

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université – Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Technologie



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Génie civil
Spécialité : structure
Thème

Etude de l'érosion dans les ouvrages hydraulique (cas des barrages construits par les argiles dispersives)

Présenté Par :

- 1) M . Hammadi Ahmed Amine
- 2) M. Gacem Oussama

Devant le jury composé de :

Dr. Maarouf H UAT.B.B (Ain Temouchent) Président
Dr. Chérifi W UAT.B.B (Ain Temouchent) Examineur
Dr. Belabbaci Z M C A UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant
Dr. Taher Berrabeh A M C B UAT.B.B (Ain Temouchent) Co-Encadrante

Année Universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACES

En signe de respect et de reconnaissance,
Je dédie ce modeste travail à Mes
parents, pour leur patience et sacrifices.

A Tous mes amis (es)(amina mustapha nadir amine
et younes).(ahmed adel et oussama) et mes
collègues de promotion, et à tous Personne ayant
contribué à ce travail de près ou de loin.

Hammadi et gacem

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu notre Dieu ALLAH le tout puissant qui nous a donné la force le courage la volonté et la bonne santé pour élaborer ce travail.

Notre grand remerciement à nos parents pour leur soutien, leur amour et leurs encouragements sans cesse renouvelés. Nous leur en sommes à jamais reconnaissants.

Nous tenons également remercier Dr. belabbaci et Dr. taher berrabah pour avoir accepté de diriger ce projet, nous la remercions pour ses conseils, son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail.

Un gros merci pour tous les membres de service au niveau de laboratoire « kawther , nedjet et mr keddou » d'université pour leurs présences et leur aide . Ainsi pour le personnel de laboratoire d'études « lagha sidahmed».

Nous remercions, en particulier nos chers frères et soeurs. qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études.

Nous remercions les membres de jury : 'dr marouf et dr cherifi' qui nous feront l'honneur de présider et d'examiner ce travail. Afin de n'oublier personne, nous vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui ont aidés à la réalisation de ce modeste mémoire

Enfin ; on remercie tous les enseignants de département de génie civil.

RESUME

L'érosion des sols est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface de la couche la plus externe de la croûte terrestre qui se différencie pour plusieurs facteurs et paramètres et des formes d'érosion et ces caractérisation ainsi La corrosion interne est le principal mécanisme d'instabilité Observé sur les ouvrages hydrauliques en terre.

Le but du projet est d'identifier la physico-chimique des sols étudiés par résultats des activités d'essais géotechniques du laboratoire sur les matériaux étudiés pour compléter leur caractérisation et déterminer les paramètres nécessaires. Et puis traiter les sols par la méthode d'ajout de la poudre de verre en étudiant l'effet et les caractéristiques de la substitution de poudre de verre en différentes pourcentage (6% 8% 10%) et des essais physique et mécanique qui permis de confirmer l'efficacité de cet ajout sur ces caractéristiques.

L'ajout de poudre de verre est donné des résultants acceptable par rapport le témoin, essentiellement la composition contenant de 10 % de poudre de verre amélioré la maniabilité et la résistance mécanique.

Abstract

Soil erosion is a phenomenon of material displacement at the surface of the outermost layer of the Earth's crust that differs for several factors and parameters and forms of erosion and this characterization as well internal corrosion is the main mechanism of instability Observed on earthen hydraulic structures.

The aim of the project is to identify the physico-chemical of the soils studied by the results of the laboratory's geotechnical testing activities on the materials studied to complete their characterization and determine the necessary parameters. And then treat the floors by the glass powder addition method by studying the effect and characteristics of glass powder substitution in different percentages (6% 8% 10%) and physical and mechanical testing to confirm the effectiveness of this addition on these features.

The addition of glass powder is given acceptable results in relation to the control, essentially the composition containing 10% glass powder improved handling and mechanical strength.

ملخص

تآكل التربة هو ظاهرة إزاحة المواد على سطح الطبقة الخارجية من القشرة الأرضية التي تختلف لعدة عوامل وبارامترات وأشكال من التعرية وهذه التوصيف وكذلك التآكل الداخلي هو الآلية الرئيسية لعدم الاستقرار التي لوحظت على الهياكل الهيدروليكية الترابية.

والهدف من المشروع هو تحديد المواد الكيميائية الفيزيائية للتربة التي تمت دراستها من خلال نتائج أنشطة الاختبار الجيوتقني للمختبر على المواد التي تمت دراستها لاستكمال توصيفها وتحديد البارامترات اللازمة. ثم قم بمعالجة الأ رضيات بطريقة إضافة مسحوق الزجاج عن طريق دراسة تأثير وخصائص استبدال مسحوق الزجاج بنسب مئوية مختلفة (6% 8% 10%) والاختبار المادي والميكانيكي لتأكيد فعالية هذه الإضافة على هذه الميزات.

تُعطى إضافة مسحوق الزجاج نتائج مقبولة فيما يتعلق بالتحكم، بشكل أساسي التركيب الذي يحتوي على 10% مسحوق زجاجي محسن المناولة والقوة الميكانيكية.

Table de matières :

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

EROSION ET DISPERSION DES SOLS : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Définition de l'érosion de sol :.....	3
1. Définition des sols :.....	3
1.1 Définition géotechnique des sols :.....	3
2. L'érosion :.....	4
2.1 L'érosion des sols :.....	4
2.3 Les types d'érosion :.....	6
2.4 L'érosion par l'eau :.....	7
2.5 L'érosion par la glace et les glaciers :.....	9
2.6 L'érosion par le vent :.....	10
2.7 L'érosion par la gravité :.....	10
2.8 L'érosion et la température (gel et dégel) :.....	11
2.9 L'érosion et l'action de l'homme :.....	11
3. Érosion interne :.....	12
Mécanisme d'érosion interne :.....	12
3.1 Les 4 processus d'érosion interne :.....	13
3.2 Les quatre phases de l'érosion interne :.....	14
3.3 Causes :.....	15
3.4 Cinétique du mécanisme :.....	15
3.5 Erosion interne :.....	16
3.6 Arrachement des particules :.....	16
4. Transport des particules :.....	16
4.1 Erosion externe :.....	17
4.2 Essais caractérisant l'érosion des sols :.....	17
4.3 Érodimètre à jets mobiles :.....	17
4.4 Essai d'érosion de trou :.....	18
4.5 Essai triaxial d'érosion :.....	19
4.6 Facteurs liés à la structure de sol :.....	21
4.7 Identification des sols dispersifs :.....	23

CHAPITRE II - L'EROSION INTERNE DANS LES BARRAGES EN REMBLAIS

1.Introduction :	24
1.1Rupture des barrages en remblai :	25
1.2Typologie des désordres et mécanismes de rupture :	26
1.3 Surverse :	27
1.4 Erosion externe dans les barrages :	28
1.5Analyse pathologique de l'érosion interne :	29
1.6Modes de rupture par l'érosion interne :	30
1.7.Processus de l'érosion interne :	31
1.8Développement du l'érosion interne :	31
1.9Méthodes de détection de l'érosion interne :	33
2.Conclusion.....	40

Chapitre III :

Identification physico-chimique des sols étudiés.

Sol 01 :	42
1. INTRODUCTION :	42
1.1. ESSAIS D'IDENTIFICATIONS :	42
1.2.Analyse granulométrique par voie sèche :	44
1.3Essai analyse granulométrique par sédimentation :	44
1.4ESSAIS MECANIKES :	46
1.5Essai de bleu de méthylène :	49
1.6Essai d'émiettement (Crumb test – ASTM D 657200):	51
1.7Essai de sédimentation en parallèle (Double hydromerer test D 4221-99) :	52
Sol 2 :	54
1. INTRODUCTION :	54
1.1. ESSAIS D'IDENTIFICATIONS :	54
1.2.Analyse granulométrique par voie sèche :	55
1.3Essai analyse granulométrique par sédimentation :	56
1.4.ESSAIS MECANIKES :	58
1.5Essai de bleu de méthylène :	59
1.6Essai d'émiettement (Crumb test – ASTM D 657200):	61
1.7Essai de sédimentation en parallèle (Double hydromerer test D 4221-99) :	62
Les stabilisants et les techniques de stabilisation :	66

Chapitre VI :

Les stabilisants et les techniques de stabilisation.

1. INTRODUCTION :	66
1.1 But de la stabilisation	66
1.2 Différentes techniques de stabilisation :	66
1.3 Stabilisation mécanique :	67
Sol 01 : Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 6% de la quantité total de sol	71
1.4. Essai de sédimentation en parallèle :	74
2. CONCLUSION :	80
CONCLUSION GÉNÉRALE	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83

Listes des figures :

Figure 01. les phase des sols.....	03
Figure 02 :Effet de la combinaison de l'érosion éolienne et hydrique (<i>Coyote Buttes</i> , Vermillion Cliffs National Monument, États-Unis).....	05
Figure 03 : Paysage de badlands en zone de climat tempéré subhumide de type méditerranéen (Pays Glaoua, Maroc).....	06
Figure 04 :Exemple d'effet de l'érosion sur le relief: parc national de Bryce Canyon aux États-Unis.....	07
Figure 05: La chute du Fer à Cheval, une des trois chutes Niagara.....	08
Figure 06 : Érosion du littoral visible à marée basse.....	09
Figure 07: Vallée glaciaire de la région du Ladakh en Inde.....	09
Figure 08: Sédiments transportés sous l'action du vent.....	10
Figure 09 : Une avalanche de neige attirée par la gravité.....	10
Figure 10 :Une roche fragmentée par la cryoclastie.....	11
Figure 11 :Déforestation par brûlage.....	12
Figure 12 :Exemple de brèche suite à érosion interne.....	13
Figure 13. Phénomène de boulangerie (schéma de principe).....	16
Figure 14: <i>Illustration en deux phases du phénomène de renard</i> dans les fondations d'un barrage ; Source : Desodt et Horsin Molinaro (2016).....	16
Figure 15: Blackman dam, <i>Tasmania</i> , 2005. Photo Crédit: The Mercury and Kim Eiszele..	17
Figure 16 : Schéma d'appareillage de Hole Erosion Test (Wan and Fell, 2004).....	18
Figure 17: Schéma d'appareillage de Triaxial Erosion Test (Sanchez and al., 1983).....	19.
Figure 18: Comportement des sols non sodiques et sodiques dans l'eau (Anon, 1999).....	21
Figure 19: La rupture du barrage de Banqiao (Chine) en 1975 a entraîné directement 86.000 morts et indirectement 145.000 morts (famines et épidémies) selon les chiffres officiels du gouvernement chinois.....	26
Figure 20 : Mécanisme d'affouillement en pied de digue (Mériax et al, 2004).....	28
Figure 21 : Modèle pour le développement de l'érosion interne dans la fondation (Fell and al., 2001).....	32
Figure 22 : Modèle pour le développement de l'érosion interne dans le remblai (Fell and al., 2001).....	33
Figure 23 : Modèle pour le développement de l'érosion interne du remblai à la fondation (Fell and al., 2001).....	33
Figure 24 : Organigramme présentant les interactions engendrées par le phénomène d'érosion interne sur plusieurs paramètres d'état d'un matériau (Johansson, 1997)...	37
Figure 25 : La thermométrie profonde. (a) : Schéma de dispositif de mesure, (b) : Exemple de fuite détecté par thermométrie profonde (Lautrin, 2003).....	37
Figure 26 : Principe de mesure de la résistivité du sol (Cunat, 2012).....	38

Figure 28 : Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins (Plus de 50% d'éléments < 0,08mm).....	44
Figure29 : L'abaque d'Analyses par sédimenteriez.....	45
Figure 30:Résultats de valeur au bleu.....	50
Figure 31: Pourcentage de dispersion déterminé par l'essai de sédimentation en parallèle, a : standard test, b : essais sans agent dispersant ni agitation mécanique (Vanicek and Vanicek, 2008).....	52
Figure 32 Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins (Plus de 50% d'éléments < 0,08mm)	55
Figure 33 : L'abaque d'Analyses par sidimonterie.....	57
Figure 34 : matériel de VBS(UAT).....	59
Figure 35:Résultats de valeur au bleu.....	60
<i>Figure 36 : Essais typiques de Crumb test.....</i>	<i>61</i>
Figure 37 : Pourcentage de dispersion déterminé par l'essai de sédimentation en parallèle, a : standard test, b : essais sans agent dispersant ni agitation mécanique (Vanicek and Vanicek, 2008).....	62
Figure 38 . Classification des liants.....	68
Figure 39: Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, cité par AZZOUZ ,2006.....	70
Figure 40 : Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, cité par AZZOUZ ,2006.....	70

Listes des tableaux :

Tableau 01 : Résultat du les limites d'atterberg pour les deux sols.....	43
Tableau 02 : Domaine de la dispersion selon l'indice de dispersion.....	53

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'érosion est un phénomène naturel où le vent, la pluie, une rivière... peuvent « attaquer » une colline et enlever progressivement la terre qui s'y trouve.

La protection contre cette érosion est un enjeu pour la préservation de la qualité agronomique des sols agricoles, de la qualité des eaux de surface et de la sécurité des habitations et des infrastructures (recouvrement des chaussées, apparition de coulées boueuses, colmatage ou comblement des réseaux de collecte des eaux pluviales

La corrosion interne est le principal mécanisme d'instabilité observé sur les ouvrages hydrauliques en terre. Le mécanisme comporte deux processus principaux : déchirure des particules et leur déplacement. Le développement progressif du temps et de l'espace, son hétérogénéité L'hétérogénéité des sols naturels rend ce phénomène complexe et difficile Soulignez et expliquez (Alem et al. 2010).

La destruction des digues peut avoir été causée par l'érosion interne du sol fin constituant le noyau, par l'érosion du sol sous la fondation ou sous les soutènements, par problèmes de stabilité causés par une pression interstitielle excessive, Débit avec des gradients trop élevés ou critiques et débordement Eau au dessus du barrage ou de son déversoir (Massiera et al. 2008). Statistiques sur les ruptures de grands barrages basées sur le résumé du comité Groupe international sur les barrages (CIGB), digues en terre représente la majorité des ruptures de barrage, près de deux fois plus élevé que les barrages en béton. Cependant, vers 1985 et après, La destruction est semblable à un barrage en béton. Cause la plus fréquente Les ruptures

de digues dans le monde sont les inondations et l'érosion interne (Fell et al., 1992).

Le but de ce projet est de déterminer les propriétés physico-chimiques du sol étudié à travers les résultats des activités d'essais géotechniques du laboratoire sur le matériau étudié, de compléter sa caractérisation et de déterminer les paramètres nécessaires. Le sol a ensuite été traité par ajout de fritte de verre pour étudier l'effet et les propriétés de substitution de la fritte de verre avec différents pourcentages (6%, 8% et 10%), ainsi que des tests physiques et mécaniques pour confirmer l'efficacité de cet ajout de ces caractéristiques. .

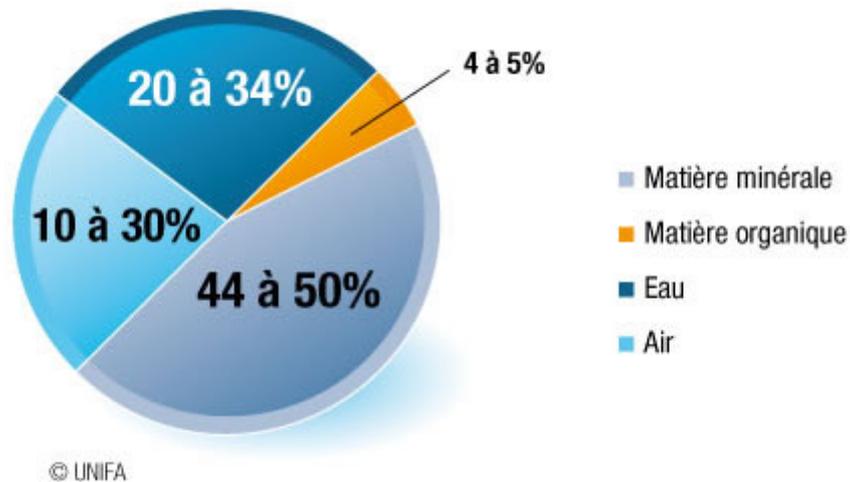
L'ajout de poudre de verre a donné des résultats acceptables, essentiellement une composition de poudre de verre à 10 % a amélioré la maniabilité et la résistance mécanique par rapport au témoin.

CHAPITRE I
EROSION ET DISPERSION
DES
SOLS : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

Définition de l'érosion de sol :

1. Définition des sols :

Un sol est un mélange de 3 éléments : solide (squelette), eau (libre ou non), et gaz (air).



1.1 Définition géotechnique des sols :

Nous schématiserons les sols comme étant composé de trois phases. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelé : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse.

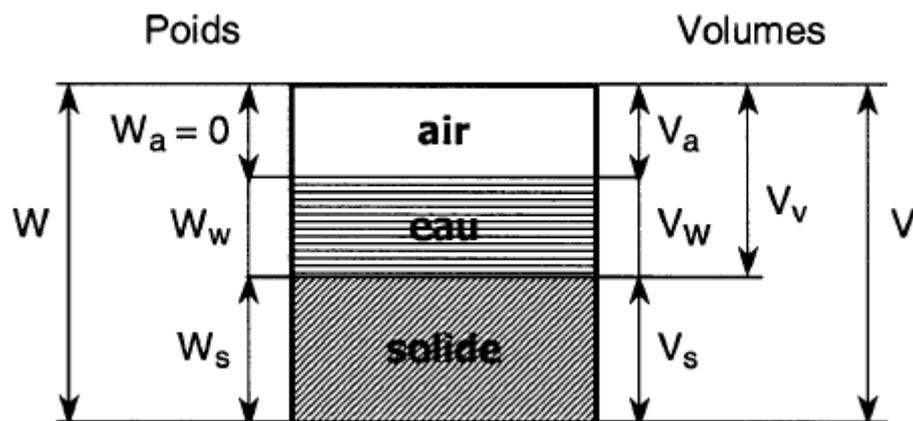


Figure 01. les phase des sols.

(/genie-civile.blogspot.com/2013/04/classificatio-et-geotechnique-des-sols.html)

La phase solide : est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes. Phase solide Trois types de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier : Sols grenus, sols fins, et sols organiques.

Phase gazeuse : • air + gaz de décomposition ou vapeur d'eau Un sol est saturé lorsque les vides sont remplis.

Phase liquide : • eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant. Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense (>300°). • eau libre : s'écoule, s'élimine par étuvage vers 100°.

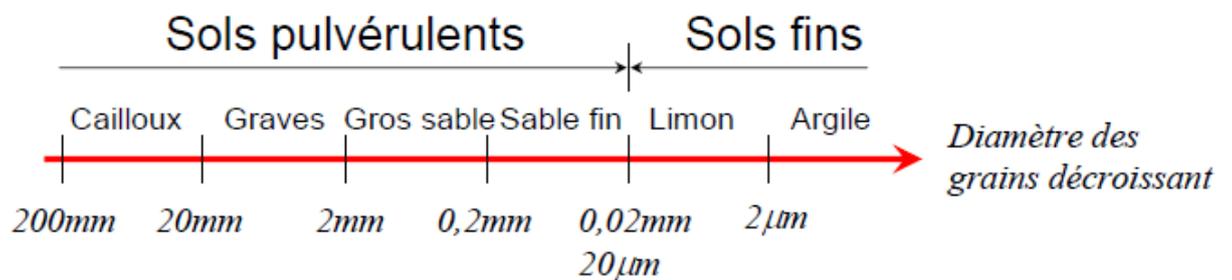
Phase solide : Trois types de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier : Sols grenus, sols fins, et sols organiques.

Phase gazeuse : air + gaz de décomposition ou vapeur d'eau Un sol est saturé lorsque les vides sont remplis.

Phase liquide : eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant. Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense (>300°).

Eau libre : s'écoule, s'élimine par étuvage vers 100°.

Classification des sols :



2.L'érosion :

2.1L'érosion des sols :

Est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface de la couche la plus externe de la croûte terrestre. Elle est une des formes de régression et dégradation des sols. La protection contre cette érosion est un enjeu pour la préservation de la qualité agronomique des sols agricoles, de la qualité des eaux de surface et de la sécurité des habitations et des infrastructures (recouvrement des chaussées, apparition de coulées boueuses, colmatage ou comblement des réseaux de collecte des eaux pluviales). David R. Montgomery,



Figure 02 :Effet de la combinaison de l'érosion éolienne et hydrique (*Coyote Buttes*, Vermillion Cliffs National Monument, États-Unis).

Les précipitations : érosion hydrique due à l'impact de la pluie sur le sol (effet splash influencé par la texture du sol, l'intensité des pluies, le couvert végétal, le taux d'infiltration qui diminue sous l'effet du gel, de l'encroûtement ou du compactage de sol et augmente avec les techniques culturales simplifiées), à la fonte des neiges.

- **le vent : érosion éolienne :**

L'érosion des sols est favorisée par plusieurs facteurs anthropiques : artificialisation et imperméabilisation des sols, déforestation, pratiques de travail du sol (labourage qui favorise la minéralisation de la matière organique), pratiques culturales (mise en culture de prairies, surpâturage, interculture nue avec résidus de culture, bandes enherbées...) et pratiques de gestion des terres (remembrement).



Figure 03 : Paysage de badlands en zone de climat tempéré subhumide de type méditerranéen (Pays Glaoua, Maroc)

2.3 Les types d'érosion :

Lors de l'érosion, des particules des roches ou du sol sont détachées et déplacées de leur point d'origine. C'est un processus de dégradation et de transformation du relief qui peut être lent et progressif, ou encore totalement violent. Il faut plusieurs millions d'années pour araser (aplanir, égaliser) une montagne ou creuser des vallées, mais il ne faut que quelques minutes pour qu'une avalanche, un lahar (coulée boueuse d'origine volcanique) ou un orage ne transforme le paysage.

L'érosion et la modification du paysage peut être causée par de nombreux facteurs que l'on nomme agents d'érosion :

- L'érosion par l'eau .
- L'érosion par la glace et les glaciers .
- L'érosion par le vent .
- L'érosion par la gravité .
- L'érosion et la température (gel et dégel) .
- L'érosion et l'action de l'homme .



Figure 04 :Exemple d'effet de l'érosion sur le relief: parc national de Bryce Canyon aux États-Unis

2.4L'érosion par l'eau :

Lorsque les gouttes de pluie frappent le sol, la force de leur impact permet de briser les agrégats et de disperser les particules qui forment le sol. C'est ce qu'on appelle l'**effet splash**. Ainsi, les sables fins, les limons, les argiles et la matière organique sont facilement emportés par les gouttes d'eau, car ce sont des particules très fines.

Le ruissellement se produit lorsque l'eau sur une pente ne peut pas s'infiltrer assez vite dans le sol ou qu'elle ne peut pas être interceptée par des obstacles naturels. Plus les précipitations et le ruissellement sont de forte intensité, plus les particules déplacées sont de grosse taille et en plus grande quantité. L'eau qui coule entraîne donc avec elle des particules de sol et cause de l'érosion. C'est principalement les eaux de ruissellement qui creusent les vallées.



Figure 05: La chute du Fer à Cheval, une des trois chutes Niagara

Les chutes Niagara sont un bel exemple d'érosion. On considère que les chutes du Niagara se trouvent actuellement à 11 kilomètres du lieu où elles se sont formées initialement. Jusqu'au début des années 50, l'érosion des chutes du Niagara était de un mètre par année. Maintenant, grâce aux différentes constructions, ce taux est estimé à 36 cm par année.



Figure 06 : Érosion du littoral visible à marée basse

2.5L'érosion par la glace et les glaciers :

L'eau sous forme de glace peut être aussi très érosive. Par exemple, une moraine est un amas de débris minéraux qui ont été transportés par un glacier ou une nappe de glace. Les cours d'eau et les glaciers façonnent les vallées.



Figure 07: Vallée glaciaire de la région du Ladakh en Inde

2.6 L'érosion par le vent :

Le vent agit comme l'eau. Il enlève des particules de sol et les transporte plus loin. Les débris que le vent souffle causent aussi de l'érosion par frottement. Ils usent et polissent les surfaces. Les sols s'appauvrissent. D'ailleurs, l'érosion éolienne est le principal facteur physique responsable de l'épuisement des terres agricoles.

Le vent assèche les terres et leur degré d'humidité diminue. Évidemment, plus le vent est fort, régulier et rempli de poussières et moins il y a d'obstacles sur son chemin, plus son pouvoir d'érosion est grand. Le vent a un grand pouvoir d'érosion dans les régions sèches où il n'y a pas beaucoup de végétation, comme les déserts.

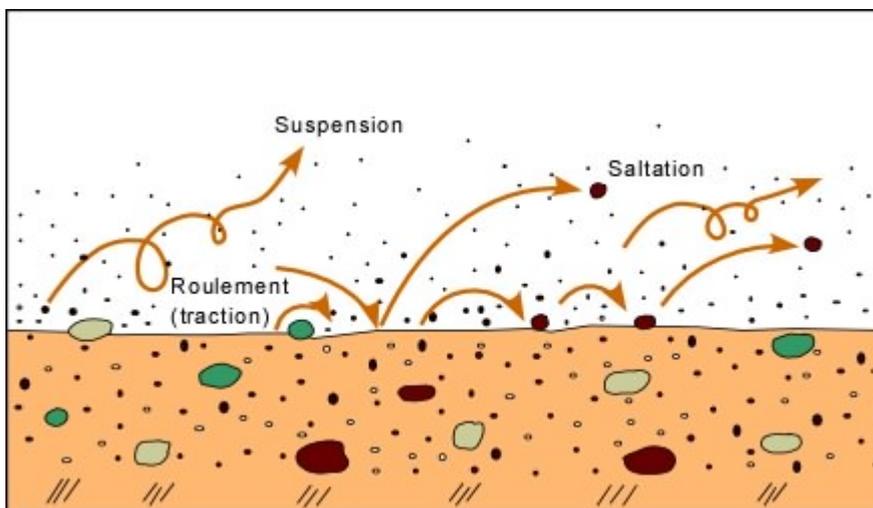


Figure 08: Sédiments transportés sous l'action du vent

2.7 L'érosion par la gravité :

La gravité permet à plusieurs processus d'érosion de se produire. Le ruissellement, la reptation (lent mouvement de particules du sol vers le bas des versants), les éboulements, les avalanches, les glissements de terrain et la descente sur un versant de matériaux boueux sont tous des phénomènes d'érosion par la gravité.



Figure 09 : Une avalanche de neige attirée par la gravité

2.8 L'érosion et la température (gel et dégel) :

Dans les endroits où les variations de température sont importantes (climat continental, climat polaire, désert, haute montagne, etc.), on assiste à la thermoclastie (érosion due aux changements de température). Par exemple, l'eau qui s'infiltré dans les fissures des roches poreuses prend plus de volume lorsqu'elle passe de l'état liquide à l'état solide. Cette eau est capable de faire éclater les roches en cas de gel et de dégel. C'est ce qu'on appelle la **cryoclastie**.



Figure 10 : Une roche fragmentée par la cryoclastie

2.9 L'érosion et l'action de l'homme :

L'être humain, par certaines de ses actions, augmente l'érosion. Par exemple, la déforestation, l'agriculture, l'urbanisation et le transport ont pour effet d'accélérer l'érosion.

- Lorsqu'on défriche une terre, on enlève la couverture végétale et on expose ainsi le sol au vent et à l'éboulement.
- Lorsqu'on construit des barrages, les cours d'eau sont alors déviés.
- En construisant des routes, on augmente les surfaces de ruissellement.
- Lorsqu'on utilise des bateaux à moteur ou des motomarines, on détruit des habitats, on augmente la turbidité de l'eau et on libère de nutriments qui causent l'augmentation des algues.



Figure 11 :Déforestation par brûlage

Certains facteurs accélèrent le processus d'érosion. Entre autres:

- Il y a des roches plus sensibles que d'autres aux différents types d'érosion. Par exemple, le grès siliceux ne sera pas facilement dissous, mais sera très sensible aux effets du gel. À l'inverse, une roche calcaire massive sera facilement attaquée par l'eau, mais très peu sensible aux effets du gel.
- Plus la pente est longue et raide, plus l'eau érodera le sol. Et plus la vitesse de l'eau est grande, plus elle occasionne un grand lessivage.
- La couverture végétale joue un rôle très important dans la prévention de l'érosion. En effet, plus il y a de résidus et de végétaux au sol, plus ils protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie. Ils ralentissent la vitesse de l'eau de ruissellement et ils favorisent une meilleure infiltration de l'eau dans le sol.

3.Érosion interne :

Mécanisme d'érosion interne :

L'érosion interne est un processus qui implique des arrachements de particules et leur transport dans le barrage ou sa fondation. Elle peut conduire à l'instabilité de l'ouvrage.

Les ruptures par érosion interne et par renard hydraulique ont représenté un peu plus de la moitié des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction (Foster et al., 2000). Elle constitue la première source d'incidents sur

les ouvrages hydrauliques en terre (CFGB, 1997). Le mode de rupture par érosion interne peut toucher aussi bien la fondation que le remblai, y compris le noyau étanche. Il peut également se propager du remblai vers la fondation. Pour la période jusqu'à 1986, soixante-cinq pourcents des érosions internes se sont produites dans le remblai, trente pourcents dans la fondation et cinq pourcents du barrage vers la fondation (Foster et Fell, 2000) .



Figure 12 :Exemple de brèche suite à érosion interne.

3.1 Les 4 processus d'érosion interne :

Quatre processus d'érosion interne sont identifiés :

- **érosion régressive** : détachement de particules de sol qui conduit de manière régressive à des conduits et "Sand boils" .
- érosion de conduit par écoulement localisé (fissure, trou...), détachement de particules de sol à partir d'un chemin préexistant dans le remblai ou la fondation.
- **suffusion**: érosion sélective de particules fines depuis une matrice de particules grossières.
- **érosion de contact** : érosion sélective de particules fines au niveau du contact avec une couche plus grossière.

Deux conditions doivent être réunies pour le développement d'une érosion interne. Premièrement, les particules doivent être arrachées c'est-à-dire que la contrainte de cisaillement hydraulique doit être plus grande que les forces de contact résistantes. L'eau doit donc avoir une vitesse suffisante pour fournir l'énergie nécessaire à l'arrachement des particules de la structure de sol. Deuxièmement, les particules détachées doivent être transportées : un critère hydromécanique et un critère géométrique doivent alors être remplis. Le flux doit être suffisant pour transporter les particules (critère hydromécanique) et les vides existants dans les sols doivent être suffisamment grands pour que les particules détachées passent au travers d'eux.

Ce vide est soit un conduit (érosion régressive ou érosion de conduit) ou des pores dans une couche grossière (suffusion et érosion de contact).

Érosion régressive :

L'érosion régressive implique qu'une fuite existe au niveau d'une surface libre non filtrée : parement aval d'un ouvrage homogène, pied aval du barrage... L'eau entraîne les particules en commençant par le débouché à l'aval. L'érosion remonte ensuite vers l'amont en s'accéléralant car l'eau a un trajet de plus en plus court à parcourir et sa vitesse augmente.

Érosion de conduit :

L'érosion de conduit apparaît selon un chemin préférentiel tel que des fissures ouvertes ou des trous préexistants. L'infiltration d'eau est suffisante au travers de ce chemin pour initier le détachement de particules de sol de surfaces latérales et leur transport induisant un agrandissement du chemin. Dans le cas de matériaux cohésifs, ces trous conduisent à la formation d'un tunnel continu entre l'amont et l'aval du barrage ou de sa fondation. Dans certaines circonstances, ces ouvertures peuvent être dues à la présence d'éléments structuraux comme les évacuateurs de crues, conduites... mais dans une large majorité, ces érosions de conduit se produisent dans des sols cohésifs.

Les modèles existants sont basés sur un essai spécifique, le Hole Erosion Test.

Suffusion :

La suffusion implique l'érosion sélective de particules fines dans la matrice de particules grossières. Les particules fines sont arrachées des espaces entre les particules grossières par le flux et laissent un squelette de sol formé de particules grossières. Ceci entraîne peu ou pas de changement dans le volume de la masse de sol mais une augmentation de la perméabilité et des vitesses de l'eau.

Érosion de contact :

Contrairement à la suffusion qui concerne un matériau unique, l'érosion de contact implique l'érosion de fines particules au contact avec une couche de matériau plus grossier, due au flux au travers de ce dernier matériau. Les particules fines sont lessivées laissant les particules plus grossières en place.

Les conséquences de l'érosion de contact dépendent de la position de la couche de particules fines par rapport au matériau grossier : au-dessous ou au-dessus. Si elle est située en dessous, les cavités entraînent des tassements, si elle est située en dessus, les cavités peuvent rester stables si le sol est suffisamment cohésif. Différents scénarios peuvent être observés : fontis, érosion de conduit ou érosion régressive, développement d'une zone fragile dans l'ouvrage et instabilité d'ensemble menant au glissement, colmatage et augmentation de la piézométrie (Beguin, 2011).

La plupart des modèles proposés traitent du cas où la couche de particules fines repose sous la couche de sol non cohésif. Des modèles plus récents s'intéressent au cas inverse (Benahmed et Philippe, 2012).

3.2 Les quatre phases de l'érosion interne :

Quatre grandes phases s'enchaînent au cours du mécanisme d'érosion interne (Fry, 2007).

L'initiation, la filtration, la progression et la formation d'une brèche.

La phase d'initiation est caractérisée par l'arrachement de particules.

La filtration est la phase pendant laquelle la relation entre la distribution de taille des particules du matériau et du filtre détermine si l'érosion va se poursuivre ou non.

Pendant la progression se produisent l'agrandissement du conduit et l'augmentation de la pression interstitielle et des fuites. Ces phénomènes dépendent des conditions mécaniques (est-ce que le conduit va rester ouvert ou se rompre ?) et des conditions hydrauliques (est-ce

que les zones à l'amont peuvent contrôler le processus d'érosion par une limitation des écoulements ? est-ce que le gradient critique ou la vitesse augmente ?).

La formation d'une brèche est la phase finale du mécanisme d'érosion interne. Elle peut provenir de quatre phénomènes : agrandissement du conduit (renard hydraulique), instabilité de la pente aval (instabilité générale), instabilité locale ou glissement de peau, ou surverse du fait du tassement de la crête.

3.3 Causes :

Les origines de ce mode de rupture sont tous les phénomènes qui entraînent des circulations d'eau dans le remblai ou la fondation et un transport des particules à savoir :

- la défaillance du système d'étanchéité dissolution du rideau d'injection, fracture du voile d'étanchéité, vieillissement du masque amont (fissuration, écaillage, faïençage), conception et/ou réalisation inadéquates du dispositif d'étanchéité.
- l'absence de filtre ou des conditions de filtre non respectées, le contact entre un matériau grossier et un matériau fin (suffusion externe) ou encore des matériaux dans lesquels la granulométrie n'assure pas l'auto-filtration (suffusion interne) : ces situations permettent un entraînement des particules fines vers l'aval.
- le colmatage, le contournement ou la rupture du dispositif de drainage, la rupture d'une canalisation.
- l'augmentation des percolations liées à la nature des matériaux : augmentation des sous-pressions dans la fondation rocheuse, instabilité des matériaux en fondation ou en remblai du fait de sauts de granulométrie entre couches successives, compactage mal réalisé autour d'un instrument d'auscultation ou d'une conduite (Foster et Fell, 2000).
- estiment qu'environ la moitié des ruptures par érosion au travers du remblai est associée à la présence de conduites qui constitue une zone particulière et sensible. Ces mêmes auteurs montrent que le compactage du remblai est un élément essentiel de sécurité : les barrages sans réel compactage sont quinze fois plus susceptibles de se rompre que des barrages où le compactage a été conduit selon les recommandations modernes : Densité supérieure ou égale à 98 % de la densité sèche maximum standard à l'OPN (Optimum Proctor Normal) et une teneur en eau comprise entre -1 % et +1 % de l'OPN (Foster et Fell, 2000) ;
- la déformation ou la fracturation du remblai : rupture par cisaillement, consolidation ou tassement de la fondation, modifications dans les états de contrainte dans le remblai, compactage insuffisant ou encore sollicitations du milieu (gel, dessiccation en profondeur) ou liées à l'exploitation.

3.4 Cinétique du mécanisme :

Le mode de rupture par renard hydraulique est plus rapide que le mode de rupture par suffusion. Il conduit rapidement à la rupture par création d'une brèche : ainsi 1h30 s'est écoulée entre le moment où une fuite d'eau claire a été signalée près de la galerie de vidange

et la rupture par apparition d'une brèche pour le barrage de Bila Desna en République Tchèque (Simek, 1997)¹.

Une brèche s'est ouverte en moins d'une heure après le premier constat d'un écoulement direct pour le barrage des Ouches en France (Peyras, 2003).

L'augmentation des débits de fuite est également un indicateur remarquable : par exemple, lors de la rupture d'un remblai zoné sur la rivière Quail, le débit est passé d'environ 15 L/s à 2000 L/s en 12 heures, l'eau se chargeant peu à peu en matériau au cours de cette courte période (Catanach et al., 1991). Ces phénomènes extrêmes menant à la rupture peuvent se produire à la première mise en eau mais également beaucoup plus tard dans la vie d'un barrage : 200 ans pour le barrage des Ouches (Peyras, 2003). Actuellement, il n'est pas possible de prédire de manière fiable les barrages pour lesquels l'érosion progresserait rapidement plutôt qu'à un rythme lent (Brown et Gosden, 2006).

3.5 Erosion interne :

L'érosion interne est définie comme l'entraînement progressif des particules Constituant l'ouvrage sous l'action de l'écoulement qui le traverse [Comité Français Des Grandes Barrages].

Deux phénomènes sont nécessaires pour que l'érosion interne se développe : L'arrachement des particules et leur transport.

3.6 Arrachement des particules :

Les phénomènes d'arrachement conduisent à la déstabilisation d'une particule ou D'un groupe de particules, sous l'action d'une force mécanique, on distingue.

Boullance : Ou l'annulation de la contrainte par gradient hydraulique, les forces d'écoulement s'opposent au poids des particules, la pression d'eau annule la contrainte effective, et la résultante des forces est dirigée vers le sens d'écoulement.

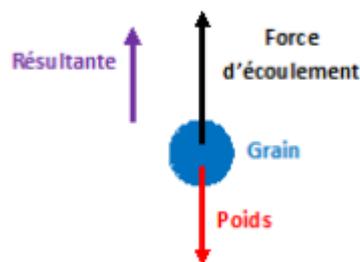


Figure 13. Phénomène de boullance (schéma de principe).

4. Transport des particules :

Le transport des particules est soit :

Concentré dans un conduit (renard) : L'infiltration d'eau sous un ouvrage peut provoquer le phénomène du renard quand le gradient hydraulique atteint une certaine valeur critique.

Au départ, on assiste à une augmentation de la vitesse d'écoulement avec un entraînement

¹

progressif des éléments fins du sol et, très rapidement, un entraînement générale des divers matériaux constituant le milieu. Il se forme alors une voie de circulation d'eau privilégiée à travers laquelle la venue d'eau prend rapidement une allure catastrophique et qu'on désigne par Renard.

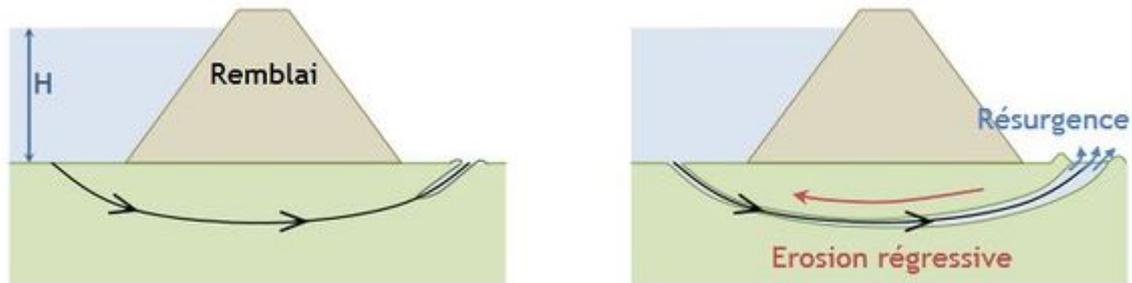


Figure 14: *Illustration en deux phases du phénomène de renard dans les fondations d'un barrage ; Source : Desodt et Horsin Molinaro (2016).*

4.1 Erosion externe :

L'érosion externe est un processus naturel sur toutes les terres. Agent C'est l'eau et le vent qui font les dégâts. L'érosion peut être un processus lent Inattendu, ou dans des proportions faramineuses, entraînant des pertes Immense étage.



Figure 15: *Blackman dam, Tasmania, 2005. Photo Crédit: The Mercury and Kim Eiszele*

4.2 Essais caractérisant l'érosion des sols :

Les tests de laboratoire peuvent être divisés en trois catégories : Tests Test de corrosion interne, test de corrosion de surface et test de dispersion. Cette Les tests d'érosion interne sont préférés car ils simulent l'érosion Fissures ou trous dans le corps d'un remblai.

4.3 Érodimètre à jets mobiles :

Le compteur d'érosion à jet mobile est constitué d'une partie mécanique active appelée "Erosor", un réservoir d'eau à pression contrôlée et divers organes Servir. Erosor dépasse d'une buse de 0,5 mm de diamètre (Fig. 1.16.b), perpendiculaire au sol ou à l'échantillon de sol à mesurer Erosion, six jets d'eau aux caractéristiques similaires et bien définies. Les éprouvettes peuvent être testées avec différentes pentes : 0%, 10%, 67%, 100% (Reiffsteck et al. 2006).

Insérez ensuite le gâteau dans l'appareil connecté à la source d'eau pression. Le moule porte-échantillon est placé sur l'une des deux rampes disponibles. L'anneau déversoir est inséré dans le moule porte-échantillon, à travers le guide Mesurer le déversoir aval de la rampe au-dessus de la cuve (Figure 16.a).

Le sol est ensuite exposé au rayonnement avec les paramètres de test suivants :

- ✓ Débit d'eau ($860 \pm 5\%$ cm³ pour buses à jet plat)
- ✓ Pression d'air comprimé (100 ± 5 kPa) .
- ✓ Échantillon d'états énergétiques (OPN 95° : wOPN et ydOPN) .
- ✓ Période d'expérimentation (60 secondes). Après le test , rincez la chambre de pluie de l'Érodimètre avec une pissette.

Le haut du récipient doseur. La quantité d'eau chargée collectée est mesurée et passée à travers le four pour déterminer la masse de matière sèche érodée par le compteur d'érosion.

C'est cette charge fixe qui est utilisée pour quantifier l'érosion. Mettre en place
Corrélation .

4.4 Essai d'érosion de trou :

Un dispositif de test similaire au test du sténopé a été développé aux fins suivantes :

Une mesure plus quantitative de l'érosion. Grâce aux mesures et paramètres estimés suivants :

Débit, hauteur, changement de diamètre de trou, tension, etc.

La résistance au cisaillement et le taux d'érosion peuvent être dérivés. La figure 1.17 montre

Schéma d'équipement du test d'érosion de la fosse développé par Wan et Fell (2002). Wan et Fell (2004) ont travaillé sur le matériau du noyau du barrage. Votre recherche

Axé sur la résistance à l'érosion de 14 matériaux de base endiguée. "L'indice du taux d'érosion" a été introduit pour la classification Résistance à l'érosion. Une méthode simple d'estimation a été proposée Érosion interne possible et taches de moisissure sur les remblais de sol. Cependant, des choix sont faits pour estimer la contrainte de cisaillement critique.

J'en doute. Le nouveau dispositif a été amélioré avec l'Ifsttar Paris.

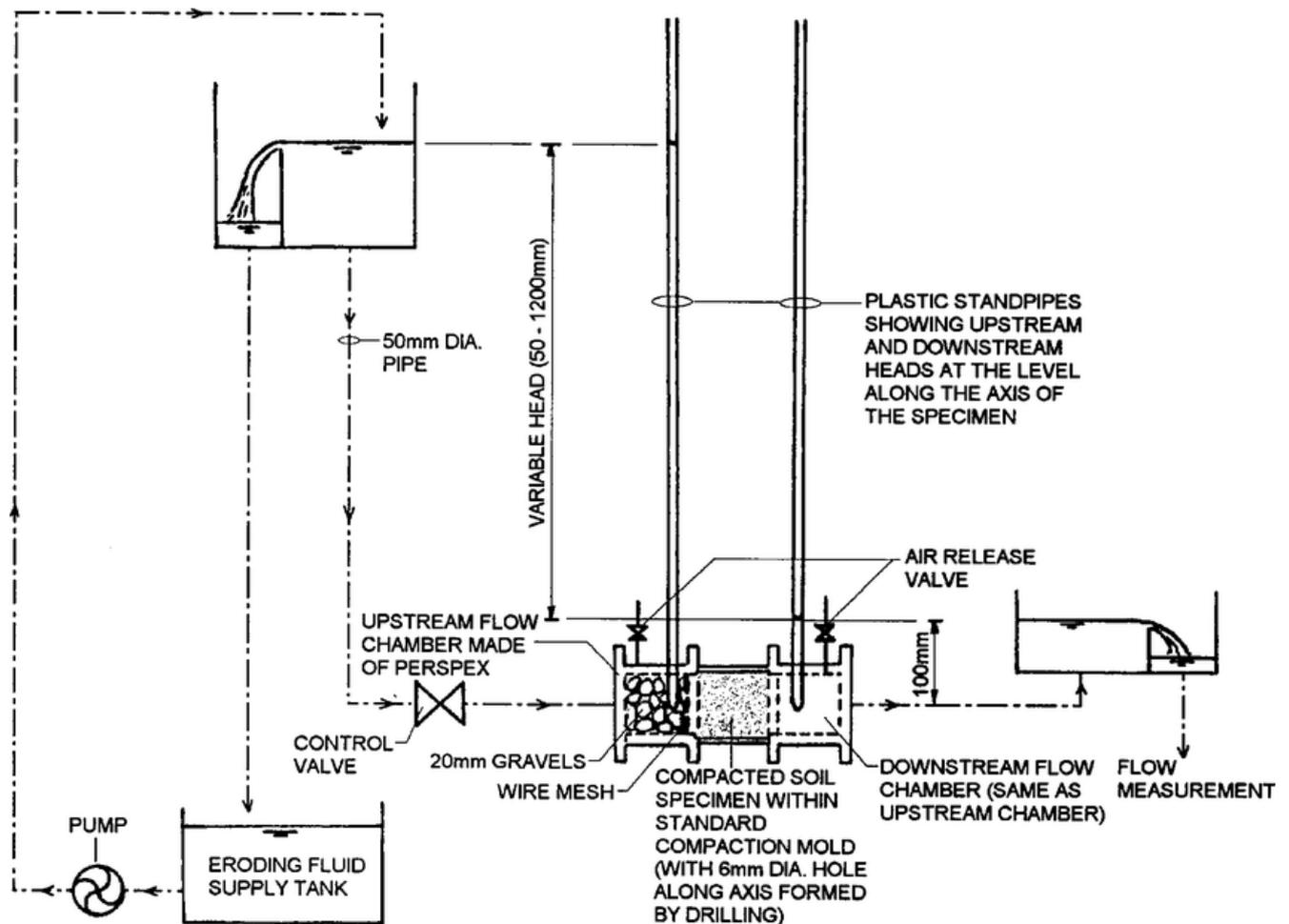


Figure 16 : Schéma d'appareillage de Hole Erosion Test (Wan and Fell, 2004).

4.5 Essai triaxial d'érosion :

Sanchez et al. , (1983)

Terre par dispositif d'érosion triaxial (modifié par rapport au dispositif triaxial normal) (Fig. 1.18). Utilisez-les pour calculer la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion. J'ai dû faire une hypothèse sur l'évolution de la forme des trous préformés.

Spécimen, échantillon. Ils ont constaté que la teneur en eau affecte l'érosion des sols.

Les sols limoneux sont plus importants que les sols limoneux. Augmentation de

La concentration d'ions dans le liquide ralentit le taux d'érosion des sols plus limoneux

Beaucoup plus qu'un sol argileux. Bendahmane (2005) a montré l'existence d'un second gradient critique.

Correspond à l'érosion interne par Fuchs après le début de l'érosion par

Suffisant. Teneur en argile et pression de confinement réduites

Augmente la suffisance. Avec une diminution de la proportion d'argile

Une pression intermédiaire augmente le phénomène de taches de moisissure.

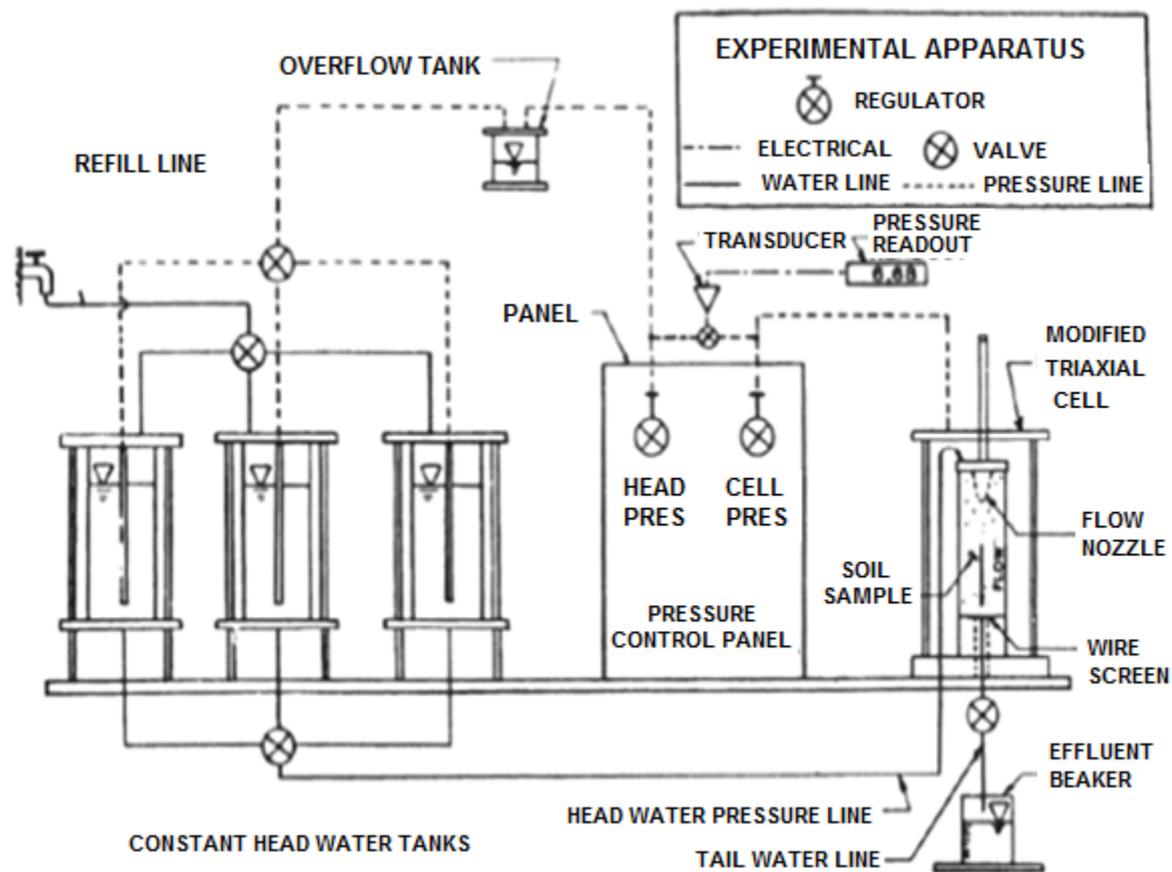


Figure 17: Schéma d'appareillage de Triaxial Erosion Test (Sanchez and al., 1983).

Dispersion de sol :

L'argile dispersée est un type particulier de sol dans lequel la partie argileuse Erosion par défloculation en présence d'eau. Cela arrive quand La force de répulsion entre les particules est supérieure à la force d'attraction, donc Les particules d'argile se séparent et entrent en suspension (Forrest, 1980).

Pour les sols non cohésifs, l'érodabilité ne dépend que de la porosité du sol, Densité et viscosité du fluide de gravure. En revanche, pour les sols cohésifs, Le problème est plus complexe, l'érosion dépend aussi de l'attractivité entre les particules.

Mécanisme de dispersion :

Lorsque deux particules d'argile se rapprochent, un champ de potentiel se crée.

S'ils se chevauchent et que les particules sont suffisamment proches les unes des autres, elles se repousseront. Eux

La force répulsive est équilibrée par la force attractive de van der Waals. Lorsque la force de répulsion est supérieure à la force de van der Wand Le wallon parle de terre dispersée.

La force répulsive de la double couche diffuse est affectée de plusieurs manières Facteurs (Fell et al., 1992) .

- ✓ Concentration d'électrolyte : sel à haute concentration dissous dans l'électrolyte

L'eau du sol produit une petite double couche diffuse (comme une plus grande)

La concentration en cations (Na +facilite le dépassement de la charge Négatif sur surface argileuse). Par conséquent, la force répulsive faible .

- ✓ Valence cationique : échange cationique Ca^{++} des cations Na^+ Double couche de diffusion plus petite, donc moins de force répulsive.

4.6 Facteurs liés à la structure de sol :

a- Type de minéral argileux :

La dispersion du sol est directement liée à ses minéraux argileux. Cet étage La montmorillonite est assez dispersive et les minéraux sont La kaolinite et les minéraux similaires (halloysites) sont non dispersibles. Illite Il a tendance à être modérément dispersé.

b- Pourcentage de sodium :

Le sodium agit comme un dispersant principalement en raison de sa charge

Il est ionique +1 car le rayon de l'ion sodium hydraté est grand.

C'est un moyen d'initier la dispersion en produisant de grandes quantités d'ions sodium.

Potentiel osmotique lors du mouvement de l'eau entre et à travers les particules

Augmentation de la répulsion entre les particules (figure...).

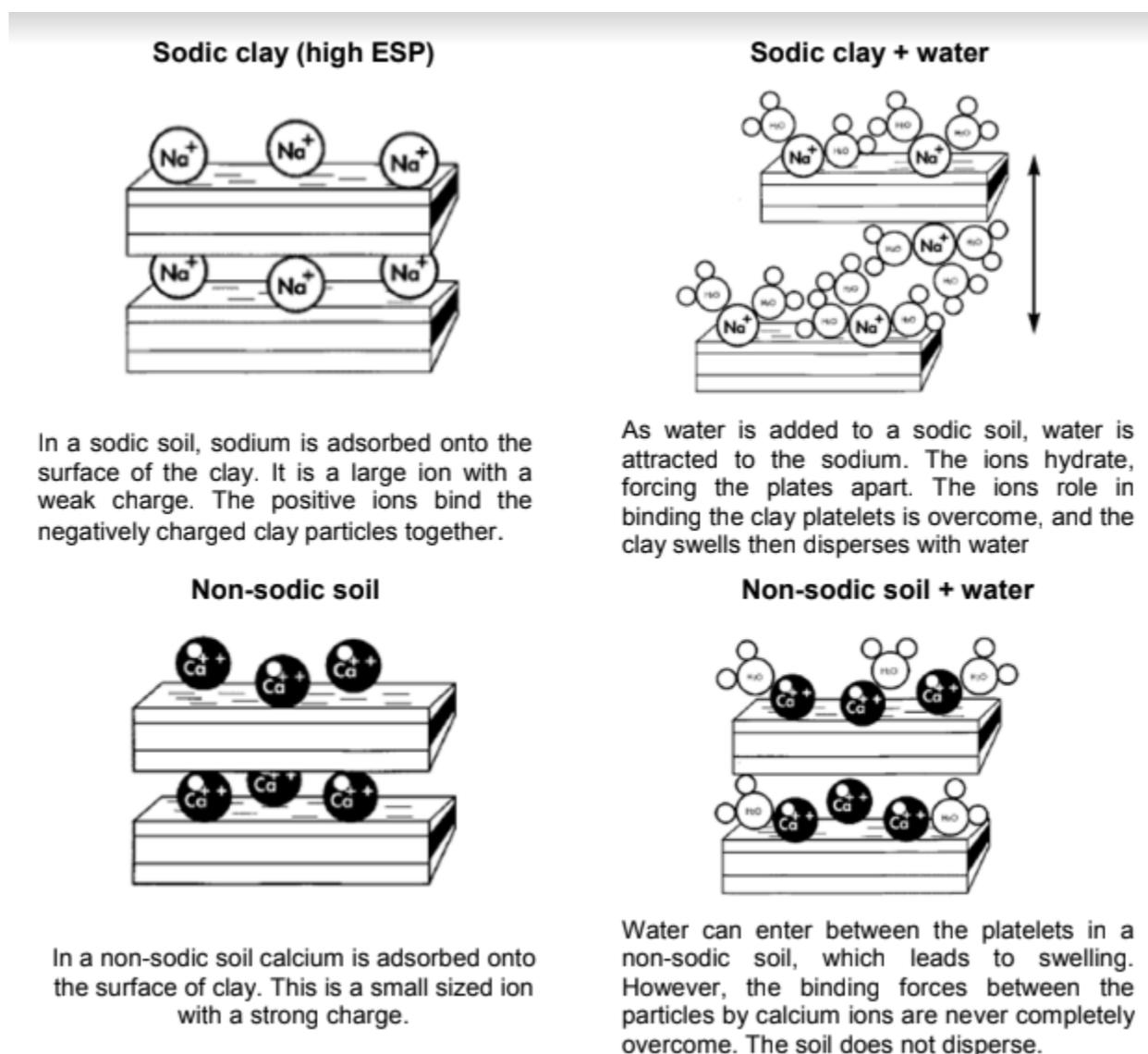


Figure 18: Comportement des sols non sodiques et sodiques dans l'eau (Anon, 1999).

c- Mode d'empilement des feuillets d'argile :

Dans la même feuille ou différents types de modes de pile Explication efficace de la dispersion spontanée même à de faibles concentrations

Sodium à structure argileuse. Particules d'argile de type montmorillonite D'une collection de 4 à 9 feuilles empilées en parallèle. Une telle structure Indique la priorité des ions calcium dans la couche interne de empiler. Cela réorganise les cations attirés. Ion Le sodium à la surface de l'emballage est progressivement recouvert de cations.

Le sodium était lié à une concentration critique spécifique de sodium. En outre

Au niveau, les ions sodium commencent à pénétrer entre les couches internes, provoquant un gonflement interne de la structure et divisant le paquet en unités plus grandes.

De petites choses peuvent se produire, ce qui est bénéfique pour la diffusion.

4.7 Identification des sols dispersifs :

Actuellement, l'identification de l'argile dispersée est requise avant la construction Nécessaire pour les terrassements et les terrassements existants.

Étant relativement pur, il est très sensible à l'érosion. Tendance à s'éroder

Le sol dispersé dépend de plusieurs variables telles que la minéralogie, la chimie, etc.

Sel dissous dans l'argile, l'eau interstitielle du sol et l'eau érodée (Shellard) et Decker, 1977).

L'identification de l'argile dispersée peut être commencée par observation visuelle Du sol ; en laboratoire, avec une série de tests spécifiques Approprié.

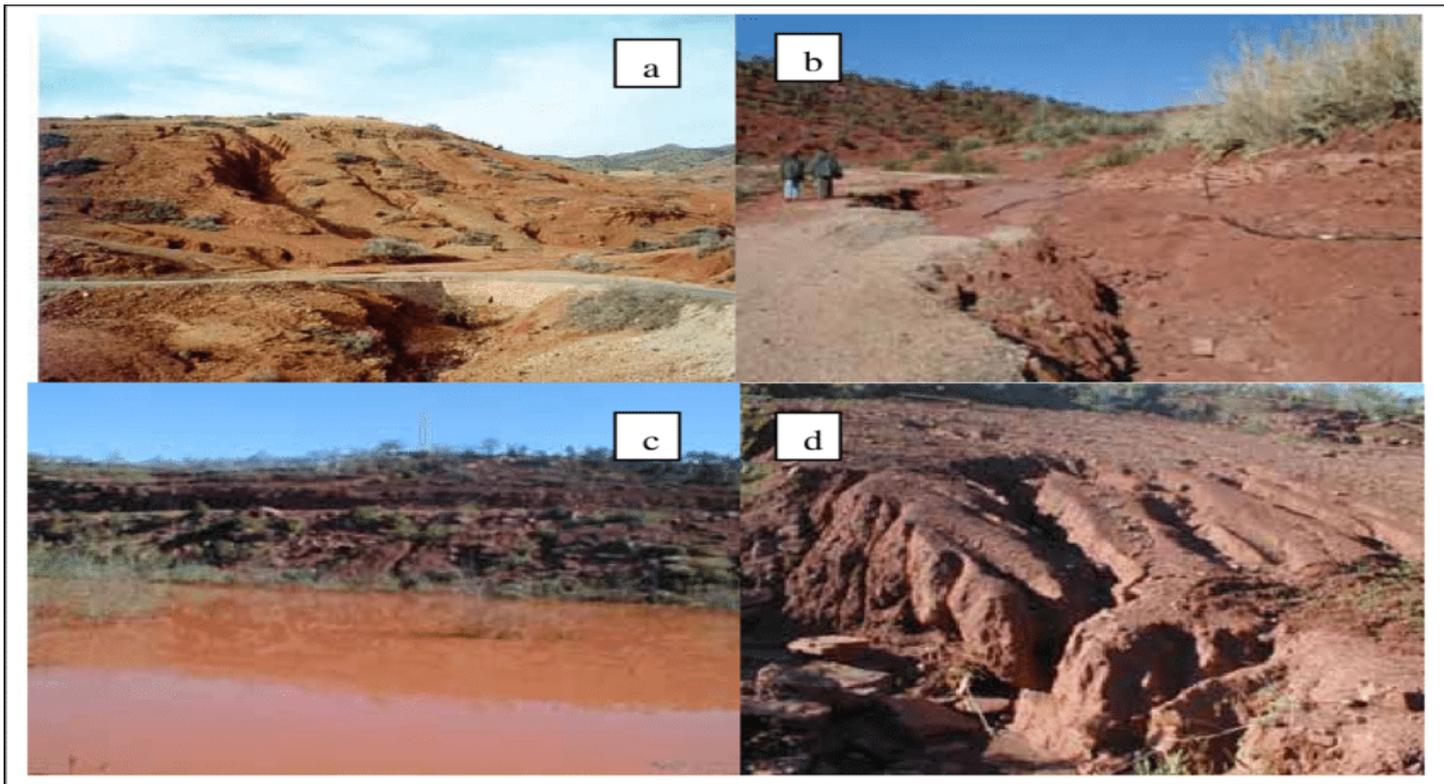
1.6.3.1 Essai d'émiettement (Crumb test – ASTM D 6572-00).

**CHAPITRE II - L'EROSION
INTERNE DANS LES
BARRAGES EN REMBLAIS**

1. Introduction :

L'érosion des structures du sol due au ruissellement se produit lorsque la résistance à l'érosion est inférieure à la pénétration, qui tend à produire, de manière à ce que les particules de sol soient retirées et transportées par l'écoulement de l'eau. La résistance dépend de la cohésion, du poids de la particule et du sol et de son type de protection en aval. La pénétration à travers la structure et l'hétérogénéité du sol, où l'érosion augmente la concentration d'infiltration, où cette concentration se produit. En aval, les forces érosives sur les particules de sol peuvent devenir très importantes. Cela met en évidence la concentration et l'agressivité de la pénétration de l'eau (Godone et Stanch, 2011).

La corrosion interne est le principal mécanisme d'instabilité observé sur les ouvrages hydrauliques en terre. Le mécanisme comporte deux processus principaux : la déchirure des particules et leur déplacement. Le développement progressif du temps et de l'espace, son hétérogénéité et l'hétérogénéité des sols naturels rend ce phénomène complexe et difficile à souligner et à expliquer (Alem et al. 2010). Les digues et les barrages sont sensibles à l'érosion interne. Ce phénomène est difficile à mesurer. C'est très localisé, ça interfère avec la structure, généralement au niveau de la canalisation, à la jonction du remblai et de la canalisation. Travaux de maçonnerie ou dus à des grottes.



1.1 Rupture des barrages en remblai :

La destruction des digues peut avoir été causée par l'érosion interne du sol fin constituant le noyau, par l'érosion du sol sous la fondation ou sous les soutènements, par Problèmes de stabilité causés par une pression interstitielle excessive, Débit avec des gradients trop élevés ou critiques et débordement Eau au dessus du barrage ou de son déversoir (Massiéra et al., 2008). Statistiques sur les ruptures de grands barrages basées sur le résumé du comité Groupe international sur les barrages (CIGB), digues en terre représente la majorité des ruptures de barrage, près de deux fois plus élevé que les barrages en béton. Cependant, vers 1985 et après, La destruction est semblable à un barrage en béton. Cause la plus fréquente Les ruptures de digues dans le monde sont les inondations et l'érosion Interne (Fell et al., 1992).

La plupart des impacts du barrage se produiront pendant la durée de vie du barrage, Surtout lors du premier remplissage du réservoir. Environ les deux tiers Toutes les ruptures de barrage liées à l'érosion interne se sont produites au cours des cinq dernières années leur première année de fonctionnement.

L'analyse des ruptures de barrage à travers le monde amène aux observations

Suivantes :

- ✓ Il y a deux causes principales de rupture :
- ✓ Capacité insuffisante de l'évacuateur (35 % des ruptures documentées) ;
- ✓ Problème de fondation (25 % des ruptures documentées).
- ✓ La probabilité de rupture d'un barrage en remblai croît avec la hauteur, passant de 0,2 % pour les toutes petites hauteurs (moins de 10 m) à 14 % pour les grands barrages (hauteur supérieure à 50 m) ;

✓ La phase de remplissage et les cinq premières années de service sont les plus critiques.

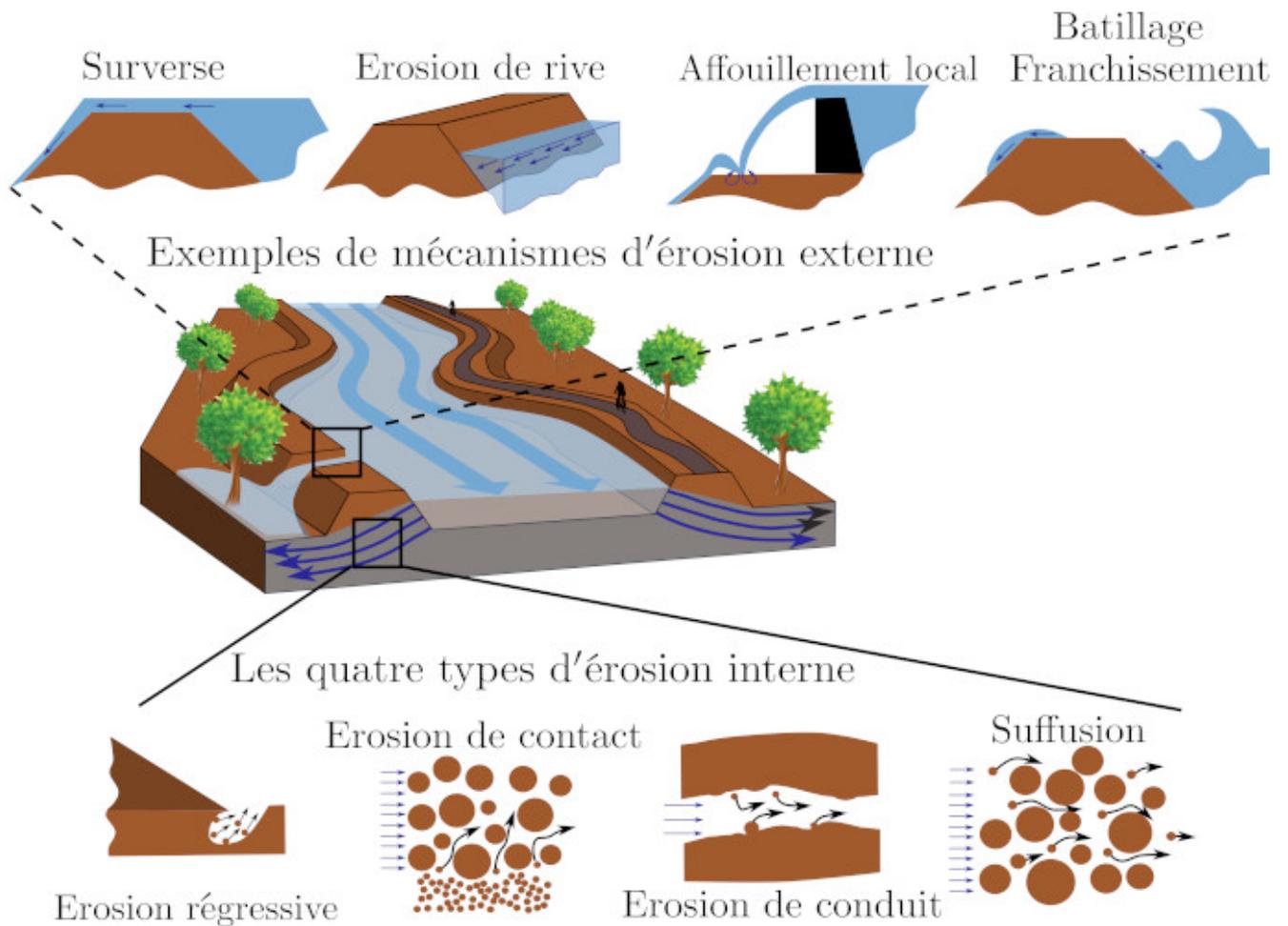
Foster and al., ont utilisés les données de la CIGB, et des informations sur les barrages qui avaient vécu des incidents pour développer des données historiques performances pour les barrages construits avant 1986 (Fell and al., 2005).



Figure 19 : La rupture du barrage de Banqiao (Chine) en 1975 a entraîné directement 86.000 morts et indirectement 145.000 morts (famines et épidémies) selon les chiffres officiels du gouvernement chinois.

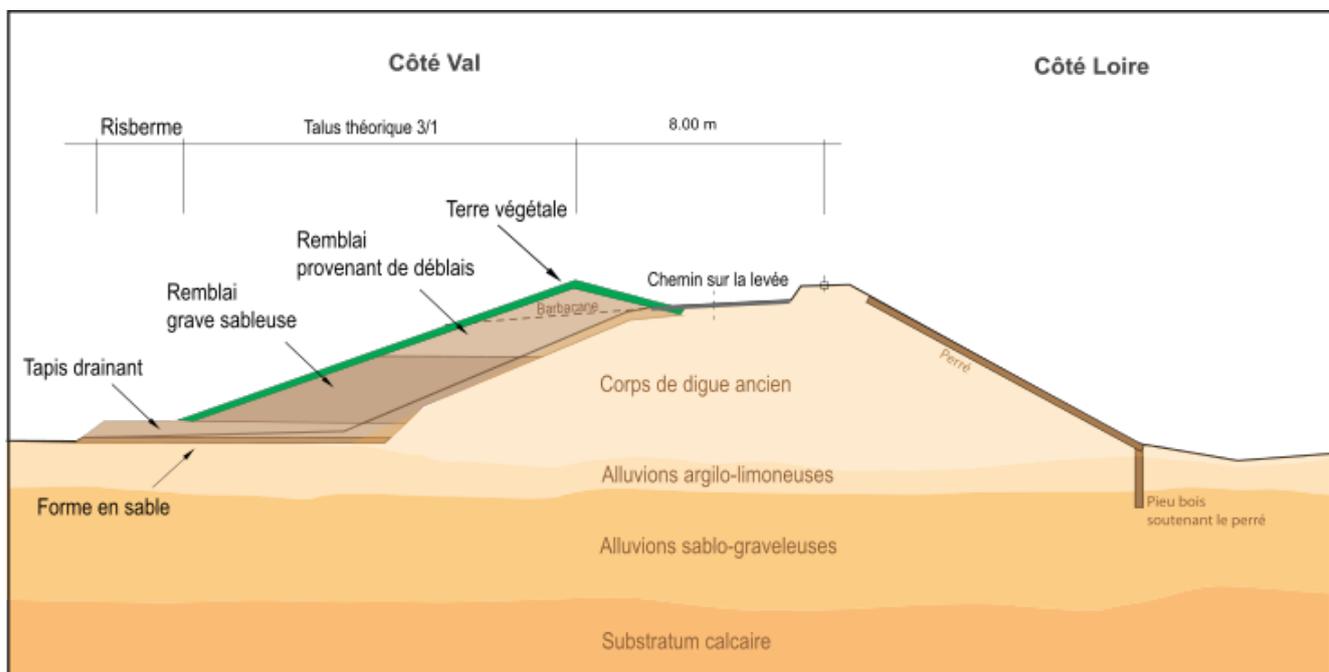
1.2 Typologie des désordres et mécanismes de rupture :

Il existe de nombreux mécanismes conduisant à la défaillance des ouvrages hydrauliques. Différents, on note : déversement, érosion externe, érosion interne et rupture globalement. Déversements dus à des phénomènes extérieurs typiques : inondation Niveau supérieur aux événements de référence pour le dimensionnement La hauteur du remblai. De ce point de vue, il est crucial de comprendre Les événements de référence, qui renseignent sur le niveau de protection assuré agencement. Cela appartient à l'étude de l'hydrologie et de l'hydraulique. Tout D'autre part, d'autres mécanismes contribuent directement à la solidité et Par conséquent, avec son emplacement, sa conception géotechnique, suivi et entretien correct.

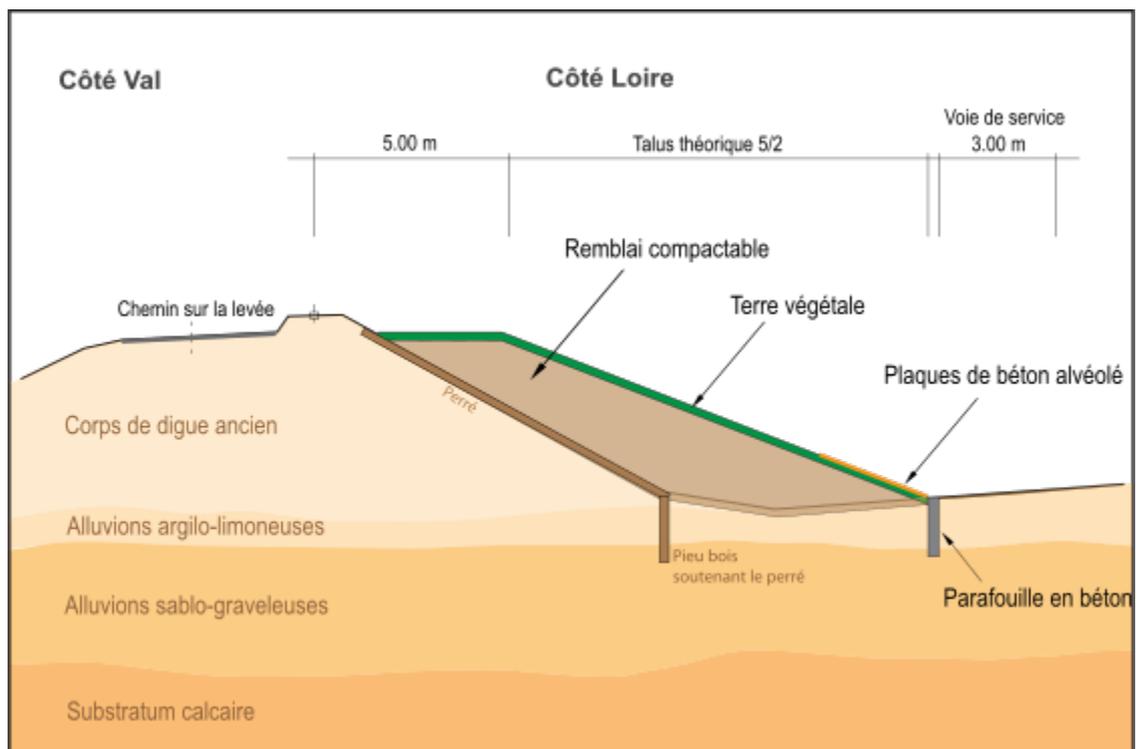


1.3 Surverse :

La surverse c'est le débordement de l'eau au-dessus de la digue lors d'une crue, conduit généralement à la brèche par érosion régressive du talus côté terre puis delà crête.



Renforcement du corps de digue par épaissement côté val.



Renforcement du corps de digue par épaissement côté lit de la Loire.

1.4 Erosion externe dans les barrages :

Lors d'une crue les talus des digues coté fleuve et les berges subissent les effets courants hydrauliques qui peuvent provoquer des érosions à leur base (figure 2.2)

Facteur de stabilité :

Protection des pentes des talus, présence espace entre la digue et le lit, largeur lit, débit lent, absent Facteurs perturbateurs (arbres, embâcles).

Facteur de vulnérabilité :

Pentes de talus fragiles, continuité des digues, Couronne de lit, largeur ruisseau étroit, arbres générer un tourbillon.

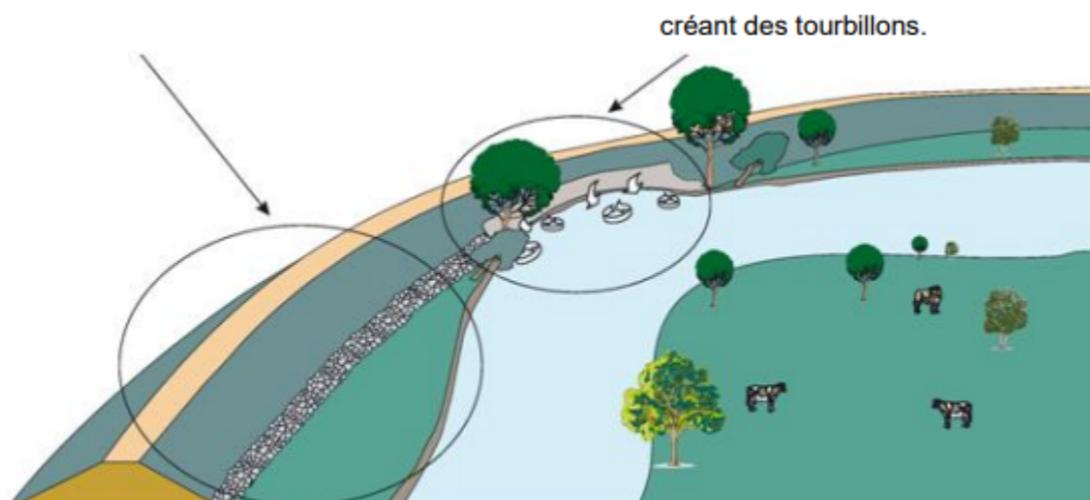


Figure 20 : Mécanisme d'affouillement en pied de digue (Mériaux et al, 2004).

1.4.1. Erosion interne :

Hétérogénéité de perméabilité du barrage et de sa fondation Peut être une source de zones de circulation d'eau prioritaires. Selon Les propriétés de la charge d'eau et du matériau peuvent être obtenues localement Dépasser les gradients hydrauliques critiques et observer l'érosion interne sol, formant progressivement un pipeline le long duquel gradients et vitesses augmenté rapidement au fil du temps. L'amplification du phénomène peut aller jusqu'à jusqu'à travers les travaux ou sa fondation (renard pression hydraulique), suivie d'une rupture par effondrement (Mériaux et al., 2004). Interface Les drains/remblais ou le béton/remblai sont de très bons endroits les renards se développent, ils doivent donc être conçus Surveillance appropriée (ex. écrans sur les canalisations) et renforcée.

1.4.2. Rupture d'ensemble :

Le profil en travers commun des remblais leur donne souvent La stabilité globale est assez garantie dans toutes les conditions de charge. Le risque global d'instabilité sous charge hydraulique est généralisé Lorsque ces trois facteurs sont combinés (Mériaux et al., 2004) .

- ✓ Présente une forte pente (supérieure à 0,65 ou moins de 3H/2V de fruits) .
- ✓ Mesure de haute pression dans les digues et absence de drainage et présence Couche hétérogène .
- ✓ Faible densité et donc faibles propriétés mécaniques du matériau Remblai, ou il y a une couche d'argile sous-consolidée dans le plan horizontal Base. Ces trois facteurs peuvent se combiner dans l'ancienne zone de violation Ses réparations ne sont pas toujours effectuées dans des conditions optimales.

1.5 Analyse pathologique de l'érosion interne :

Les terrassements doivent répondre à deux conditions principales : étanchéité et Résistance mécanique de la structure. Événement déclencheur L'érosion peut fonctionner en affaiblissant la résistance mécanique de la structure, Ou réduire son étanchéité en augmentant la perméabilité de la structure. Les principales causes de rupture sont (Bekkouche, 1987).

1.5.1 Causes liées au compactage :

- ✓ Si le matériau est trop sec ou trop humide, la densité sèche sera inférieure à la densité sèche optimale.
- ✓ Il est très difficile de compacter au voisinage des conduites de vidange, des évacuateurs de fond...
- ✓ Une mauvaise liaison entre deux couches successives peut être la cause d'un cheminement d'eau privilégié .
- ✓ Adaptation du matériel au matériau : par exemple le compacteur à rouleaux lisses donne un mauvais résultat avec les argiles constituées en mottes, à l'encontre du tramping qui permet d'homogénéiser ces dernières.

1.5.2 Causes dues à la mauvaise liaison du noyau avec le contour :

Il faudra que les forces de liaison au contact du noyau soient au moins égales à celles existant le long d'une section quelconque de l'ouvrage. Plusieurs conditions rendent cette liaison difficile :

Fondation et appuis rocheux :

- ✓ Les roches poreuses absorbent l'humidité de la première couche, donc retrait de celle-ci .
- ✓ La surface du rocher très lisse .
- ✓ L'irrégularité du rocher .
- ✓ L'effet de voûte qui peut se produire par le compactage de la terre au-dessus des points bas de la surface du rocher .
- ✓ La présence d'eau libre.

Fondation et appuis en terre :

- ✓ Il faudra excaver jusqu'à l'obtention d'une terre suffisamment compactée.
- ✓ Il faudra scarifier la fondation pour assurer une meilleure liaison .
- ✓ Si les terres du remblai et celles de la fondation sont de natures différentes, il faudra une terre de transition constitué d'un mélange des deux terres. Sur les rives, cette zone de transition peut atteindre 2 à 3 m d'épaisseur.

1.5.3 Causes liées à la fissuration du remblai :

a) Tassement différentiel, il peut être provoqué par les causes suivantes :

- ✓ Pentes des appuis latéraux trop raides .
- ✓ Au-dessus de la conduite de vidange ou évacuateur de crue ;
- ✓ Hétérogénéité du sol de fondation .
- ✓ La non-continuité des déformations entre le corps du barrage et la fondation. Cette condition n'est pas satisfaite si le corps du barrage est plus déformable que la fondation.

b) Relâchement des contraintes des matériaux surconsolidés du fond de la vallée ou appuis latéraux.

c) Fracturation hydraulique affectant les noyaux minces à cause de la faible contrainte effective due aux frottements avec les recharges.

d) Mauvaises reconnaissances géologiques ou géotechniques :

- ✓ Fissures géologiques .
- ✓ Roches altérables .
- ✓ Lentilles de sable dans les fondations ou appuis.

1.5.4 Causes provoquées par la conduite de vidange :

↳ Si le tuyau de vidange est fissuré, il fuira du tuyau de vidange.

↳ Mauvais fonctionnement de la vanne pouvant provoquer des vibrations Le tuyau sème la confusion dans le corps du barrage.

1.6 Modes de rupture par l'érosion interne :

Le risque d'érosion interne et d'infiltration dans les barrages en remblai est subdivisé généralement en trois modes de rupture (Cyganiewicz, 2001).

1.6.1.Érosion interne à travers le remblai :

Ce mode de rupture est caractérisé par une érosion interne uniquement. Par remblayage. Érosion interne par les renards, les ravinements ou les inondations Au cœur du barrage. L'érosion interne progresse en s'échappant Particules vers le bas. L'érosion interne continue jusqu'à ce qu'elle échoue Barrages (Walter Boldin Dam et Anita Dam, USA).

1.6.2.Érosion interne à travers la fondation :

Ce mode de rupture est caractérisé par une érosion interne uniquement. Au sein de la fondation. Érosion interne par chasse, affouillement ou inondation Introduit dans certains matériaux érosifs de la fondation. L'érosion interne va continuer Les particules s'échappent vers les cours inférieurs. L'érosion interne continue Retournez au réservoir. En retard L'érosion conduira le barrage à la destruction. (Barrage de Baldwin Colline, États-Unis).

1.6.3.Érosion interne du remblai dans/à la fondation :

Ce mode de rupture est caractérisé par le processus d'érosion interne associé. A la fois remblai et fondation. Dans cette catégorie commune d'érosion interne Distinguer les deux types de panne.

1.6.4.Erosion interne du remblai près de la fondation :

L'érosion interne initie le contact entre le remblai et la fondation. Pénétration des remblais. Les particules de remblai sont transportées vers la fondation Grâce à cette pénétration. Doit avoir une perméabilité et une fondation suffisantes Peut éliminer une quantité importante de charge Surface de contact. Le processus se déroule comme suit par érosion à rebours. Rupture de barrage (Teton Dam, États-Unis).

1.6.4.1.Erosion interne du remblai au contact de fondation par un flux :

L'exulcération fermier commence par une dégoulinade velouté de l'eau chez la assiette à son coudoisement rebrousse-poil le remblai. Effectivement annulé motilité des particules du remblai chez la assiette ne se produit. Plutôt la dégoulinade bataille le centre du antre à son coudoisement rebrousse-poil la assiette diffus, l'exulcération des particules chez les zones respect de la assiette ou chez le remblai. L'exulcération des remblais peut manoeuvrer délire une entorse par voir graduelle de la façade respect du remblai (barrages de Fontanelle et de Quail) ou par des méconnaissables mécanismes violation. L'antre de Teton est itou pensé par la tierce pendant lequel à elles entorse par ce mode.

1.7.Processus de l'érosion interne :

Le pourcentage de sol considéré comme le plus sensible à l'érosion est Limon et sable. En revanche, les sols collants tels que l'argile ont tendance à le faire. Résistant à l'érosion car les liaisons chimiques ne sont pas rompues (Srbulov, 1988). (Mattson et al. , cité par 2008). En son centre se trouve le barrage en terre et en enrochement Trois processus principaux qui peuvent produire des renards (Fell et al. 2005).

Erosion rétrograde, concentration et diffusion des fuites :

} L'érosion commence à la sortie de l'infiltration et progresse Former progressivement un canal vers l'arrière.

} La concentration des fuites crée des fissures ou des zones provenant de la source Eau au point de sortie. L'érosion se poursuit progressivement Mur du canal ;

} La suffusion est le processus par lequel les fines particules de sol sont emportées ou consommées. Cavités formées par des particules plus grossières. Vous pouvez éviter cela si vous avez le terrain A une distribution de particules bien réglée avec suffisamment de vides petit. Les sols sont s'appellent intérieurement instable si la suffusion prend ca place et intérieurement stable si les particules ne sont pas dispersive sous infiltrations. Le renard peut se produire dans le remblai, à travers la fondation et dans le remblai a travers la fondation.

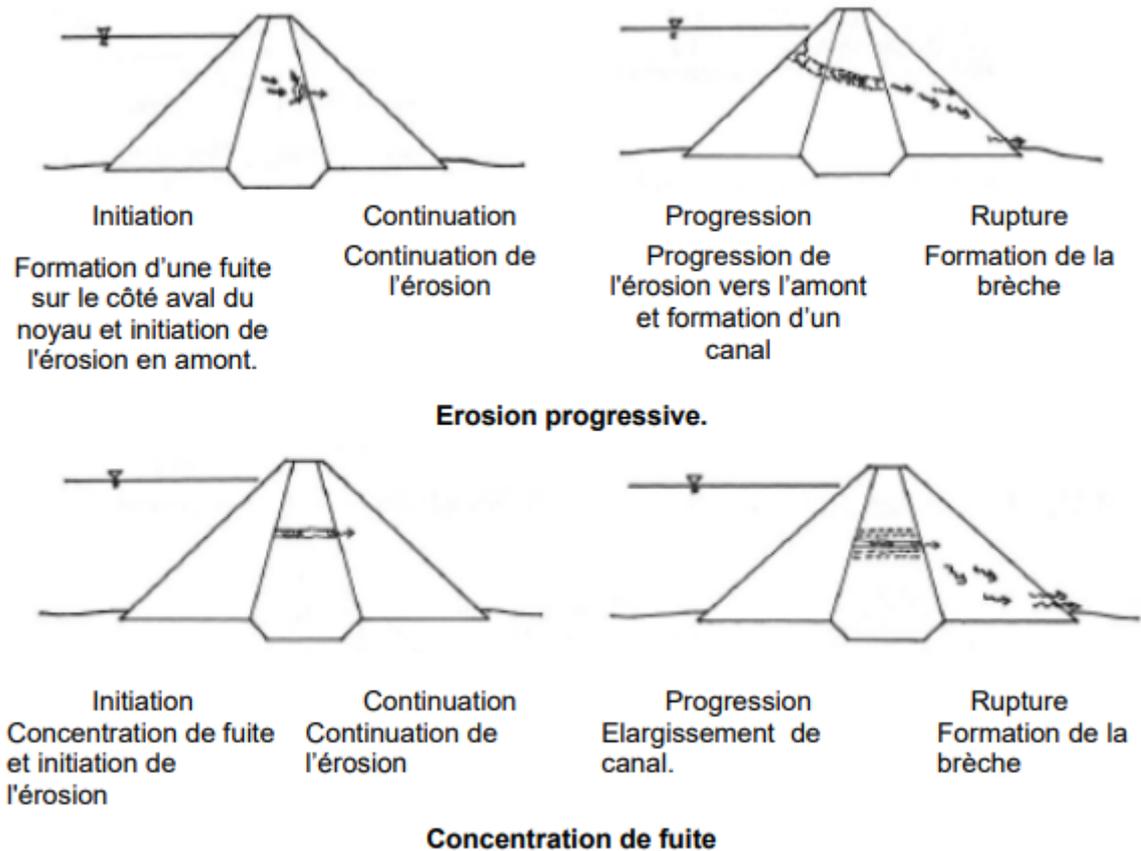


Figure 21 : Modèle pour le développement de l'érosion interne dans la fondation (Fell and al., 2001)

Figure 22 : Modèle pour le développement de l'érosion interne dans le remblai (Fell and al., 2001).

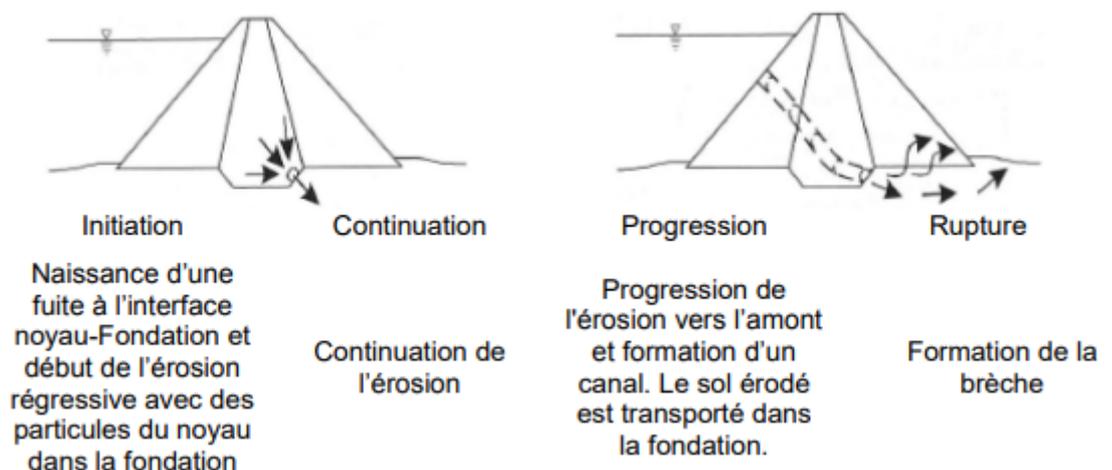


Figure 23 : Modèle pour le développement de l'érosion interne du remblai à la fondation (Fell and al., 2001).

1.9 Méthodes de détection de l'érosion interne :

Dans de nombreux cas, il existe de nombreuses façons de détecter l'érosion interne. Utilisé ou utilisé pour les tests d'intégrité des barrages
 Réhabilitation de barrages ou enquête sur les dommages structurels existants. Eux
 La méthode a la capacité de reconnaître et de donner des alertes précoces
 Érosion interne. (Selon Fel et al. 2005).

signe général d'alerte du cas Les barrages en remblai sont : des fuites accrues, des fuites boueuses, des gouffres, Colonies, fissures, tourbillons dans les réservoirs, prolifération Pression interstitielle et fragments de sable.

1.9.1. Auscultation des barrages en remblais :

Les méthodes traditionnelles de détection de l'érosion interne sont :

Il est divisé en surveillance et contrôle. Des contrôles visuels réguliers sont les meilleurs Important dans les programmes de surveillance des barrages. dirigé par
 Avec toutes les enquêtes menées régulièrement Inspection visuelle au barrage.

Y compris la surveillance Mesure de divers paramètres importants pour la sécurité barrage. La surveillance a l'avantage de couvrir toute la partie visible du barrage. Inspecté. Les intervalles de surveillance dépendent de la classification du barrage. Le principal inconvénient de l'inspection visuelle pour détecter l'érosion interne est que le processus d'érosion pourrait progresser trop quand til devient visuelle (Sjödahl, 2006).

Le contrôle est composé de la surveillance des débits d'infiltration, mesures de pression interstitielle et des mesures des mouvements et des déformations. L'infiltration est fortement liée à l'érosion interne, une augmentation rapide des débits d'infiltration est un signal du problème de fuite, qui pourrait être associée à une érosion interne. Les mesures d'infiltration sont effectuées sur le drainage recueillis en aval du barrage.

Mesure de la pression interstitielle dans le barrage Informations intéressantes pour plusieurs raisons. pression Le site interstitiel du noyau cellulaire peut indiquer une zone de fuite. Valeur mesurée de Les filtres en aval permettent de vérifier l'intégrité de la capacité de déshydratation de la section filtrante.

Ou alors Une diminution de la capacité de drainage du filtre peut être un signe d'érosion interne En effet, le lavage en poudre fine peut obstruer le filtre. pression L'interstitiel est souvent mesuré manuellement de façon régulière.

Les déformations dans le barrage peuvent être associées à des tassements causés par l'érosion interne. Ces mesures sont effectuées à certains points sur la crête et sur les talus du barrage. Généralement de telles mesures sont répétées manuellement à des intervalles réguliers, mais la surveillance automatique est possible.

1.9.2. Dispositif d'auscultation :

Le but recherché est de réunir des informations suffisantes, en nombre et en qualité, pour détecter en temps utile les phénomènes évolutifs susceptibles de nuire à la sécurité de l'ouvrage. L'inspection visuelle est la partie majeure de la surveillance des barrages : elle permet souvent de détecter des désordres et anomalies affectant un ouvrage. Par contre, l'auscultation est une méthode quantitative basée sur l'utilisation d'instruments de mesure,

choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage. Les principales évolutions susceptibles de conduire à des désordres, voire à des ruptures, sont globalement de trois ordres :

- ✓ Des tassements nettement plus importants que ceux qui ont été prévus de la crête du remblai, ce qui entraîne aussi une diminution de la revanche ;
- ✓ Le développement de pressions interstitielles anormalement élevées ;
- ✓ L'existence des fuites à travers le remblai ou la fondation, non contrôlées par le système de drainage (insuffisant ou colmaté) et pouvant, par leur aggravation brutale ou progressive, conduire à un phénomène de renard ou à une saturation du talus aval. Les principales mesures effectuées lors de l'auscultation d'un barrage sont (Degoute, 1997).

1.9.2.1 Mesure de la cote du plan d'eau :

Cette mesure répond à trois objectifs :

- ✓ Améliorer la gestion des dépôts avec une connaissance continue du volume Eau disponible .
- ✓ Enquêter sur l'impact du barrage et participer à l'auscultation du barrage Gamme de restrictions sur les mesures d'équipements spécifiques (en particulier les rivières) Et piézomètre).
- ✓ Améliorer les données hydrologiques en mesurant les courants de crue.

La gestion d'un barrage vanné et l'amélioration des données hydrologiques justifient, dans certains cas, l'installation d'un limnimètre enregistreur. Dans tous les autres cas, et en particulier pour les besoins de l'auscultation, une échelle limnimétrique convient tout à fait pour la mesure de la cote du plan d'eau.

1.9.2.2. Mesure des débits :

Le contrôle des fuites, des suintements et des zones humides est d'abord visuel. La mesure des débits suppose leur collecte : fossé de pied, aménagement d'exutoires. Deux procédés de mesure des débits sont envisageables :

- ✓ Par capacité (mesure du volume recueilli dans une capacité jaugée pendant un temps donné) .
- ✓ Par mesure de la lame déversant en amont d'un seuil calibré. Ces dispositifs sont installés sur les ouvrages neufs à la sortie des organes de drainage, et sur les barrages en service dans des zones où l'on observe des fuites. Tout doit être fait contournement, et qu'il soit, si possible, non influencé par la pluie. Les seuils doivent être maintenus propres et les canaux d'approche des seuils doivent être périodiquement débarrassés des matériaux déposés. Si des matériaux granulaires sont observés, il convient d'alerter un bureau spécialisé qui étudiera si un risque d'érosion interne est à redouter.

1.9.2.3. Mesure de la piézométrie :

Il est important de localiser la fondation et le remblai Évolution du niveau de la nappe phréatique et de la pression interstitielle. Les jauges peuvent être divisées en deux types :

- ✓ Piézomètre à tube ouvert, longueur allongée de quelques dm A quelques mètres.
- ✓ Cellule de pression interstitielle (fil vibrant, contre-pression). Cellule de mesure de la pression interstitielle avec mesure ponctuelle précise Temps de réponse plus rapide que le piézomètre. Un piézomètre à tube ouvert peu coûteux et facile à lire permet la détection Anomalies de la fondation (preuve d'une perte de charge insuffisante), Ou

remblai aval (problème de saturation). Puis le piézomètre est installé Profil d'impact (notez le contact avec le tapis de drainage). Compte tenu du temps de réponse, le piézomètre à tube ouvert est adapté à la terre Transparence.

D'autre part, lorsqu'un phénomène plus compliqué tel que le suivant est requis Fondation, remblai, Cours de saturation, efficacité du drainage de la cheminée, privilégiez les mesures Points de pression interstitielle regroupés en plusieurs

profils amont.

1.9.2.4. Mesure des déplacements :

Il existe plusieurs types de mesures de déplacement.

Mesure du déplacement absolu du marqueur de barrage par rapport à Colonnes d'observation fixes dans des zones peu susceptibles d'exister, Il est affecté par le mouvement. La mesure de l'altitude est possible (Têtement) et mesure de surface (en amont et en amont), Mesure du déplacement interne du barrage utilisation verticale Jauge d'affaissement horizontal avec inclinomètre ou jauge de longueur. Mesure du déplacement relatif des structures en béton .

pendule Vinchon, une tour de prise au droit de la jonction du tunnel d'inspection.

La mesure la plus courante est le paiement. Ce dernier se développe généralement rarement Quelques années plus tard. Il est important de commencer à mesurer les paiements Une fois la dernière couche de remblai comprimée. Terminal Il est placé sur le sommet du massif en solidarité avec le corps du massif. Barrage ou à proximité et en aval des ouvrages Relativement large.

1.9.3. Méthodes Géophysiques :

Les techniques géophysiques sont des méthodes indirectes de caractérisation des sols : elles donnent accès aux valeurs effectives de propriétés physiques, qui dépendent des paramètres d'état ou de structure des sols.

Les méthodes de prospection électrique et électromagnétique ont été sélectionnées pour leur grande sensibilité aux paramètres des sols, en particulier l'humidité des sols, leur état de compactage, leur nature, leur structure et leur homogénéité.

Des études approfondies tentent couramment de relier les variables géophysiques mesurées aux paramètres d'état des sols.

1.9.3.1. Sensibilité des méthodes géophysiques à l'érosion interne :

Le transport et la perte de particules fines provoquent une augmentation de la porosité. Il s'agit d'une augmentation qui peut conduire à une transparence accrue, Participer à l'augmentation du flux osmotique, Zone de pénétration. L'augmentation de la porosité affecte également des paramètres tels que :

B. Densité, permittivité, conductivité hydraulique, température Et la résistance électrique. En général, la porosité, le débit de percolation et la pression Dans les pores, il existe des paramètres physiques qui indiquent la présence d'érosion

Paramètre interne dit primaire. Certains ont été révélés par l'analyse de Johansson en 1997.

Les paramètres sont plus affectés que les autres paramètres par les fluctuations de ces paramètres Élection primaire. Par conséquent, la méthode associée à l'un des paramètres est sélectionnée. Les zones plus touchées sont plus susceptibles de montrer des signes d'érosion A l'intérieur du barrage. Par conséquent, les mesures de température sont susceptibles d'être plus Il est plus sensible aux changements de flux osmotique qu'aux changements de porosité.

Expliquer la faible sensibilité due à la faible sensibilité du sol ou à la méthode de résistance électrique

Fluctuations de la porosité et des flux osmotiques (Tchoumkam, 2010).

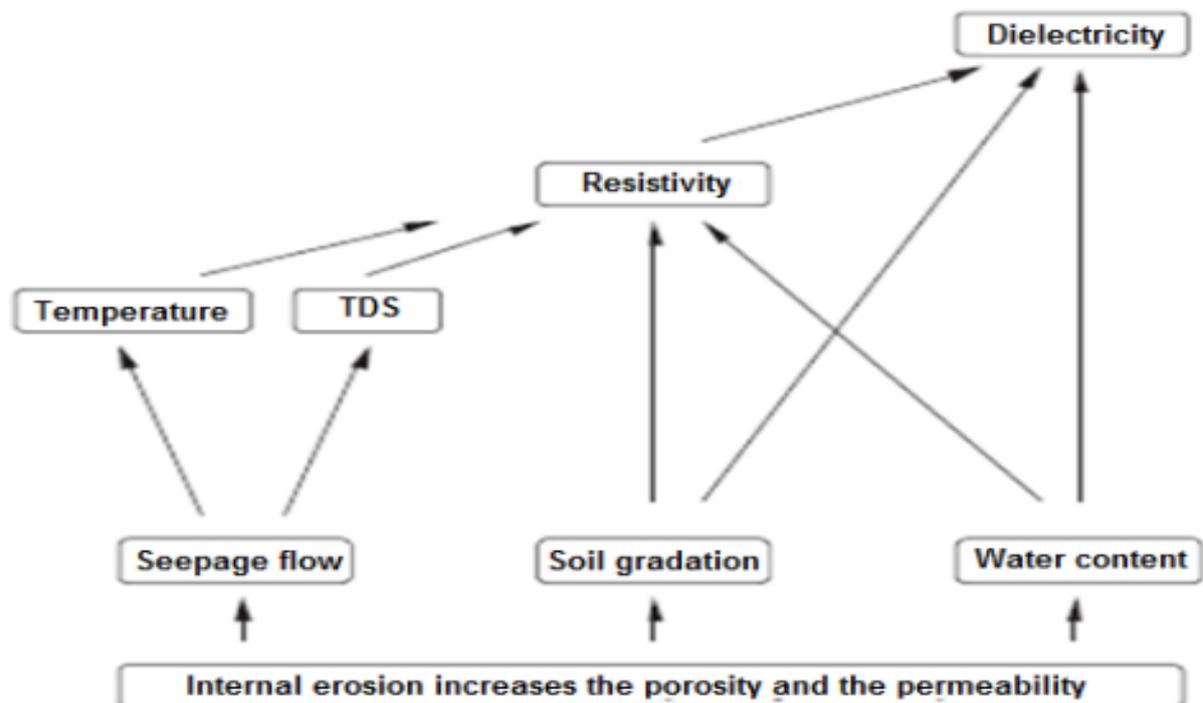


Figure 24 : Organigramme présentant les interactions engendrées par le phénomène d'érosion interne sur plusieurs paramètres d'état d'un matériau (Johansson, 1997).

1.9.3.2. Mesure de température :

La mesure de la température a montré une méthode de détection puissante. Forte pénétration dans le remblai. La technique est basée sur l'augmentation de l'infiltration affecte le profil de température du barrage. Ou alors l'effet de la température peut être mesuré et associé à la perméabilité (Sjodahl, 2006). Mesure de température avec profil en croix. Verticalement avec un piézomètre ou un boîtier creux enfoncé dans le sol. Une perceuse à roche d'une profondeur de 15 à 20 m. Chaîne de capteurs. A la température introduite dans chaque tube à une distance de 1 m, (Ou) Zones affectées par des pics thermiques (Lautrin, 2003).

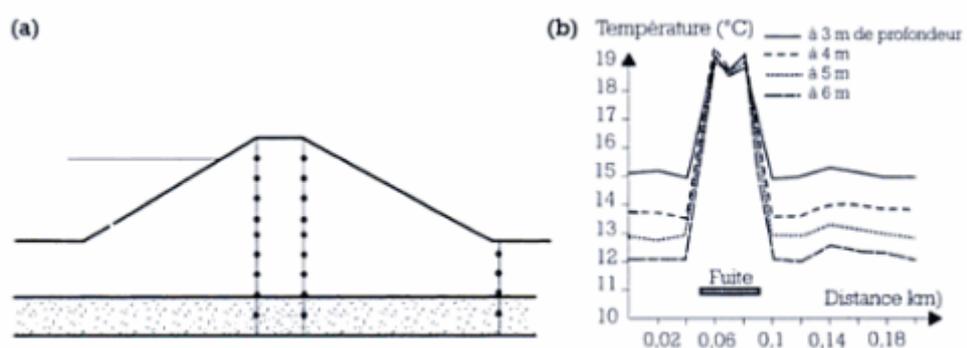


Figure 25 : La thermométrie profonde. (a) : Schéma de dispositif de mesure, (b) :

Exemple de fuite détecté par thermométrie profonde (Lautrin, 2003).**1.9.3.3.Méthode de résistivité électrique :****a) Origine de la conductivité électrique des sols :**

Le sol est un milieu triphasé non uniforme. Le courant peut être conduit théoriquement A travers chacune des trois phases (gaz, liquide, solide). Cependant, la phase gazeuse C'est un très bon isolant. La conduction se produit dans la phase liquide Solide, grâce au phénomène suivant (Schneider, 2006) .

- ✓ La phase liquide conduit l'électricité à travers les ions et Le complexe ionique qui s'y trouve. C'est la conduction électrolytique. Ou alors La valeur de la conductivité dépend du type d'ion présent (Leur différence dans les véhicules électriques) et leur concentration.
- ✓ La phase solide, qui est l'ensemble des composants du sol, Utilise un matériau électriquement neutre et isolant (utilise du sable pur, Composition chimique SiO₂), sinon conducteur. Charge insuffisante à la surface des minéraux, en particulier des minéraux argileux, Elle conduit à l'adsorption d'ions sur ces surfaces.

Conduction dite de surface. Électrons libres à la surface Le composant métallique du sol est Courant de nature électronique.

b) Facteurs influençant la résistivité électrique :

Les facteurs qui affectent la résistance électrique du sol sont :

Sa porosité (taille et Forme des pores, forme et taille des connexions existantes entre les pores), Concentration ionique du liquide contenu dans les pores, composition de phase Solide (teneur en argile et composition du sol), saturation moyenne Porosité, forme des particules, taille, orientation, température, conditions Eau (eau libre, eau complexe, glace, vapeur) (Beck, 2008).

b) Principe de la méthode :

Résistance électrique mesurée avec un ohmmètre ($\Omega.m$). Il quantifie la capacité de Matériel pour le passage du courant électrique; vice versa Courant exprimé en marins (S/m) par mètre.

Le principe du procédé est de fournir du courant ou Alternance basse fréquence au sol avec deux électrodes. Les deux autres Des électrodes, également encastrées dans le sol, permettent de mesurer les différences Potentiel. Les quatre électrodes forment un quadripôle schématique (figure 2.8).

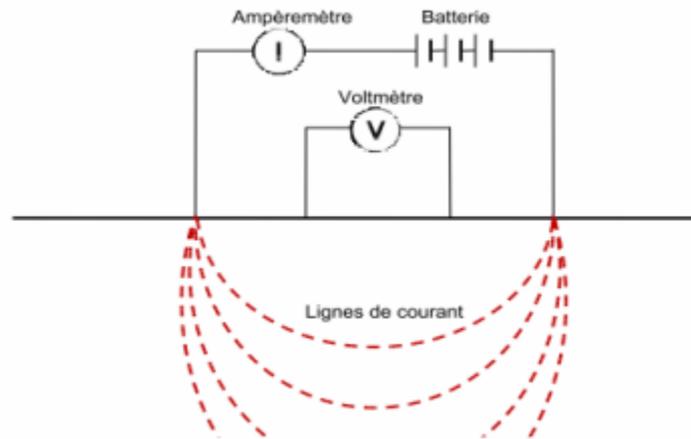


Figure 26 : Principe de mesure de la résistivité du sol (Cunat, 2012).

La mesure de potentiel couplée à la mesure d'intensité I (Ampère) du courant injecté permet de mesurer la résistivité apparente du sol $\rho_a : I V \rho_a K \Delta = (2.1)$ La résistivité apparente est proportionnelle au rapport de la différence de potentiel sur l'intensité du courant injecté.

Le coefficient de proportionnalité K est un facteur géométrique fonction du positionnement des électrodes. La profondeur d'investigation des méthodes électriques varie en fonction de l'espacement interélectrodes et est de l'ordre de 1/6ème à 1/8ème de la longueur du dispositif (Mériaux et al., 2004).

c) Types de mesures utilisées pour les digues :

L'étude du champ de résistance de la zone peut être effectuée de différentes manières.

Méthode:

- ✓ **Résistance électrique** : La taille du réseau d'électrodes est fixe (la distance entre les électrodes est constante), mais elle parcourt toute la zone de visibilité directe.
- ✓ **Sondage électrique** : Il y a des électrodes après chaque mesure

Espacement progressif pour augmenter l'épaisseur Pays à considérer .

- ✓ **Panneau de configuration** : Il s'agit d'une combinaison des deux méthodes précédentes. Les électrodes sont intégrées dans toute la zone d'inspection. Tableau blanc Peut être utilisé pour toute la structure ou verticalement. L'électrode peut Les deux servent d'injections ou de mesures de potentiel. La mesure est faite par L'ordinateur qui exécute la combinaison de requêtes. En cas de Veines qui ont un fort caractère 3D et conduisent à la formation Artefacts des résultats d'imagerie traditionnels (1D ou 2D), Les électrodes sont utilisées perpendiculairement au profil vertical.

2. Conclusion

Selon les statistiques, l'érosion interne Rupture de la structure hydraulique. Le phénomène est compliqué et difficile à reconnaître, Cela se produit à l'intérieur des barrages et des fondations et le processus peut être bon Passez devant chaque panneau à l'extérieur du barrage. Le premier signe de celui-ci L'externe peut avoir une forte pénétration et des fuites Observable et visuellement concentré sur les pieds sous-marins ou à forte turbidité De pénétration. Sur les remblais bancaires, le principal enjeu de sécurité est de les identifier Comment surveiller l'érosion interne et la pénétration dans les premiers stades, La détection de l'érosion interne est très utile pour l'évaluation de la sécurité.

L'auscultation des ouvrages hydrauliques est un point important de la vie dernier. Cela se traduira par Instabilité au travail. Moyens utilisés pour assurer un bon suivi Doit correspondre à la taille et à la complexité de votre travail.

Méthode La géophysique fournit à la fois des informations supplémentaires Interprétations qualitatives et quantitatives, principalement dues à la non-uniformité À propos de la reconnaissance de la structure, des faiblesses et du flux barrage.

**Chapitre III :
Identification physico-
chimique des sols
étudiés.**

Sol 01 :**1. INTRODUCTION :**

Parallèlement aux précautions expérimentales, diverses procédures d'essais en laboratoire peuvent déterminer les paramètres requis pour les études géotechniques. Ce chapitre rassemble tous les résultats des activités d'essais géotechniques du laboratoire sur les matériaux étudiés pour compléter leur caractérisation et déterminer les paramètres nécessaires. Les sols étudiés ont fait l'objet de recherches préalables au Laboratoire de Mécanique des Sols ; ils ont été soumis à une série d'essais d'identification physico-chimiques et d'essais mécaniques.

1.1. ESSAIS D'IDENTIFICATIONS :**Granulométrie****Tamisage sédimentation****1.1.1. Limites D'atterberg :**

Lorsque la pleine capacité d'adsorption du sol est saturée, l'excès d'eau restera à l'état libre, c'est-à-dire à l'état liquide. A l'état "liquide" ($W > WL$). Plus il y a de minéraux dans le sol qui interagissent avec l'eau, plus il faut ajouter d'eau au sol pour le rendre liquide ; sachant que la majeure partie de l'eau sera adsorbée par les particules, elle ne restera donc pas liquide et ne rendra le matériau liquide mais pâteux, correspondant à la phase plastique. L'indice de plasticité s'écrit :

$$I P = W L - W P$$

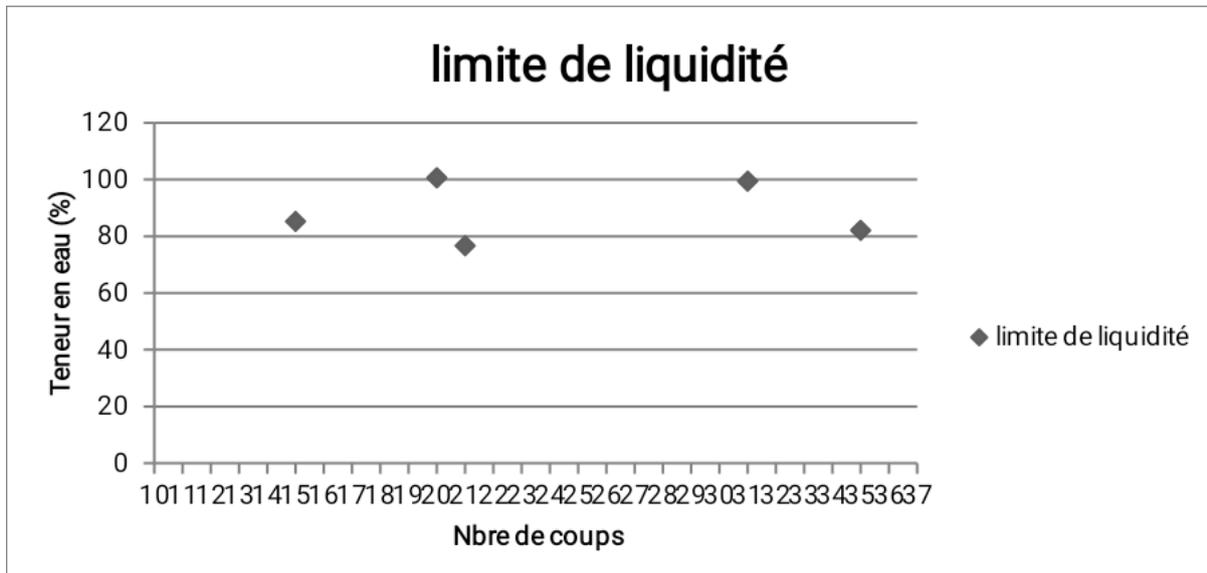
**A-Creusement de la rainure.****B- Sol humide.****c- Tamisage du sol à 0,4 m****F-Déterminée la teneur
En eau**



D-3mm de diamètre et 10cm de longueur.

P total	P sec	P tare	P sol H	P sol S	P eau	W	w*100	Moyen
6.77	6.4	5.48	1.29	0.92	0.37	0.40217391	40.2173913	30.7644334
5.83	5.7	5.09	0.74	0.61	0.13	0.21311475	21.3114754	

Tableau 01 : Résultat du les limites d'atterberg pour les deux sols.



Limite de liquidité WL	86
Limite de plasticité WP	30.76
L'indice de plasticité IP	55.24

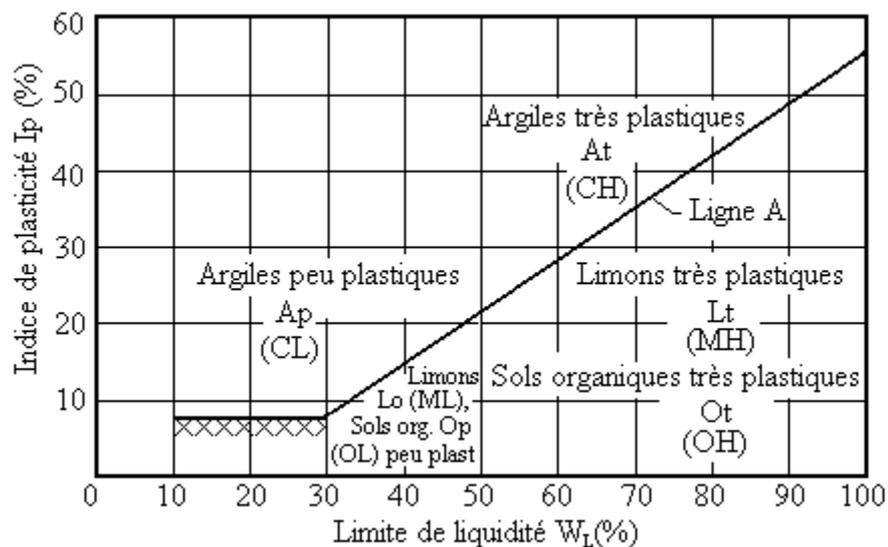


Figure 28 : Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins (Plus de 50% d'éléments < 0,08mm).

1.2. Analyse granulométrique par voie sèche :

1.2.1. But de l'essai :

L'analyse de la taille des particules peut déterminer la taille et le pourcentage en poids des différentes familles de particules qui composent l'échantillon. Il convient à tous les granulats de granulométrie inférieure ou égale à 63 mm, hors fillers. Il convient de noter qu'il est nécessaire d'éviter de confondre la détermination de la taille des particules avec la taille des particules d'intérêt dans la détermination de la taille des particules et en relation avec la distribution granulométrique globale.

1.2.2. Principe de l'essai :

Le test consiste à trier les différents grains qui composent l'échantillon à l'aide d'une série de tamis, imbriqués les uns au-dessus des autres, avec des ouvertures de taille décroissante de haut en bas. Le matériau à l'étude est placé sur la partie supérieure du tamis, et la classification des grains est obtenue par la vibration de la colonne du tamis.

1.3 Essai analyse granulométrique par sédimentation :

1.3.1. But de l'essai :

L'analyse de la taille des particules avec des mesures de sédimentation peut déterminer la taille et le pourcentage en poids relatif des différentes familles de particules inférieures à 80 μm qui composent un échantillon.

1.3.2. Mode opératoire :

- Prendre deux éprouvettes à essais de 2 litre de contenance.
- Prendre l'une des deux éprouvettes et compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 2 litre. Cette éprouvette sera appelée l'éprouvette témoin l'éprouvette B.
- Prendre 60cm³ de défloculant et 80g du sol tamisé 80 μ et compléter avec 440cm³ l'eau distillée pour obtenir une solution 500cm³.

- Agiter avec un agitateur mécanique pendant 0 3 min.
- Vester la suspension dans la deuxième éprouvette A.
- Remplissez un tube à essai avec jusqu'à 2 litres d'eau distillée.
- Continuer à homogénéiser la suspension avec un mélangeur à main. Insérez l'hydromètre dans la suspension et obtenez les lectures (O les appelle Rt).

Le temps de trajet est de 30 secondes, 1 minute, 2 minutes, 5 minutes, 10 minutes, 15 minutes, 20 minutes ,30 minutes, 60 minutes, 120 minutes, 240 minutes, 1440 minutes.

- À la fin de la lecture, l'hydromètre est retiré de l'échantillon A et de l'échantillon B. Lire la densité de la solution dans le tube à essai B (c'est ce qu'on appelle Rb).
- Lire la température de la solution de l'échantillon B avec un thermomètre.
- Pour les 5 premières lectures, plonger le densitomètre dans la suspension environ 30 secondes avant les lectures.

1.3.3. Calcul :

Calcul du pourcentage des particules non décantées

Le pourcentage des particules qui sont en suspension est donné par :

$$p = \left[100 \times \frac{Vs}{m} \frac{Ps}{Ps_{Pw}} Pw \right] (RT - 1)$$

- Vs : Volume de la suspension (2litre)
- M : Masse de la prise d'essai (40 grammes)
- Ps : Masse volumique de l'eau.
- Rt : lecture de l'éprouvette A au temps t.
- Rb : lecteur de l'éprouvette B (éprouvette témoin).

1.3.4..Calcul du diamètre des particules non décantées :

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par :

$$D = F \sqrt{\frac{Ht}{t}}$$

F est un facteur donné par l'abaque suivant :

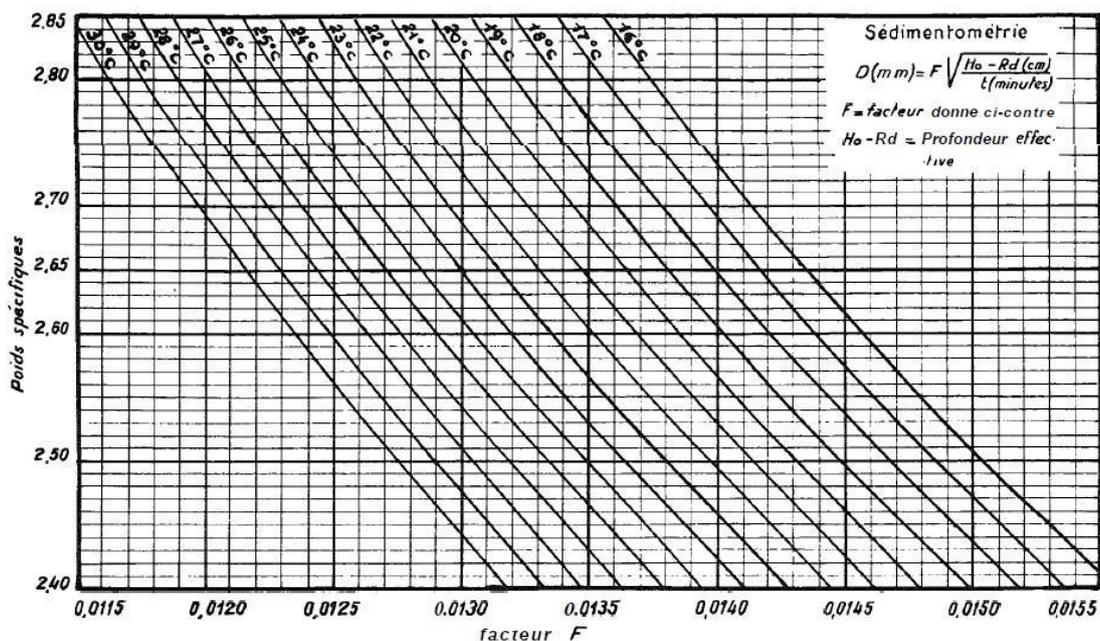


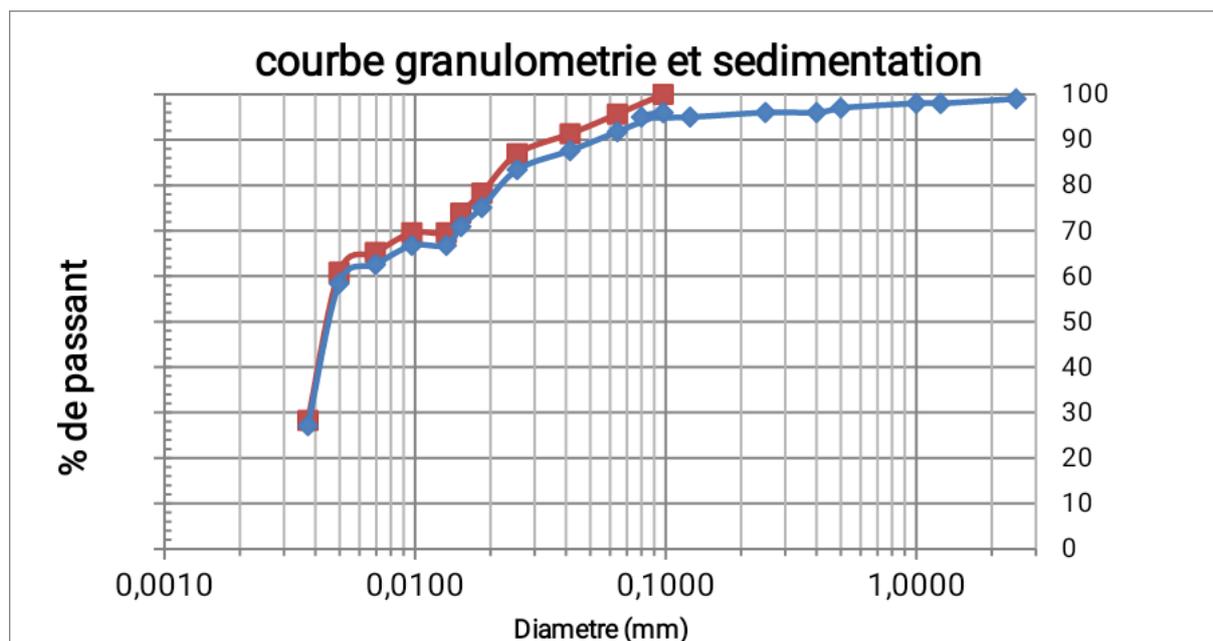
Figure29 : L'abaque d'Analyses par sédimenteriez

- t est le temps de lecture en **minute**.
- Ht est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre en **Centimètre**.
- Elle donnée par :

$$H_t = 22.2 - 100 \times 3.8(R_t - R_b) - H_c$$

Avec : Hc est le déplacement de la suspension du à l'introduction du densimètre

Elle est prise (par convention) égale à 0 pour les 3 premiers lecteurs et égale à 1.4 cm pour la suite.



1.4 ESSAIS MECANIQUES :

1.4.1. Les paramètres de compactage :

"Proctor" mesure l'évolution de la compacité du sol en fonction de la teneur en eau dans laquelle il est préparé, et en fonction de l'énergie de compactage.

Le t est étant standardisé, il fait la distinction entre « **Proctor normal** » et

« **Proctor modifié** » en fonction de l'énergie de compression.

En pratique, cinq échantillons de sol avec des teneurs en humidité différentes sont préparés, comprimés par un certain nombre de coups de bélier, puis la densité apparente et la teneur en humidité sont mesurées.



a. préparation de sol



b.compactage des couches



c. Pesée le moule+ sol



d. Entre la tare dans l'étuve

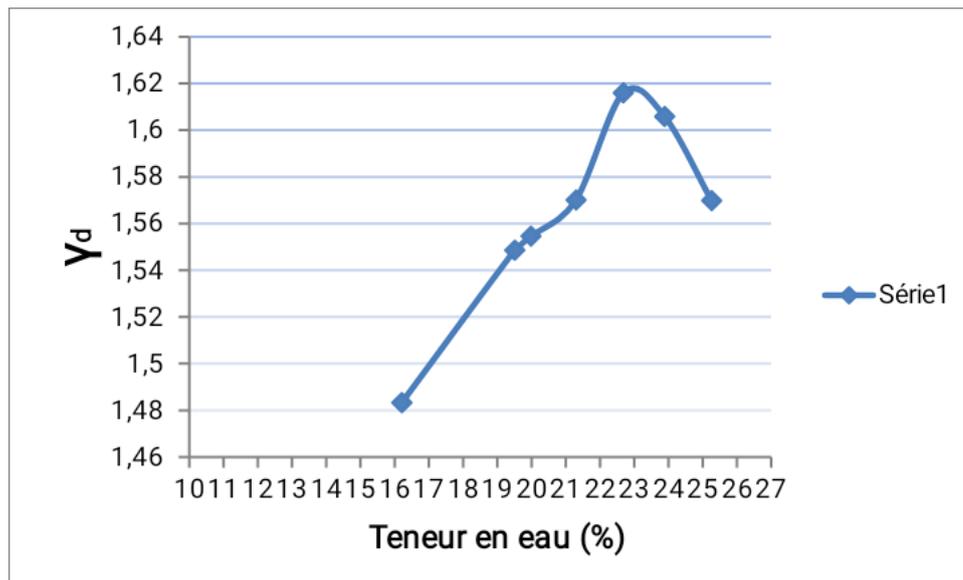


e. Déterminer la teneur en eau

Les résultats des tests sont portés sur un graphique montrant le poids sec (issu de deux mesures prises) en fonction de la teneur en eau.

La courbe résultante a généralement une valeur maximale correspondant à une teneur en eau particulière. Ces valeurs sont valeurs "**meilleur superviseur**". Le poids unitaire est plus petit de part et d'autre du Procter optimal.

w	γ _d
16.21	1.48329447
19.51	1.54857615
19.98	1.55461679
21.3	1.57007657
22.68	1.61600275
23.89	1.60586497
25.26	1.5698326
27.06	1.52769286



Wop=23

gd=1.62

D'après la courbe de compression obtenue, le poids sec maximal de l'unité est une valeur de 1.62 et le taux d'humidité optimal est de 23 %. La courbe caractéristique Proctor sert également de référence qui caractérise la qualité de compression sur le chantier.

1.5 Essai de bleu de méthylène :

1.5.1. Principe de l'essai :

Elle consiste à déterminer la capacité d'adsorption ionique du sol en mesurant la quantité de colorant bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir l'intégralité des surfaces externes et internes de toutes les particules d'argile présentes dans la solution étudiée. .. Cette quantité, appelée valeur de bleu, est exprimée en VB et est exprimée en Grammes de bleu par gramme de sol, comme le montre la formule suivante.

$VB = \frac{VBM}{M \text{ sol}}$ où VBM

Est la quantité de bleu de méthylène adsorbé (ml), Msol, masse de sol sec Dans la section d'essai.

1.5.2. Matériel nécessaire :

- Une balance permettant de faire toutes les pesées.
- Un chronomètre, un papier filtre, une baguette de verre .
- Un agitateur à ailettes
- Un bécher de 1 ou 2 litres en matière plastique.
- Une étuve ventilée ou autre moyen de séchage Bleu de méthylène à 10g /l avec doseur permettant des injections de 2, 5ml et 10ml Un chronomètre.

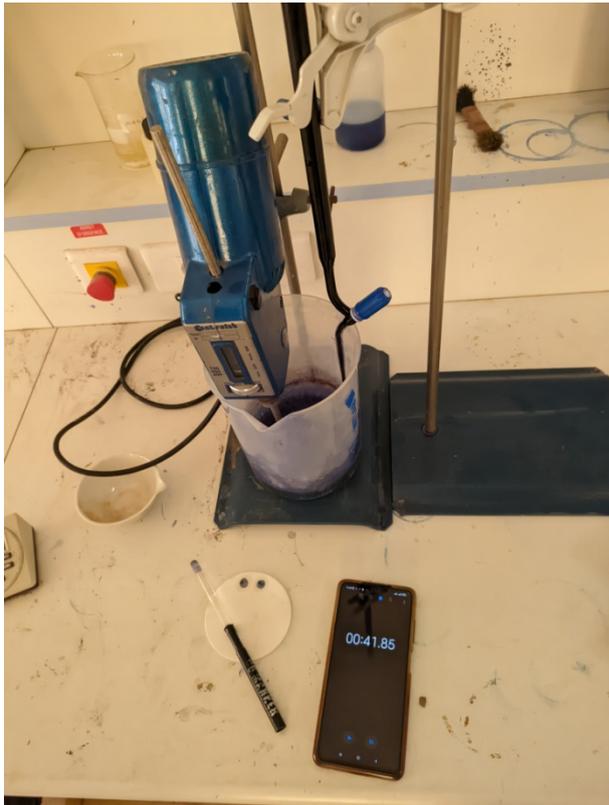


Figure : matériel de VBS(UAT).

Le test est effectué sur une fraction de particules de 0/5 mm du matériau. Ceci est principalement dû au fait que la fraction argileuse est incluse dans les éléments les plus fins (moins de 2 mm).

Cela reflète la nature de la réaction au bleu de méthylène et représente donc quantitativement la sensibilité du sol à l'eau. Préparer 30 g de fraction sèche 0/5 mm et l'immerger dans 200 ml d'eau dessalée. L'agitateur à nervures maintient l'ensemble du mouvement constant. L'administration consiste en une infusion continue de bleu de méthylène défini avec précision dans la suspension de sol jusqu'à ce que les particules d'argile atteignent la saturation.

Des tests ponctuels permettent d'identifier ce moment de saturation. Prélevez une goutte de liquide d'un bécher contenant de la terre teintée en bleu et fixez-la sur un papier filtre (diamètre de dépôt 8-12 mm).

Il y a deux cas possibles:

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide bleue.

Le test est positif.

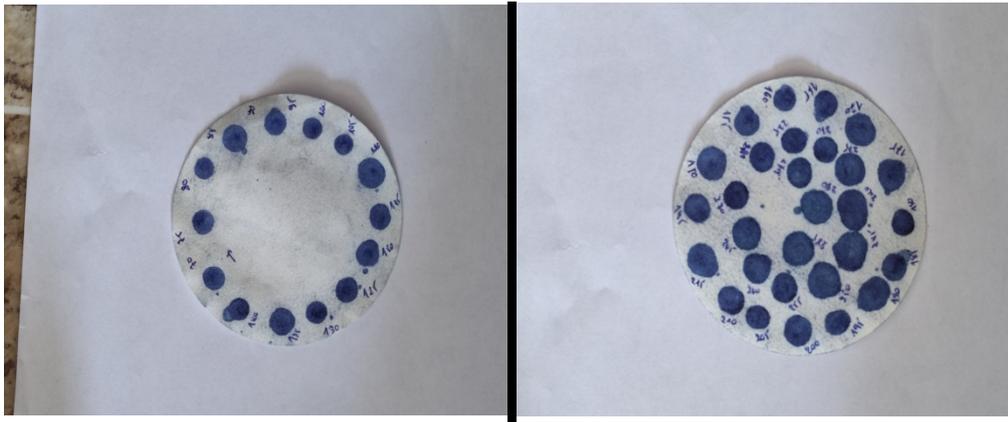


Figure 30: Résultats de valeur au bleu.

1.5.3. Classification des sols après essai :

VBS = 0.1 : sol insensible à l'eau.

VBS = 0.2 : apparition de la sensibilité à l'eau.

VBS= 1.5 : seuil distinguant les sols sablo limoneux des sols sablo-argileux.

VBS= 2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité Moyenne.

VBS= 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.

VBS= 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux. Surface de bleu de méthylène

$$21 \cdot VBS = v/m \cdot c(1+w)$$

(Mémoire 2018 traitement d'un sol affaissable par un ajout mixte de fibre de verre et de ciment université Mohamed Boudiaf m'sila M.hanane).page.

D'après le calcul de valeur de bleu :

VBS=10.16

Ssst=213.5

Valeur de bleu	
VBS	10.16
Ssst	213.5

Donc on a : un sol argileux*

1.6 Essai d'émiettage (Crumb test – ASTM D 657200):

Le test est considéré comme le moyen le plus simple d'identifier le sol

Dispersion, qui repose uniquement sur des observations qualitatives directes.

Ces tests estiment la susceptibilité de l'argile par rapport à d'autres tests

Dispersion, le procédé de dispersion est valable dans le cas du Crumb Test.

Ce test ne s'applique pas aux sols avec un pourcentage de fines (<0,005 mm) moins

de 12 %, donc pour des sols dont l'indice de plasticité est inférieur à 8 %.

Les tests de miettes sont souvent utilisés comme aide à d'autres tests

Identification des argiles dispersées (Holmgren et Flanagan, 1977).

La procédure donnée par la norme ASTM est basée sur deux méthodes :

Méthode A : à cause les sols non remaniés : Un modèle de sol en deçà forme Approximative, d'un cube de grandeur de 15 mm de quelque coté et caparaçonné à sa teneur en eau naturelle, si ces échantillons ne sont pas disponibles, des enchantions cubiques de encore aérienne dimension peuvent convenir utilisés, exclusivement ils ne doivent pas convenir inferieur a 7 mm de coté.

Méthode B : Placez soigneusement l'échantillon de sol dans un b cher avec de l'eau Distillé (250 ml). L'échantillon doit être retiré et placé au fond du b cher.

Ces Les particules de sol ont tendance à se disperser en une suspension colloïdale En observant la formation des nuages après 2 minutes, 1 heure et 24 heures.

Selon Turbidité des nuages, le sol est classé dans l'un des quatre niveaux

Le nuage de points suivant :

✓ **Classe 1 (Non-dispersif, figure .a)** : aucun nuage n'est appar .

✓ **Classe 2 (moyennement dispersif, figure)** : formation d'un nuage limité autour de l'échantillon.

✓ **Classe 3 (dispersif, figure .c)** : formation d'un nuage appréciable qui ne couvre pas toute la bordure du fond du récipient.

✓ **Classe 4 (fortement dispersif, figure .d)** : formation d'un nuage qui recouvre toute la bordure du fond du récipient, éventuellement toute l'eau devient trouble.



(A)

(b)

(c)

(d)

Figure : Essais typiques de Crumb test.

Le test V est facile à reproduire, pas cher, pas besoin équipements, qui peuvent être mis en œuvre aussi bien en laboratoire que sur le terrain, mais avec Capacité limitée car son interprétation comparative est basée uniquement sur l'observation visuelle.

1.7 Essai de sédimentation en parallèle (Double hydrometer test D 4221-99) :

Cet essai consiste à déterminer la granulométrie de l'argile de deux manières (Figure).

Le premier est effectué à l'aide d'un test standard, où l'échantillon L'argile est dispersé à l'aide de réactifs chimiques (hexa méta phosphate de sodium), par agitation mécanique. Effectuer la deuxième méthode de décantation Aucun dispersant, aucune agitation mécanique nécessaire. La différence entre les deux La granulométrie ainsi obtenue a tendance à se disperser naturellement Essai d'argile. Ce test ne s'applique qu'aux sols dont la teneur est supérieure à 12 % Fine (<5 μm), plasticité supérieure à 4 Les résultats du test déterminent le taux de dispersion D, donné par Pourcentage de fines inférieures à 5 microns dans deux cas tests spécifiques :

$$D = \frac{\% \text{ fine } < 5 \mu\text{m} \text{ (sans dispersant)}}{\% \text{ fine } < 5 \mu\text{m} \text{ (avec dispersant)}} \times 100$$

Selon les normes ASTM, le sol étudié sera terminé lorsque D approchera 100%.

La dispersibilité, c'est-à-dire que l'argile se défloque naturellement dans l'eau. Par contre, dans le cas de D Très faible, proche de zéro, le matériau est totalement non dispersible.

Argile en conditions normales (avec et sans dispersant) Agitation mécanique dans l'eau).

D'autres auteurs utilisent d'autres classifications Comme le montre le tableau 000 .

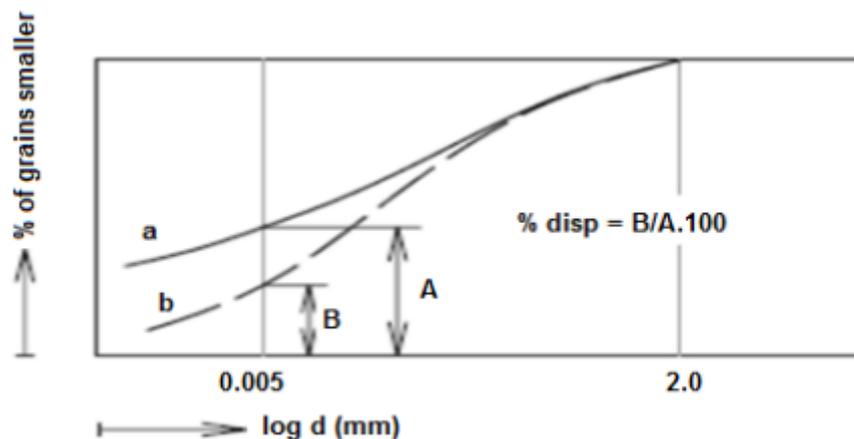
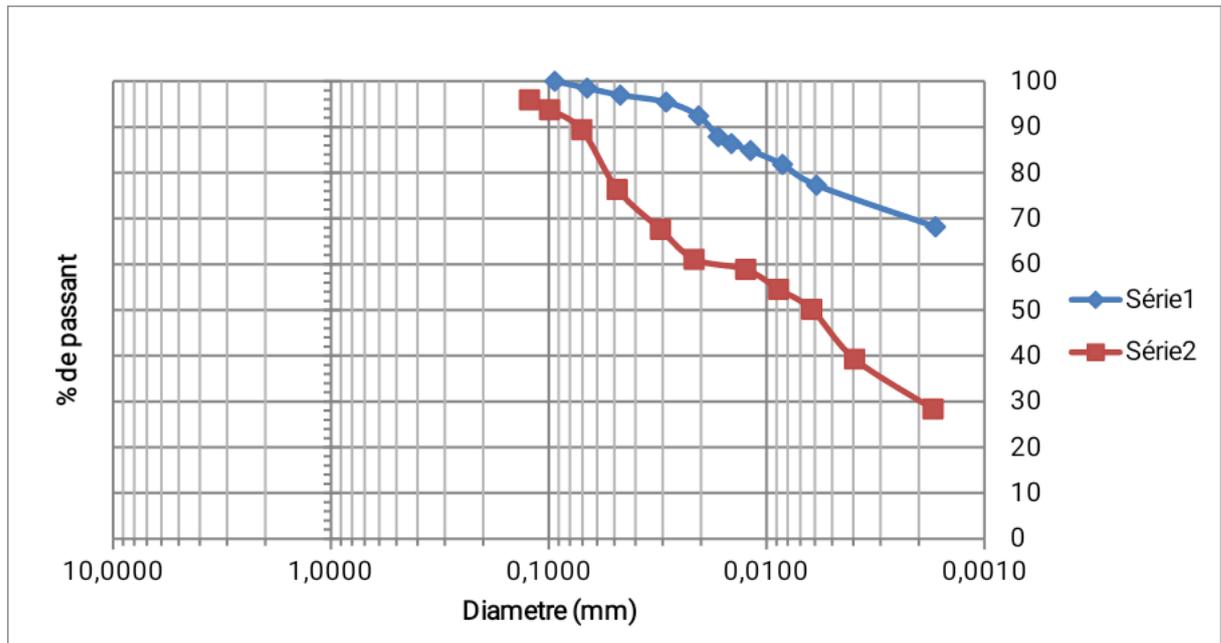


Figure 31: Pourcentage de dispersion déterminé par l'essai de sédimentation en parallèle, a : standard test, b : essais sans agent dispersant ni agitation mécanique (Vanicek and Vanicek, 2008).



Courbe sédimentation en parallèle

Tableau 02 : Domaine de la dispersion selon l'indice de dispersion.

Auteurs	Indice de dispersion ID (%)	Domaine de dispersion
ASTM D-4221	Proche de 100	Dispersion complète
	Proche de 0	Sol non dispersif
Decker et Dunnigan (1977)	< 35	Pas de problème de dispersivité
	35 - 50	La dispersivité est probable
	> 50	Il y a un problème de dispersivité
Knodel (1991)	< 30	Non dispersif
	30 - 50	Intermédiaire
	> 50	Dispersif

Donc :

$$D = \frac{50.16}{77.27} \times 100$$

D= 64.91%

64.91 > 50

Alors en voit que notre sol est un sol dispersif selon **Knodel (1991)** ;

Et il y a un problème de dispersivité selon **Decker et Dunnigan (1977)** ;

Et dispersion complète selon **ASTM D-4221**.

Sol 2 :**1. INTRODUCTION :**

Parallèlement aux précautions expérimentales, diverses procédures d'essais en laboratoire peuvent déterminer les paramètres requis pour les études géotechniques. Ce chapitre rassemble tous les résultats des activités d'essais géotechniques du laboratoire sur les matériaux étudiés pour compléter leur caractérisation et déterminer les paramètres nécessaires. Les sols étudiés ont fait l'objet de recherches préalables au Laboratoire de Mécanique des Sols ; ils ont été soumis à une série d'essais d'identification physico-chimiques et d'essais mécaniques.

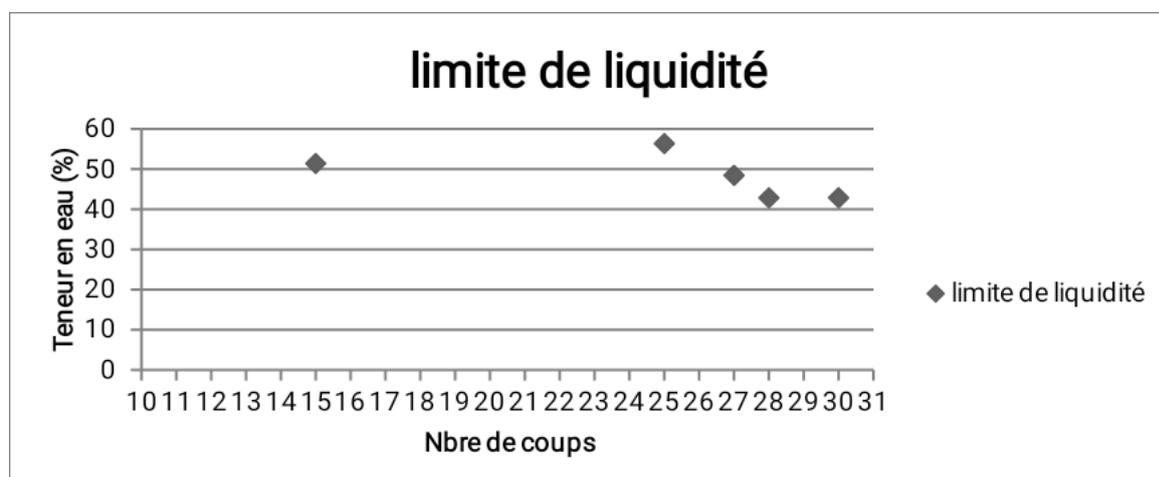
1.1. ESSAIS D'IDENTIFICATIONS :**Granulométrie****Tamissage sédimentation****1.1.1. Limites D'atterberg :**

Lorsque la pleine capacité d'adsorption du sol est saturée, l'excès d'eau restera à l'état libre, c'est-à-dire à l'état liquide. A l'état "liquide" ($W > WL$). Plus il y a de minéraux dans le sol qui interagissent avec l'eau, plus il faut ajouter d'eau au sol pour le rendre liquide ; sachant que la majeure partie de l'eau sera adsorbée par les particules, elle ne restera donc pas liquide et ne rendra le matériau liquide mais pâteux, correspondant à la phase plastique. L'indice de plasticité s'écrit :

$$I P = W L - W P$$

P total	P sec	P tare	P sol H	P sol S	P eau	W	w*100	moyen
24,6	24,33	22,9	1,7	1,43	0,27	0.18881119	18,881119	16,104608
24,3	24,06	22,6	1,7	1,46	0.24	0.16438356	16,438356	4

Tableau 2.1 : Résultat du les limites d'atterberg pour les deux sols.



Limite de liquidité WL	56,363664
Limite de plasticité Wp	16,104608
	4

L'indice de plasticité IP	40,259028
---------------------------	-----------

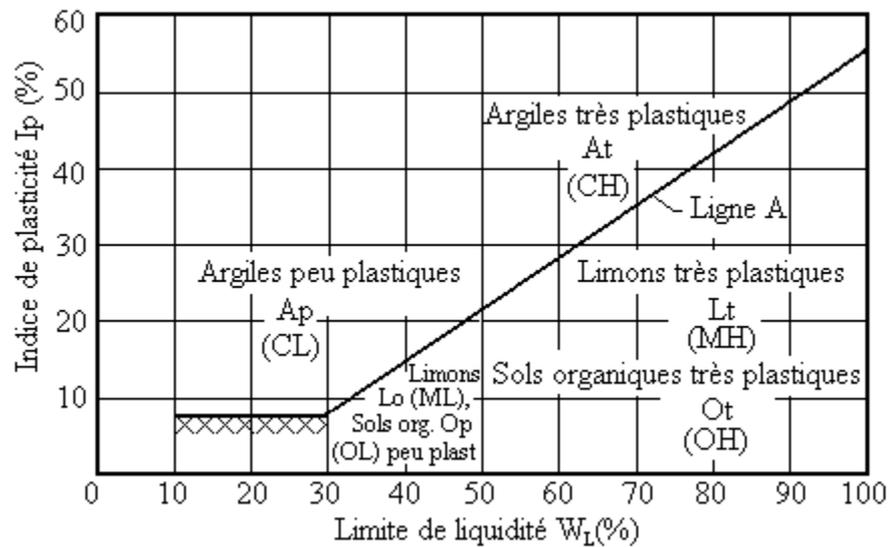


Figure 32 Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins (Plus de 50% d'éléments < 0,08mm) .

1.2. Analyse granulométrique par voie sèche :

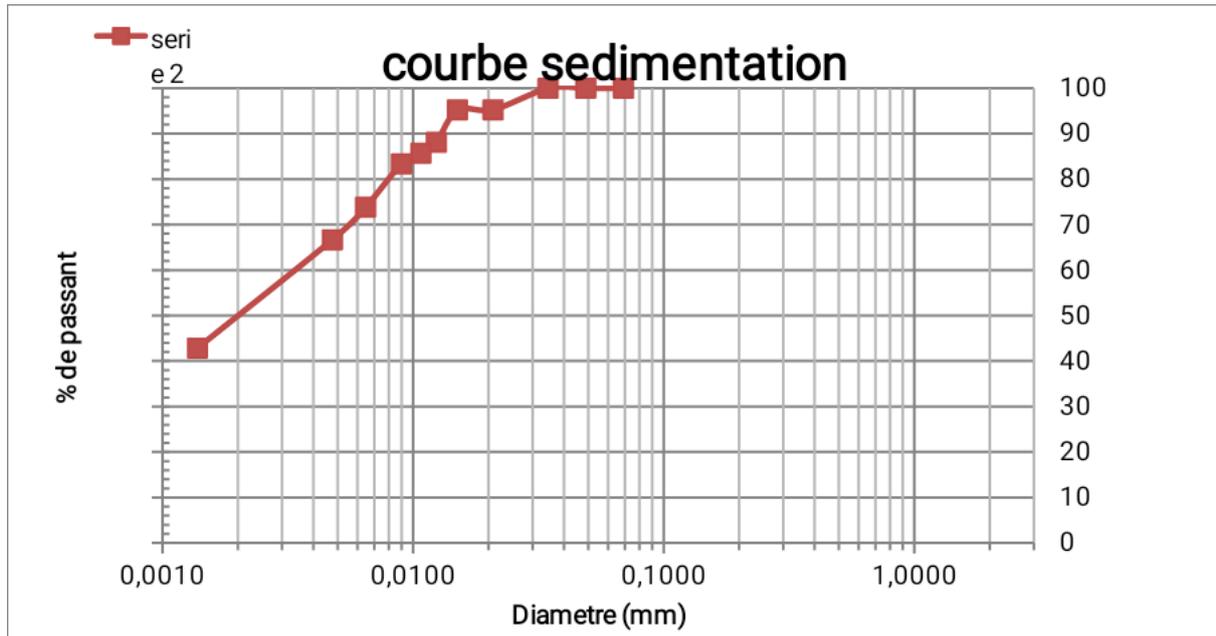
1.2.1..But de l'essai :

L'analyse de la taille des particules peut déterminer la taille et le pourcentage en poids des différentes familles de particules qui composent l'échantillon. Il convient à tous les granulats de granulométrie inférieure ou égale à 63 mm, hors fillers. Il convient de noter qu'il est nécessaire d'éviter de confondre la détermination de la taille des particules avec la taille des particules d'intérêt dans la détermination de la taille des particules et en relation avec la distribution granulométrique globale.

1.2.2..Principe de l'essai :

Le test consiste à trier les différents grains qui composent l'échantillon à l'aide d'une série de tamis, imbriqués les uns au-dessus des autres, avec des ouvertures de taille décroissante de haut en bas. Le matériau à l'étude est placé sur la partie supérieure du tamis, et la classification des grains est obtenue par la vibration de la colonne du tamis.

- Pour les 5 premières lectures, plonger le densitomètre dans la suspension environ 30 secondes avant les lectures.



1.3.3. Calcul :

Calcul du pourcentage des particules non décantées

Le pourcentage des particules qui sont en suspension est donné par :

$$p = \left[100 \times \frac{V_s}{m} \frac{P_s}{P_s - P_w} (R_t - 1) \right]$$

- V_s : Volume de la suspension (2 litre)
- m : Masse de la prise d'essai (40 grammes)
- P_s : Masse volumique de l'eau.
- R_t : lecture de l'éprouvette A au temps t .
- R_b : lecteur de l'éprouvette B (éprouvette témoin).

1.3.4. Calcul du diamètre des particules non décantées :

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par :

$$D = F \sqrt{\frac{Ht}{t}}$$

F est un facteur donné par l'abaque suivant :

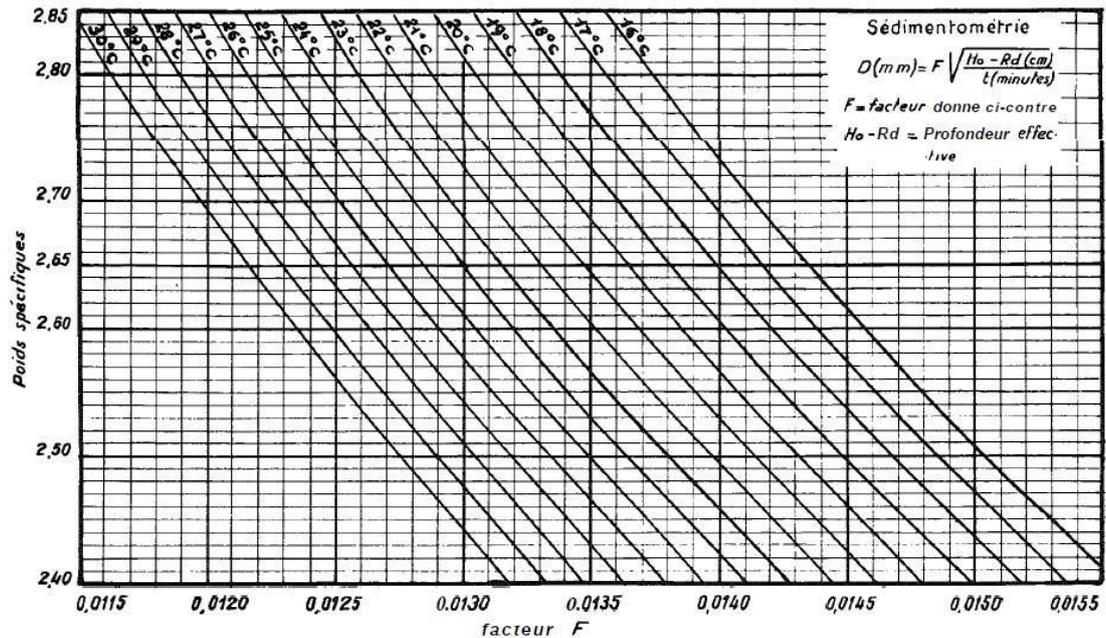


Figure 33 : L'abaque d'Analyses par sidimonterie

- t est le temps de lecture en **minute**.
- H_t est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre en **Centimètre**.
- Elle donnée par :

$$H_t = 22.2 - 100 \times 3.8(R_t - R_b) - H_c$$

Avec : H_c est le déplacement de la suspension du à l'introduction du densimètre

Elle est prise (par convention) égale à 0 pour les 3 premières lectures et égale à 1.4 cm pour la suite.

1.4.ESSAIS MECANIQUES :

1.4.1 Les paramètres de compactage :

"Proctor" mesure l'évolution de la compacité du sol en fonction de la teneur en eau dans laquelle il est préparé, et en fonction de l'énergie de compactage.

Le t est étant standardisé, il fait la distinction entre « **proctor normal** » et

« **Proctor modifié** » en fonction de l'énergie de compression.

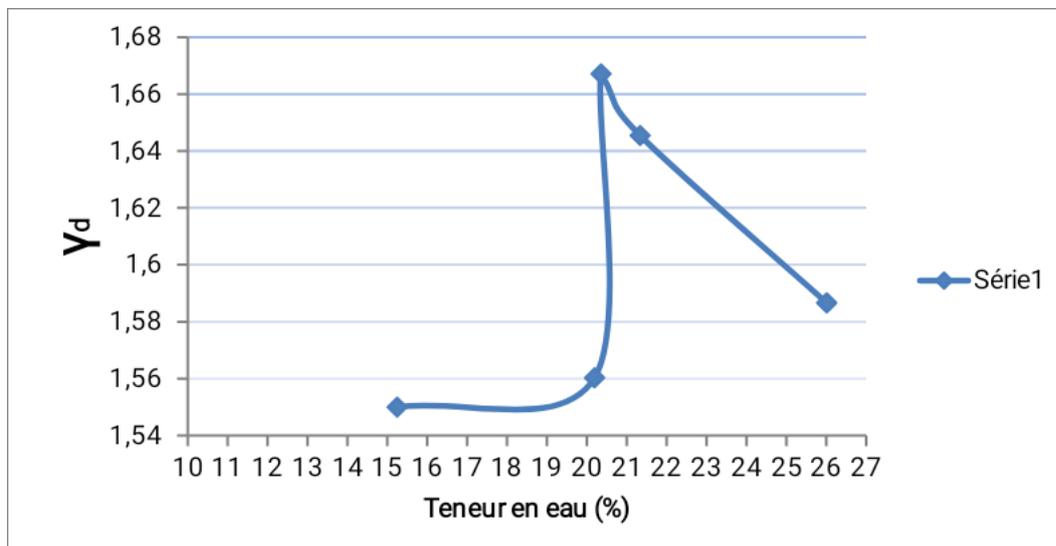
En pratique, cinq échantillons de sol avec des teneurs en humidité différentes sont préparés, comprimés par un certain nombre de coups de bélier, puis la densité apparente et la teneur en humidité sont mesurées.

Les résultats des tests sont portés sur un graphique montrant le poids sec (issu de deux mesures prises) en fonction de la teneur en eau.

La courbe résultante a généralement une valeur maximale correspondant à une teneur en eau particulière. Ces valeurs sont valeurs "**meilleur superviseur**". Le poids

unitaire est plus petit de part et d'autre du Procter optimal.

w	Γ_d
15,2448699	1,5499593 8
20,194051	1,56028051
20,3564467	1,6671662
21,3364167	1,64547572
26,0111923	1,58662088



Wop=20

gd=1.67

D'après la courbe de compression obtenue, le poids sec maximal de l'unité est une valeur de 1.67 et le taux d'humidité optimal est de 20 %. La courbe caractéristique Procter sert également de référence qui caractérise la qualité de compression sur le chantier.

1.5 Essai de bleu de méthylène :

1.5.1 Principe de l'essai :

Elle consiste à déterminer la capacité d'adsorption ionique du sol en mesurant la quantité de colorant bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir l'intégralité des surfaces externes et internes de toutes les particules d'argile présentes dans la solution étudiée. ... Cette quantité, appelée valeur de bleu, est exprimée en VB et est exprimée en Grammes de bleu par gramme de sol, comme le montre la formule suivante.

$VB = VBM/M$ sol où VBM

Est la quantité de bleu de méthylène adsorbé (ml), Msol, masse de sol sec Dans la section d'essai.

1.5.2 Matériel nécessaire :

- Une balance permettant de faire toutes les pesées.
- Un chronomètre, un papier filtre, une baguette de verre .
- Un agitateur à ailettes
- Un bécher de 1 ou 2 litres en matière plastique .
- Une étuve ventilée ou autre moyen de séchage Bleu de méthylène à 10g /l avec doseur permettant des injections de 2, 5ml et 10ml Un chronomètre.

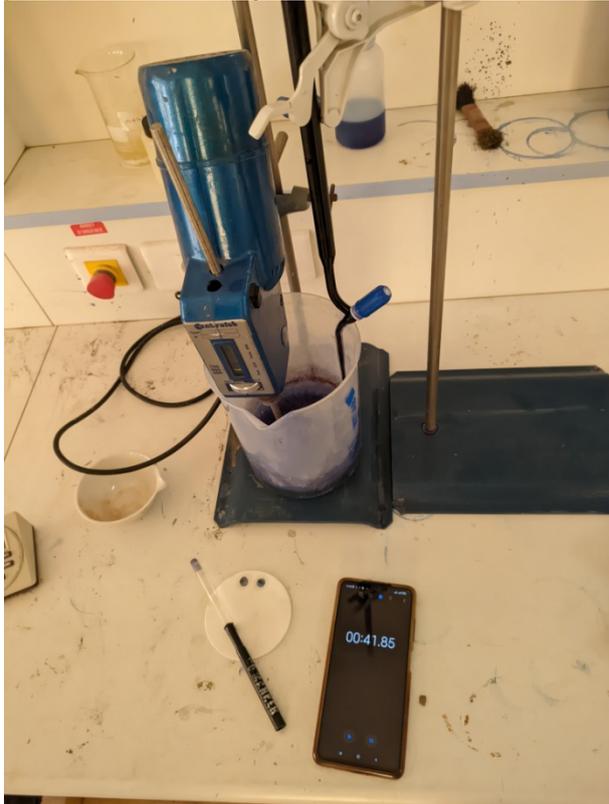


Figure 34 : matériel de VBS(UAT).

Le test est effectué sur une fraction de particules de 0/5 mm du matériau. Ceci est principalement dû au fait que la fraction argileuse est incluse dans les éléments les plus fins (moins de 2 mm).

Cela reflète la nature de la réaction au bleu de méthylène et représente donc quantitativement la sensibilité du sol à l'eau. Préparer 30 g de fraction sèche 0/5 mm et l'immerger dans 200 ml d'eau dessalée. L'agitateur à nervures maintient l'ensemble du mouvement constant. L'administration consiste en une infusion continue de bleu de méthylène défini avec précision dans la suspension de sol jusqu'à ce que les particules d'argile atteignent la saturation.

Des tests ponctuels permettent d'identifier ce moment de saturation. Prélevez une goutte de liquide d'un bécher contenant de la terre teintée en bleu et fixez-la sur un papier filtre (diamètre de dépôt 8-12 mm).

Il y a deux cas possibles:

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide bleue.

Le test est positif.



Figure 35: Résultats de valeur au bleu.

1.5.3 Classification des sols après essai :

VBS = 0.1 : sol insensible à l'eau.

VBS = 0.2 : apparition de la sensibilité à l'eau.

VBS= 1.5 : seuil distinguant les sols sablo limoneux des sols sablo-argileux.

VBS= 2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité Moyenne.

VBS= 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.

VBS= 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux. Surface de bleu de méthylène $21 \cdot VBS$ $VBS = v/m \cdot c (1+w)$.

(Mémoire 2018 traitement d'un sol affaissable par un ajout mixte de fibre de verre et de ciment université Mohamed Boudiaf m'sila M.hanane).page.

D'après le calcul de valeur de bleu :

VBS=4,33

Ssst=91

Valeur de bleu	
VBS	4,33
Ssst	91

Donc on a : un sol argileux*

1.6 Essai d'émiettage (Crumb test – ASTM D 657200):

Le test est considéré comme le moyen le plus simple d'identifier le sol

Dispersion, qui repose uniquement sur des observations qualitatives directes.

Ces tests estiment la susceptibilité de l'argile par rapport à d'autres tests

Dispersion, le procédé de dispersion est valable dans le cas du Crumb Test.

Ce test ne s'applique pas aux sols avec un pourcentage de fines (<0,005 mm) moins

de 12 %, donc pour des sols dont l'indice de plasticité est inférieur à 8 %.

Les tests de miettes sont souvent utilisés comme aide à d'autres tests

Identification des argiles dispersées (Holmgren et Flanagan, 1977).

La procédure donnée par la norme ASTM est basée sur deux méthodes :

Méthode A : à cause les sols non remaniés : Un modèle de sol en deçà forme Approximative, d'un cube de grandeur de 15 mm de quelque coté et caparaçonné à sa teneur en eau naturelle, si ces échantillons ne sont pas disponibles, des enchantions cubiques de encore aérienne dimension peuvent convenir utilisés, exclusivement ils ne doivent pas convenir inferieur a 7 mm de coté.

Méthode B : Placez soigneusement l'échantillon de sol dans un bécber avec de l'eau Distillé (250 ml). L'échantillon doit être retiré et placé au fond du bécber.

Cette Les particules de sol ont tendance à se disperser en une suspension colloïdale En observant la formation des nuages après 2 minutes, 1 heure et 24 heures.

Selon Turbidité des nuages, le sol est classé dans l'un des quatre niveaux

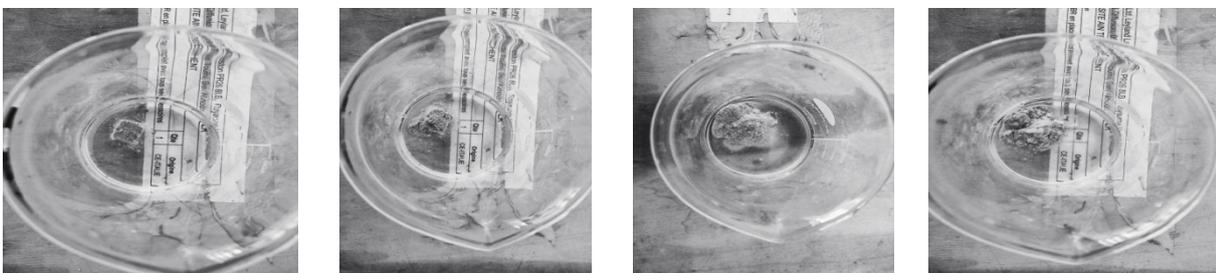
Le nuage de points suivant :

✓**Classe 1 (Non-dispersif, figure .a)** : aucun nuage n'est apparu .

✓**Classe 2 (moyennement dispersif, figure.b)** : formation d'un nuage limité autour de l'échantillon .

✓**Classe 3 (dispersif, figure .c)** : formation d'un nuage appréciable qui necouvre pas toute la bordure du fond du récipient .

✓**Classe 4 (fortement dispersif, figure .d)** : formation d'un nuage qui recouvre toute la bordure du fond du récipient, éventuellement toute l'eau devient trouble.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figure 36 : *Essais typiques de Crumb test.*

Le test V est facile à reproduire, pas cher, pas besoin équipements, qui peuvent être mis en œuvre aussi bien en laboratoire que sur le terrain, mais avec Capacité limitée car son interprétation comparative est basée uniquement sur l'observation visuelle .

1.7 Essai de sédimentation en parallèle (Double hydrometer test D 4221-99) :

Cet essai consiste à déterminer la granulométrie de l'argile de deux manières (Figure).

Le premier est effectué à l'aide d'un test standard, où l'échantillon L'argile est dispersée à l'aide de réactifs chimiques (hexaméta phosphate de sodium), par agitation mécanique. Effectuer la deuxième méthode de décantation Aucun dispersant, aucune agitation mécanique nécessaire. La différence entre les deux La granulométrie ainsi obtenue a tendance à se disperser naturellement Essai d'argile. Ce test ne s'applique qu'aux sols dont la teneur est supérieure à 12 % Fine (<5 μm), plasticité supérieure à 4 Les résultats du test déterminent le taux de dispersion D, donné par Pourcentage de fines inférieures à 5 microns dans deux cas tests spécifiques :

$$D = \frac{\% \text{fine} < 5 \mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{fine} < 5 \mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

Selon les normes ASTM, le sol étudié sera terminé lorsque D approchera 100%.

La dispersibilité, c'est-à-dire que l'argile se défloque naturellement dans l'eau. Par contre, dans le cas de D Très faible, proche de zéro, le matériau est totalement non dispersible.

Argile en conditions normales (avec et sans dispersant) Agitation mécanique dans l'eau).

D'autres auteurs utilisent d'autres classifications Comme le montre le tableau 000 .

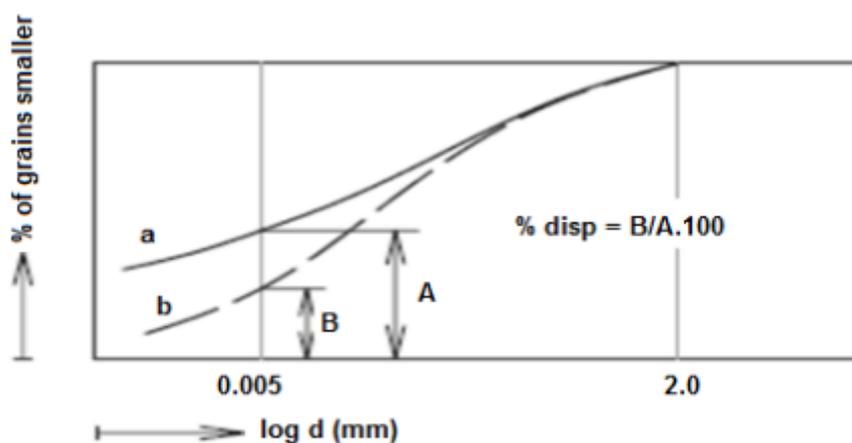
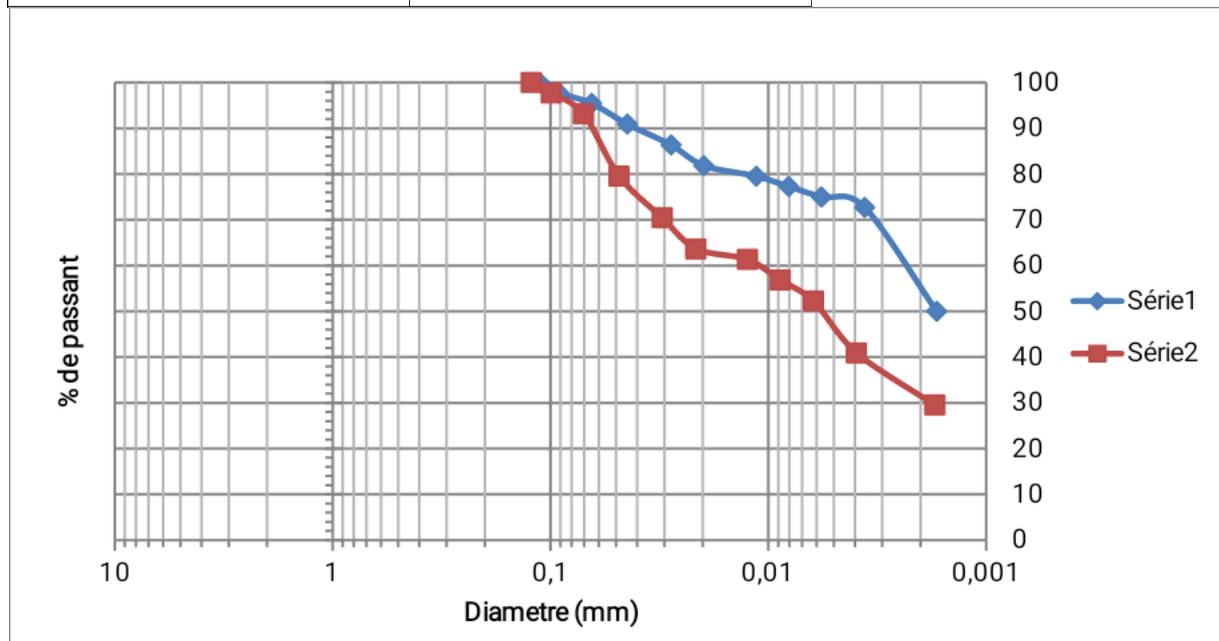


Figure 37 : Pourcentage de dispersion déterminé par l'essai de sédimentation en parallèle, a : standard test, b : essais sans agent dispersant ni agitation mécanique (Vanicek and Vanicek, 2008).

Tableau 1.2 : Domaine de la dispersion selon l'indice de dispersion.

Auteurs	Indice de dispersion ID (%)	Domaine de dispersion
ASTM D-4221	Proche de 100	Dispersion complète
Proche de 0	Sol non dispersif	
Decker et Dunnigan (1977)	< 35	Pas de problème de dispersivité
35 - 50	La dispersivité est probable	
> 50	Il y a un problème de dispersivité	
Knodel (1991)	< 30	Non dispersif
30 - 50	Intermédiaire	
> 50	Dispersif	



Courbe sédimentation en parallèle.

Donc :

$$D = \frac{52.27}{75} \times 100$$

D= 69.69%

69.69 > 50

Alors en vois que notre sol et un sol dispersif selon **Knodel (1991)** ;

Et il ya un probleme de despersivite selon **Decker et Dunnigan (1977)** ;

Et desperstion complete selon **ASTM D-4221**.

**Chapitre VI : Les
stabilisants et les
techniques de
stabilisation.**

Les stabilisants et les techniques de stabilisation :

1. INTRODUCTION :

En raison de l'érosion interne, de la faible résistance au cisaillement, du gonflement du sol, Endommager les ouvrages d'art (AlRawas et Goosem, 2006). Pour surmonter ces difficultés et éviter les dommages structurels,

L'ingénieur a développé plusieurs techniques. Est-ce que vous évitez le problème

Sélectionnez un emplacement différent ou supprimez la terre inutile pour garantir une terre potentielle.

Remplacer par le sol désiré. Dans d'autres études de conception

Utilisé pour l'amélioration du sol. La stabilisation des sols en fait partie

La dernière méthode de cette approche. Il y a beaucoup d'additifs dans ce

Il peut être utilisé pour l'amélioration du sol. Traitement de l'argile par

La chaux, le ciment et les cendres volantes sont utilisés depuis longtemps pour l'amélioration

Les propriétés physico-chimiques et mécaniques du sol en génie des sols. Les liants hydrauliques sont considérés comme des correcteurs granulométriques

Améliorer les propriétés du sol lors du compactage, créer des connexions,

Amélioration des liaisons existantes entre les particules.

1.1 But de la stabilisation

- ✓ Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
- ✓ Colmater les vides que l'on peut supprimer;
- ✓ Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance

Mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de

Diminuer la sensibilité à l'eau. (Thèse doctorat bellabaci 2015).

1.2 Différentes techniques de stabilisation :

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on

Distingue : (BABOURI ,2008)

- ✓ la stabilisation mécanique ;
- ✓ la stabilisation thermique ;

- ✓ la stabilisation chimique, (par additifs).

1.3 Stabilisation mécanique :

1.3.1. Compactage :

L'empilement est un toit important de la fixation. Un condamnable

Empilement permet de contourner la transparence du sol en expulsant l'air emprisonné.

Les caractéristiques optimales de empilement du sol sont déterminées par

L'aperçu Proctor normal. Les caractéristiques mesurées, c'est-à-dire la teneur optimale

En eau (W_{opt}) permettant l'acquisition de la valeur maximale du sol la plus élevée (ρ_{opt})

Est utilisée comme des tâches de la fixation et élément comme du chantier.

La granulométrie, la plasticité des particules du sol, l'abrasivité et la teneur

En argile, ont une réquisition sur le tube du sol comme de l'empilement. En

Pensée de à elles mince taille (maints microns) les particules d'argiles permettent

D'augmenter la valeur du sol en comblant sa transparence. Le tube du

Sol dépend de la teneur en argile.

Dans le cas des sols fins, un condamnable empilement ne permet pas de recroqueviller les

Caractéristiques de la mare de peinture. L'enchaînement est frontispice nombre liée à la présence

D'eau : c'est une disette de empressement superficielle qui lie les particules du sol.

Les caractéristiques de la mare de peinture sont ainsi tributaires de la teneur en

Eau du sol. Cette enchaînement ne crée pas de by-pass à peine consistant à cause les

Particules comme s'aventurer au bosse des argiles. L'entretien d'agents chimiques

Permettant une fixation irrévocable est ainsi nécessaire. Plusieurs produits

Existent et sont régulièrement employés.

1.3.2. Drainage :

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables Verticaux. (Thèse doctorat belabbaci 2015).

1.3.3.Substitution :

C'est la flottant de la pluie du sol gonflant. C'est la péroration la plus évidente. Si la pluie a une prolixie épaisseur, la flottant exhaustive ne peut être envisagée. Elle consiste à évier jusqu'à une palpable épaisseur ensuite remblayer pile des sable, ou hétéroclites matériaux graveleux. C'est une péroration effroyablement coûteuse.

1.3.4.Application de fortes pressions :

Le ballonnement peut appartenir évité en appliquant au sol des pressions supérieures à

La bousculade de ballonnement. Il s'agit de bousculade de ballonnement réelle, c'est-à-prétexte

116

Indicateur à la bousculade restriction maximum vitale dans préexister le sol de Lever par des chemins de contraintes réelles, in situ, cette bousculade peut appartenir Appliquée rien par l'maison lui-même, rien par des surcharges qui sont généralement Des remblais des sols non gonflants (MOUROUX, 1969).

1.3.5.Pré humidification :

Cela provoque beaucoup d'eau et de gonflement avant la construction

J'en ai pris soin. Dans ce cas, le volume reste pratiquement constant. Deux techniques

Citation de BOJANA DOLINAR, 2006, AZZOUZ, 2006 :

Arrosage facile avec un jet ;

Créer une piscine sur le sol bombé et d'autres seront utilisées.

1.3.6.Stabilisation avec des additifs :

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs.

Ces derniers sont classés en deux grandes familles (BEKKOUCHE et al, 2001) :

- ✓ les hydrophobants ;
- ✓ les liants.

1.3.7. Hydrophobants :

« Les hydrophobants sont des produits dérivés aminés des composés Cationiques (par exemple: les amines aromatiques, les amines aliphatiques,). Les Caractéristiques des hydrophobes permettent les variations de la teneur en eau en Rendant le sol insensible à l'eau quelles que soient les conditions extérieures.

L'absorption d'un produit hydrophobe se traduit par deux effets :

- ✓ diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau ;

Ce qui a pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol et la Réduction du gonflement.

- ✓ diminution de la structure microscopique du sol. » (thèse doctorat bellabaci 2015).

1.3.8. Liants :

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques Et les liants organiques.

Le diagramme recherchant noble art les importants liants existants chez l'industrie.

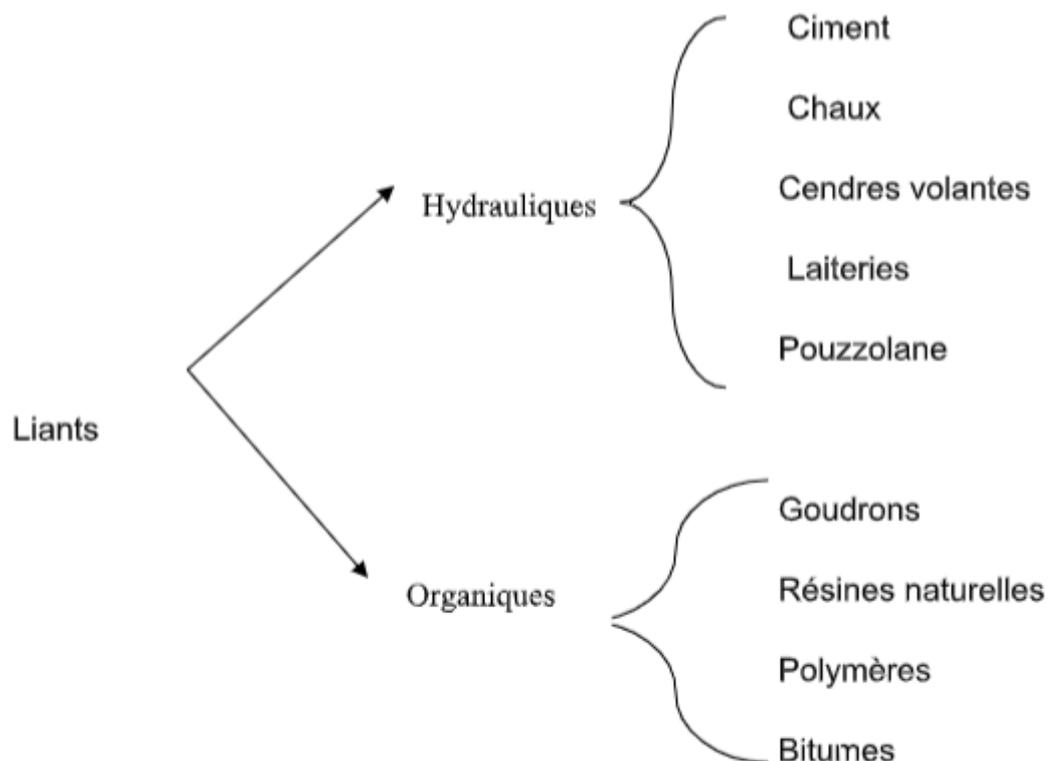


Figure 38 . Classification des liants.

a) Liants hydrauliques :

Ce sont des produits d'origine minérale obtenus par réaction avec l'eau Réseaux cristallins hautement cohésifs et entrelacés qui peuvent émergé Connexion avec le squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux Son de :

- ✓ Echange cationique ;
- ✓ Flocculation et agglomération ;
- ✓ Carbonations ;
- ✓ Réaction pouzzolanique.

Ces réactions se traduisent par :

- ✓ Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution

De la sensibilité à l'eau par flocculation et échange cationique.

- ✓ Une réaction lente produisant les matériaux cimentant. C'est la réaction Pouzzolanique.

b) Liants organiques :

Ce sont des produits de suprême colle, c'est à calomnie des composés organiques

Susceptibles d'une plaisante autorisation au squelette.

On distingue deux sortes :

- ✓ Les mono-composants (un seul constituant) ont un caractère thermoplastique, ce

Sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.

- ✓ Les bi-composants (deux constituants) sont à mélanger au moment de la mise en

Œuvre.

Le résultat est intermédiaire entre le collage thermique des mono-polymères,

Des résines ou des dopes. L'action de ces produits donne au sol des propriétés

Hydrophobes qui dépendent de l'enrobage des particules du sol par le liant.

L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux.

c).1.Stabilisation par ajout du ciment :

« L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température

(JOHSON, 1960). De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des Réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient, comme pour la chaux, de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement de sols de surface (THOMAS et al, 2002). » (Thèse doctorat belabbaci).

d).3.Stabilisation par la chaux :

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet :

- ✓ D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des

Sols médiocres.

- ✓ De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance

Pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt

Économique de ce procédé.

- ✓ De modifier les propriétés du sol.
- ✓ Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en

Basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient.

Généralement, c'est la chaux vive qui est préférée car elle fournit plus d'ions de Ca^{2+} , elle donne un produit plus dense et un abaissement de la teneur en eau Important (BEKKOUCHE et al, 2001).

Il est clair que c'est la phase argileuse du sol qui réagit avec la chaux. La

Qualité du résultat dépend des engins utilisés dans le traitement. L'expérience a

Montré que suite à un traitement, certaines modifications se produisent sur les

Caractéristiques du sol :

- ✓ Diminution de la teneur en eau du mélange de 0.6% à 0.8% pour 1% de chaux

(BEKKOUCHE et al, 2001).Additivement à l'échange de cations Na^{+} et K^{+} par Ca^{2+} et

La floculation des particules argileuses provoquée par les forces électriques, les

Limites de consistance changent.

L'ajout de chaux, en réduisant la plasticité des sols par une augmentation

Immédiate de la limite de plasticité et une diminution de la limite de liquidité, produit

Des structures maniables et faciles à compacter. La quantité optimale pour avoir ces

Changements est appelée point de fixation de la chaux. Au-delà de ce point, des

Processus de formation de divers ciments se produisent augmentant la résistance du

Sol.

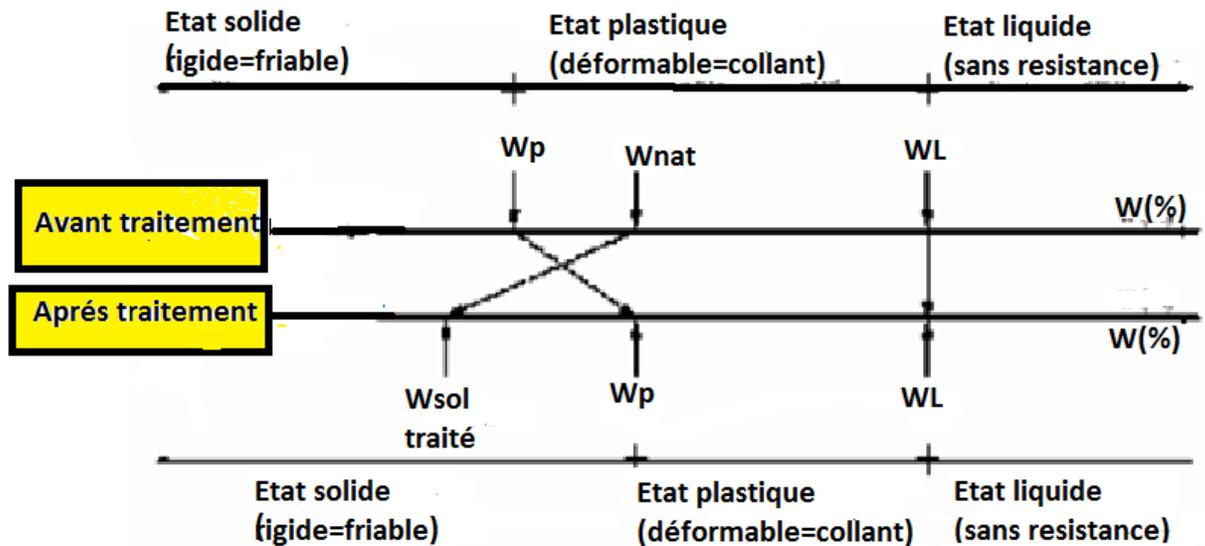


Figure 39: Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, cité par AZZOUZ ,2006.

La figure 39 montre le phénomène combiné de la diminution de.

Diminution de la teneur en humidité naturelle et de l'indice de plasticité du sol traité

Le sol peut être changé à partir d'un état plastique déformable, il ne colle donc guère

Compressible) Séchant (rigidité, frottement, fragilité, et donc beaucoup plus léger)

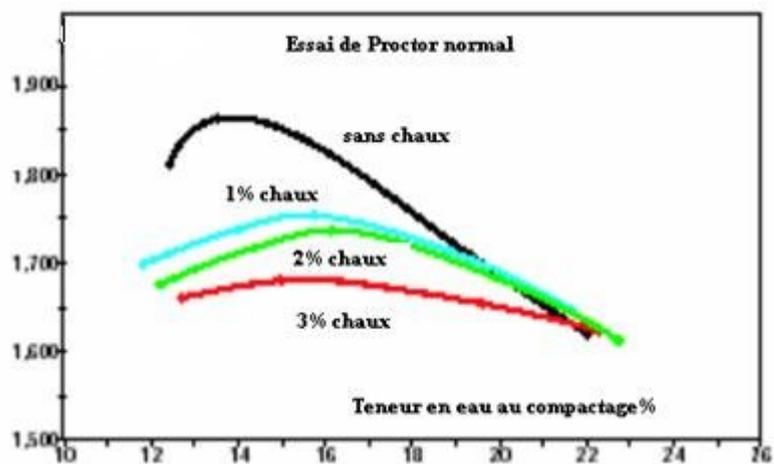
Travailler). Par conséquent, le traitement à la chaux réduit la densité maximale Apparemment, il est séché pour augmenter la quantité d'eau et conservé.

La figure 40 montre la courbe Proctor dans la direction du sol traité.

Directement en bas de la courbe du sol naturel. Ce changement est

Plus il est proéminent, mieux le sol réagit avec la chaux.

Figure 40 : Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, cité par AZZOUZ ,2006.



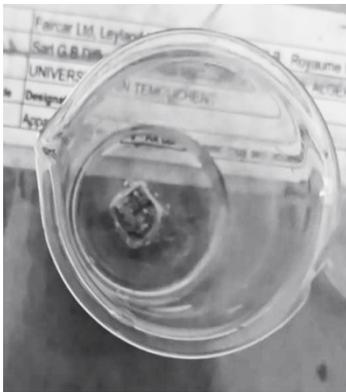
Essai d'émiettage (Crumb test) :

Après l'ajout du poudre de verre avec le pourcentage suivant 6% ; 8% ; 10 %.

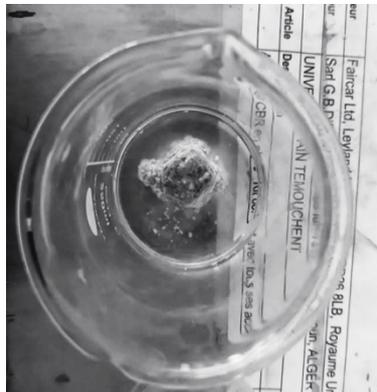
Sol 01 :

Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 6% de la quantité total de sol

6 %



(a) Après 0 s



(b) après 2 min



(c) après 24h

Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 8% de la quantité total de sol

8 % :



(d) après 0 s



(e) après 2 min



(f) après 24 h

Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 10% de la quantité total de sol

10 % :



(j) après 0 s



(h) après 2 min



(i) après 24 h

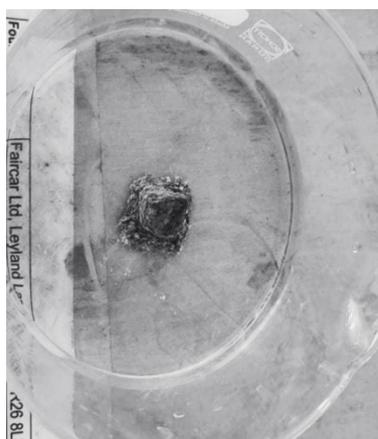
Sol 02 :

Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 6% de la quantité total de sol

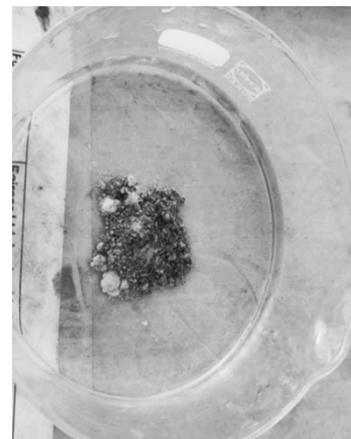
6 % :



(a) Après 0 s



(b) après 2 min



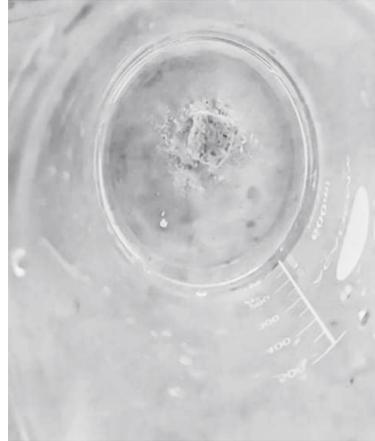
(c) après 24 h

Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 8% de la quantité total de sol

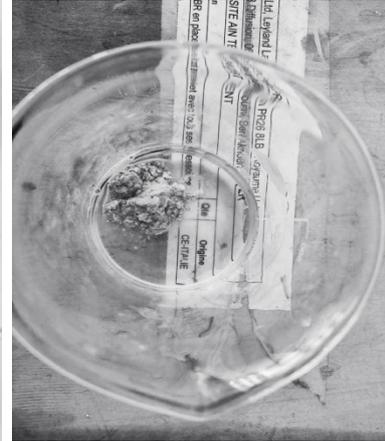
8 % :



(d) après 0 s



(e) après 2 min



(f) après 24 h

Crumb test après l'ajout de la poudre de verre 10% de la quantité total de sol

10 % :



(j) après 0 s



(h) après 2 min



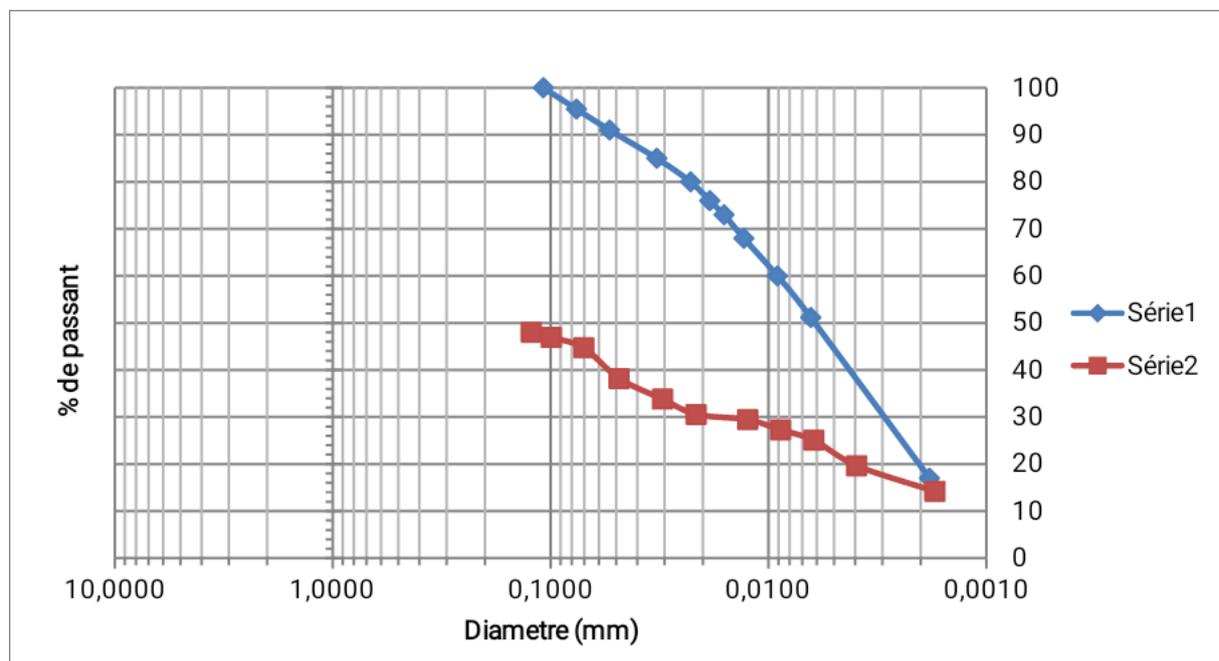
(i) après 24 h

1.4.Essai de sédimentation en parallèle :

Cet essai consiste à déterminer la granulométrie de l'argile de deux manières

Sol 01 :

6% :



Courbe sédimentation en parallèle sol 1 avec 6% de la poudre de verre.

$$D = \frac{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

Le premier est effectué à l'aide d'un test standard, où l'échantillon L'argile est dispersé à l'aide de réactifs chimiques (hexa méta phosphate de sodium), par agitation mécanique. Effectuer la deuxième méthode de décantation Aucun dispersant, aucune agitation mécanique nécessaire. La différence entre les deux La granulométrie ainsi obtenue a tendance à se disperser naturellement

Essai d'argile. Ce test ne s'applique qu'aux sols dont la teneur est supérieure à 12 % Fine (<5 µm), plasticité supérieure à 4 Les résultats du test déterminent le taux de dispersion D, donné par Pourcentage de fines inférieures à 5 microns dans deux cas tests spécifiques :

Donc :

$$D = \frac{\% \text{fine} < 5 \mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{fine} < 5 \mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

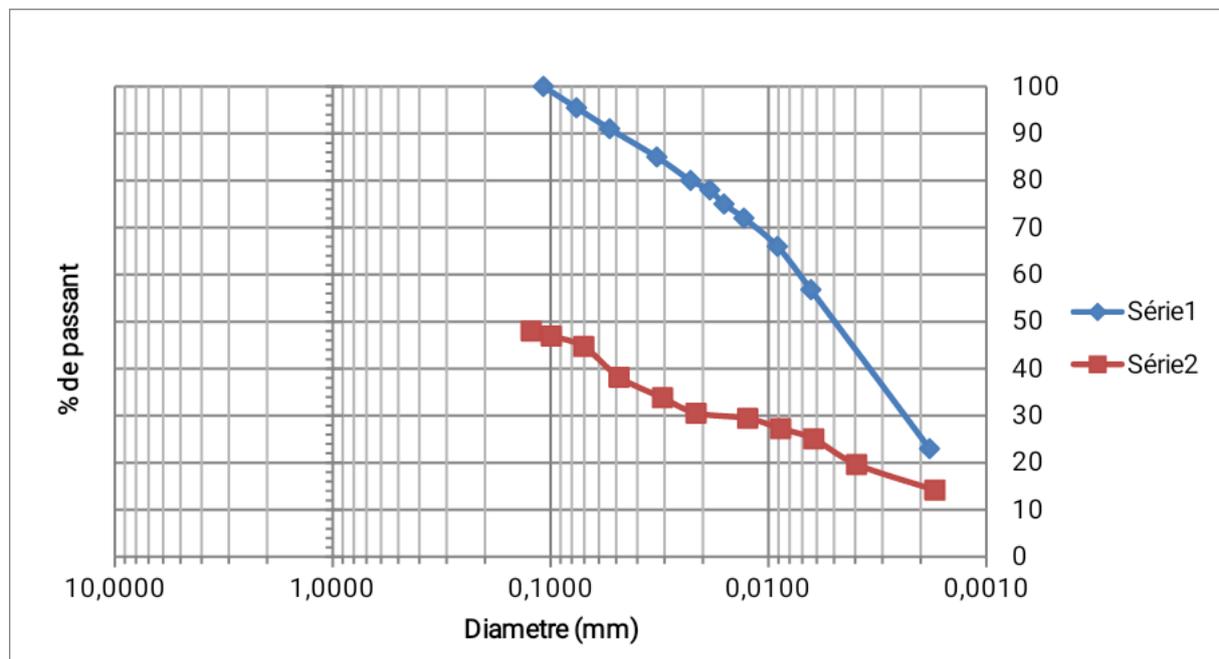
$$D = \frac{25.09}{51.16} * 100$$

$$D = 49.04\%$$

$$D = 49.04\%$$

Alors en remarque que la désertion de sol a été diminuée
64.91 > 49.04.

8% :



Donc :

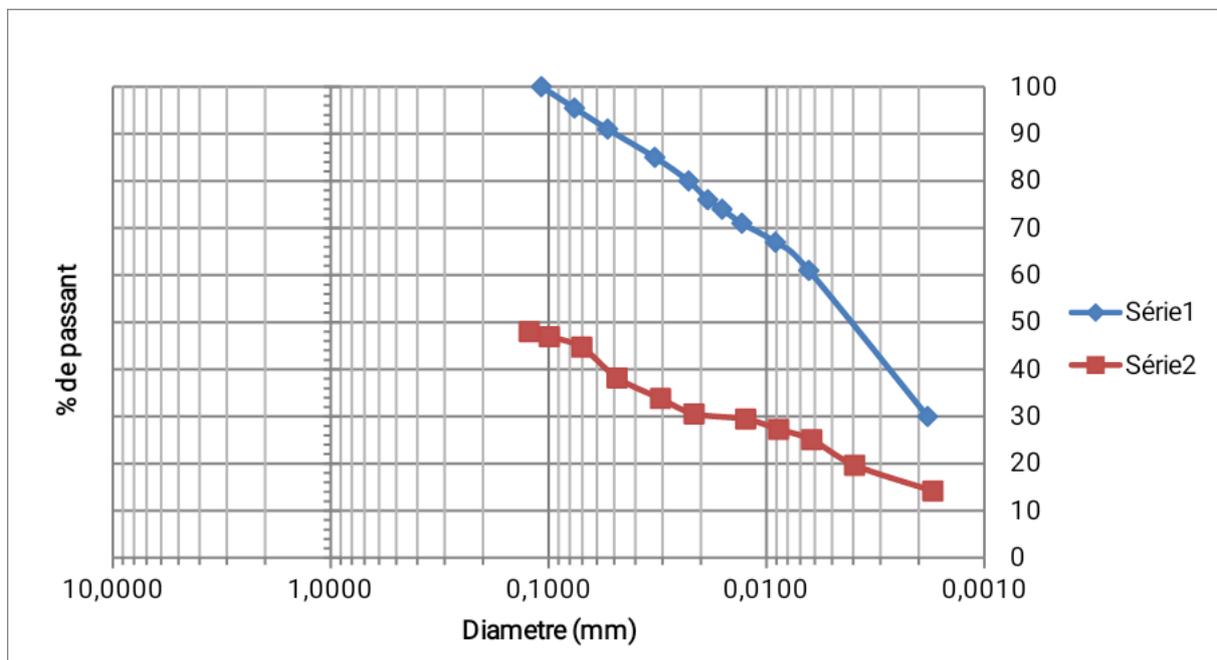
$$D = \frac{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

$$D = \frac{25.09}{56.81} * 100$$

$$D = 44.16\%$$

Alors en remarque que la désertion de sol a été diminuée
64.91 > 49.04 > 44.16.

10% :



Donc :

$$D = \frac{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

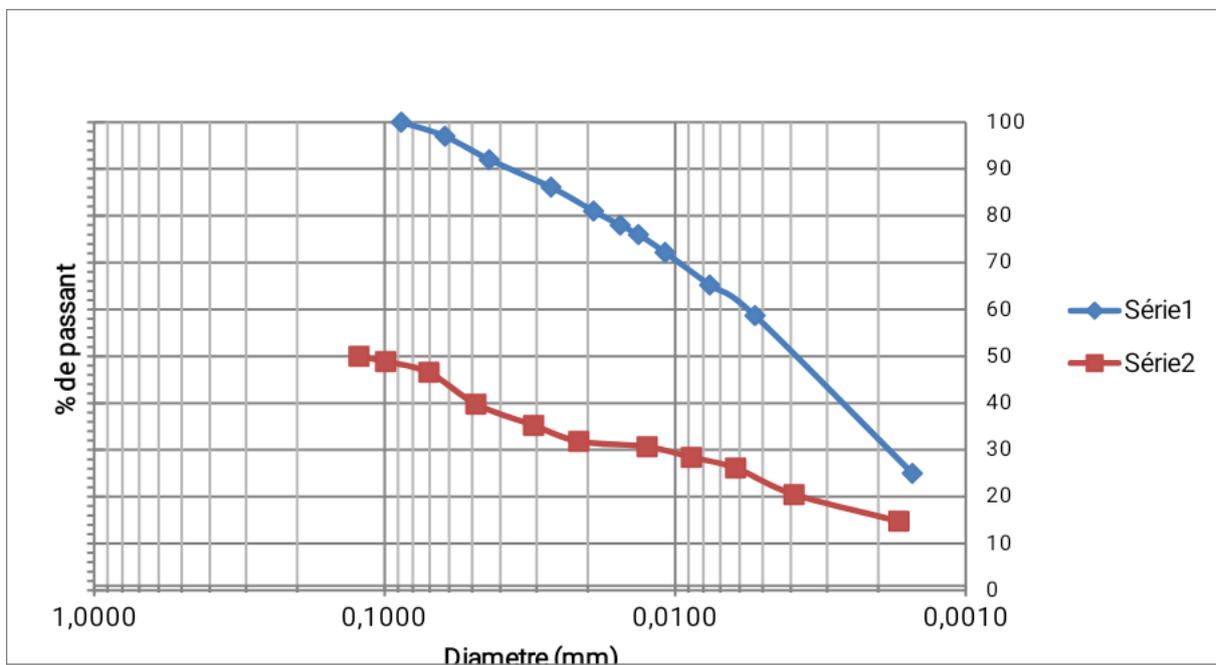
$$D = \frac{25.09}{61} * 100$$

$$D = 41.13\%$$

Alors en remarque que la désertion de sol a été diminuée
64.91 > 49.04 > 44.16 > 41.13.

Sol 02 :

6% :



Donc :

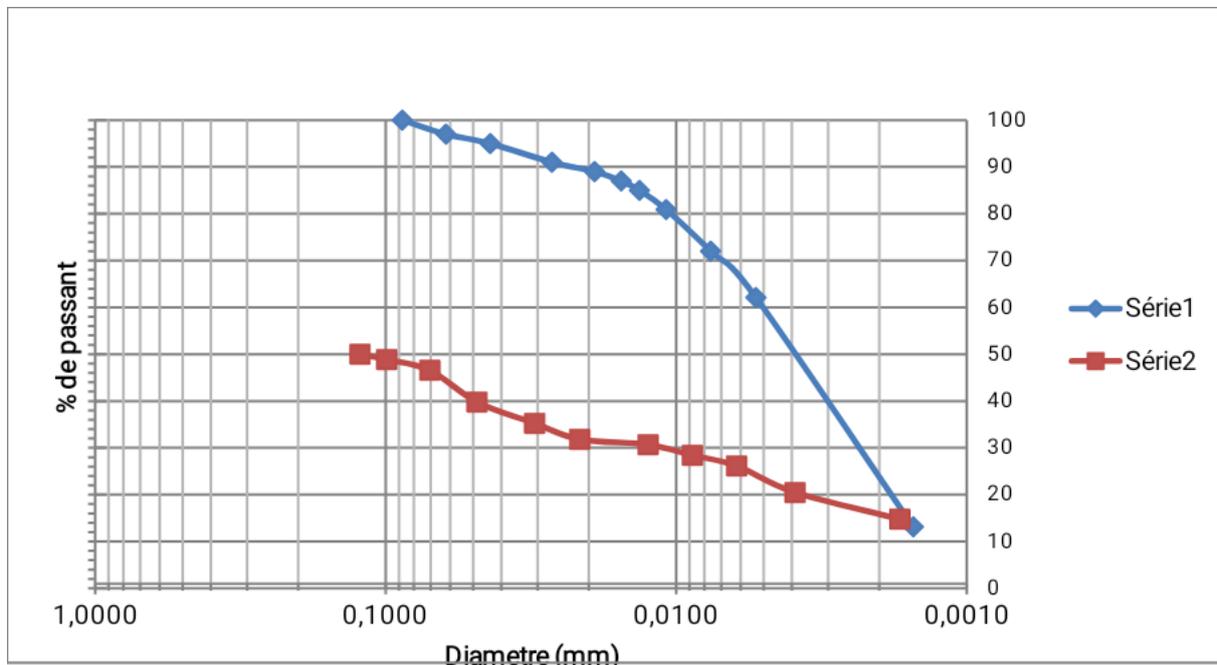
$$D = \frac{\% \text{ fine} < 5\mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{ fine} < 5\mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

$$D = \frac{26.14}{58.69} * 100$$

$$D = 44.53\%$$

Alors en remarque que la désertion de sol a été diminuée
69.69 > 44.53.

8% :



Donc :

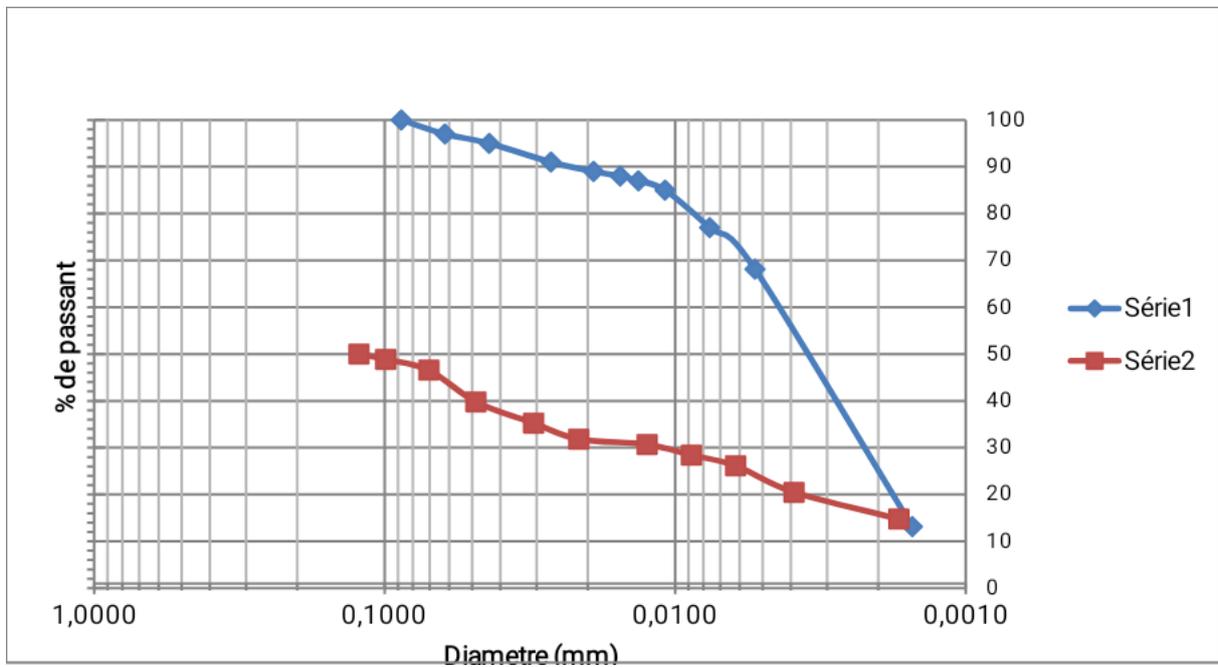
$$D = \frac{\% \text{ fine} < 5\mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{ fine} < 5\mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

$$D = \frac{26.14}{62.12} * 100$$

$$D = 42.07\%$$

Alors en remarque que la désertion de sol a été diminuée
69.69 > 44.53 > 42.07.

10% :



Donc :

$$D = \frac{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{sans dispersant})}{\% \text{fine} < 5\mu\text{m} (\text{avec dispersant})} * 100$$

$$D = \frac{25.09}{61} * 100$$

$$D = 38.36\%$$

Alors en remarque que la désertion de sol a été diminuée

$$69.69 > 44.53 > 42.07 > 38.36.$$

2.CONCLUSION :

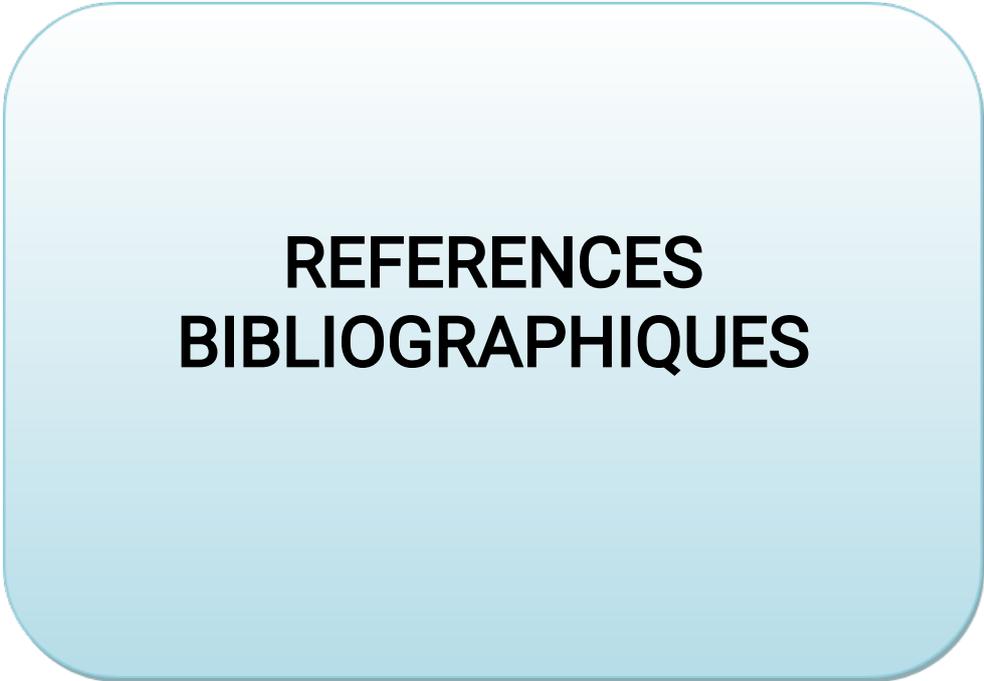
Dans ce chapitre, une revue générale de l'état de connaissance dans le domaine de traitements des sols a été présentée. Nous avons essayé de définir d'abord la présentation des différentes méthodes de traitement suivi par leurs avantages, puis nous avons passé en revue les grandes étapes et les différent cas de traitement. Nous avons terminé ce chapitre par les études expérimentales de traitement du sol avec l'ajout des différents pourcentages de la poudre de verre.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but de ce projet est de déterminer les propriétés physico-chimiques du sol étudié à travers les résultats des activités d'essais géotechniques du laboratoire sur le matériau étudié, de compléter sa caractérisation et de déterminer les paramètres nécessaires. Le sol a ensuite été traité par ajout de fritte de verre pour étudier l'effet et les propriétés de substitution de la fritte de verre avec différents pourcentages (6%, 8% et 10%), ainsi que des tests physiques et mécaniques pour confirmer l'efficacité de cet ajout de ces caractéristiques. .

L'ajout de poudre de verre a donné des résultats acceptables, essentiellement une composition de poudre de verre à 10 % a amélioré la maniabilité et la résistance mécanique par rapport au témoin



**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Foster et al., 2000. LIVRE Foster care dynamics, 2000-2005: A report from the multistate foster care data archive

CFGB, 1997.: S Bonelli - Ingénieries eau-agriculture-territoires, 2001 - hal.archives-ouvertes.fr

Foster et Fell, 2000 LIVRE. Foster care dynamics, 2000-2005: A report from the multistate foster care data archive

Beguïn, 2011..LIVRE A Béguïn-Verbrugge, S Kovacs - 2011 - books.google.com

Benahmed et Philippe, 2012. N Benahmed, P Philippe, P Royet, R Tourment... - 2012 - hal.inrae.fr

Fry, 2007 . C Homer, J Dewitz, J Fry, M Coan... - ... and remote sensing, 2007 - academia.edu

Foster et Fell, 2000 LIVRE Foster care dynamics, 2000-2005: A report from the multistate foster care data archive

Foster et Fell, 2000. LIVRE Foster care dynamics, 2000-2005: A report from the multistate foster care data archive

Simek, 1997. K Simek, J Vrba, J Pernthaler, T Posch... - Applied and ..., 1997 - Am Soc Microbiol

Peyras, 2003. J Peyras - Histoire, Espaces et Marges de l'Antiquité, Hommages ..., 2003 - books.google.com

Catanach et al., 1991. AC Ferguson-Smith, BM Cattanach, SC Barton... - Nature, 1991 - nature.com

Peyras, 2003 J Peyras - Histoire, Espaces et Marges de l'Antiquité, Hommages ..., 2003 - books.google.com

Brown et Gosden, 2006. AJ Brown, JD Gosden - ... of Durham from 6 to 9 September 2006, 2006 - icevirtuallibrary.com

Reiffsteck et al. 2006. P Reiffsteck - Comptes rendus Symposium international 50 ans de ..., 2006 - researchgate.net

Wan et Fell 2002. RSS Wu, PKS Lam, KL Wan - Environmental pollution, 2002 - Elsevier

Wan et Fell 2004 « Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams » Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 130, No. 4, pp 373-380.

Sanchez et al. , 1983 R Sanchez-Pescador, PJ Laybourn... - Nature, 1983 - nature.com

Bendahmane 2005 « Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne » Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, p 153.

Forrest, 1980 . « Engineering and design - Laboratory soils testing, Appendix XIII: Pinhole erosion test for identification of dispersive clays » Department of Tee Army, Washington, U.S.A, 407 p

Fell et al., 1992 « Geotechnical engineering of embankment dams » A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 675 p.

Shellard et Decker, 1977). « Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects » American society for testing and materials, USA, 495 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Godone et Stanch, 2011. « Soil Erosion Studies » Published by InTech. ISBN 978-953-307-710-9, Hard cover, Croatia, 332 p
- Alem et al. 2010. « Migration de particules dans un milieu poreux : érosion interne » 28èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, France, 8 p
- Massiéra et al., 2008 « Analyse des déformations de grands barrages en remblai pendant le remplissage et l'opération du réservoir » Congrès annuel de la SCGC, Québec, Canada
- Fell et al., 1992 « Geotechnical engineering of embankment dams » A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 675 p.
- Fell and al., 2005. « Geotechnical engineering of dams » Taylor & Francis Group plc, London, UK, 912 p
- Mériax et al., 2004. « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » Guide pratique à l'usage des gestionnaires, Cemagref Éditions, Paris
- Mériax et al., 2004 . « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » Guide pratique à l'usage des gestionnaires, Cemagref Éditions, Paris
- Bekkouche, 1987 « Sécurité des grands barrages en terre. Approche probabiliste des problèmes d'écoulement liés aux reconnaissances et contrôles » Thèse de doctorat. Ecole centrale de Paris, France, 370p.
- Cyganiewicz, 2001 « Estimating Risk of Internal Erosion and Material Transport Failure Modes for Embankment Dams » U.S. Bureau of Reclamation Technical Service Center Denver, USA, 37 p.
- .Barrage de Baldwin Colline, États-Unis . C Marche - 2008 - books.google.com
- Teton Dam, États-Unis RL Schuster - Bulletin of the International Association of Engineering ..., 1979 - Springer
- Srbulov, 1988 . M Srbulov - Computers and Geotechnics, 1988 - Elsevier
- Mattson et al. , cité par 2008. « On internal erosion in embankment dams » Luleå University of Technology, Sweden, 70 p
- Fell et al., 2005 . « Geotechnical engineering of dams » Taylor & Francis Group plc, London, UK, 912 p
- Wan et Fell, 2004.) « Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams » Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 130, No. 4, pp 373-380.
- Selon Fel et al. 2005. S Le Floch, AS Devanne, JP Deffontaines - LEspace géographique, 2005 - cairn.info
- Sjödahl, 2006. « Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams » Thèse de doctorat, Lund University, Sweden, 96 p.
- Degoute, 1997. « Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi » Edition Cemagref, France, 183 p.
- Johansson en 1997. « Seepage Monitoring in Embankment Dams » Thèse de doctorat, Université de Stockholm, 62 p
- Tchoumkam, 2010. « Détection de fuite dans les barrages en remblai par la méthode de polarisation spontanée et par tomographie électrique » Thèse de doctorat, Université De Montréal, 116 p

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sjodahl, 2006. « Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams » Thèse de doctorat, Lund University, Sweden, 96 p.
- Lautrin, 2003. « Vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre » Edition Cemagref, France, 239 p
- Schneider, 2006 « Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols a partir d'une inversion jointe de données d'infiltration et de résistivité électrique » Thèse de doctorat, Unité de Science du sol Thiverval-Grignon, 144 p.
- Beck, 2008 « Évaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique » Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, France, 322 p
- Mériaux et al., 2004: « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » Guide pratique à l'usage des gestionnaires, Cemagref Éditions, Paris
- AlRawas et Goosem, 2006 « Expansive Soils, recent advances in characterization and treatment » Taylor & Francis Group, London, UK, 540 p
- Thèse doctorat bellabaci 2015
- BABOURI ,2008 , M Bensenane, A Babouri... - Alimentary ..., 2008 - Wiley Online Library
- Thèse doctorat belabbaci 2015
- MOUROUX, 1969 G Mourou, B Drouin - Optics Communications, 1971 - Elsevier
- BEKKOUCHE et al, 2001 (1987) « Sécurité des grands barrages en terre. Approche probabiliste des problèmes d'écoulement liés aux reconnaissances et contrôles » Thèse de doctorat. Ecole centrale de Paris, France, 370p.
- thèse doctorat bellabaci 2015
- JOHSON, 1960 GM Muha, PA Vaughan - The Journal of Chemical Physics, 1960 - aip.scitation.org
- THOMAS et al, 2002
- A Jemal, A Thomas, T Murray, M Thun - Ca-A Cancer Journal for Clinicians, 2002 - icic.es
- Thèse doctorat belabbaci).
- BEKKOUCHE et al, 2001 « Sécurité des grands barrages en terre. Approche probabiliste des problèmes d'écoulement liés aux reconnaissances et contrôles » Thèse de doctorat. Ecole centrale de Paris, France, 370p.
- BEKKOUCHE et al, 2001.