : Scissomètre

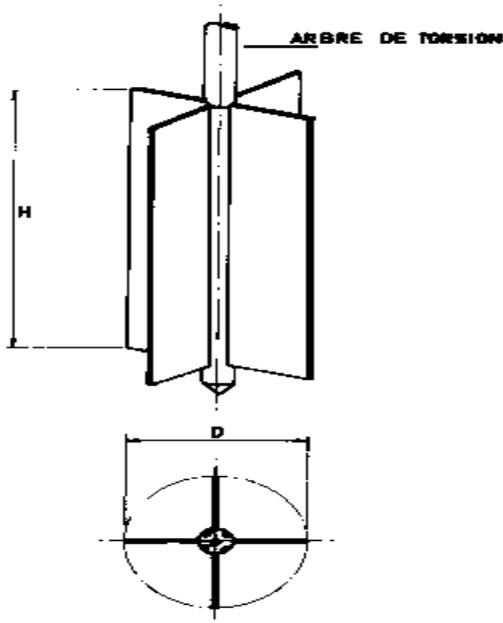


Figure II.2.8.1.2 : Axe de rotation du scissomètre

Le rapport des valeurs enregistrées permet de tracer un diagramme représentant les moments de torsion, mesurés par un couple-mètre, en fonction de l'angle de rotation θ du train de tiges [34].

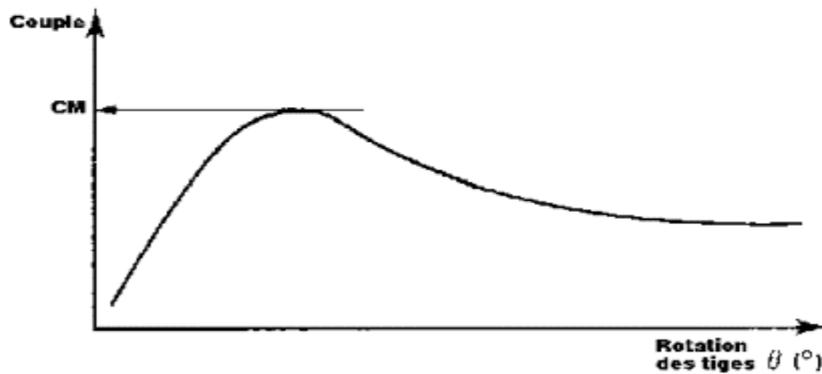


Figure II.2.8.1.3 : Courbe scissométrique

On suppose qu'il y a rupture du sol lorsque le moment maximal M_{max} est atteint. A ce moment maximal correspond la résistance au cisaillement maximale τ_{max} . Dans le cas des sols argileux saturés, cette résistance correspond à la cohésion non drainée C_U .

Le domaine d'utilisation du scissomètre de chantier est limité aux sols fins, cohérents, peu consistants dont il donne la cohésion non drainée maximale C_U , de 80 à 100 k Pa ainsi que la valeur résiduelle C_r et la sensibilité [34]: $S = \frac{C_r}{C_U}$

Les résultats obtenus C_U , C_r et la pression d'enfoncement des tiges sont portés sur un graphique en fonction de la profondeur.

Lorsque $\frac{H}{D} = 2$, on adopte souvent comme valeur de la résistance aux contraintes tangentielles :

$$\theta = \left(\frac{6}{7}\right) \cdot \left(\frac{T_{max}}{\pi D^3}\right) \text{ Où } T_{max} \text{ est le couple maximal [34].}$$

La vitesse d'exécution de l'essai influe sur la valeur de τ . Des vitesses allant de 0,1 à 1° par seconde donnent des différences de l'ordre de 20%. La vitesse adoptée est en général de 0,1°/sec. Elle est le minimum que l'on peut pratiquement réaliser à la main. Lorsqu'on procède à de grandes profondeurs, il faut également tenir compte dans le calcul de la vitesse, de la déformation élastique de l'arbre.

Le scissomètre peut être utilisé dans un forage préparé de n'importe quelle façon. Ce forage peut être tubé ou non. Le scissomètre est introduit dans le forage et on ajoute des rallonges à l'arbre de torsion jusqu'à ce que l'appareil atteigne le fond du sondage. Le scissomètre est alors poussé dans le sol sans torsion à une profondeur suffisante pour être sous la zone remaniée par le forage. La profondeur la plus courante est de 45cm sous le fond du forage. L'arbre est alors tordu et on mesure le couple de torsion.

On peut aussi utiliser le scissomètre dans des argiles molles, sans effectuer de forage au préalable, en enfonçant directement le scissomètre dans celles-ci. Dans ce cas, les palettes sont protégées pendant l'enfoncement par une pièce moulée ou un simple tube. Ensuite, le scissomètre est poussé hors de sa gaine et l'essai est effectué.

Dans les sols de consistance très molle, il est possible de procéder ainsi jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 15m [34].

Enfin, les limitations de l'essai au scissomètre sont les suivantes [34]:

- Des précautions doivent être prises pour ne pas remanier le sol à essayer ;
- La présence de pierres dans le voisinage du scissomètre influence les résultats. Il en est de même pour les limons et les sables, par couches ou par lentilles ;

- La rupture se fait suivant une direction verticale et ne correspond pas nécessairement à une rupture oblique dans un sol anisotrope ;
- L'essai donne la résistance au cisaillement non drainé ;
- La résistance le long des surfaces horizontales de rupture est difficile à estimer avec précision. Pour cette raison on utilise parfois des scissomètres à axes concentriques avec des moulinets de garde au-dessus et en dessous du moulinet de mesure.

II-2.8.2. La boîte de cisaillement (boîte de Casagrande)

L'échantillon est placé entre deux demi-boîtes, une supérieure C_1 qui peut coulisser horizontalement sur une inférieure C_2 (figure : II.2.8.2.1)
 Le sol est placé entre deux pierres poreuses qui permettent le drainage de celui-ci. On peut remplacer les pierres poreuses par des plaques pleines et le sol ne peut plus se drainer, du moins théoriquement [32].

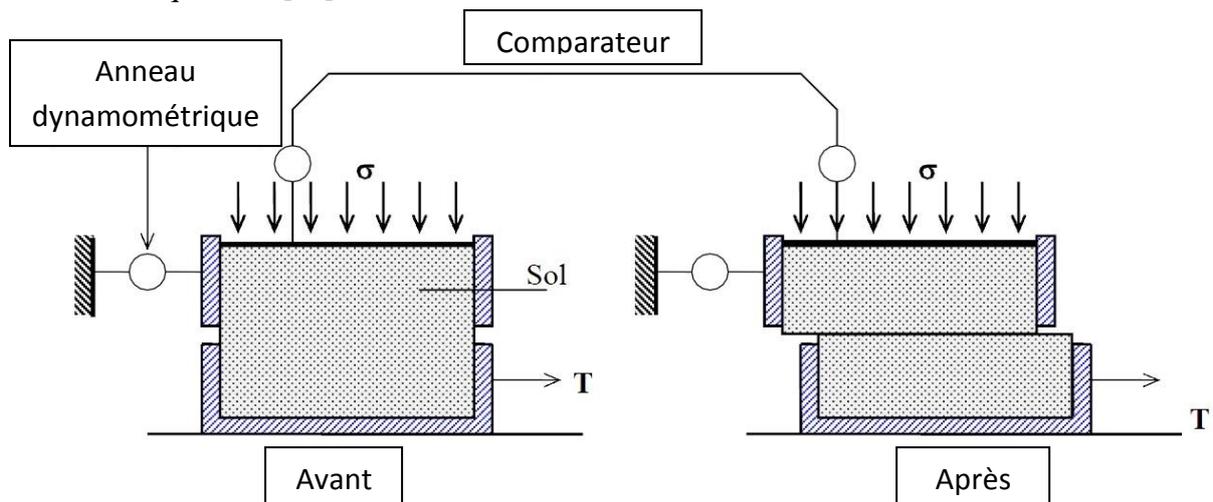


Figure II.2.8.2.1 : Boîte de Casagrande.

L'appareil comporte un dispositif de chargement qui permet d'appliquer une charge verticale N par l'intermédiaire d'un piston.

L'essai consiste à tirer horizontalement sur la demi-boîte supérieure de façon à cisailier le sol selon le plan π .

On mesure l'effort horizontal T en fonction de Δl (figure : II.2.8.2.3)

L'essai se fait à vitesse contrôlée V

Soit :

- S la section de l'échantillon selon le plan π

- $\sigma_i = \frac{N}{S}$ la contrainte normale appliquée à l'échantillon,

- $\tau_i = \frac{T}{S}$ la résistance au cisaillement mesurée à la rupture.

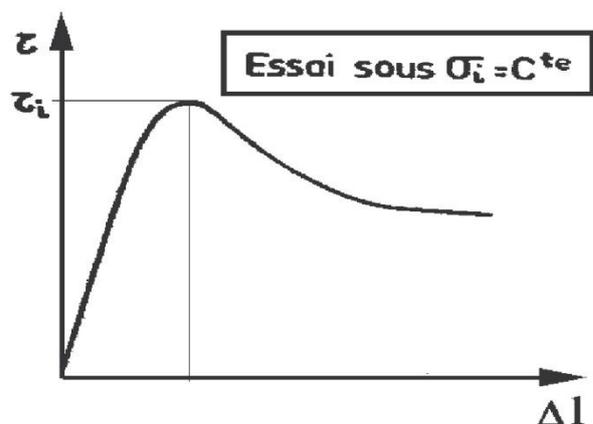


Figure II.2.8.2.2 : Courbe contraintes/déformation

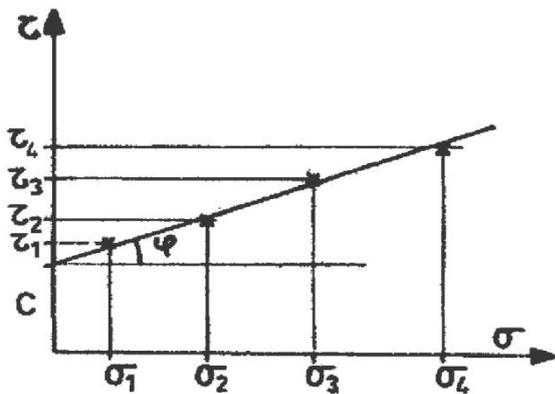


Figure II.2.8.2.3 : Courbe intrinsèque (détermination de c et φ)

Si cet essai est réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même sol avec des contraintes normales différentes, par exemple $\sigma_{i(i=1,2,3,4)}$, la courbe intrinsèque du sol peut être déterminée en portant sur le diagramme de Coulomb ($\tau ; \sigma$) les points correspondants aux contraintes $\tau_{i(i=1,2,3,4)}$ mesurées (figure II.2.8.2.3) [32].

II-2.9 Classification des sols

II-2.9.1 But de la classification

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser ces sols mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires.

Il va de soi qu'une telle classification ne peut être basée que sur des corrélations empiriques, elles même basées sur une grande expérience.

Il existe de par le monde de nombreuses classifications [32].

On va s'intéresser à celle utilisée dans les pays Afriques francophone.

II-2.9.2 La classification LPC des sols

Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Cette classification est une adaptation de la classification U.S.C.S (The Unified Soil Classification System) mis au point par le « Bureau of reclamation » et le « Corps of Engineers » aux Etats Unis [32].

La classification LPC des sols utilise les résultats de l'analyse granulométrique, de l'Equivalent de sable et des limites d'Atterberg.

Suivant la classification LPC, on distingue trois grands types de sols [32]:

- Les sols grenus dont 50% d'éléments en poids sont supérieurs à $80\mu\text{m}$;
- Les sols fins dont 50% d'éléments en poids sont inférieurs à $80\mu\text{m}$;
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est élevée.

Ci-après la classification complète qui s'utilise avec le diagramme de plasticité associée [32]:

| Définitions | | Symboles | Conditions | Désignation géotechnique |
|---------------|--|-----------------------------------|---|---------------------------|
| GRAVES | Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm | moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm | Gb $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3 | grave propre bien graduée |
| | | moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm | Gm Une des conditions de Gb non satisfaite | grave propre mal graduée |
| | | plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm | GL Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2) | grave limoneuse |
| | | plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm | GA Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A | grave argileuse |
| SABLES | Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm | moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm | Sb $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3 | sable propre bien gradué |
| | | moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm | Sm Une des conditions de Sb non satisfaite | sable propre mal gradué |
| | | plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm | SL Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A | sable limoneux |
| | | plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm | SA Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A | sable argileux |

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.

Tableau II-2.9 : Classification LPC

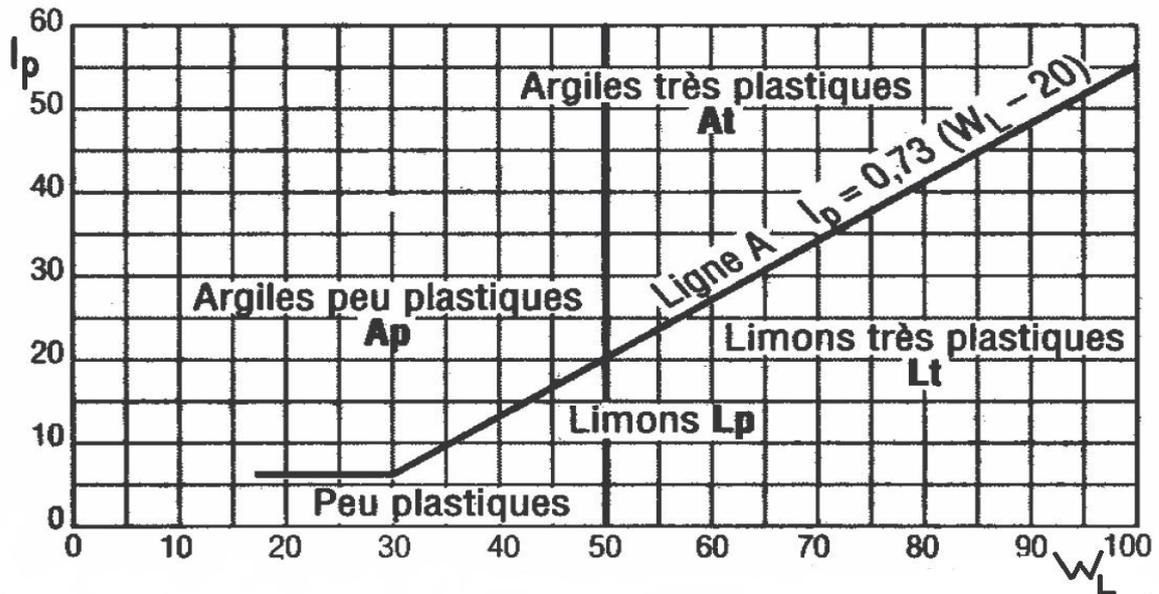


Figure II.2.9 : Classification LPC : diagramme de plasticité

II-3 Stabilité des talus

II-3.1 Les mouvements de terrains

L'objet de cette partie est l'étendue de l'équilibre mécanique des masses de sol pouvant être mis en mouvement, soit par des phénomènes naturels (érosion, tremblements de terre ...) soit consécutivement à des travaux de chantier (terrassements, remblais, constructions).

Les différents mouvements de terrains peuvent se classer en 3 catégories :

- **Les écoulements** : chutes soudaines de masses rocheuses. Les causes peuvent être internes au massif (altération, accroissement de la pression interstitielle, glissement banc sur banc dans une roche stratifiée) ou externes (écroulement de masses mises en surplomb par érosion de masses sous-jacentes plus tendres, fluage ou glissement d'une masse sous-jacente).
- **Les coulées** : mise en mouvement brutale de masses de sol à l'état "liquide".
- **Le fluage** : par opposition aux mouvements précédents, celui-ci est lent, de faible amplitude et se développe dans une zone dont les dimensions sont mal définies.

Nous étudierons donc les mouvements relevant de la mécanique des sols, en particulier les glissements pour lesquels on dispose de théories et d'expériences suffisantes pour dimensionner la plupart des projets.

II-3.2 Généralités sur les glissements

II-3.2.1 Aspect général des glissements

La rupture par glissement d'un talus se manifeste habituellement par un déplacement en bloc d'une partie du massif. La surface de glissement est assimilable à une surface cylindrique. On fera donc l'étude pour des tranches de massif d'épaisseur unité, découpées perpendiculairement à l'axe de la surface de rupture. Si on représente la coupe transversale du

terrain (donc une tranche), l'aspect de la surface de rupture sera donc un arc de cercle. Le sommet du talus s'affaisse et il se forme un bourrelet de pied (Figure : II.3.2.1). On distinguera trois grandes catégories de glissements [35]:

- ◆ Glissement de pente ;
- ◆ Glissement de pied ;
- ◆ Glissement profond.

Ces différents types n'auront pas les mêmes conséquences mais on peut dire que la stabilité dépend :

- Des moments résistants (pris par rapport au centre du cercle de rupture), dus à la résistance au cisaillement le long de la ligne de rupture ;
- Des moments moteurs dus principalement au poids du massif en déplacement.

Il y aura donc glissement si à un moment donné les moments sont supérieurs aux moments résistants.

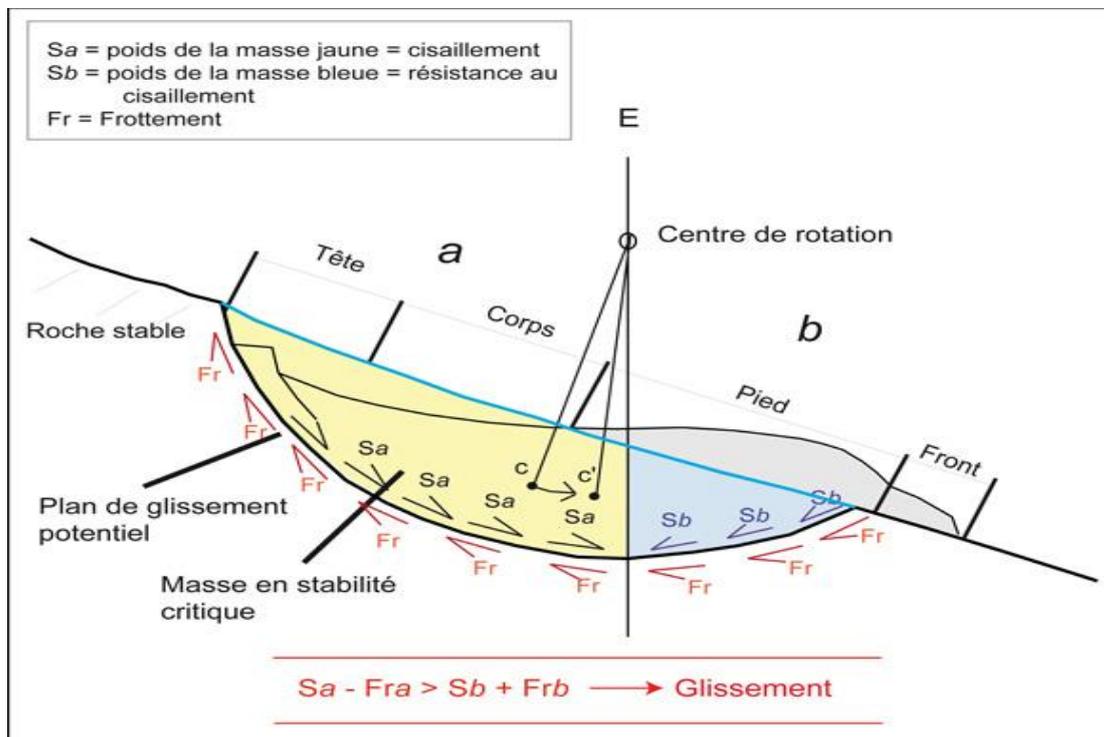


Figure II.3.2.1 : forces-glissements

II-3.2.2 Causes de glissements

D'après ce qui précède, les glissements sont dus à des modifications soit dans les moments résistants, soit dans les moments moteurs. On distinguera donc deux types de causes [35]:

a) Diminution des moments résistants

Les causes de diminution des moments résistants peuvent être naturelles (changement des conditions hydrauliques du terrain) ou consécutives à des travaux (tranchées en pied de pente, ou chargement rapide augmentant les pressions interstitielles en pied de pente).

b) Une augmentation des moments moteurs

Certaines causes sont évidentes (surcharge du sommet de la pente, changement de pente,...), d'autres le sont beaucoup moins. Les problèmes d'infiltration, en particulier, sont souvent difficiles à cerner. Par exemple, les écoulements ont une action hydrodynamique qui tend à augmenter les moments moteurs. C'est le cas des drainages en pied de talus servant au rabattement de nappe.

En effet, l'écoulement provoque des forces de percolation qui augmentent les moments moteurs ; il ne faut donc plus simplement considérer l'aspect statique du problème de stabilité de pentes.

II-3.2.3 Mécanisme du mouvement

Souvent on ne peut pas identifier le mécanisme d'un mouvement seulement par une exploration géotechnique, au lieu de cela il doit être vérifié par des mesures géotechniques. Sans connaissance du développement du mouvement on ne peut pas faire un calcul de stabilité. Il y a trois mécanismes différents: (voir figure : II.3.2.3) [35]:

- Mouvements rotatifs
- Mouvements de translation et
- Mouvements basculants

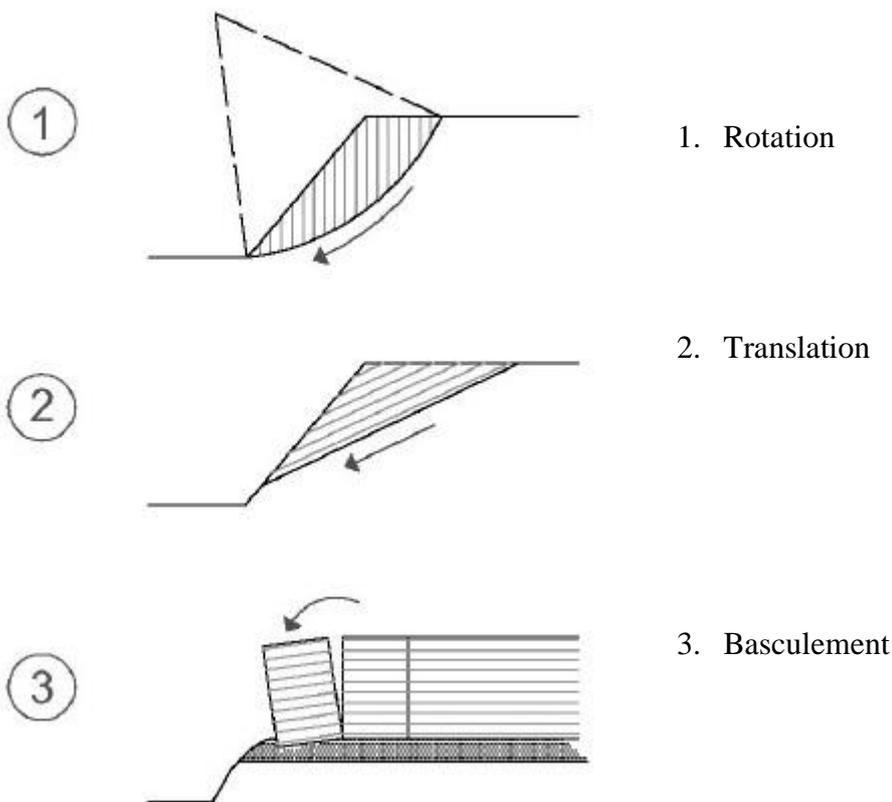


Figure II.3.2.3 : Mécanismes de mouvement différents dans le développement aux talus

II-3.3 Analyse de stabilité

De manière classique, on définira les conditions d'équilibre limite et on utilisera un coefficient de sécurité. On suppose que l'équilibre limite existe au moment de la rupture le long de la ligne de glissement. L'expérience montre que la zone en équilibre limite forme une bande assez étroite de part et d'autre de la zone de rupture. La stabilité de l'ensemble est donc liée à celle de la bande considérée.

Les méthodes de calcul consistent à rechercher la surface le long de laquelle le coefficient de sécurité F est le plus faible :

$$F = \frac{\tau_{max}}{\tau}$$

Avec : τ_{max} : résistance au cisaillement du sol.

τ : contraintes de cisaillement s'exerçant le long de la surface.

- ✓ Si $F < 1$: la surface est inévitable,
- ✓ Si $F = 1$: le massif est en état d'équilibre limite,
- ✓ Si $F > 1$: le milieu est en équilibre et le massif sera stable si le coefficient atteint un chiffre fixé à l'avance compte-tenu de la nature de l'ouvrage et des conséquences que pourrait entraîner la rupture.

Il existe plusieurs dizaines de méthodes de calcul de stabilité ayant toutes des avantages et des inconvénients. Aucune n'est parfaite, car aucune ne tient compte de la déformabilité du sol. En effet, on en revient au problème éternel de la méconnaissance des lois de comportement du sol que l'on considère toujours comme rigide-plastique. Nous étudierons ci-après plusieurs méthodes de calcul "traditionnelles" mais la confiance que l'on peut leur accorder sera essentiellement fonction de l'expérience que l'on peut en avoir. Nous envisagerons des méthodes de stabilité de milieux homogènes. Dans le cas de massifs constitués de plusieurs couches de nature différente, le problème est beaucoup plus ardu [35].

II-3.3.1 Glissement plan

Pendant longtemps on a préféré croire (par simplicité des calculs) que les surfaces de glissement étaient planes. Or la simple observation sur le terrain prouve que les surfaces sont courbes.

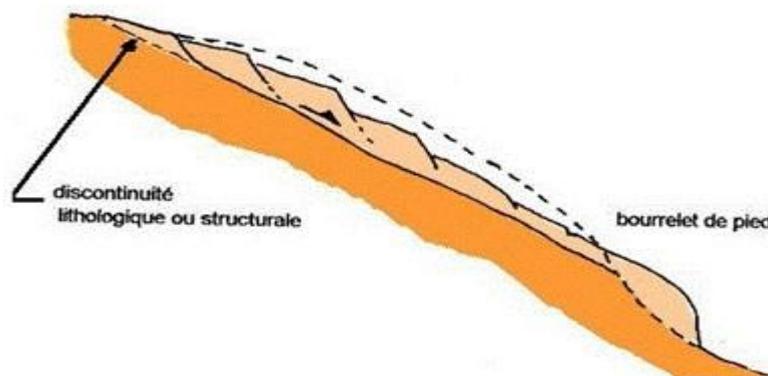


Figure II.3.3.1: Glissement plan

Cependant dans des cas particuliers, on peut admettre des rayons de courbure infinis, ce qui nous amène à des glissements plans. D'autre part, cette méthode est une bonne introduction aux méthodes plus élaborées. Considérons un massif de pente $0A$. En faisant l'hypothèse que la rupture se fait suivant un plan, il paraît évident que le cas le plus défavorable est celui d'un plan passant par le pied O de la pente. Soit OB ce plan. Le sol étant homogène (cohésion c , angle de frottement interne φ), il obéit à la loi de Coulomb. On découpe le massif $0AB$ en tranches d'égales largeurs. Le poids de chacune des n tranches induit sur la surface OB une contrainte pouvant se décomposer en une contrainte normale et une contrainte tangentielle. Soit W_i le poids de la tranche i et L la longueur du plan de rupture OB [35].

Soit N_i et T_i les composantes du poids W_i de chacune des tranches.

$$\sigma_i = \frac{n \cdot N_i}{L} \text{ et } \tau_i = \frac{n \cdot T_i}{L}$$

Le terme τ_i représente la contrainte de cisaillement s'exerçant le long de la surface de glissement. Selon la loi de Coulomb, la résistance au cisaillement du sol τ_{max} sera donnée par [35]:

$$\tau_{max} = c + \sigma_i \cdot \tan \varphi$$

Le coefficient de sécurité F exprime donc le rapport :

$$F = \frac{c + \sigma_i \cdot \tan \varphi}{\tau_i}$$

Si l'équilibre limite est atteint, $F = 1$. On peut écrire que pour chaque tranche :

$$\begin{aligned} \tau_i = c + \sigma_i \cdot \tan \varphi &\Rightarrow \frac{n \cdot T_i}{L} = c + \frac{n \cdot N_i}{L} \\ W_i \cdot \sin \theta &= \frac{c \cdot L}{n} + W_i \cos \theta \cdot \tan \varphi \\ \sum_i^n W_i \cdot \sin \theta &= \frac{c \cdot L}{n} + \sum_i^n W_i \cos \theta \tan \varphi \end{aligned}$$

Si le poids total du massif $0AB$ est W , on a l'égalité :

$$W = \frac{A \cdot B \cdot \gamma \cdot H}{2} \text{ soit encore } W = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \sin \theta}$$

Si $F = 1$, l'équilibre limite nous permet de déterminer la hauteur critique H_c du talus :

$$\frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \sin \theta} = \frac{c \cdot H_c}{\sin \theta} + \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \tan \theta} \cdot \tan \varphi$$

Mais la hauteur H du talus est généralement connue, par contre l'inconnue est l'angle θ du plan de glissement. Par la formule précédente, on peut calculer différentes valeurs de la

hauteur critique H_c en fonction de θ ; on peut ainsi, par tâtonnement, déterminer la valeur de θ donnant la hauteur critique $H_c = H$. On aura donc l'orientation du plan de glissement.

Le calcul précédent revient à écrire que le coefficient de sécurité est égal à [35]:

$$F = \frac{2c \cdot \sin \alpha}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\alpha - \theta)} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$$

Examinons deux cas particuliers importants :

- **Sol pulvérulent** : $c = 0$

Dans ce cas, le coefficient de sécurité se réduit à :

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$$

Or θ varie de 0 à α . La valeur minimale de F sera donc obtenue pour $\theta = \alpha$. On a donc :

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

L'équilibre limite est atteint pour $F_{min} = 1$ soit $\alpha = \varphi$. Ceci exprime bien que l'angle de talus naturel d'un sol pulvérulent est égal à l'angle de frottement interne.

- **Sol cohérent** : $\varphi = 0$

Le coefficient de sécurité est alors égal à :

$$F = \frac{2c}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \theta \sin(\alpha - \theta)}$$

On peut alors construire des abaques donnant les variations de F et déterminer les valeurs de θ pour F_{min} .

$$\text{Donc } N_i = \frac{u_i \sin \varepsilon_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F} + W_i + V_A - V_B - \frac{c \cdot L_i}{F} \sin \varepsilon_i}{\cos \varepsilon_i + \sin \varepsilon_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F}}$$

$$H_A - H_B = \frac{(W_i + V_A - V_B) \cdot \cos \varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} - \frac{u_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F} + \frac{W_i + V_A - V_B}{\sin \varepsilon_i} - \frac{c \cdot L_i}{F}}{\cos \varepsilon_i + \sin \varepsilon_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F}}$$

Considérons maintenant l'ensemble des tranches. Le massif sera en état d'équilibre limite si les moments moteurs sont égaux aux moments résultants. L'égalité des moments par rapport au centre 0 du cercle de rupture de rayon R s'écrit :

$$\sum_i^n X_i \cdot W_i = \sum_i^n T_i \cdot R$$

En effet, les réactions inter-tranches $R_A, R_B \dots$ s'annulent deux à deux et les résultantes N passent par 0, donc leur moment est nul. On a en outre:

$$X_i = R \cdot \sin \varepsilon_i \Rightarrow \sum_i^n T_i = \sum_i^n W_i \cdot \sin \varepsilon_i$$

Le coefficient de sécurité est alors :

$$F = \sum_i^n \frac{[c \cdot L_i + (N_i - u_i) \cdot \tan \varphi]}{\sum_i^n W_i \cdot \sin \varepsilon_i}$$

En utilisant le résultat de l'équation (1) on en tire :

$$F = \sum_i^n \frac{\sum_i^n \left[\frac{(W_i - u_i \cos \varepsilon_i + V_A - V_B) \tan \varphi}{\cos \varepsilon_i + \frac{\tan \varphi}{F} \cdot \sin \varepsilon_i} + \frac{c \cdot L_i}{F} \right]}{\sum_i^n W_i \cdot \sin \varepsilon_i}$$

D'autre part on sait que : $\sum_i^n (H_A - H_B) = 0$; on peut donc écrire :

$$\sum_i^n \left[\frac{(W_i + V_A - V_B) \cdot \cos \varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} - \frac{u_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F} + \frac{W_i + V_A - V_B}{\sin \varepsilon_i} - \frac{c \cdot L_i}{F}}{\cos \varepsilon_i + \sin \varepsilon_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F}} \right] = 0$$

On obtient donc deux relations entre F et $V_A - V_B$. Le coefficient de sécurité est alors déterminé par itération entre les deux expressions (4) et (5).

En fait Bishop a démontré que les quantités $V_A - V_B$ étaient toujours négligeables, l'erreur commise étant $< 1\%$. Dans ce cas F devient :

$$F = \sum_i^n \left[\frac{(W_i + V_A - V_B) \cdot \cos \varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} - \frac{c \cdot L_i \cdot \cos \varepsilon_i}{\cos \varepsilon_i + \sin \varepsilon_i \cdot \frac{\tan \varphi}{F}} \right]$$

L'itération devient alors très facile. On introduit dans le 2nd membre de la valeur de F donnée par la méthode de Fellenius et on calcule une nouvelle valeur de F par la formule, que l'on réintroduit, et ainsi de suite. Pour être certain de trouver le minimum de F , il faut environ une centaine de cercles. Or le calcul à la main d'un cercle pour 10 à 15 tranches demande à peu près 3h pour un bon calculateur. La détermination d'un coefficient de sécurité demande donc 1 mois de travail. On conçoit donc aisément que l'emploi d'abaques est nécessaires et que l'emploi de l'informatique ne serait pas superflu.

L'avantage de la méthode de Bishop, est qu'elle permet de calculer un coefficient F dans le cas de sols hétérogènes et avec des formes de pentes très complexes, mais les calculs restent très longs [35].

II-3.3.2 Méthode de FELLENIUS (1927)

C'est la méthode la plus simple pour l'analyse de stabilité des talus. Fellenius suppose que le volume de glissement délimité par la surface de glissement et la topographie du talus est subdivisé en n tranches. Chaque tranche est considérée comme un solide indéformable, en équilibre sur la ligne de glissement. Considérons un talus recoupant un certain nombre de couches de sols de caractéristiques différentes c_i , γ_i et φ_i . La stabilité est étudiée en considérant le problème 2D, c'est-à-dire en analysant l'équilibre d'une masse de sol d'épaisseur unité dans le sens perpendiculaire à la figure.

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement. La méthode consiste à découper le volume de sol concerné (compris dans l'arc EMF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux. Etudions l'équilibre de l'une de ces tranches, par exemple la tranche "ABCD". Les forces agissant sur cette tranche sont les suivantes [36]:

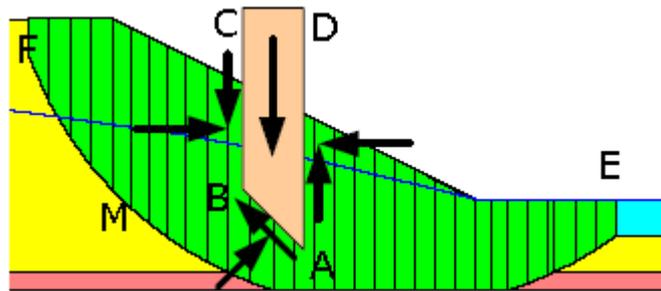


Figure II.3.3.2 : Forces agissant sur la tranche de terrain ABCD

- Son poids W ;
- La réaction du milieu sous-jacent sur l'arc AB ;
- Les réactions sur les faces verticales BC et AD décomposées en réactions horizontales H et en réactions verticales V . Il s'agit de forces internes au massif étudié.
- Les pressions hydrauliques.

Définissons par rapport au centre O :

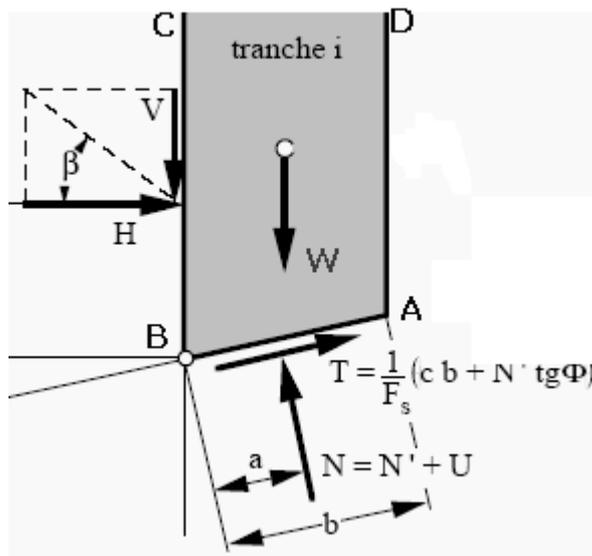
- Le moment moteur, comme celui du poids des terres W (et des surcharges éventuelles), qui tend à provoquer le glissement ;
- Les moments résistants, comme ceux des réactions s'opposant globalement au glissement de la tranche.

La surface de rupture étant limitée par les points E et F , le coefficient de sécurité global F_s est défini par le quotient:

$$F_S = \frac{S_{EF}(\text{des moments résistants maximaux})}{S_{EF}(\text{des moments moteurs})}$$

Considérons la somme des moments pour l'arc EF, sachant que la somme des moments des forces est nulle. Fellenius a fait une hypothèse qui simplifie considérablement les calculs, à savoir que la seule force agissant sur l'arc AB est le poids W, à l'exception des forces internes. Dans ces conditions, le moment résistant maximal est fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de R_n : $(R_n)_t$. D'après la loi de Coulomb, elle s'écrit [36]:

$$(R_n)_t = c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i$$



La somme des moments pour toutes les tranches est :

$$\sum_{n=1}^{n=m} R \cdot (c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i)$$

Avec : m : nombre total de tranches,
 R : rayon du cercle de glissement.
 c_i et φ_i : caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est situé l'arc de la tranche AB.

Par ailleurs, le moment moteur est dû à T_n et égal à $T_n \cdot R$, d'où:

$$F_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} (c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i)}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n}$$

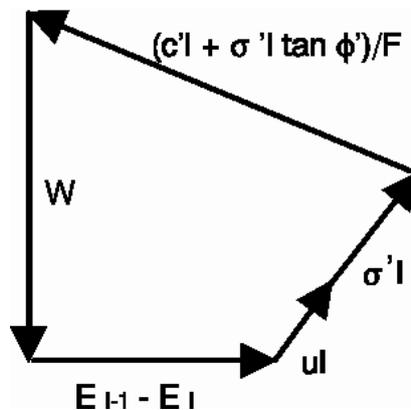
N.B. : Au voisinage de 0, T_n prend des valeurs négatives, dont il faut tenir compte. L'expression de F est donc algébrique.

On voit donc que ce travail est long. Généralement, on préfère donner les résultats sous forme graphique. En effet, on détermine les lieux géométriques des centres des cercles correspondant à un coefficient de sécurité constant [36].

II-3.3.3 Méthode de BISHOP (1955)

La méthode de Bishop simplifiée est la plus utilisée des méthodes de calcul en rupture circulaire. Bien qu'elle possède un certain nombre d'imperfections son grand usage lui confère un statut de méthode de référence.

On considère une tranche verticale de sol soumise à l'action de ses voisines, celles-ci n'ayant qu'une action horizontale, et aux forces normales et de cisaillement centrées à la base de la tranche [37].



La construction du funiculaire des forces appliquées à cette tranche permet d'écrire l'équilibre vertical qui fournit une expression de la force à la base de la tranche : $\sigma'l$.

$$\sigma'l = \frac{w - ul \cdot \cos \alpha - \frac{\sigma'l}{F} \sin \alpha}{\cos \alpha + \tan \varphi \cdot \frac{\sin \alpha}{F}}$$

On considère une rupture circulaire, cette expression permet d'écrire l'équilibre global des moments, et l'on obtient le coefficient de sécurité F par [37]:

$$F = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment moteur}}$$

Le moment moteur, est dû au poids des terres, et a pour expression :

$M_{mot} = R. \sum w_i \sin \alpha_i$ avec R rayon du cercle de rupture.

Le Moment résistant ne correspond qu'aux forces de cisaillement, et a pour expression :

$$M_{res} = R. \sum (c' l + \sigma' l \tan \varphi')$$

En développant on trouve [37]:

$$F = \frac{\sum b_i (c' + \gamma h_i - u_i) \tan \varphi' / m(\alpha_i)}{\sum w_i \sin \alpha_i}$$

Le terme $m(\alpha_i) = \cos \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \tan \varphi' / F)$ pose quelques problèmes de programmation car il peut devenir nul.

L'expression du coefficient de sécurité, montre que le procédé est itératif puisque F apparaît dans les deux membres de l'expression. La convergence est rapide quand F_0 , première valeur de F dans le processus itératif, est pris égal à $F_{fellenius}$.

Prendre $F_0 =$ constante (1 par exemple) peut faire converger le processus vers une valeur erronée de F , la courbe $F = f(F)$ possédant plusieurs asymptotes dans le cas de sols frottants.

Pour résoudre les problèmes posés par le terme $m(\alpha_i)$, l'analyse des programmes existant montre que plusieurs tests ont été introduits dans la programmation de la méthode. Il s'agit de faire en sorte que τ ne soit jamais négatif et que σ'_n ne soit jamais supérieur à une valeur finie, en général deux fois la contrainte de Fellenius égale à $\sigma_f = \gamma h \cos^2 \alpha_i$. L'expression de la contrainte de Bishop s'obtient à partir des équations précédentes et s'écrit [37]:

$$\sigma_{Bishop} = \frac{\gamma h_i - u_i - \frac{c' \tan \alpha_i}{F}}{1 - \frac{\tan \varphi' \tan \alpha_i}{F}}$$

II-3.3.4 Méthode du cercle de frottement

Les méthodes consistant à découper en tranches verticales ont l'avantage de rester valables même lorsque le massif présente des couches de caractéristiques mécaniques différentes. Par contre, la méthode "du cercle de frottement" ne peut s'appliquer que si le milieu est homogène. Cependant, son caractère de méthode graphique la rend intéressante du point de vue de la compréhension globale du phénomène de stabilité de pente. Considérons un cercle de glissement de rayon et de centre 0 et supposons que le milieu est en équilibre limite.

La réaction \overrightarrow{dR} due au frottement le long d'un élément d'arc dl peut se décomposer en une réaction due au frottement interne $\overrightarrow{dR_\phi}$ et une composante de cohésion $\overrightarrow{dR_c}$ [37]:

$$\overrightarrow{dR} = \overrightarrow{dR_\phi} + \overrightarrow{dR_c}$$

$$|\overrightarrow{dR_c}| = c \cdot dl \quad \text{avec } (c : \text{cohésion du milieu}).$$

A la rupture, $\overrightarrow{dR_\phi}$ fait l'angle ϕ avec la normale à dl donc toutes les réactions élémentaires enveloppent un cercle de centre O et de rayon $r \cdot \sin \phi$. Ce cercle est appelé cercle de frottement. Si on trace le polygone des forces élémentaires de cohésion $\overrightarrow{dR_c}$, la résultante $\overrightarrow{R_c}$ sera parallèle à la corde AB . Elle agira à une distance OH de O telle que :

$$R_c \cdot OH = r \int |\overrightarrow{dR_c}| = \int c \cdot dl = r \cdot c \cdot L \quad \text{avec } L: \text{longueur de } \widehat{AB}$$

D'autre part, si le milieu est homogène :

$$R_c = c \cdot AB \Rightarrow f_c \cdot OH = OH \cdot c \cdot AB = r \cdot c \cdot L$$

$$OH = \frac{r \cdot L}{AB} \quad \text{et} \quad \frac{L}{AB} > 1 \quad \text{et} \quad OH > r$$

Les études de Taylor et Terzaghi ont permis de démontrer que la résultante $\overrightarrow{R_\phi}$ est portée par une droite tangente à un cercle de centre O et de rayon $K \cdot r \cdot \sin \phi$. Bien que K dépende de l'angle \widehat{AOB} ainsi que des variations des contraintes normales aux arcs élémentaires, on peut faire en 1^{ère} approximation l'hypothèse que $K = 1$. On en déduit alors que le support de $\overrightarrow{R_\phi}$ est tangent au cercle de frottement.

On peut donc faire une résolution graphique. A l'équilibre limite [38]:

$$\overrightarrow{W} + \overrightarrow{R_c} + \overrightarrow{R_\phi} = 0$$

- \overrightarrow{W} est portée par une verticale passant par le centre de gravité G de la partie du massif en rupture.
- $\overrightarrow{R_c}$ est connue. Elle est portée par une parallèle à AB située à une distance : $OH = \frac{r \cdot L}{AB}$ de O .

Pour déterminer $\overrightarrow{R_\phi}$, on mène par E , ($|\overrightarrow{W}| = O'E$) une parallèle à $\overrightarrow{R_c}$. Elle coupe la droite tangente au cercle de frottement $O'K$ en F .

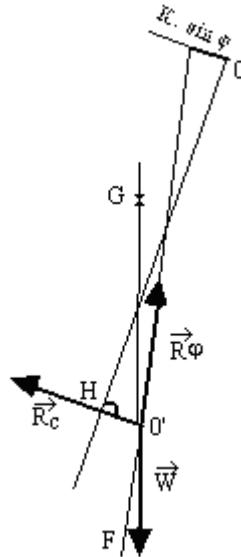
$$O'F = |\overrightarrow{R_\phi}|$$

$$EF = |\overrightarrow{R_c}|$$

En fait $\overrightarrow{R_c}$ représente la force de cisaillement réellement mobilisée. A l'équilibre on a donc en réalité $\overrightarrow{R_c} = |\overrightarrow{r_c}|$.

On reporte alors $\overrightarrow{R_\varphi}$ à partir de D . $R_{\varphi t}$ est donc la composante de R_φ sur la tangente au cercle en D ; puisque le coefficient de sécurité est égal au rapport du moment résistant sur le moment moteur, on peut écrire :

$$F = \frac{r \cdot R_{\varphi t} + OH \cdot R_c}{r \cdot R_{\varphi t} + OH \cdot r_c}$$



II-3.4 Choix des caractéristiques mécaniques à prendre en compte

Dans les calculs de stabilité, le choix des caractéristiques mécaniques est fonction du problème lui-même. Mais d'une manière générale on constate que lorsqu'il s'agit de sols argileux, le calcul à court terme conduit au coefficient de sécurité le plus faible. L'expérience montre que c'est souvent juste après la construction que se produisent les glissements dans les sols argileux. On utilisera donc les caractéristiques mécaniques non drainées (C_u , φ_u). Par contre dans les sols sableux, le calcul à court terme n'a pas de sens car on atteint très rapidement le long terme. On utilisera donc les caractéristiques mécaniques (C_{CD} , φ_{CD}) ou (C' , φ') [38].

II-4 Présentation du site

II-4.1 Contexte général

Le centre d'enfouissement technique choisi pour notre étude est situé dans la wilaya de Tipaza, à l'Ouest de la wilaya d'Alger, environ 20 km (à la frontière des deux wilayas).

A son voisinage immédiat on trouve :

- A l'Ouest l'oued Mazafran et la ville de Douaouda (wilaya de Tipaza);
- A l'Est la commune de Mahelma (wilaya d'Alger) ;
- Et entouré de végétation et forêt au Nord et au Sud.

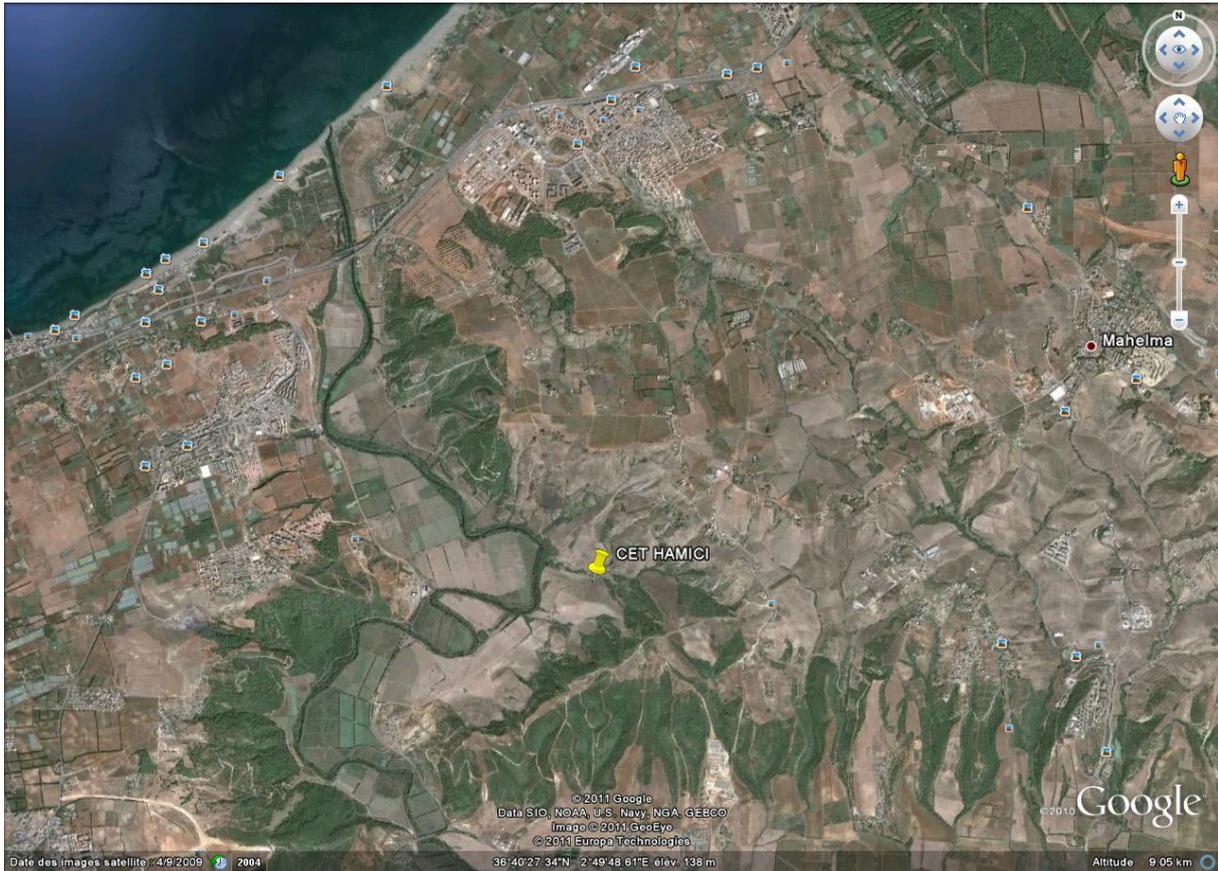


Figure II.4.1 : Image satellite de la localisation du CET de Hamissi

II-4.2 Description des formations locales

La wilaya de Tipaza est située dans le Nord-centre de l'Algérie, c'est une région côtière donc les formations sont récentes, à dominance de terrains sédimentaires.

D'une manière générale, les faciès géologiques montrent que la structure de la région est simple : deux formations affleurent et comportent des terrains marneux (mélange naturel de calcaire et d'argile) ou argileux, parfois mêlés à des sables.

La carte géologique présentée ci-dessous (carte au 1/500.000^e) montre que la zone d'implantation du C.E.T présente des roches sédimentaires allant du Tertiaire au Quaternaire. Le Tertiaire, l'époque du Pliocène marin où la présence de conglomérats, marnes bleues, molasses et grès est à signaler.

Le Quaternaire marin avec la présence d'anciennes plages et formations dunaires consolidées (stabilisées) qui les accompagnent.

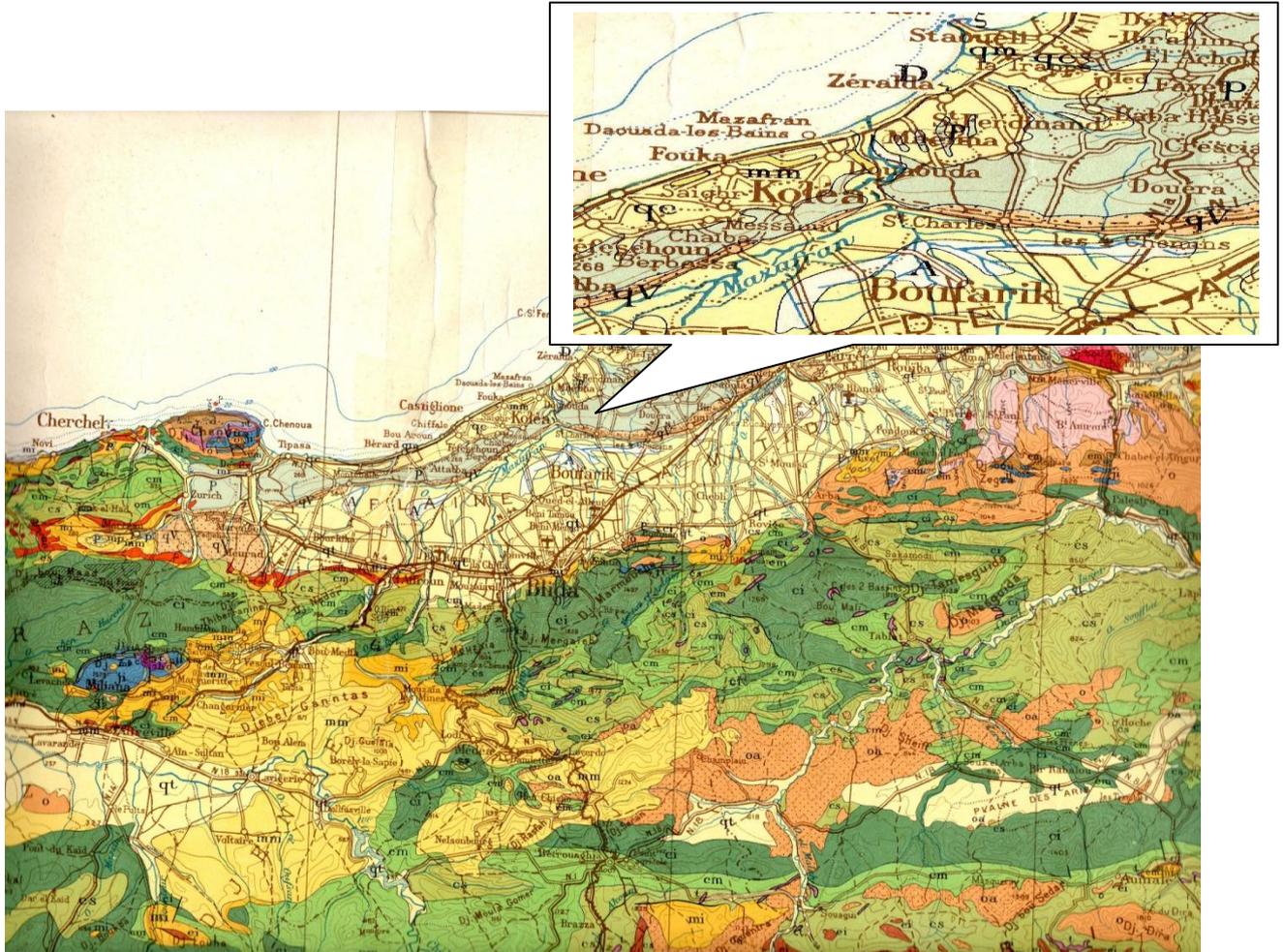


Figure II.4.2 : Carte géologique du Nord de l'Algérie (1/500.000^e)

Avec la légende suivante :

| TERRAINS | | SÉDIMENTAIRES | |
|----------|---|---------------|--|
| A | Alluvions actuelles: lacs, marécages, dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-salines | | |
| D | Dunes récentes | | |
| qt | Quaternaire continental: alluvions, regs, terrasses | | |
| qm | Quaternaire marin: plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent | | |
| qC | Calabrien: grès marins et formations dunaires associées | | |
| qV | Villafranchien: calcaires et castres, argiles à lignite, couches rouges | | |
| pV | Pliocène continental et Villafranchien non séparés (pV) | | |
| pe | Pliocène continental: poudingues, calcaires lacustres | | |
| P | Pliocène marin conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées | | |
| mp | Pontien (localement équivalent du mc) | | |
| ms | Miocène terminal marin et lagunaire: couches à Tripoli, marnes à gypse | | |
| mm | Miocène supérieur marin: calcaires, grès, argiles | | |
| mc | mc Miocène continental antépontien | | |
| mi | Miocène inférieur marin (Burdigalien) | | |
| oa | Aquitanién continental (pouvant inclure localement la base du Burdigalien) | | |
| oc | Oligocène continental (pouvant inclure localement l'Eocène sup ^r continental) | | |
| o | Oligocène marin incluant localement l'Eocène supérieur) | | |
| em | Eocène moyen marin | | |
| ec | ec Eocène moyen et inférieur continental | | |
| ei | Eocène inférieur marin | | |

II-4.3 Raisons du choix du site

Les arguments géologique et hydrogéologique en faveur du choix de ce site pour le CET sont très forts :

- En surface, présence du matériau argileux (marnes) peu perméable sur une épaisseur d'environ 50m et sur une grande surface ;
- Terrain peu accidenté ;
- Absence de captage d'eau potable à proximité.

D'autres facteurs sont également remarquables :

- Isolement par rapport aux secteurs habités ;
- Proximité d'aménagements : routes...
- Milieu naturel d'intérêt moyen ;
- Facilité d'accès à partir de la route ou autoroute.

II-4.4 Implantation générale

Le CET de Hamissi est situé sur un vaste terrain d'une superficie de 100 Ha, clôturé et entouré d'une route qui permet un accès facile et direct vers toutes les différentes phases, au nombre de sept, existantes.

Chaque phase correspond à un casier d'enfouissement, donc 7 casiers, dont le volume total est de 10 Millions de tonnes.

Les casiers sont de forme géométrique différente (rectangle, carré etc.), d'une profondeur de 50m chacun [39].

Les travaux d'aménagement sont indispensables à la mise en place d'un système d'exploitation des déchets, visant en priorité à protéger l'environnement du site de toutes nuisances susceptibles d'être générées. Ces travaux portent notamment sur :

- 1- L'imperméabilisation des casiers.
- 2- La mise en place de points de contrôle des eaux superficielles.
- 3- La mise en place d'un système d'évacuation des eaux de pluie.
- 4- La mise en place d'une chemise de drainage pour l'évacuation des percolats de chaque casier.
- 5- Les matériaux issus du déblai des casiers, devront faire l'objet d'un stockage de façon sélective afin de différencier les argiles, les sables et les terres végétales.
- 6- L'installation d'un bassin de stockage des eaux de percolation.
- 7- La mise en place et en service d'un pont bascule à l'entrée de la décharge.
- 8- La construction des bâtiments d'entretiens et des bureaux.
- 9- Les plantations périphériques intérieures et extérieures (mur de clôture).

II-4.5 Conception et Réalisation du CET:

II-4.5.1 Les casiers d'enfouissement :

Après étude du sol et des caractéristiques géologiques du site retenu pour l'implantation de la décharge, commence alors les travaux de terrassement, une excavation d'une cinquantaine de mètres de profondeur est creusée (casier). Sur le fond du casier est déposée une couche d'argile ou de marne : matériaux naturels.

Intervient ensuite la pose de la géo-membrane en PEHD sur le fond et les talus du casier, la pose de cette géo-membrane exige une maîtrise des techniques de soudures. Cette dernière est alors recouverte par une couche de géotextile pour la protéger.



Figure II.4.5.1.1 : Casier d'enfouissement-vue en coupe

Un caniveau de drainage perforé et entouré de grillage pour recueillir les lixiviats est aménagé dans l'axe du casier dans le sens de sa largeur ou sa longueur.



Figure II.4.5.1.2 : Caniveau de drainage des lixiviats

Enfin une dernière couche de 50 cm de gravier de dimensions différentes, (10% de calcaire) est déposée.

Des cheminées d'évacuation de biogaz provenant de la décomposition des déchets sont installées avant l'épandage de la couche du gravier. Ce système de captage, est réalisé à l'aide des buses verticales à parois perforées empilées au fur et à mesure de la progression de la hauteur des déchets dans le casier. A partir de cette ultime phase, l'épandage des déchets domestiques peut commencer.

II-4.5.2 Réseau de drainage des lixiviats et des biogaz

Afin de capter et éviter l'accumulation des eaux de lixiviations vers le bas des casiers, un réseau est installé au fond des cellules. Les conduites sont en PVC perforés de 25 cm de diamètre.



Figure II.4.5.2.1 : conduites de drainage

Ces tubes sont disposés dans les fosses, ensuite recouverts de pierre concassée et d'un géotextile de filtration afin de minimiser les risques d'obstruction.

L'ensemble est recouvert d'une couche de gravier 50 /25 de 40 cm d'épaisseur.

Des conduites perforées sont installées aux points bas des casiers, elles sont destinées au captage de biogaz.



Figure II.4.5.2.2 : Torchères

Le schéma présenté ci-dessous montre une vue en coupe d'un casier d'enfouissement avec tout son installation :

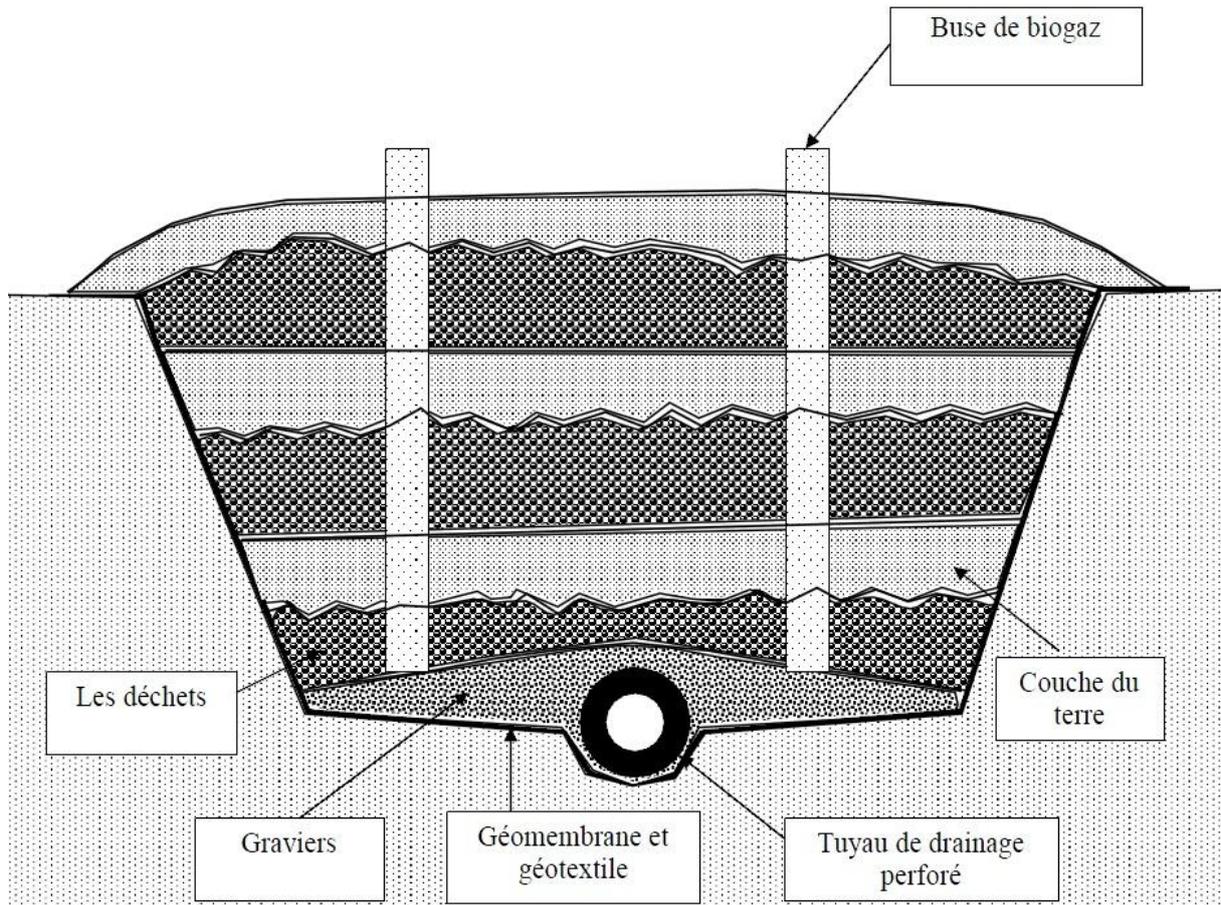


Figure II.4.5.2.3 : Vue de coupe d'un casier d'enfouissement

CHAPITRE III :
RESULTATS ET
INTERPRETATIONS

Comme nous l'avions vu dans la partie théorique, la réalisation d'un CET nécessite des études approfondies sur le sol et le sous sol. Nous avons pu avoir en notre possession les résultats de ces études menées sur le CET de Hamissi.

Pour nous permettre d'avoir une bonne description de la structure du sous-sol un certain nombre de sondages a été réalisé, 9 d'entre eux ont été choisis, pour cela plusieurs puits ont été forés a des endroits différents et des profondeurs variées, la maximale étant de 50m et des échantillons représentatifs ont été pris de profondeurs différentes.

Des experts ont analysé ces échantillons issus de plusieurs puits qui se répartissent comme le montre le plan topographique ci-joint.

Nous prendrons comme exemple d'étude le puits n°1 que nous allons présenter en détaillant l'ensemble des procédures réalisées.

(Les tableaux récapitulatifs des essais sur l'ensemble des puits du CET sont en annexe II).

Après les opérations menées conformément au mode opératoire que nous avons présenté dans les chapitres précédents, nous avons obtenu les résultats suivant :

1. L'étude géologique :

Le sondage n°1 a été réalisé a une profondeur de 50m, ce qui nous a permis de voir la nature du sous-sol :

- Le niveau de la nappe est à 2,5m ;
- A 5m des Limons, avec un taux de récupération de 90% ;
- A 7m des marnes jaunâtres sableuses graveleuses, avec un taux de récupération de 90% ;
- A 11,50m des marnes grisâtres à verdâtres schisteuses, avec un taux de récupération de 90% ;
- Et jusqu'à 50m des marnes grises schisteuses sableuses compactes, avec un taux de récupération de 95%.

Des échantillons ont été pris à différentes profondeurs :

- De 5,50m à 5,70m dans les marnes jaunâtres sableuses graveleuses ;
- De 9,50m à 10,00m dans les marnes grisâtres à verdâtres schisteuses ;
- De 10,50m a 20,00m dans les marnes grises schisteuses sableuses compactes.

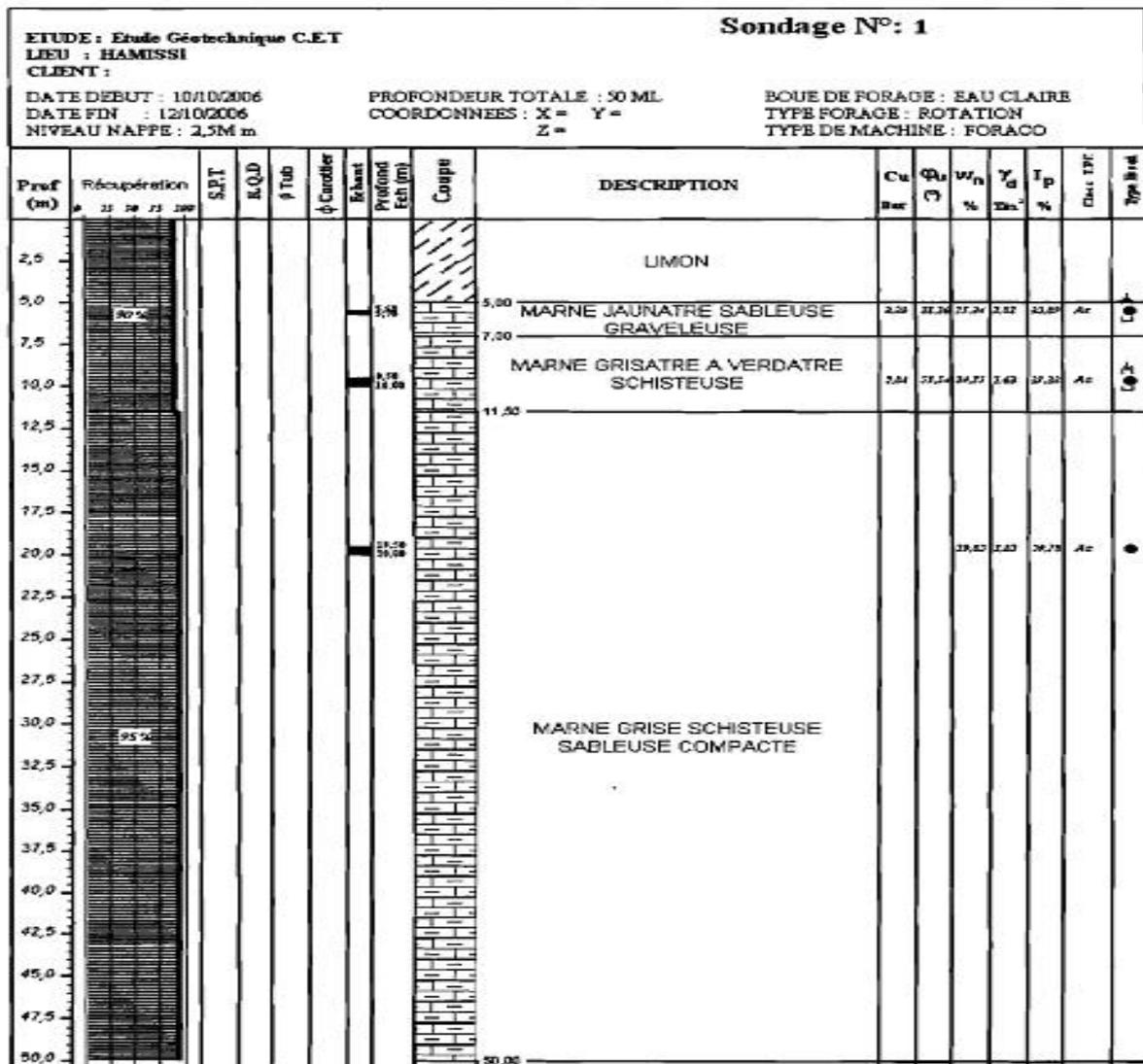


Tableau III-1 : Sondage géologique n°1

Des analyses ont été faites sur chaque échantillon :

- a- Essai de cisaillement pour la détermination de la cohésion et l'angle de frottement du sol ;
- b- Calcul de la teneur en eau W ;
- c- Calcul de la densité sèche γ_d ;
- d- Calcul de l'indice de plasticité I_p ;
- e- Procéder à la classification LPC.

On déduit du sondage n°1, que le sous-sol est constitué essentiellement de marnes de différentes porosités, ceci est du aux composantes de sol associées comme le sable et le gravier, et dans ce cas la marne devient un milieu poreux, ou bien des marnes schisteuses compactes qui constituent un milieu faiblement poreux à cause de la compacité et la densité de ces dernières.

D'après les différents sondages géologiques réalisés, nous pouvons conclure que le sous-sol est à dominance de formations marneuses, avec passage vertical de niveaux argileux et schisteux associé parfois à des niveaux sableux et graveleux.

(Les logs des sondages géologiques de tout les puits sont présentés en annexe I)

2. L'étude géotechnique :

| ETUDE : ETUDE GEOTECHNIQUE C.E.T LIEU : HAMISSI CLIENT : | | Puits : 1 COORDONNEES : X = Y = Z = DATE : | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|--|------------------------|---------------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------|---------|----------------------|------------|---------------------|
| Profondeur (m) | Coupe Lithologique | DESCRIPTION GEOTECHNIQUE | Profondeur Echantillon | Granulométrie | | | Essais d'identification | | | | Proctor | | Indice CBR | Classification LCPC |
| | | | | < 2mm (%) | < 80 µ (%) | < 75 µ (%) | γ _d (g/cm ³) | W _n (%) | W _L (%) | IP (%) | IC | W _{opt} (%) | | |
| 0,5 | | LIMON | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 | | LIMON BRUNATRE A CONCRETIONS CALCAIRES | | | | | | | | | | | | |
| 1,5 | | MARNE JAUNATRE GRAVELEUSE A CONCRETIONS CALCAIRES | 1,60 1,80 | | 98,26 | | 637 | 33,60 | 14,30 | 1,90 | | | | Ap |
| 2,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3,5 | | MARNE VERDATRE GRAVELEUSE CAILLOUTEUSE A CONCRETIONS CALCAIRES | | | | | | | | | | | | |
| 4,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,5 | | | 4,40 4,60 | | 78,27 | | 621 | 61,16 | 28,51 | 1,42 | | | | Ap |
| 5,0 | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau III-2 : Essais géotechniques sur le puits n°1

Ce puits a été foré à une profondeur de 5m, l'identification géologique du sous-sol a donnée :

- A 0.40m des limons ;
- A 1.00m des limons bruns à concrétions calcaires ;
- A 2,00m des marnes jaunâtres graveleuses à concrétions calcaires ;
- A 4,80m des marnes verdâtres graveleuse caillouteuses à concrétions calcaires.

Deux échantillons ont été pris :

- Le premier de 1,60m à 1,80m ;
- Et le second de 4,50m à 4,60m.

Nous avons fait deux essais pour l'identification du sol sur ces deux échantillons :

- **Echantillon n°1 (1,60-1,80m):**

a- L'essai granulométrique :

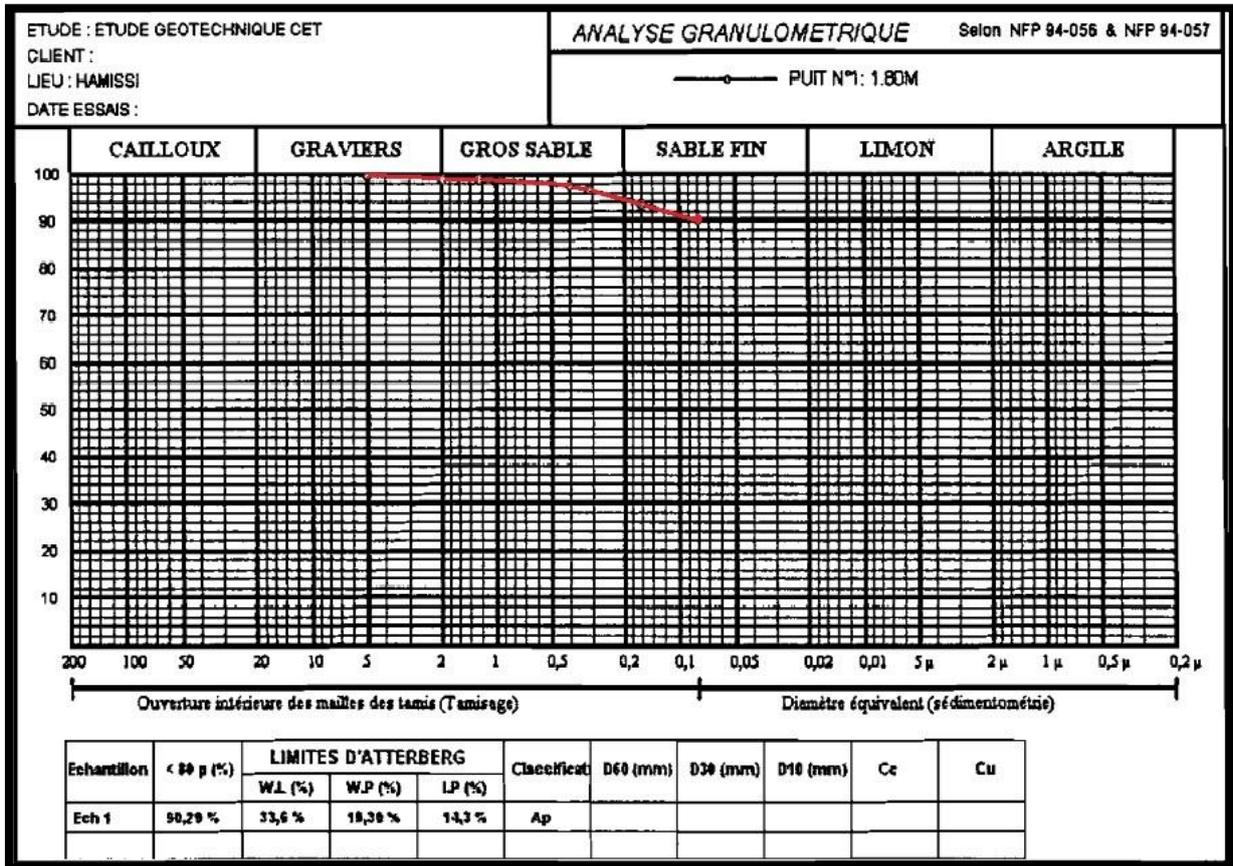


Figure III.2.1 : Graphe de la granulométrie de l'échantillon n°1

Nous remarquons que de 1,8mm à 5,0mm le taux des tamisats est de 100%, ce qui veut dire que toute la portion du sol est passée à travers les mailles du tamis, donc le diamètre des particules du sol est inférieur à 1,8mm.

Ensuite entre 0,08mm et 1,8mm nous remarquons que la courbe descend ce qui veut dire que le pourcentage des tamisats diminue avec la diminution du diamètre des tamis donc les grains de l'échantillon sont inférieurs à 0,08mm.

Ce qui veut dire que nous avons affaire à un sol de granulométrie relativement fine, d'après la courbe : des sables fins.

Donc nous pouvons effectuer les essais des limites d'Atterberg.

b- Les limites d'Atterberg :

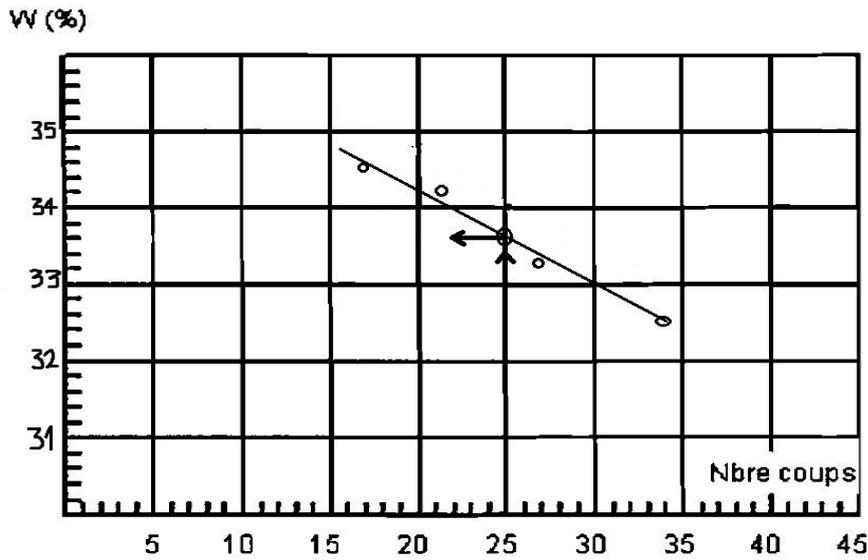


Figure III.2.2 : Graphe de la limite de liquidité W_L pour l'échantillon n°1

$$W_L = 33,6\%$$

| Essai n° | W_P (%) |
|----------|-----------|
| 1 | 19,1 |
| 2 | 20,03 |
| 3 | 18,78 |

⇒

| |
|-----------------|
| $W_P = 19,30\%$ |
|-----------------|

Et donc $I_P = 33,6 - 19,3 \Rightarrow I_P = 14,3\%$

Et donc la nature du sol est déterminée par l'abaque de Casagrande :

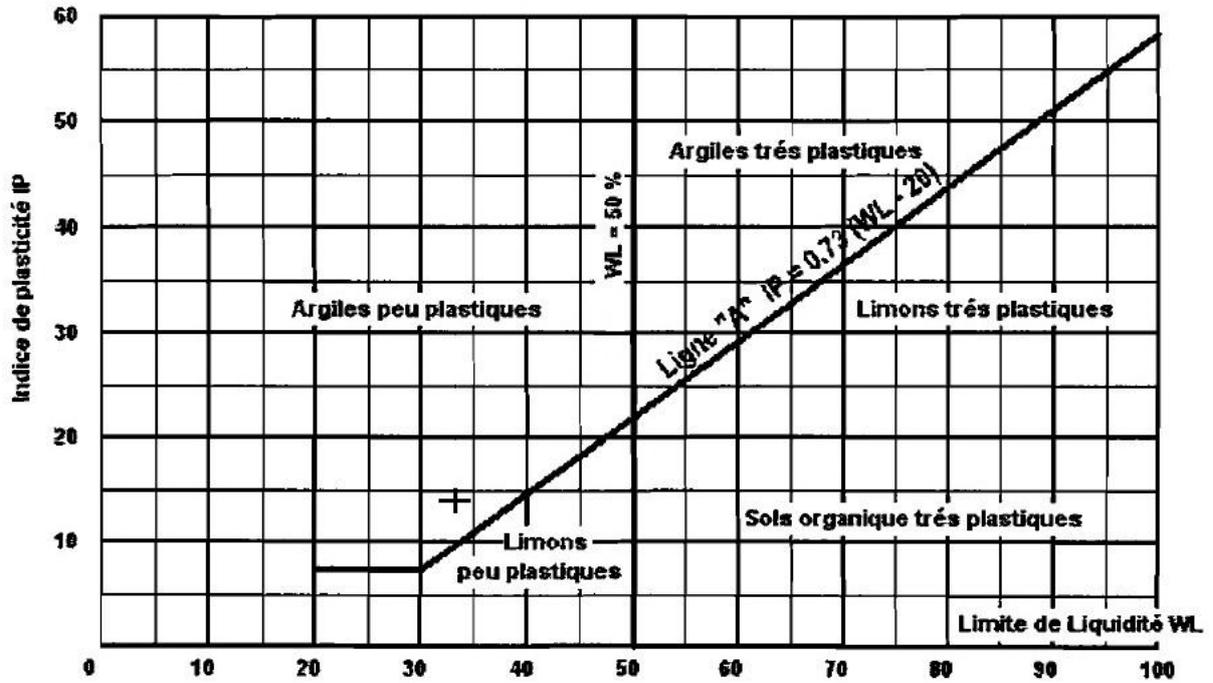


Figure III.2.3 : Abaque de Casagrande pour l'échantillon n°1

En rapportant les valeurs de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité nous trouvons que le sol est une argile peu plastique.

- Echantillon n°2 (4,50-4,60m):
 - a- L'essai granulométrique :

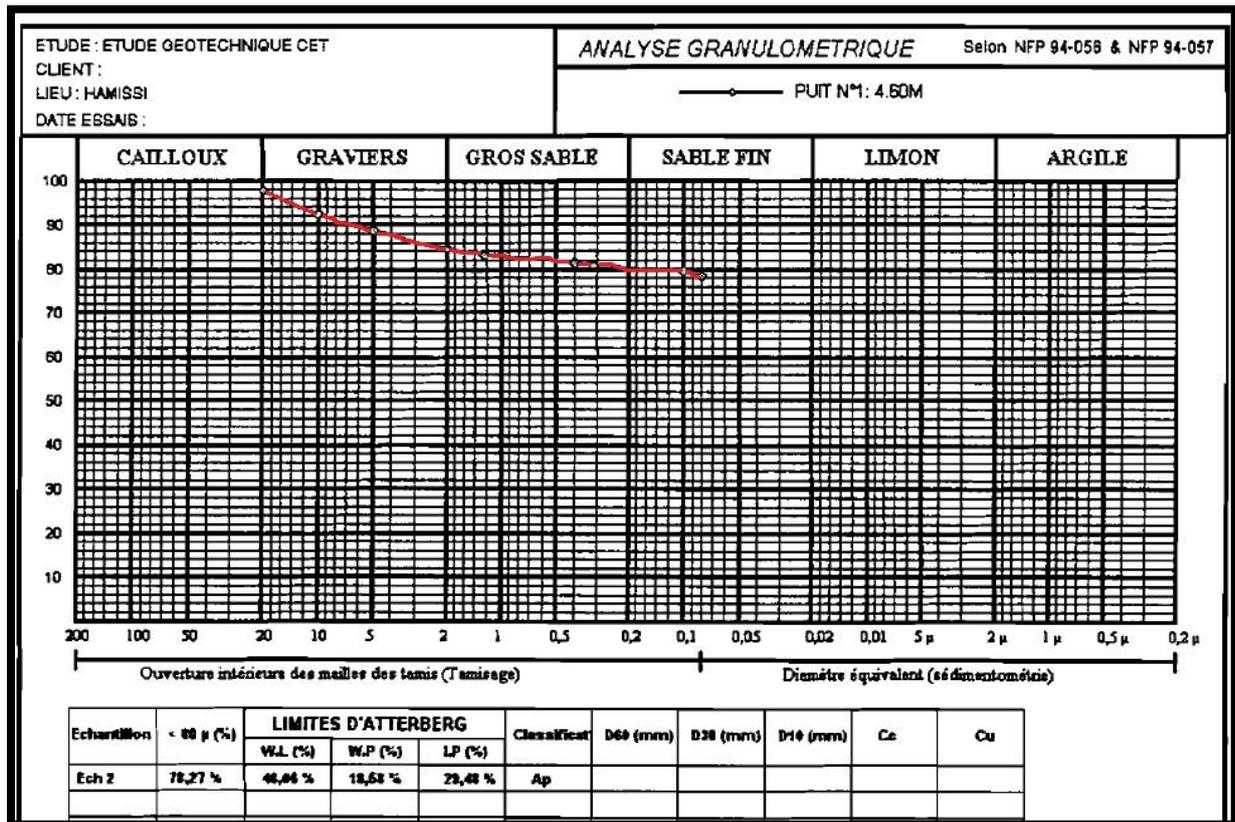


Figure III.2.4 : Graphe de la granulométrie de l'échantillon n°2

A 20 mm le tamisat est de 98%, nous sommes à la limite cailloux-graviers.

De 20mm à 2mm nous remarquons que la courbe descend ce qui veut dire que le pourcentage de tamisat diminue avec la diminution du diamètre des mailles des tamis et donc la granulométrie des particules de sol est inférieure à 2mm.

De 2mm à 0,2mm nous remarquons que le pourcentage reste relativement élevé de 80% à 84% de tamisats ce qui veut dire que le diamètre des particules reste inférieur à 0,2mm.

De 0,2mm à 0,1mm la courbe devient constante ce qui implique qu'il n'y a pas eu de tamisats donc 100% de refus.

Donc notre sol est de granulométrie fine, permettant l'application des essais des limites d'Atterberg.

b- Les limites d'Atterberg :

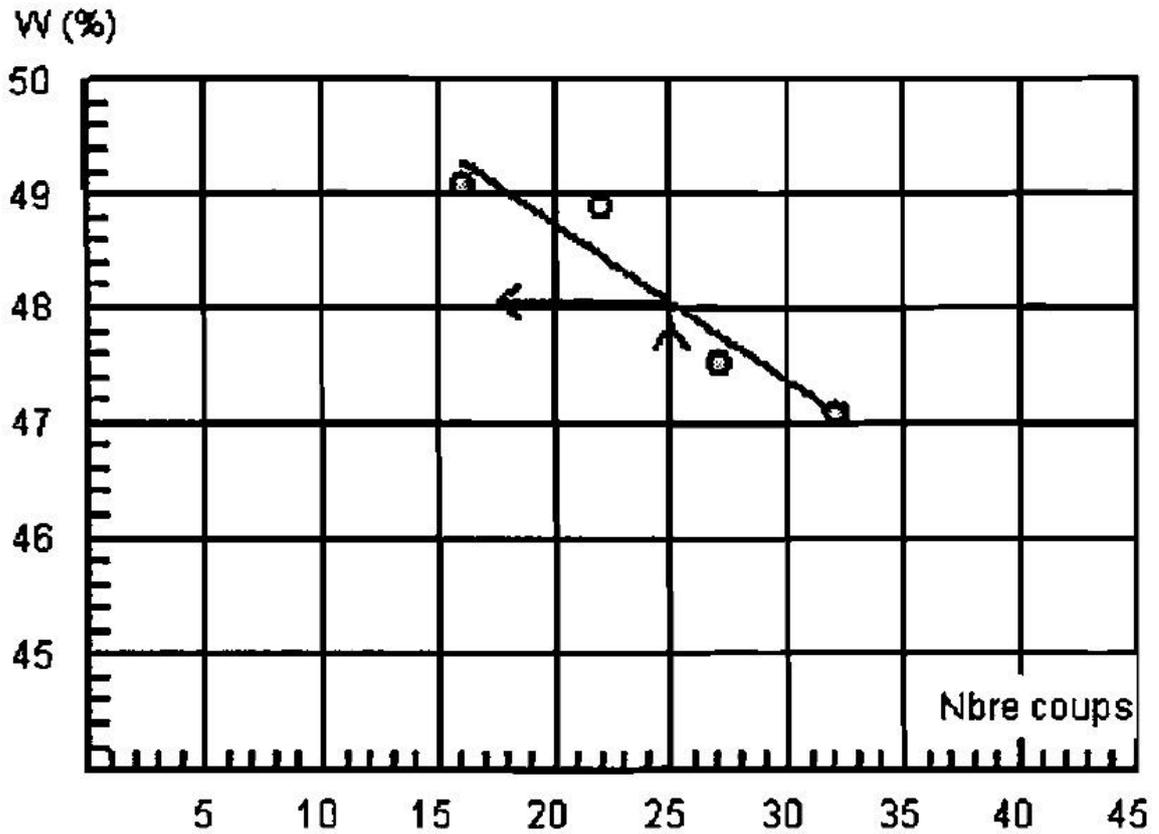


Figure III.2.5 : Graphe de la limite de liquidité W_L pour l'échantillon n°2

$$W_L = 48,06\%$$

| Essai n° | W_P |
|----------|-------|
| 1 | 12,5 |
| 2 | 21,82 |
| 3 | 21,43 |

$$\Rightarrow W_P = 18,58\%$$

$$I_P = W_L - W_P = 48,06 - 18,58 \Rightarrow I_P = 29,48\%$$

Et donc la nature du sol est déterminée par l'abaque de Casagrande :

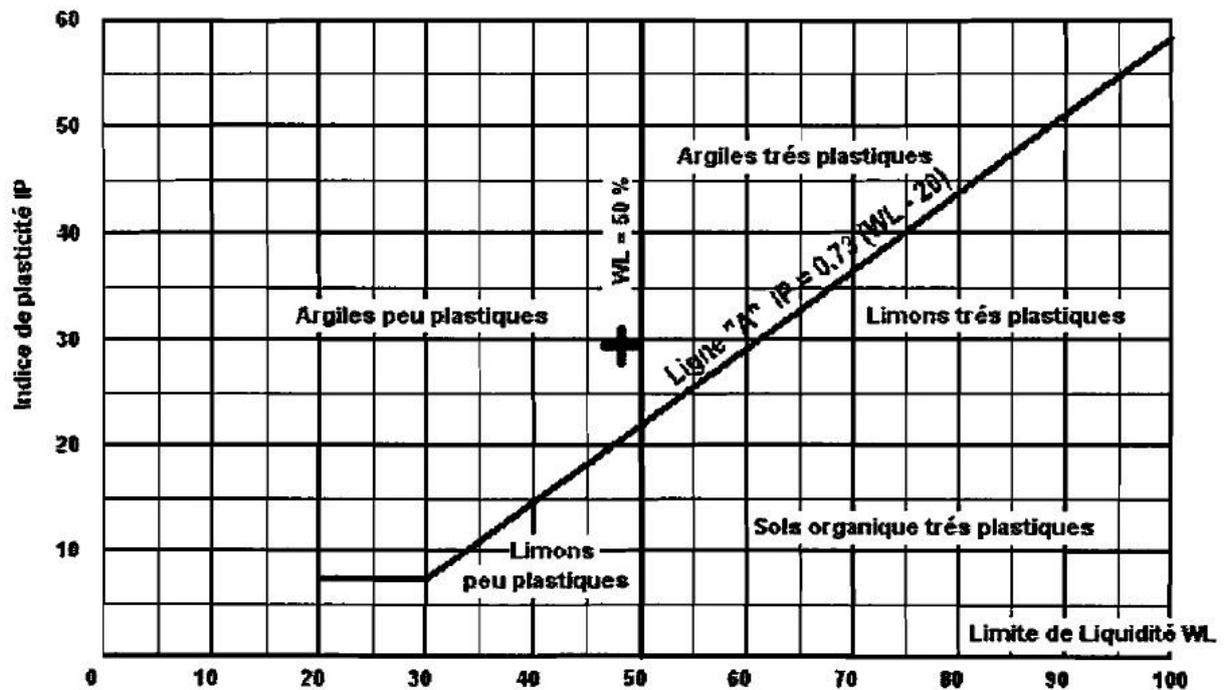


Figure III.2.6 : Abaque de Casagrande pour l'échantillon n°2

En rapportant les valeurs de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité nous trouvons que le sol est pratiquement à la limite entre une argile peu plastique et une argile très plastique.

Vu les résultats des différents sondages, nous pouvons affirmer que notre sol est constitué d'une argile peu ou très plastique ; ceci est très intéressant pour un CET, du moment que parmi les conditions d'installation correcte d'une décharge contrôlée, il faudra avoir un sol très imperméable.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale :

La gestion des déchets représente un réel défi pour n'importe quel gouvernement de n'importe quel pays, étant donné que cette action relève de la santé publique et la qualité de vie des citoyens. De plus, le déversement anarchique de déchet sur un site quelconque peut engendrer des coûts de dépollution et de décontamination exorbitants.

L'une des procédures de gestion existante actuellement et ayant prouvée son efficacité est le placement de ces déchets au niveau des CET, sujet sur lequel tourne notre étude.

Comme nous l'avons présenté au sein de ce rapport, et malgré les résultats forts satisfaisants de cette procédure de gestion, le CET reste un écosystème en constante évolution, qui consiste en la dégradation des déchets solides et donc production d'éléments dits « dérivés » qui peuvent être gazeux (biogaz : CH_4 et CO_2 essentiellement), ou liquides (lixiviats). Ces derniers présentent des risques de contamination et de pollution imminents, dans le cas où ils sont laissés sans contrôle, au contact du sol, sous-sol et air.

Pour parer aux problèmes de dispersion des biogaz dans l'air pouvant porter atteinte à la santé publique, et l'infiltration des lixiviats vers le sol et le sous sol provoquant une contamination bactériologique des eaux souterraines, des études approfondies, sur les sols des terrains pris en compte pour la mise en décharge des déchets choisis préalablement sur des critères spécifiques, doivent être faites en détails et minutieusement. Si ces terrains présentent les caractères requis pour contenir un CET (primordialement l'imperméabilité du sous-sol) le terrain sera exploité directement, si cette « barrière active » (qui est la couche d'argile ou de marne ou leurs dérivés) est absente, un remaniement des sols doit être fait en apportant une couche de ces dernières et le terrain sera exploité selon les normes suscitées.

Le site HAMISSI, au sein duquel un CET est en cours de réalisation, s'est avéré être un site présentant des caractéristiques très favorables à l'implantation d'une telle structure.

Nous avons commencé par des forages géologiques (carottage) où nous en avons déduit que le milieu est marneux avec passage vertical d'argile et de schiste associé parfois à des niveaux sableux et graveleux.

Ensuite, des sondages ont été réalisés pour nous permettre de prélever des couches du sous sols, et des essais ont été effectués sur plusieurs échantillons. En

premier lieu des analyses granulométriques qui ont permis d'estimer la taille des grains, constitutif du sol, inférieure à 80 μ m, nous en avons déduit que la granulométrie est fine et donc le sol pourrait être intéressant.

Ce qui nous a emmenés à procéder à des analyses plus approfondies sur ces échantillons pour connaître la nature des terrains. Ainsi, à partir des essais des limites d'Atterberg, nous pouvons dire que notre sol est constitué d'une argile peu à très plastique, ce qui convient à la mise en place du CET du fait de l'imperméabilité du sous-sol.

Le site peut donc être exploité en mettant en œuvre toutes les installations requises pour la mise en place du CET, en commençant par les casiers d'enfouissement qui vont être d'une profondeur considérable et donc de préférence ces excavations devraient être creusées en alvéoles pour permettre une meilleure stabilité des talus.

Les lixiviats, résultant de la décomposition des déchets, pourront être déversés sur le tas d'ordures ce qui permettra un traitement en moins, la non-nécessité de la mise en place des bacs pour le stockage de ces derniers mais surtout, ces liquides vont réduire le volume des déchets, donc le casier pourrait être exploité d'avantage.

Mais comme toute solution a des inconvénients, la réutilisation des lixiviats engendrera une plus grande formation des biogaz. Ces derniers pourront être valorisés par recyclage en énergie électrique. Il s'agit plutôt d'augmenter les profits de l'exploitation (mise sur réseau à 80%), sinon d'alimenter son éclairage du site ou sa station d'épuration de lixiviats.

Le suivi de l'exploitation est très important, pour voir non seulement l'évolution des déchets mais surtout le comportement des sols par rapport à ces derniers

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographique

- [1] F. MEZOUARI, Les décharges publiques du grand Alger et leur impact sur l'environnement, aspects réglementaires, urbanistiques et techniques. Thèse de Magister, EPAU, Alger (2004).
- [2] M.A.T.E (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), Rapport DOUNIA (2003).
- [3] MATE, Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés, (2003).
- [4] O.M.S. (Organisation Mondiale de Santé), Réduction, traitement et élimination des déchets, GENEVE (1971).
- [5] : K. HAMOURI et R. DJEMAA, Evaluation de la pollution des lixiviats de la décharge d'Ouled Fayet et proposition d'un traitement. Projet de fin d'étude, USTHB (2006).
- [6] : R.GILLET, Traité de gestion des déchets solides, Ministère de l'intérieur et de la collectivité locale, Volume 1, OMS, COPENHAGUE (1985).
- [7] : F. ATTOU, Caractérisation du lixiviat de la décharge d'Oued Smar et estimation de son impact sur la nappe souterraine. Projet de fin d'étude, E.N.P (1990).
- [8] : A.DAMIEN, Guide du traitement des déchets ; DUNOD, Paris (2002).
- [9] : D.HADDAD, Collecte et traitement des ordures ménagères de la ville de Boufarik. Projet de fin d'étude, E.N.P, Alger (1982).
- [10] : Claude-Marie VADROT, "Pensez durable : Économisez", éditions Hachette, (2008).
- [11] www.wikibooks.org
- [12] Ahmed Raouf ISMAIL, Caractérisation et traitement des lixiviats générés par les déchets du centre d'enfouissement technique d'Ouled Fayet. Projet de fin d'étude, E.N.P, (2008).
- [13] ADSE (Association de Défense de la Santé et de l'Environnement), "Enfouissement des déchets ménagers et assimilés en Essonne, Evaluation de l'opportunité du projet d'implantation d'un centre d'enfouissement technique de classe II sur la commune de Saint-Escobille", (2008).

[14] : Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD)
<http://www.beta.undp.org/undp/fr/home.html>

[15] : MATE, Guide méthodologique pour l'évaluation des incidences sur l'environnement : CET, (2005).

[16] : MATE, Guide pour la gestion des CET en Algérie : Guide d'exploitation des CET, (2005).

[17] : SEP (Société environnement polynésien), <http://www.taiarapu-est.pf/une-commune-a-votre-service/ramassage-des-dechets/164-centre-denfouissement-technique> : CET de Paihoro

[18] : Recommandations pour l'utilisation des géo-synthétiques dans les centres de stockage.

Fascicule n° 11, Comité français des géotextiles et géo-membranes (1995).

[19] : INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, <http://www.ineris.fr/aida/>, France (2002).

[20] : MATE, Guide pour le choix de site des CET, (2005).

[21] : "Analyse du dossier SITA 09/2007 de demande d'autorisation d'exploiter un CET de classe II à Saint-Escobille (91) Note de synthèse réglementaire sur l'étude d'impact", France (2008).

[22] : ANRED, la décharge contrôle des résidus urbains, Cahiers technique de la direction de la prévention des pollutions, N° 6, ANGERS (1981).

[23] : ADSE: <http://www.adse-saintescobille.com>.

[24] : SAGE : <http://www.uk.sagepub.com/home.nav> : Protection de la nappe de Beauce vis-à-vis des pollutions industrielles (2011).

[25] : B.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 II", (2008).

[26] : D.LEMAIRE, ASTER (Association pour les Sciences de la Terre, l'Environnement et la Recherche), "Expertise du dossier concernant la réalisation d'un site de stockage de déchets de classe II sur le territoire de la commune de Saint-Escobille (Essonne)", (2008).

[27] : F.MAMMERI, Caractérisation des lixiviats de la décharge d'Ouled Fayet et proposition d'un traitement. Projet de fin d'étude, E.N.P (2007).

[28] : FOUCAULT et RAOULT, Dictionnaire de Géologie, 4e édition.

[29] : Forage et carottage dans les roches : Techniques de l'Ingénieur.

- [30] : <http://geo.polymtl.ca/~marcotte/glq3401min/chapitre3.pdf>
- [31] : J.LERAU, INSA Toulouse (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), Cours de Géotechnique chapitre 1, (2005)
- [32] : J.M. TCHOUANI NANA (avril 1999) mis à jour par M. CALLAUD (décembre 2004) IIIIEE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement) : Cours de mécanique des sols Tome 1 : Propriétés des sols.
- [33] : <http://brindesciences.pagesperso-orange.fr/Granulo.htm>
- [34] : <http://wwz.ifremer.fr/dyneco/Moyens-Outils/Instrumentation-in-situ/Laboratoire-Physed/Scissometre-de-terrain>
- [35] : FECKER & Partner, Geotechnisches Ingenieurbüro : Mesures géotechniques aux pentes et talus (2004).
- [36] : J. COSTET & G. SANGLERAT Cours pratique de mécanique des sols. Calcul des ouvrages, Tome 2, Ed Dunod (1983).
W. Fellenius -Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion, Ernst, Berlin (1927).
- [37]: A.W. Bishop, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, V5, pp 7-17 (1955).
- [38] : M. CALLAUD, IIIIEE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement) : Cours de la stabilité des pentes (2004).
- [39] : AMENHYD (Aménagement, Environnement et Hydraulique), Cahier technique du CET de HAMISSI.

ANNEXES

ANNEXE I

ANNEXE II

Récapitulatif des essais géotechniques

| Sondage N°1 | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Profondeur (m) | | 5.0/5.70 | 9.50/10.0 | 19.5/20.0 | 31.4/31.9 | 40.5/41.0 | 48.5/48.8 |
| Teneur en eau | W (%) | 15.34 | 24.15 | 19.82 | | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.81 | 1.63 | 1.81 | | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 2.02 | 2.02 | 2.03 | | | |
| Degré saturation | Sr (%) | 70.67 | 98.57 | 64.23 | | | |
| Passant à 80 μ | (%) | 95.75 | 95.75 | 99.77 | | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 62.11 | 64.33 | 52.92 | | | |
| | Plasticité: IP | 32.89 | 37.33 | 29.78 | | | |
| Indice de consistance Ic | | 1.43 | 1.08 | 1.12 | | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | - | 3.08 | - | | 10.38 | |
| | Cc (%) | - | 7.49 | - | | 10.74 | |
| | Cg (%) | - | 3.04 | - | | 4.46 | |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | 3.33 | 2.84 | | 3.04 | | 0.63 |
| | φ (degrés) | 21.16 | 55.54 | | 55.95 | | 43.85 |
| Essai de compression simple | Rc (bars) | | | | | | |

| Sondage N° | | 1 | 1 |
|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| Profondeur (m) | | 9.5/10.0 | 40.5/41.0 |
| Perméabilité m/s | 1.904 bars | 7×10^{-7} | |
| | 4.04 bars | 1.34×10^{-8} | 10^{-11} |
| | 9.404 bars | | 10^{-11} |

| Sondage N°2 | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Profondeur (m) | | 7.0/7.50 | 13.6/14.0 | 24.1/24.7 | 35.5/35.8 | 46.5/46.8 |
| Teneur en eau | W (%) | 13.62 | | | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.60 | | | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 1.84 | | | | |
| Degré saturation | Sr (%) | 52.85 | | | | |
| Passant à 80 μ | (%) | 98.96 | | | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 48.86 | | | | |
| | Plasticité: IP | 25.87 | | | | |
| Indice de consistance Ic | | 1.37 | | | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | - | | 18.27 | | 10.32 |
| | Cc (%) | - | | 25.03 | | 8.19 |
| | Cg (%) | - | | 8.74 | | 4.46 |
| Cisaillement à la boîte | C (bars) | | 1.81 | | 3.41 | |
| | ϕ (degrés) | | 61.7 | | 43.73 | |

| Sondage N° | | 2 | 2 |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|
| Profondeur (m) | | 24.1/24.7 | 46.6/46.8 |
| Perméabilité m/s | 4.04 bars | | - |
| | 9.04 bars | 1.33×10^{-7} | 1.33×10^{-9} |
| | 19.4 bars | 2.73×10^{-8} | 10^{-11} |

| Sondage N°3 | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Profondeur (m) | | 9.5/10.0 | 15.5/15.9 | 20.4/20.9 | 29.6/30.0 |
| Teneur en eau | W (%) | 15.18 | | | 19.55 |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.72 | | | 1.53 |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 1.99 | | | 1.84 |
| Degré saturation | Sr (%) | 71.84 | | | 68.95 |
| Passant à 80 μ | (%) | 99.09 | | | 99.33 |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 61.1 | | | 53.73 |
| | Plasticité: IP | 35.8 | | | 27.72 |
| Indice de consistance I_c | | 1.29 | | | 1.23 |
| Caractéristiques oedométriques | P_c (bars) | 6.11 | | | 3.83 |
| | C_c (%) | 7.38 | - | | 6.34 |
| | C_g (%) | 4.01 | - | | 2.71 |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | 1.3 | | 3.75 | 1.72 |
| | ϕ (degrés) | 57.17 | | 29.65 | 30.33 |

| Sondage N° | | 3 | 3 |
|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| Profondeur (m) | | 9.5/10.0 | 29.6/30.0 |
| Perméabilité m/s | 1.904 bars | | |
| | 4.04 bars | 2.73×10^{-7} | 10^{-11} |
| | 9.404 bars | 10^{-8} | 10^{-11} |

| Sondage N°4 | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|
| Profondeur (m) | | 6.5/7.0 | 7.2/7.5 | 15.3/15.7 | 25.4/25.8 | 34.3/34.70 | 44.6/45.0 |
| Teneur en eau | W (%) | 15.85 | | | | 22.67 | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.87 | | | | 1.64 | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 2.17 | | | | 1.99 | |
| Degré saturation | Sr (%) | 94.91 | | | | 94.14 | |
| Passant à 80 μ | (%) | 97.07 | | | | 99.84 | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 61.27 | | | | 55.94 | - |
| | Plasticité: IP | 35.89 | | | | 31.15 | - |
| Indice de consistance Ic | | 1.28 | | | - | 1.07 | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | 6.77 | | - | 10.20 | | 8.87 |
| | Cc (%) | 9.20 | | - | 12.67 | | 8.93 |
| | Cg (%) | 4.39 | | - | 7.50 | | 4.07 |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | | 0.98 | 2.49 | | - | |
| | ϕ (degrés) | | 50.68 | 62.25 | | - | |

| Sondage N° | | 4 | 4 | 4 |
|-------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Profondeur (m) | | 6.5/7.0 | 25.4/25.8 | 44.6/45.0 |
| Perméabilité cm/s | 1.904 bars | | - | |
| | 9.4 bars | 3.27×10^{-7} | 2.67×10^{-8} | 10^{-9} |
| | 19 bars | 7.32×10^{-8} | 10^{-9} | 10^{-11} |

| Sondage N°5 | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Profondeur (m) | | 4.3/4.80 | 9.3/9.8 | 14.5/15.0 | 20.3/20.7 | 34.3/34.6 | 40.5/41.0 |
| Teneur en eau | W (%) | 13.30 | | | 9.83 | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.86 | | | 1.94 | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 2.11 | | | 2.13 | | |
| Degré saturation | Sr (%) | 79.35 | | | 49.20 | | |
| Passant à 80 μ | (%) | 99.02 | | | 84.67 | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 69.3 | | | 61.68 | | |
| | Plasticité: IP | 38.6 | | | 33.73 | | |
| Indice de consistance Ic | | 1.45 | | | 1.53 | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | - | - | 12.51 | | | 5.35 |
| | Cc (%) | - | - | 10.62 | | | 6.09 |
| | Cg (%) | - | - | 6.85 | | | 3.98 |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | | 4.2 | | | 3.28 | |
| | φ (degrés) | | 30.49 | | | 6.54 | |

| Sondage N° | | 5 | 5 | 5 |
|-------------------|------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Profondeur (m) | | 14.5/15.0 | 40.5/41.0 | |
| Perméabilité cm/s | 1.904 bars | | - | |
| | 9.4 bars | 8.56×10^{-8} | 6.76×10^{-9} | |
| | 19 bars | 5.4×10^{-8} | 10^{-11} | |

| Sondage N°6 | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------|------------|------------|---|
| Profondeur (m) | | 2.1/2.4 | 16.45/16.8 | 39.40/39.8 | 0 |
| Teneur en eau | W (%) | 9.32 | 8.94 | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.97 | 2.1 | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 2.03 | 2.32 | | |
| Degré saturation | Sr (%) | 47.56 | 44.96 | | |
| Passant à 80 μ | (%) | 96.63 | 97.78 | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 35.34 | 37.06 | | |
| | Plasticité: IP | 14.89 | 16.57 | | |
| Indice de consistance Ic | | 1.75 | 1.70 | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | - | 5.66 | 12.89 | |
| | Cc (%) | - | 6.21 | 5.20 | |
| | Cg (%) | - | 4.39 | 2.84 | |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | 2.08 | | | |
| | ϕ (degrés) | 44.89 | | | |

| Sondage N° | | 6 | 6 | 6 |
|-------------------|------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Profondeur (m) | | 16.45/16.8 | 39.4/39.8 | |
| Perméabilité m/s | 1.904 bars | 3.45×10^{-8} | - | |
| | 4.04 bars | 2.35×10^{-9} | 9.29×10^{-8} | |
| | 9.404 bars | | 2.38×10^{-9} | |

| Sondage N°7 | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|-----------|-----------|--|---|
| Profondeur (m) | | 4.0/4.20 | 14.5/15.0 | 19.7/20.0 | | |
| Teneur en eau | W (%) | 13.3 | | | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.86 | | | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 2.11 | | | | |
| Degré saturation | Sr (%) | 79.33 | | | | |
| Passant à 80 μ | (%) | 80.44 | | | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 48.96 | | | | |
| | Plasticité: IP | 23.7 | | | | |
| Indice de consistance Ic | | 1.51 | | | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | | 3.97 | | | |
| | Cc (%) | | 12.32 | - | | |
| | Cg (%) | | 3.81 | - | | |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | | | 3.53 | | - |
| | ϕ (degrés) | | | 22.45 | | - |

| Sondage N° | | 7 | 7 | 7 |
|-------------------|------------|---|-----------------------|---|
| Profondeur (m) | | | | |
| | | | 14.5/15.0 | |
| Perméabilité m/s | 1.904 bars | | 7.51×10^{-7} | |
| | 4.04 bars | | 4.4×10^{-8} | - |
| | 9.404 bars | | | |

| Sondage N°8 | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|---------|-----------|--|---|
| Profondeur (m) | | 3.0/3.50 | 7.6/7.9 | 14.8/15.0 | | |
| Teneur en eau | W (%) | | 16.57 | | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | | 1.63 | | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | | 1.98 | | | |
| Degré saturation | Sr (%) | | 79.43 | | | |
| Passant à 80 μ | (%) | | 79.68 | | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | | 67.21 | | | |
| | Plasticité: IP | | 37.07 | | | |
| Indice de consistance Ic | | | 1.36 | | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | | | 5.32 | | |
| | Cc (%) | | | 11.81 | | |
| | Cg (%) | | | 3.75 | | |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | 2.01 | | | | - |
| | φ (degrés) | 3.83 | 53.52 | | | - |

| Sondage N° | | 8 | 8 | 8 |
|-------------------|------------|----------|--------------------|----------|
| Profondeur (m) | | | | |
| | | | 14.8/15.0 | |
| Perméabilité m/s | 1.904 bars | | 10^{-11} | |
| | 4.04 bars | | 7×10^{-8} | - |
| | 9.404 bars | | | |

| Sondage N°9 | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|----------|-----------|--|---|
| Profondeur (m) | | 3.0/3.50 | 9.0/9.30 | 14.2/14.8 | | |
| Teneur en eau | W (%) | 17.12 | | 13.42 | | |
| Densité sèche | γ_d (t/m ³) | 1.62 | | 1.57 | | |
| Densité humide | γ_h (t/m ³) | 1.92 | | 1.79 | | |
| Degré saturation | Sr (%) | 83.54 | | 51.34 | | |
| Passant à 80 μ | (%) | 90.72 | | 97.38 | | |
| Limites d'Atterberg (%) | Liquidité: WL | 63.99 | | 47.91 | | |
| | Plasticité: IP | 33.29 | | 26.56 | | |
| Indice de consistance Ic | | 1.41 | | 1.30 | | |
| Caractéristiques oedométriques | Pc (bars) | | 4.11 | | | |
| | Cc (%) | | 9.82 | | | |
| | Cg (%) | | 4.01 | | | |
| Cisaillement à la boite | C (bars) | | 1.67 | 1.76 | | - |
| | φ (degrés) | | 56.4 | 27.82 | | - |

| Sondage N° | | 9 | 9 | 9 |
|-------------------|------------|-----------------------|---|---|
| Profondeur (m) | | | | |
| | | 9.0/9.30 | | |
| Perméabilité m/s | 1.904 bars | 3.24×10^{-7} | | |
| | 4.04 bars | 2.63×10^{-8} | - | |
| | 9.404 bars | | | |