



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI - Tébessa -

Faculté des Science Exactes et Sciences de la Nature et de le Vie

Département de sciences de la terre et de l'univers

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences de la terre et de l'univers

Filière : Géologie

Spécialité : Géologie de l'Ingénieur et de la Géotechnique

Thème :

**Sols fins et stabilité des ouvrages en terre : érosion,
dispersion, typologie et pathologie (recherche
bibliographique)**

Présenté par :

Bouhlassa chaith

Achi ziad

Devant le jury :

Président	Dr. Mouici Redha	MCB	Université de Tébessa
Rapporteur	Dr. Aoun Mounira	MCB	Université de Tébessa
Examineur	Dr. Djabri Mohamed	MCA	Université de Tébessa

Session : 2022/2023

Recherche a traversé de nombreux obstacles, mais j'ai essayé de les surmonter avec persévérance, louange à Dieu et de sa part. Pour mes parents, je remercie mon père Allah yarahmou, et ma mère, que Dieu la protège, mes frères et sœurs et mes amis, ils ont été comme un soutien et un soutien pour mener à bien la recherche. Je ne dois pas oublier mes professeurs qui ont eu le plus grand rôle en me soutenant et en me donnant de précieuses informations, je vous adresse mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude pour votre amour, votre soutien et votre présence à chaque étape de ma vie d'étudiant. Votre contribution a été inestimable, et je suis honoré de vous avoir à mes côtés.

Ziad achi

Je dédie ce mémoire à

A mes très chers parents

B, mostefa et f, tebib

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, jusqu'au jour-là. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

A mon très cher frère : kaisse

A mes sœurs

A toute ma famille

Ton soutien moral, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études.

Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.

A tous et à toutes mes cher(e)s ami(e)s A tous qui m'ont aidé de près ou de loin

Chaith bouhlassa

Remerciements :

Tout d'abord, louange à « Allah » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pu aboutir.

Nos remerciements vont à notre promoteur Dr. Aoun Mounira, pour nous l'occasion de vous témoigner notre profonde gratitude.

On tient également à remercier Dr. Mouici Redha qui nous a donné l'honneur de présider le jury devant lequel, ce modeste travail vat être présenté

Nous tenons également à remercier profondément Dr. Djabri Mohammed d'avoir accepté examiner notre travail

Nos remerciements sont adressés aussi à toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

RESUME :

Les différents types de sols fins, en raison de leur composition minéralogique complexe, ont toujours posé des problèmes lors de la construction. En particulier, les argiles présentent un comportement très délicat qui dépend de la teneur en eau et du degré de saturation.

De nombreuses études ont été réalisées sur les phénomènes liés à ces types de sol, qui restent difficilement maîtrisables et causent d'importants dégâts à travers le monde. L'études en cours vise à atténuer l'ampleur de ces dommages en comprenant le comportement des sols fins et en maîtrisant les facteurs qui peuvent les influencer.

Une revue bibliographique a été réalisée dont le but de recueillir le maximum d'informations sur les différents sols fins et les phénomènes récents qui les affectent tels que l'érosion et la dispersion, ces phénomènes, présentent en effet, des pathologies qui engendrent des dégâts énormes pour les ouvrages en terre.

Un autre objectif de notre mémoire est aussi de présenter les différentes techniques de stabilisation des sols fins (chimiques, mécaniques et thermiques) pour contrer les phénomènes tels que l'érosion et la dispersion. Nous nous appuyons sur des résultats bibliographiques afin de proposer une méthode pratique, simple, économique et efficace pour minimiser ces phénomènes.

Mots clés : Les sols fins, Erosion, dispersion, les pathologies, ouvrages en terre, traitement des sols fins.

ABSTRACT:

Soft soil is considered a fertile environment for various diseases that affect different earth structures, and these diseases vary depending on the type of soft soil involved or forming its foundation. Numerous studies have been conducted on the phenomena associated with these types of soil, which remain difficult to control and cause significant damage to earth structures worldwide. Our current studies aim to identify the problems associated with soft soil, as well as the severity of the damage it causes to structures, by understanding the behavior of fine soil and attempting to summarize the factors that can affect it and increase the severity of the problems and resulting damage. Through this work, a literature review was conducted to gather as much information as possible about different types of fine soil and the modern phenomena that affect them, in order to determine their impact on structures as mentioned above. One of the main objectives of this research is to provide a variety of techniques used as solutions for treating and strengthening fine soil (chemical, mechanical, and thermal) to address phenomena such as settlement and dispersion. We rely on the results of the literature studies to propose a practical, simple, and effective method to mitigate these phenomena.

Keywords: fine soil, erosion, dispersion, fine soil diseases, earth structures, treatment of fine soil.

الملخص:

تعتبر التربة الناعمة وسط خصب لخلق مختلف الامراض التي تصيب المنشآت الترابية المختلفة وتختلف هذه الأخيرة حسب نوع التربة الناعمة التي تدخل في تكوينها أو تشكل أرضية أساس لها.

تم إجراء العديد من الدراسات حول الظواهر المرتبطة بهذه الأنواع من التربة، والتي تظل صعبة التحكم وتسبب أضرارًا كبيرة للمنشآت الترابية في جميع أنحاء العالم. تهدف دراساتنا الحالية إلى معرفة نوعية المشاكل المرتبطة بالتربة الناعمة أيضا حدة الأضرار التي تسببها للمنشآت و ذلك عن طريق فهم سلوك التربة الدقيقة وكذلك محاولة حوصلة العوامل التي يمكن أن تؤثر فيها و تزيد من حدة المشاكل و الأضرار الناجمة عنها.

من خلال هذا العمل تم إجراء مراجعة مكتبية لجمع أكبر قدر من المعلومات حول مختلف أنواع التربة الدقيقة والظواهر الحديثة التي تؤثر فيها، وهذا لتحديد مدى تأثيرها على المنشآت مثلما سلف الذكر. من بين الأهداف الرئيسية لهذا البحث هو تقديم مجموعة متنوعة من التقنيات المستعملة كحلول لمعالجة و تدعيم التربة الدقيقة (كيميائية، ميكانيكية و حرارية) لمواجهة الظواهر مثل الحت والتشنت. نعتد على نتائج الدراسات المكتبية لاقتراح طريقة عملية وبسيطة وفعالة للحد من هذه الظواهر.

كلمات مفتاحية: التربة الدقيقة، التآكل، التشنت، أمراض التربة الدقيقة، المنشآت الترابية، معالجة

التربة الدقيقة

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les sols fins

Figure 1 : Structure de base des argiles	20
Figure 2 : Schéma de la structure de l'illite D'après	21
Figure 3 : Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm.	22
Figure 4 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	23.
Figure 5 : Schéma de la structure de kaolinite	23
Figure 6 : Structure de la montmorillonite	24
Figure 7 : Structure élémentaire de smectite	24
Figure 8 : a : Limon en vue macroscopique	25
B : Limon à l'échelle microscopique	25
Figure 9 : Sable fin à l'échelle	26
Figure 10 : Sable fin à l'échelle	26
Figure 11 : Structure générale du sol fin	27
Figure 12 : Structure compacte du sol fin	27
Figure 13 : Structure particulière du sol fin	28.
Figure 14 : Triangle de texture	28

Chapitre 2 : Erosion et dispersion des sols fins : origine, typologie et caractérisation

Figure 15 : Rupture par Erosion interne de la digue de Tunbridge, Tasmania	32
Figure 16 : Une photo réelle représentant l'effondrement du pont à Jijel en raison de l'érosion hydrique (2019)	38
Figure 17: Illustration en deux phases du phénomène de renard en fondation référence article de Clément Desodt – Hélène Horsin Molinaro 2016.....	39
Figure 18: Schéma représentatif des divers phénomènes initiateur de l'érosion interne dans un barrage (Blais, 2005).....	41
Figure 19: Détail de la cellule de Pinhole test (NELSON, 1991)	48
Figure 20: Essai typique du Crumb test (Nelson, 1991), cité par (BELARBI, 2014)	48

Figure 21: Érodimètre à jets mobiles au laboratoire (Reiffsteck et al., 2006).....	50
Figure 22: Schéma d'appareillage de Triaxial Erosion Test (Sanchez and al., 1983).....	50

Chapitre 3 : les pathologies des sols fins

Figure 23: barrage de Malpasset 1959 (www.aria.developpement-durable.gouv.fr 2009).....	54
Figure 24: Le pont Morandi, situé dans la ville de Gênes en Italie 2018 (www.lepoint.fr).....	56
Figure 25 : barrage de Teton en 1976 (www.structurae.net)	58

Chapitre 4 : Les différentes méthodes de stabilisation des sols fins

Figure 26 : Conditions d'utilisation de la stabilisation Chimique (Dept. Of the Army, 1983) cité par (Azzouz, 2006)	65
Figure 27 : Le nuage de cation autour de la micelle qui représente la dispersion et lafloculation. (2014)	66
Figure 28: Résultat de l'essai d'Emiettage (Belarbi A., 2012), cité par (Bouziane, 2014)	67

..

Liste des tableaux

Chapitre : Généralités sur les sols fins

Tableau 1 : Tableau montrant la classification des principaux minéraux argileux et leurs espèces	19
Tableau 2 : Pouvoir d'absorption et d'adsorption des argiles	20

Chapitre 2 : Erosion et dispersion du sols fins : origine, typologie et caractérisation

Tableau 3 : L'origine du phénomène d'érosion (Atlan, Y., & Feller, C. 1980).....	36
Tableau 4 : qui montre l'effet de la teneur en argile sur la susceptibilité à la dispersion pour différents types de sols (Belarbi, 2014).....	44
Tableau 5 : Classes de dispersion à partir du ESP (Knodel, 1991) cité par (Bouziane, 2014)	49

Chapitre 4 : Les différentes méthodes de stabilisation des sols fins

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (A.Bekkouche, 2014).....	62
--	----

Sommaire :

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction generale

INTRODUCTION GENERALE	15
1) Chapitre 1 : Généralités sur les sols fins	18
Introduction :	18
1.1. Définition des sols fins:	18
1.2. Définition des argiles :	18
1.3. Définition des minéraux argileux:	20
1.4. Différentes structures d'argile :	21
1.4.1. Les argiles du groupe de l'illite :	21
1.4.2. La kaolinite :	22
1.4.3. Les argiles du groupe des smectites :	23
1.5. Définition des silts et des limons :	24
1.6. Définition des sables fins :	25
1.7. La microstructure des sols fins :	25
1.8. La structure des sols fins :	26
1.8.1. La structure compact :	26
1.8.2 La structure particulière :	27
1.9. La texture des sols fins :	27
1.10 .Principaux problèmes des sols fins :	28
1.10.1 Gonflement et retrait :	28
1.10.2 Faible capacité de support :	28

1.10.3 Risque de glissement :	28
1.11. Conclusion :	29
Chapitre 2 : Erosion et dispersion des sols fins : origine, typologie et caractérisation	31
Introduction :	31
2.1. l'érosion :	31
2.2. L'érosion des sols fins :	32
2.3. Paramètres influençant le phénomène de l'érosion :	32
2.3.1. Les précipitations et le ruissellement d'eau :	32
2.3.2. L'érosion fluviale :	33
2.3.5. La végétation :	34
2.3.6. L'activité humaine	34
2.3.7. Les facteurs climatiques :	35
2.3.8. La présence d'eau :	35
2.3.9. La circulation des eaux souterraines :	35
2.4. L'origine du phénomène d'érosion :	35
2.5. La caractérisation des sols érodables :	36
2.5.1. La granulométrie des sols :	36
2.5.2. La cohésion :	36
2.5.3. L'angle de frottement interne :	36
2.5.4 La porosité :	36
2.6. La structure du sol :	37
2.7. Typologie de l'érosion :	37
2.7.1. L'érosion externe :	37
2.7.2. l'érosion interne :	39
2.8. Généralité sur le phénomène de dispersion des sols :	41
2.8.1. Définition des sols dispersifs :	41
2.8.2. Mécanisme de dispersion :	42
2.8.3. Mécanisme d'érosion par dispersion :	42
2.9. Paramètres influençant le phénomène de dispersion :	43
2.9.1. La teneur en argile :	43
2.9.2. Le pH :	44
2.9.3. la salinité de l'eau :	44
2.9.4. La composition minéralogique de l'argile	44
2.9.5. La présence d'ions divalents :	44

2.9.6. La vitesse de l'eau :	45
2.10. Caractérisation des sols dispersifs :	45
2.10.1. L'analyse granulométrique :	45
2.10.2. Les essais d'absorption d'eau	46
2.10.4. Les essais de stabilité structurale :	47
2.10.5. Pinhole test :	47
2.10.6. Crumb test :	47
2.11. L'essai chimique :	48
2.11.1. Extrait de saturation :	48
2.11.2 Extrait au 1/5 :	48
2.11.3 Essais de sédimentation en parallèle (Double Hydrometer test):	49
2.12. Essais caractérisant l'érosion des sols.....	49
2.12.1. Érodimètre à jets mobiles	49
2.12.2. Essai triaxial d'érosion.....	50
2.13. Conclusion :	51
Chapitre 3 les pathologies des sols fins :	53
Introduction :	53
3.1. Phénomène de renard :	53
3.2. Les glissements de terrain :	54
3.3. Les tassements différentiels :	55
3.4. L'érosion interne :	56
3.5. Effets des cycles de gel-dégel :	58
3. Conclusion :	58
Chapitre 4 : Les différentes méthodes de stabilisation des sols fins.	61
4.1. Introduction	61
4.2. Les techniques de la stabilisation des sols fins :	61
4.3. Stabilisation mécanique :	62
4.3.1 La stabilisation mécanique par compactage :	62
4.3.2 Le drainage :	62
4.3.3 La technique de substitution :	63
4.3.4. L'application de fortes pressions:	63
4.3.5. Stabilisation par pré humidification	63
4.4. La stabilisation thermique	63
4.5. La stabilisation chimique :	64

4.5.1 Stabilisation par ajout de la chaux	65
4.5.2 Stabilisation par ciment :.....	67
4.5.5 Stabilisation par des additifs	67
4.5.6 Stabilisation aux cendres volantes et à la pouzzolane	68
Conclusion.....	69
CONCLUSION GENERALE	70

INTRODUCTION GENERALE

Les sols fins ont une très grande importance en géotechnique, vue leur utilisation dans le domaine de génie civil précisément pour la construction des routes et des barrages alors que le pourcentage des barrages en remblais dépasse 60 % à l'heure actuelle (Belarbi et al., 2012). La compréhension des principes de la mécanique des sols ainsi que le coté économique constituent la principale cause de l'utilisation des matériaux naturelles. Cependant cette utilisation a donné naissance à de nombreux problèmes d'instabilité des ouvrage qui avec le temps, est devenue un enjeu pour la sécurité des personnes et des biens (Belarbi et al., 2012).

L'instabilité des ouvrages en terre résulte essentiellement de l'érosion et la dispersion des sols fins. Sous l'action de l'écoulement interne, les particules fines peuvent être sujettes à des phénomènes d'arrachement et de transport. Ce déplacement qui est appelé érosion interne provoque un changement de la granulométrie et la porosité du sol constituant l'ouvrage et par la suite une diminution de ses propriétés mécaniques et hydrauliques (cohésion, perméabilité, ... etc.). De ce fait l'ouvrage peut être exposé à plusieurs problèmes dont on peut citer : le phénomène de renard, le glissement, le tassement, le déplacement des fines engendre aussi la perte d'étanchéité du ceps de l'ouvrage, etc.

Dans certains cas, où l'ouvrage est constitué par des sols dispersifs, le problème de l'érosion peut se déclenché facilement grasse à ces sols. Par leur nature les sols dispersifs ont une structure instable, en présence de l'eau ils se défloclent (déplacement en suspension des particules séparés) et devient très érodable sous l'effet d'une petite vitesse d'écoulement (Belarbi et al., 2013). La dispersion est un phénomène dépendant de la minéralogie et la composition chimique des argiles ainsi que du type de sel contenue dans l'eau interstitielle. Le phénomène de dispersion est due à la présence du sodium échangeable dans la structure des argiles, ce qui rend les forces expulsives plus élevées que les forces attractives, la particule se sépare et se déplace en suspension. Il est important de signaler qu'une fois déclenché, le phénomène d'érosion s'accroît de plus en plus avec le temps (Belarbi et al., 2013).

Les sols fins, tels que les argiles et les limons, sont donc particulièrement sensibles à ces phénomènes déjà mentionnés et peuvent subir des dégradations importantes, pouvant aller jusqu'à la rupture des ouvrages. C'est pourquoi de nombreuses recherches ont été menées pour comprendre les mécanismes de l'instabilité des sols et développer des techniques pour prévenir ou réparer les dommages causés (David W. McClenahan, publié par McGraw-Hill Education, 2010). Les méthodes de stabilisation de ces sols ont aussi fait l'objet de plusieurs études (Ouhahi and Goodarzi, 2006, Belkouchi et Aoulmi, 2017).

Pour cette raison, notre travail à été orienté sur les problèmes causés par les sols fins constituant les ouvrages en terre. A travers une recherche bibliographique, nous allons présenter les types et les pathologies ainsi que les méthodes de caractérisation pour les deux phénomènes les plus connus et qui sont liés aux sols fins : érosion et dispersion.

Pour achever ce travail, nous avons choisi la structure suivante :

Premier chapitre : après l'exposition de l'introduction et l'objectif de l'étude. Nous allons présenter toute définition jugée nécessaire à notre avis tel que les types des sols fins, l'érosion, la dispersion.

Le deuxième chapitre : Il est consacré aux deux phénomènes de l'érosion et de dispersion des sols fins : origine, typologie et caractérisation

Troisième chapitre : Ce chapitre aborde les pathologies courantes causés par l'érosion et la dispersion des sols fins. Des exemples réels vont être présentés.

Quatrième chapitre : Ce dernier chapitre présente les différentes méthodes de stabilisation des sols fins vis-à-vis des phénomènes de d'érosion et surtout de dispersion, ce qui est de grande rentabilité pour la vie des ouvrages en terre.

Chapitre 1 :

Généralités sur les sols fins

1) Chapitre 1 : Généralités sur les sols fins

Introduction :

Les sols fins, tel que les argiles, les limons, les marnes et les sables fins, présentent des caractéristiques géotechniques complexes qui peuvent causer des dommages aux structures si elles ne sont pas prises en compte correctement lors de la conception des études de sol surtout ceux qui vont être utilisés pour la construction des ouvrages en terre. L'étude poussée des sols fins implique une analyse microscopique détaillée de leur minéralogie, de leur composition chimique et de leurs propriétés physiques (Dubois, J., 2019). Il est également important de comprendre la structure et la texture de ces sols à fins de mieux comprendre leur comportement sous différentes contraintes et dans des différentes situations. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différentes caractéristiques et propriétés des sols fins, en mettant l'accent sur leur complexité géotechnique et leur importance pour la conception et la construction des ouvrages.

1.1. Définition des sols fins :

Ce sont des sols où les éléments fins de diamètre inférieur à 20 μ m prédominent. Les sols fins peuvent englober différents types tel que les argiles, les sables fins, les limons...etc. en général. Leurs propriétés doivent être étudiés avec précaution lors de la construction, afin d'éviter tout dommage de la structure car, ces sols sont très sensibles à toute variation en teneur en eau, ils peuvent augmenter ou diminuer de volume en fonction de leur état d'humidité ou de sécheresse (Aoun, 2016 ; Nardjas D. et Fadila N., 2016), comme ils peuvent également, être entraînés sous l'effet du courant d'eau, ou défoulés en présence d'eau et migrer sous l'effet d'écoulement souterrain.

1.2. Définition des argiles :

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 μ m chargées négativement comme les smectites, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. (Chenini M Bellahcene T. 2021) (Aoun, 2016). Cette sensibilité se traduit par le gonflement et/ou le retrait du sol. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. La variation du volume des argiles est fortement influencée par les facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant. A l'échelle macroscopique, ils dépendent des liaisons électriques entre les particules

Tableau 1 : Tableau montrant la classification des principaux minéraux argileux et leurs espèces (Jasmund et Laghaly 1992).

Groupe de minéraux Argileux	Espèce minérale	Structure T = couche de tétraèdres O = couche d'octaèdres
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux a 2 couches T- O T-O
Smectites	Montmorillonite Saponite Biedellite Nontronitr	Minéraux a 3 couches T- O -T T-O -T
Illites Vermiculites Micas	Illites Vermiculites Muscovite Biotite	H ₂ O. Cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux a 4 couches T- O -T-O T- O - T-O
Sépiolites Palygorskites	Sépiolite (écume de mer) attapulгите	Minéraux en lattes T-O-T T-O-T T-O-T

En effet, la différence entre les types d'argiles réside principalement dans leur structure interne. Les argiles sont des minéraux complexes qui sont constitués de cristaux en couches, appelés feuillets, qui peuvent être empilés les uns sur les autres. Les deux types d'argiles les plus courants sont les argiles à base de silicate d'aluminium, comme la montmorillonite, la kaolinite et l'illite, et les argiles à base de silicate de magnésium, comme la sépiolite et la palygorskite

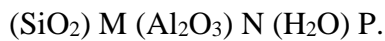
Les argiles à base de silicate d'aluminium ont une structure en feuillets empilés les uns sur les autres, ce qui leur confère une grande capacité d'absorption et d'adsorption. Les feuillets ont des charges électriques négatives, ce qui leur permet d'attirer et de retenir les cations positifs. Cela fait des argiles à base de silicate d'aluminium d'excellents agents de clarification, de filtration et de stabilisation pour les liquides et les sols

Tableau 2 : Pouvoir d'absorption et d'adsorption des argiles (Delcourt, 2011).

	Pouvoir d'absorption	Pouvoir d'adsorption
Montmorillonite	+	+++
Illite	+++	+
Kaolinite	+	+++
Attapulgit	+++	+
Ghassoul	+++	+++

1.3. Définition des minéraux argileux:

Les minéraux argileux sont des minéraux d'argile caractérisés par leur composition chimique de silicates d'alumine hydratés. Ils se forment par la décomposition des feldspaths et des micas, et leur formule chimique générale est de la forme (Nardjas D. et Fadila N., 2016) :



Les particules d'argile sont constituées d'empilements de feuillets, avec deux unités structurales de base : l'unité tétraèdre et l'unité octaèdre. L'unité tétraèdre est composée de quatre ions d'oxygène entourant l'ion de silicium, formant une couche tétraédrique. L'unité octaèdre est composée d'un ion d'aluminium ou de magnésium entouré de six groupes hydroxyle, formant une couche octaédrique. Les couches tétraédriques et octaédriques sont reliées entre elles par des liaisons covalentes au niveau des oxygènes. Les minéraux argileux sont largement répandus dans la nature et sont importants dans de nombreux processus géologiques et environnementaux, tels que la formation des sols, la pollution des sols et des eaux, et la formation de roches sédimentaires. Ils sont également utilisés dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans la fabrication de céramique, de papier, de peintures et de cosmétiques (Lucas, J., 1962).

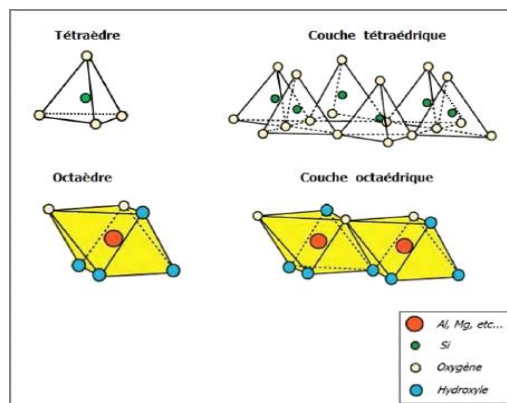


Figure1 : Structure de base des argiles (S. Caillère, 2016)

1.4. Différentes structures d'argile :

Les argiles sont des minéraux argileux complexes qui se forment à partir de roches altérées par des processus géologiques tels que l'érosion, la météorisation, l'altération hydrothermale ou la diagenèse. Les argiles sont constituées de minuscules cristaux plats et fins qui se superposent en feuillets, leur donnant une structure en forme de plaquettes. Les trois principaux groupes d'argiles sont :

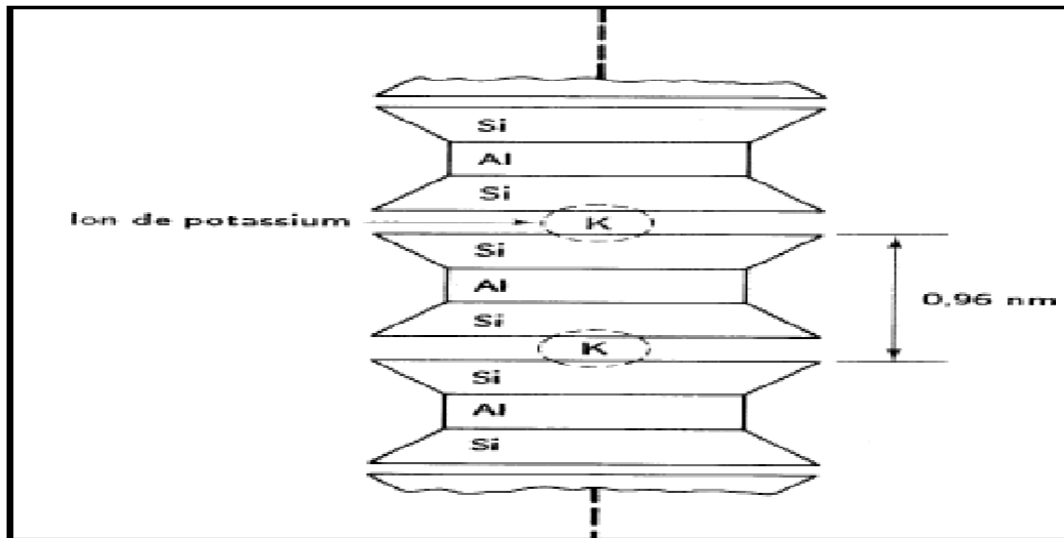


Figure 2 : Schéma de la structure de l'illite D'après (Lambe, 1953)

1.4.1. Les argiles du groupe de l'illite :

L'illite est un minéral argileux qui appartient au groupe des micas. Il est largement répandu dans la nature et possède un diamètre équivalent moyen de 0,3 μm et une épaisseur de 100 Å. L'illite est connue pour sa stabilité par rapport à la montmorillonite, qui est un autre type d'argile appartenant également au groupe des micas. La structure de l'illite est similaire à celle de la montmorillonite, mais avec une différence importante. Une partie des ions de silicium (Si^{4+}) dans les tétraèdres est remplacée par des ions d'aluminium (Al^{3+}) dans l'illite. Ce remplacement peut atteindre jusqu'à 20% dans les tétraèdres. Cette substitution entraîne une modification de la charge électrique de la structure et l'équilibre des charges est rompu. Pour rétablir l'équilibre des charges, des ions de potassium (K^+) sont liés aux feuillets d'illite intercalaires. Cette liaison permet de stabiliser la structure et de rendre l'illite une argile non gonflante contrairement à la montmorillonite qui peut gonfler considérablement en présence d'eau. En résumé, l'illite est une argile du groupe des micas qui se distingue de la montmorillonite par la substitution de l'aluminium pour une partie du silicium dans les tétraèdres et la liaison des ions potassium entre les couches. Cette structure rend l'illite plus stable et non gonflante par rapport à la montmorillonite (Lucas, J., 1962). La structure de l'illite est donnée dans la figure 2 (Lambe, 1953).

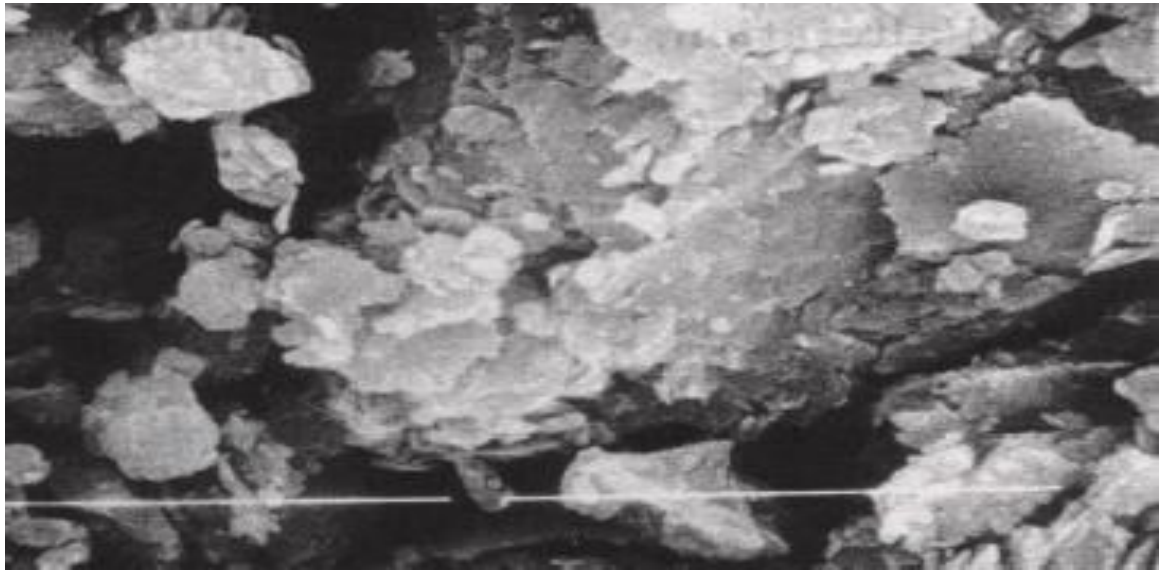


Figure 3 : Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois.
La longueur du trait de lumière est de 5 μm . (Holtz, 1991)

1.4.2. La kaolinite :

La kaolinite est un type d'argile di-octaédrique qui est composé de feuillets empilés avec une épaisseur de 7,2 Å. Lorsque les feuillets de kaolinite sont superposés, les liaisons hydrogène fortes entre les O⁻ présents sur la surface supérieure et les H⁺ de la surface inférieure assurent la stabilité de l'empilement vis-à-vis des actions de l'eau. Cette structure empêche la pénétration de l'eau dans l'espace inter foliaire et la substitution entre les feuillets. En raison de la forte liaison entre les feuillets de kaolinite, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites, qui sont des associations de plusieurs feuillets, sont des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de quelques centaines de nanomètres. En raison de la forte liaison entre les feuillets, la surface spécifique de la kaolinite ne dépasse généralement pas 45 m²/g. Le nombre de feuillets par particule de kaolinite varie de quelques dizaines à quelques centaines, solidement liés les uns aux autres.

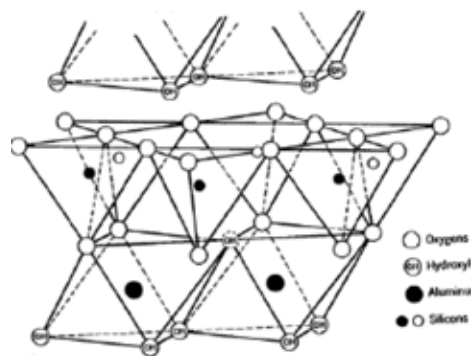


Figure 4 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (Grim, 1986)

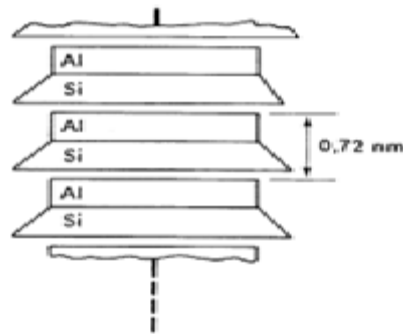
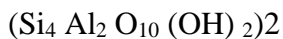


Figure 5 : Schéma de la structure de kaolinite, (Lambe,1953)

1.4.3. Les argiles du groupe des smectites :

Les argiles du groupe des smectites, telles que la montmorillonite, ont une structure en feuillets composés de couches octaédriques et tétraédriques. La formule chimique de la montmorillonite est :



Où Si représente le silicium, Al représente l'aluminium, O représente l'oxygène et OH représente le groupe hydroxyle. La particularité de la montmorillonite réside dans la présence de couches d'eau entre les feuillets, contenant généralement des cations sodium (Na^+) ou calcium (Ca^{2+}) libres. Cette présence d'eau et de cations entraîne un écartement variable des feuillets selon les conditions du milieu. En raison de la présence de charges négatives sur les feuillets, il y a un déficit de charge dans la structure de la montmorillonite. Ce déficit est compensé par la présence de cations échangeables ou compensateurs, tels que Na^+ ou Ca^{2+} , situés entre les feuillets. La capacité d'échange cationique de la montmorillonite est donc importante, ce qui lui confère des propriétés intéressantes pour de nombreuses applications industrielles, notamment dans les domaines de la géologie (Morel R. 1996).

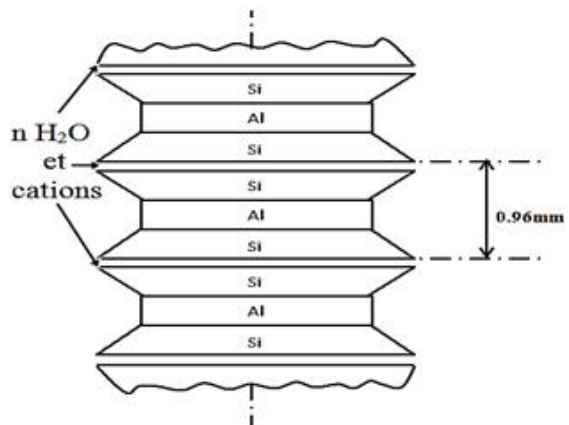
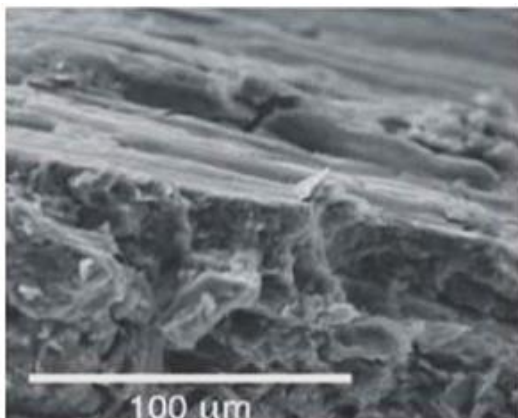


Figure 6 : Structure de la montmorillonite (Holtz. R., 1991).

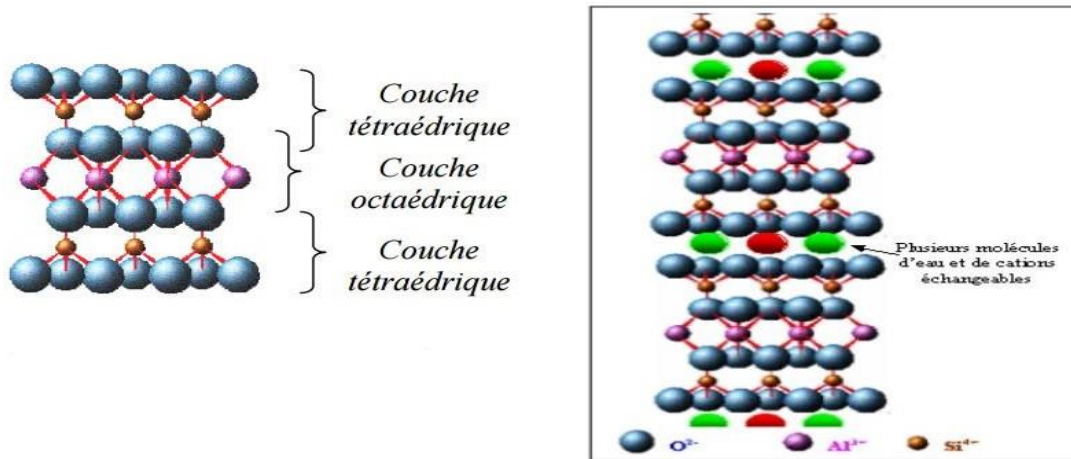


Figure 7 : Structure élémentaire de smectite (Caillère, S., 2016)

1.5. Définition des silts et des limons :

Les silts et les limons sont deux types de sols qui se situent entre les sols sableux et les sols argileux en termes de granulométrie c'est-à-dire de diamètres compris entre 2 et 50 micromètres. Ils sont souvent associés à des matériaux organiques et peuvent contenir des minéraux de quartz, de feldspath, de calcite ou encore de mica (Selon la classification granulométrique de l'USDA (United States Département of Agriculture),

Les silts ont une capacité de rétention de l'eau relativement élevée. Vue leur grande compressibilité, ces types de sol constituent des assises souvent médiocres pour les constructions, ce qui les rend peu adaptés pour des fondations. Ils ont également une faible perméabilité.

Par rapport aux silts, les limons renferment une plus grande proportion de particules argileuses, ils ont une texture douce et veloutée au toucher et ont une capacité de rétention de l'eau élevée. Ils sont souvent riches en minéraux tels que la calcite, le quartz, le mica ou encore l'hématite. De même, les limons sont également peu adaptés pour des fondations à cause de leur faible portance et leur grande compressibilité

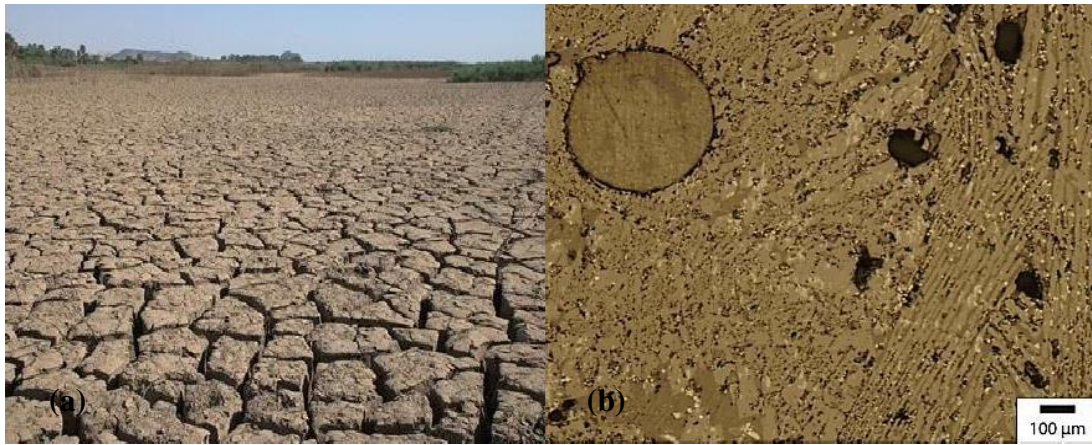


Figure 8 : a : Limon en vue macroscopique (Roy, 2015).

b : Limon à l'échelle microscopique (Stéphane Joly, 2011).

1.6. Définition des sables fins :

Les sables fins sont des particules de sable qui ont une granulométrie fine, généralement inférieure à 0,063 mm de diamètre. Ils sont souvent le produit de l'érosion des roches et des minéraux, ainsi que de l'action des vagues et des courants marins qui les transportent et les déposent sur les plages (Pierre, 2014)



Figure 9 : Sable fin à l'échelle Macroscopique (Roy, 2015)

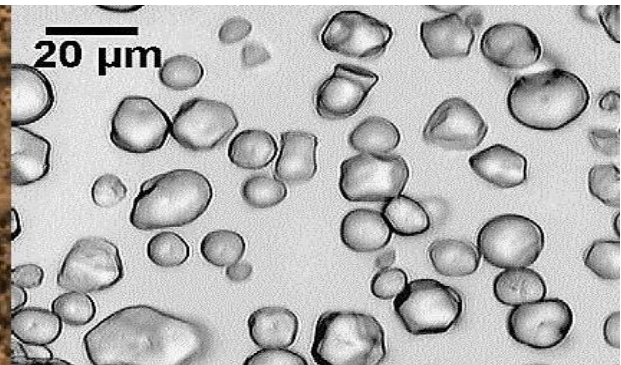


Figure 10 : Sable fin à l'échelle Microscopique (Roy, 2015)

1.7. La microstructure des sols fins :

La microstructure des sols fins est influencée par de nombreux facteurs, comme l'indique la liste de Collins et al.

Tout d'abord, l'acidité du sol peut affecter la charge électrique des particules, ce qui peut influencer la formation de la microstructure. La vitesse de dépôt peut également jouer un rôle important dans la formation de la microstructure, car elle peut affecter l'organisation des particules et leur arrangement (Ferber, V., 2005).

La minéralogie des sols peut également influencer la microstructure, car différents minéraux ont des propriétés chimiques et physiques différentes qui peuvent affecter leur

agglomération et leur organisation. L'état d'agitation de l'eau peut également jouer un rôle important, car elle peut affecter la distribution et l'orientation des particules (Ferber, V., 2005).

La quantité de matière organique peut également avoir un effet significatif sur la microstructure des sols fins. Les particules organiques peuvent se lier aux particules minérales pour former des agrégats plus gros, qui peuvent ensuite s'organiser en structures plus complexes (Ferber, V., 2005).

Les dimensions et les formes des particules peuvent également influencer la microstructure des sols fins, car elles peuvent affecter leur arrangement et leur organisation. De même, les caractéristiques et les charges électriques des ions échangeables peuvent jouer un rôle important, car elles peuvent influencer les interactions entre les particules.

Enfin, l'histoire des sollicitations, telles que le séchage, le mouillage, les charges mécaniques, etc., ainsi que le mode de dépôt et les caractéristiques électrochimiques de l'électrolyte au moment du dépôt du sol peuvent également influencer la microstructure des sols fins. Tous ces facteurs peuvent contribuer à la formation de la microstructure des sols fins, qui peut avoir des implications importantes pour les propriétés géotechniques et environnementales des sols (Ferber, V., 2005).

1.8. La structure des sols fins :

La structure des sols fins : se réfère à la manière dont les particules du sol sont arrangées les unes par rapport aux autres. Elle est définie comme le mode d'assemblage des particules du sol en agrégats ou en blocs, ainsi que la manière dont ces agrégats sont liés entre eux (Ammeri, A., et al 2008).

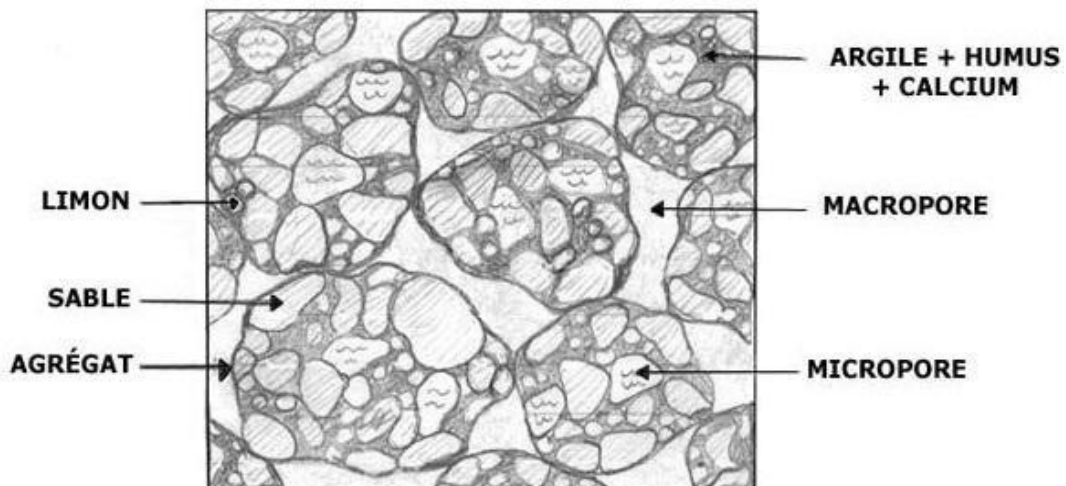


Figure 11 : Structure générale du sol fin (Fort, 2014).

1.8.1. La structure compact :

Dans ce cas, le sol est caractérisé par une forte densité et une faible porosité, ce qui rend le sol imperméable à l'air et à l'eau. Cette structure se forme souvent lorsque les particules de sable sont noyées dans une masse d'argile (Ammeri, A., et al 2008).



Figure 12 : Structure compacte du sol fin (Fort, 2014).

1.8.2 La structure particulaire :

Pour cette structure, le sol se caractérise par des particules de tailles variables sans aucune liaison entre elles. Cette structure est souvent formée par des particules de sable, qui sont très grosses, ou de limon, qui sont plus petites que le sable, mais plus grandes que les particules d'argile (Amerri, A., et al 2008).

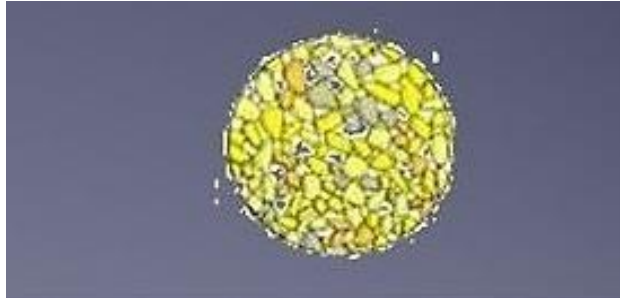


Figure 13 : Structure particulaire du sol fin (Fort, 2014)

1.9. La texture des sols fins :

La texture des sols fins est déterminée par la proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol. Les particules sont classées en argiles ($<2\mu\text{m}$), limons fins (2-50 μm) et sables fins (50-2000 μm), (Atlan, Y., & Feller, C. 1980).

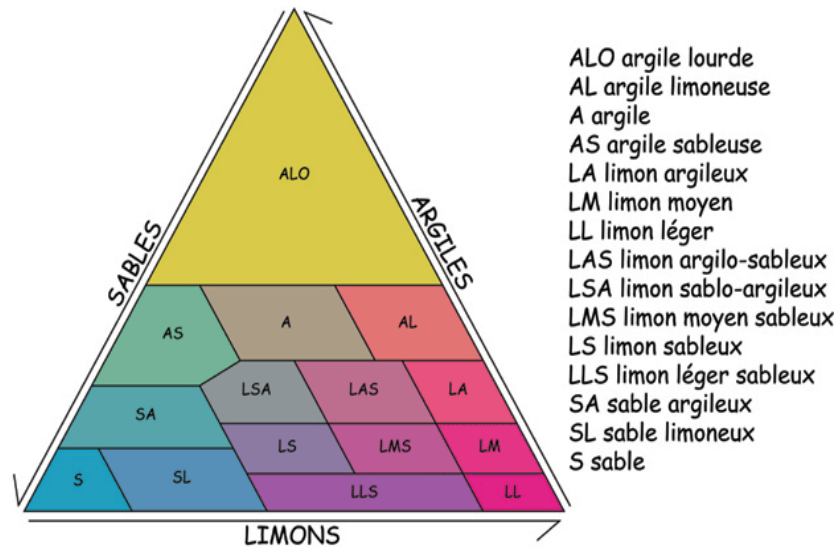


Figure 14 : Triangle de texture (Maëva Bourgeois, 1992).

1.10 Principaux problèmes des sols fins :

Ces sols présentent plusieurs problèmes, notamment :

1.10.1 Gonflement et retrait : Les sols fins ont tendance à gonfler lorsqu'ils sont exposés à l'eau et à se rétracter lorsqu'ils s'assèchent. Ce phénomène peut entraîner des dommages aux fondations des bâtiments et des infrastructures (Murthy, 2013).

1.10.2 Faible capacité de support : en raison de leur texture fine, les sols fins ont une capacité de support relativement faible. Cette caractéristique rend ces sols moins adaptés pour supporter des charges importantes, telles que les structures de construction et les infrastructures routières, sans la mise en place de mesures de renforcement appropriées.

La faible capacité de support des sols fins est principalement due à leur composition granulométrique dominée par des particules de taille réduite, telles que les argiles et les limons. Ces particules ont une surface spécifique élevée, ce qui augmente leur capacité à retenir l'eau et à se dilater lorsqu'elles sont mouillées. En conséquence, les sols fins ont tendance à présenter une faible cohésion et une résistance au cisaillement réduite, ce qui limite leur capacité à supporter des charges sans déformation excessive.

Pour pallier cette faiblesse, des techniques de renforcement des sols peuvent être utilisées, telles que l'amélioration de la compaction du sol, l'injection de liants chimiques ou la mise en place de géotextiles et de géogrilles pour renforcer la structure du sol et améliorer sa capacité de support (Murthy, 2013).

1.10.3 Risque de glissement : Les sols fins ont également un risque élevé de glissement, en particulier sur des pentes raides. Cela peut causer des problèmes de stabilité pour les infrastructures et par conséquent sur la vie humaine (Murthy., 2013).

1.11. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence les définitions des sols fins, tels que les argiles, les limons, les marnes et les sables fins. Les sols fins présentent une complexité géotechnique importante en raison de leur sensibilité en présence d'eau, ce qui peut engendrer des problèmes pour les ouvrages si ces propriétés ne sont pas prises en compte lors du choix de ces sols comme matériaux de construction surtout pour les ouvrages en terre.

Les argiles, qui sont un type de sol fin, se distinguent par leur structure en feuillets empilés, qui leur confère une grande capacité d'absorption et d'adsorption. Les différentes espèces minérales d'argiles, telles que la kaolinite, la montmorillonite et l'illite, ont des structures et des comportements différents en fonction de leur composition chimique et de leur arrangement cristallin.

En somme, la compréhension des sols fins et de leurs propriétés est essentielle pour la conception et la construction des ouvrages. Une analyse approfondie de la minéralogie, de la composition chimique et des propriétés physiques des sols fins est nécessaire pour évaluer leur comportement sous différentes contraintes et prendre les mesures appropriées afin d'assurer la stabilité des ouvrages.

Chapitre 2 : Erosion et dispersion des sols fins : origine, typologie et caractérisation

Chapitre 2 : Erosion et dispersion des sols fins : origine, typologie et caractérisation

Introduction :

Les sols fins sont particulièrement vulnérables aux phénomènes d'érosion et de dispersion, qui peuvent entraîner des conséquences environnementales et économiques importantes. L'érosion des sols fins, qui peut avoir lieu en surface ou sous terrain, peut être causée par des facteurs naturels tels que l'eau, le vent ou la glace, ainsi que par des facteurs anthropiques tels que les activités agricoles, forestières ou minières. La dispersion des sols fins peut également avoir des conséquences graves, notamment sur la qualité de l'eau, en augmentant la turbidité et en réduisant la capacité de filtration des sols, la dispersion peut également augmenter l'érodibilité des sols. Dans ce chapitre, nous avons abordé les deux phénomènes les plus importants dans le cas des sols fins (l'érosion et la dispersion) qui pouvaient menacer d'une manière très grave la stabilité des ouvrages en terre. Nous avons évoqué leur origine, leur typologie et leur caractérisation. Nous avons également examiné les mécanismes de dispersion, ainsi que les facteurs qui influencent chaque phénomène, tels que la structure du sol, la composition minéralogique, la teneur en certains éléments chimiques qui pouvaient accentuer l'un ou l'autre, tel que le sodium. Les propriétés des eaux interstitielles ont été prises aussi en considération. Enfin, nous avons présenté les différentes méthodes de caractérisation des deux phénomènes notamment l'essai à l'érodimètre, le pinhole test, le crumb test, l'essai chimique et les essais de sédimentation en parallèle (double hydromètre test).

2.1. l'érosion :

De manière générale, l'érosion en surface de la terre est un phénomène de déplacement des matériaux sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité, tous ces agents peuvent en fonction de leur force d'entraînement, peuvent transporter des matériaux de différentes dimensions. Elle causerait annuellement une perte de 25 milliards de tonnes de sol (Brown., Wolf., 1984). Dans le domaine de géotechnique, on s'intéresse beaucoup plus à l'érosion des sols fins, car c'est un phénomène important, elle peut avoir des effets significatifs sur la stabilité des ouvrages soient ceux construits sur ces sols ou bien ceux constitués par ces sols (cas des ouvrages en terre). Les sols fins sont des sols qui contiennent une quantité élevée de particules fines, comme l'argile et le limon. Lorsque ces sols sont exposés à l'eau, ils peuvent se liquéfier et être entraînés par le courant, entraînant une érosion progressive du sol. Cette érosion peut causer un affaissement du sol, un glissement de terrain ou un effondrement de la structure construite par ou sur le sol.



Figure 15 : Rupture par Erosion interne de la digue de Tunbridge, Tasmania

– Australia(2008). (Source : <http://www.geoengineer.org/>)

2.2. L'érosion des sols fins :

L'érosion des sols fins est un phénomène important en géotechnique, car il peut entraîner des problèmes de stabilité des structures souterraines et des fondations. Ce phénomène est caractérisé par le transport de particules du sol, qui peuvent être érodées par l'eau, le vent, ou d'autres forces environnementales. Les sols fins sont particulièrement susceptibles à l'érosion en raison de leur faible cohésion, de leur porosité élevée et de leur faible densité. Les processus d'érosion peuvent être influencés par de nombreux paramètres, tels que la vitesse de l'eau, le type de sol, la teneur en eau du sol, la pente du terrain et les propriétés du sol. La caractérisation des sols érodables ou érosifs est également cruciale pour comprendre et prévenir l'érosion. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la résistance des sols à l'érosion, notamment l'essai de perte de masse, l'essai de micro-chambre, et l'essai de disque rotatif. Ces méthodes permettent de déterminer les propriétés du sol qui sont importantes pour la prévision de l'érosion. La compréhension de l'érosion du sol fin est essentielle pour prévenir les problèmes de stabilité des structures et des fondations. La caractérisation des sols érodables ou érosifs est également importante pour prévoir le phénomène et mettre en place des mesures préventives appropriées (Bouhadeh, M., Bouzid, A., 2018).

2.3. Paramètres influençant le phénomène de l'érosion :

Ils existent plusieurs paramètres qui influencent le phénomène de l'érosion, notamment :

2.3.1. Les précipitations et le ruissellement d'eau : sont des facteurs essentiels qui influencent le phénomène de l'érosion. Lorsqu'il pleut, l'eau de pluie peut entraîner des particules de sol en surface, provoquant leur déplacement et leur transport par le ruissellement. Plus le volume et l'intensité des précipitations sont élevés, plus l'érosion peut être importante (R. P. C. Morgan, M. G. K. van den Berg, and J. N. Quinton 2017).

2.3.2. L'érosion fluviale : elle est particulièrement influencée par les précipitations et le ruissellement. Dans les zones où les précipitations sont abondantes, les cours d'eau peuvent être soumis à un débit d'eau élevé, ce qui augmente la force de ruissellement et peut entraîner une érosion importante des berges et du lit des rivières. Dans les régions arides, les pluies sporadiques peuvent également provoquer des épisodes soudains d'érosion élevée, car le sol sec possède une faible capacité à retenir l'eau et à résister à l'écoulement rapide, ce qui peut mettre en danger les fondations des ouvrages franchissant les oueds (Pont, dalots, ...etc.).

Il est crucial de prendre en compte ces facteurs lors de la conception d'ouvrages en terre ou de l'aménagement du territoire. Les ingénieurs géotechniciens et les spécialistes de l'hydrologie doivent évaluer les caractéristiques climatiques d'une région donnée, y compris les précipitations moyennes, les épisodes de pluies extrêmes et la fréquence des événements de ruissellement, afin de dimensionner adéquatement les ouvrages pour résister à l'érosion. Des études hydrologiques et hydrauliques détaillées sont souvent nécessaires pour évaluer l'impact des précipitations et du ruissellement sur un site spécifique (R. P. C. Morgan, M. G. K. van den Berg, and J. N. Quinton 2017).

2.3.3 La topographie du terrain : la topographie constitue également un facteur important dans l'accentuation de l'érosion des sols. La pente du terrain détermine la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau de pluie ou du ruissellement, ce qui peut avoir un impact significatif sur l'érosion. Une pente plus forte favorise l'écoulement rapide de l'eau, augmentant ainsi sa force de ruissellement. Cela peut entraîner une plus grande capacité d'entraînement des particules de sol, accentuant ainsi l'érosion. De plus, l'écoulement sur une pente peut générer des forces de cisaillement plus importantes sur le sol, ce qui peut également contribuer à son érosion (Reaney, S. M., Bracken, L. J., & Kirkby, M. J. 2014). Dans les études géotechniques, géologiques et hydrogéologiques, la topographie du terrain est généralement représentée sous forme de cartes topographiques ou de modèles numériques d'élévation (MNE). Ces données sont obtenues à partir de levés sur le terrain ou de sources telles que des systèmes d'information géographique (SIG) et des levés aéroportés. L'analyse de la topographie permet de déterminer les pentes du terrain, d'identifier les zones à risque élevé d'érosion et de planifier des mesures de prévention et de gestion (Reaney, S. M., Bracken, L. J., & Kirkby, M. J. 2014).

2.3.4 Le type de sol : joue un rôle crucial dans la sensibilité à l'érosion. Certains sols sont naturellement plus résistants à l'érosion en raison de leur composition et de leur structure, tandis que d'autres sont plus vulnérables (J.O.Akande, M. K. Adeyemo, A.O. Adekanye 2014). Les sols argileux, par exemple, sont généralement plus sensibles à l'érosion en raison de leur texture fine et de leur forte capacité de rétention d'eau. Lorsque ces sols sont exposés à des précipitations abondantes, l'eau peut pénétrer dans les pores du sol, provoquant un gonflement et une réduction de la stabilité. De plus, les sols argileux ont tendance à former une surface lisse et imperméable lorsqu'ils sont secs, ce qui facilite le ruissellement et l'érosion (J.O.Akande, M. K. Adeyemo et A.O. Adekanye 2014). D'un autre côté, les sols sableux et graveleux sont généralement moins sensibles à l'érosion en raison de leur granulométrie plus grossière et de leur meilleure perméabilité. Ces sols permettent un drainage plus efficace de l'eau, réduisant ainsi le risque d'érosion (J. O. Akande, M. K. Adeyemo, A. O. Adekanye 2014).

Il est donc essentiel de connaître la sensibilité des sols à l'érosion, en particulier lorsqu'ils sont utilisés comme matériaux de construction pour les ouvrages en terre, ou lors de l'aménagement du territoire. Des études géotechniques approfondies peuvent être menées pour évaluer la résistance à l'érosion des sols, en utilisant des méthodes telles que des essais de laboratoire, des analyses granulométriques et des évaluations sur le terrain (J. O. Akande, M. K. Adeyemo, A. O. Adekanye 2014)

2.3.5. La végétation : ce paramètre joue un rôle crucial dans la prévention de l'érosion des sols. Lorsqu'une zone est couverte de végétation, les racines des plantes maintiennent le sol en place, ce qui réduit l'impact direct des précipitations sur sa surface. Les plantes agissent comme des barrières naturelles qui ralentissent le ruissellement de l'eau, permettant ainsi une infiltration plus efficace dans le sol (Rajesh P. Mathankar, Prashant R. Wankhade 2016).

La présence de végétation contribue également à améliorer la structure du sol en favorisant son agrégation. Les racines des plantes pénètrent dans le sol, créant des canaux qui permettent une meilleure circulation de l'eau et de l'air. Cela aide à maintenir le sol plus stable et résistant à l'érosion (Rajesh P. Mathankar, Prashant R. Wankhade 2016).

De plus, la couverture végétale agit comme un matelas protecteur, réduisant l'impact direct des gouttes de pluie sur le sol. Les feuilles et les tiges des plantes interceptent les gouttes de pluie, réduisant ainsi la force de l'impact et la détachabilité des particules de sol. La végétation agit également comme un filtre, retenant les particules de sol en suspension dans l'eau de ruissellement et prévenant leur transport (Rajesh P. Mathankar, Prashant R. Wankhade 2016).

2.3.6. L'activité humaine : L'activité humaine n'est plus à négliger car c'est un facteur important qui peut avoir un impact significatif sur l'érosion des sols. Les pratiques agricoles intensives, telles que le labour intensif, l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides, ainsi que la monoculture, peuvent entraîner la dégradation du sol et augmenter sa vulnérabilité à l'érosion. Lorsque le sol est dépourvu de couverture végétale pendant de longues périodes, il devient exposé aux forces érosives de l'eau et du vent, ce qui entraîne une érosion accélérée (Lal, R., 2013).

De même, la construction d'infrastructures, la déforestation et l'exploitation minière entraînent souvent le déplacement de grandes quantités de sol, ce qui expose les zones affectées à un risque élevé d'érosion. Les activités de construction, en particulier lorsqu'elles impliquent l'enlèvement de la végétation et la mise à nu du sol, peuvent perturber l'équilibre naturel du paysage et accroître les taux d'érosion (Lal, R., 2013).

Il est donc essentiel de mettre en place des mesures de gestion appropriées pour minimiser l'impact de l'activité humaine sur l'érosion des sols. Dans le domaine de la construction, des mesures de contrôle de l'érosion telles que l'installation de barrières de protection, la stabilisation des pentes et la gestion des eaux pluviales doivent être mises en œuvre (Lal, R., 2013).

2.3.7. Les facteurs climatiques : jouent un rôle crucial dans le phénomène de l'érosion des sols. Les changements climatiques, tels que les variations des régimes de précipitations, peuvent avoir un impact significatif sur les taux d'érosion. Par exemple, des périodes de fortes précipitations peuvent entraîner un ruissellement intense et une érosion accrue des sols, tandis que des périodes de sécheresse prolongée peuvent rendre les sols plus vulnérables à l'érosion éolienne (P. et al., 2014).

Les phénomènes climatiques extrêmes, tels que les tempêtes, les cyclones et les inondations, peuvent également causer des dommages importants aux sols en provoquant un arrachement des particules du sol et un déplacement des matériaux. Les températures extrêmes et les cycles de gel-dégel peuvent affaiblir les sols en provoquant des expansions et des contractions, ce qui facilite leur érosion (Papagos P., et al., 2014).

Les facteurs climatiques doivent donc être pris en considération lors de l'évaluation et de la gestion de l'érosion des sols. Cela nécessite donc la collecte de données climatiques précises, telles que les régimes de précipitations, les températures et les événements climatiques extrêmes, afin de mieux comprendre les conditions environnementales dans lesquelles se produit l'érosion. Ces informations sont importantes pour la prévention et la gestion de l'érosion, notamment l'aménagement du territoire, la gestion des ressources en eau et la conservation des sols.

2.3.8. La présence d'eau : la présence d'eau peut également avoir un effet sur l'érosion en créant des ruisseaux et des rivières qui peuvent emporter les particules de sol (Boardman, J., Poesen, J., 2006).

2.3.9. La circulation des eaux souterraines : qui peut engendrer de graves problèmes tel que l'érosion interne pour les barrages en terre, la création de cavités souterraines comme le cas de karst, etc. (Boardman, J., Poesen, J., 2006).

2.4. L'origine du phénomène d'érosion :

L'érosion est un processus naturel qui implique l'usure et la dégradation des sols et des roches par les agents externes tels que l'eau, le vent et la glace, le gel et dégel ... etc. Les principales causes sont déjà énumérées ci-dessus. C'est donc, un phénomène qui a lieu sur l'ensemble de la croûte terrestre et se produit à des échelles de temps et d'espace différentes. Par exemple, l'érosion peut se produire lentement sur des milliers d'années pour les formations résistantes, ou elle peut être rapide et se produire en quelques heures lors d'une tempête violente dans le cas des formations tendre et pulvérulentes (Atlan, Y., & Feller, C. 1980).

Tableau 3 : L'origine du phénomène d'érosion (Atlan, Y., & Feller, C. 1980).

Origine de l'érosion	Description
Érosion hydrique	Cause principale de l'érosion des sols, due à l'action des pluies, des rivières et des vagues de l'océan
Érosion éolienne	Cause de l'érosion des sols causée par le vent, qui souffle et emporte les particules de sol
Érosion glaciaire	Cause de l'érosion des sols causée par les glaciers, qui se déplacent et arrachent les particules de sol
Érosion anthropique	Cause de l'érosion des sols causée par l'activité humaine, telle que l'exploitation forestière, l'agriculture intensive, la construction de routes et de bâtiments, etc.

2.5. La caractérisation des sols érodables : en géotechnique est importante pour évaluer leur résistance à l'érosion et leur stabilité face à ce phénomène. Les caractéristiques importantes à considérer pour la caractérisation des sols érodables sont :

2.5.1. La granulométrie des sols : joue un rôle essentiel dans leur érodibilité. La distribution des tailles de particules dans le sol influence sa capacité à résister à l'érosion. Les particules plus fines, telles que l'argile et le limon, sont plus susceptibles d'être transportées par les agents d'érosion tels que l'eau et le vent. En revanche, les particules plus grossières, comme le sable et le gravier, sont plus résistantes à l'érosion (I.P. Abrol, J.S.P. Yadav et F.I., 2003).

La granulométrie des sols peut être caractérisée par des analyses de laboratoire, telles que le tamisage et la sédimentométrie, qui permettent de déterminer la distribution des tailles de particules. Cette information est ensuite utilisée pour évaluer l'érodibilité du sol et prédire son comportement face à l'érosion (I.P. Abrol, J.S.P. Yadav et F.I., 2003).

2.5.2. La cohésion : la cohésion du sol est une mesure de sa résistance à la rupture, et les sols ayant une faible cohésion ont tendance à être plus érodables. La cohésion est exprimée en Pascal (Pa) et est généralement mesurée par des essais de cisaillement en laboratoire

2.5.3. L'angle de frottement interne : cet angle mesure la résistance d'un sol à la compression et à la déformation. Les sols ayant un angle de frottement interne plus faible sont plus susceptibles d'être érodables

2.5.4 La porosité : est un autre facteur important dans la caractérisation des sols érodables. Elle représente le volume des vides ou des pores présents dans un sol par rapport à son volume total. Les sols ayant une porosité plus élevée ont généralement une plus grande capacité à retenir

l'eau, mais ils peuvent aussi être plus vulnérables à l'érosion (S. Chandrasekharan, K. Ramasamy et A. N. V. Satyanarayana., 1994).

2.6. La structure du sol : la structure du sol peut également jouer un rôle important dans l'érosion, car les sols ayant une structure lâche ou instable sont plus susceptibles d'être érodables.

En général, la caractérisation des sols érodables est réalisée à travers des tests de laboratoire et des essais in situ tels que des essais de percolation, des essais d'absorption d'eau, etc. Ces tests permettent d'obtenir des données sur les caractéristiques physiques et mécaniques du sol, ce qui est utile pour évaluer leur résistance à l'érosion

2.7. Typologie de l'érosion :

2.7.1. L'érosion externe : en géotechnique peut être classée en plusieurs types en fonction de la nature des forces environnementales qui la provoquent :

2.7.1.1. L'érosion hydrique : est l'un des types d'érosion les plus répandus en géotechnique. Elle est causée par l'eau, qu'elle soit sous forme de pluie, d'inondations, de rivières ou de vagues. Lorsque l'eau tombe sur le sol, elle peut être absorbée par le sol ou s'écouler en surface. Lorsqu'elle s'écoule en surface, elle peut entraîner avec elle des particules de sol, provoquant ainsi l'érosion. Cette érosion peut causer des dommages importants, tels que l'effondrement de bâtiments et de structures, la formation de ravines et la déstabilisation des pentes.

Les effets de l'érosion hydrique peuvent être aggravés par d'autres facteurs tels que la pente du terrain, la nature du sol, la végétation, les précipitations et la géomorphologie du bassin versant. Par exemple, une pente abrupte peut favoriser l'écoulement rapide de l'eau, augmentant ainsi le risque d'érosion. De même, un sol non cohérent peut être plus vulnérable à l'érosion que les sols cohérents (Diakakis, M., Deligiannakis, G.,2015).



Figure 16 : Une photo réelle représentant l'effondrement du pont à Jijel en raison de l'érosion hydrique (www. jjeleljadida.dz ,2019)

2.7.1.2. L'érosion éolienne : c'est le type d'érosion qui est causé par le vent, qui peut transporter les particules fines du sol sur de longues distances. Ce type d'érosion est souvent observé dans les régions arides et les déserts

2.7.1.3. Érosion glaciaire : Les glaciers peuvent éroder les couches superficielles du sol et des roches en les grattant et en les broyant sous leur poids. Cette érosion peut entraîner des mouvements de terrain, des glissements de terrain et des avalanches, ce qui peut compromettre la sécurité des infrastructures construites dans ces zones. De plus, la fonte des glaciers peut entraîner des inondations et des crues soudaines, qui peuvent endommager les digues, les barrages et les ponts (Bajracharya, S. R., Mool, P. K., Shrestha, B. R., 2011).

2.7.1.4. L'érosion anthropique : est un type d'érosion qui est causé par les activités humaines qui perturbent l'équilibre naturel de l'environnement. Elle peut prendre plusieurs formes, telles que l'exploitation minière, la construction de routes et de bâtiments, la déforestation, l'agriculture intensive et l'extraction de sable et de gravier

L'exploitation minière est une source majeure d'érosion anthropique, car elle implique souvent la suppression de grandes quantités de sol et de roches, qui peut entraîner une érosion accrue. La construction de routes et de bâtiments peut également causer une érosion importante en perturbant la couverture végétale et en créant des surfaces imperméables qui augmentent le ruissellement de l'eau. La déforestation peut causer une érosion en exposant le sol aux

éléments, en réduisant la capacité du sol à retenir l'eau et en perturbant les habitats naturels (Prokop, P., & Stanko, S., 2016).

Il existe également d'autres types d'érosion externe tels que l'érosion thermique due à la chaleur, l'érosion par les avalanches, ou encore l'érosion par les marées. La compréhension des différents types d'érosion est importante pour pouvoir évaluer les risques et mettre en place des mesures de prévention et de protection contre l'érosion.

2.7.2. l'érosion interne : se produit lorsqu'il y a un écoulement d'eau à travers un matériau granulaire (tel que des sols ou des roches fissurées) qui entraîne le transport de fines particules à l'intérieur de ce matériau. Cela peut entraîner une réduction de la perméabilité et de la résistance du matériau, augmentant ainsi le risque de rupture ou de glissement (Vardanega, P., Simonini, P., 2003). en géotechnique peut être classée en plusieurs types en fonction de la cause ou du mécanisme de l'érosion :

2.7.2.1. Le phénomène de renard : est un processus d'érosion interne qui se produit avec l'augmentation des vitesses d'écoulement de l'eau sous une fondation ou un remblai. L'eau atteint localement des vitesses susceptibles d'entraîner progressivement les éléments les plus fins du sol et augmente ainsi le débit. Progressivement des éléments plus gros sont entraînés, l'arrachement des particules progresse vers l'amont générant un conduit depuis l'aval (figure 3). Le phénomène peut s'arrêter si par manque de cohésion le conduit s'effondre. Dans le cas contraire, l'érosion progresse jusqu'à l'amont, l'eau s'engouffre et désorganise le sol, c'est le phénomène de renard qui est difficilement détectable et à évolution très rapide.

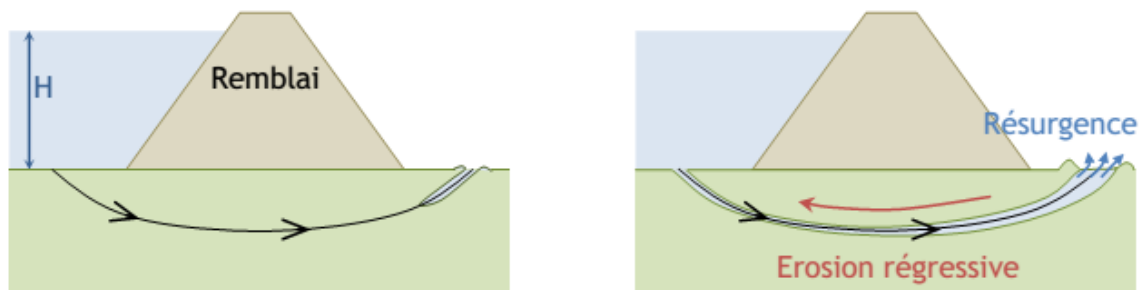


Figure 17: Illustration en deux phases du phénomène de renard en fondation référence article de Clément Desodt – Hélène Horsin Molinaro 2016

2.7.2.2 L'érosion interne par filtration : les digues et les fondations en contact avec des eaux souterraines. Ce type d'érosion est dû au transport de fines particules du sol par l'eau à travers les pores du matériau, ce qui peut entraîner une diminution de la résistance et de la stabilité de la structure.

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'érosion interne par filtration, notamment la granulométrie et la distribution des particules du sol, la porosité du matériau, la perméabilité du sol, la teneur en eau et la pression hydraulique. La présence d'une charge hydraulique importante peut également augmenter la probabilité de ce phénomène (Bouassida, M., Abbas, C., & Sassi, S., 2014).

2.7.2.3. Érosion interne par écoulement : L'érosion interne par écoulement est un phénomène courant en géotechnique qui se produit dans les sols meubles, tels que les remblais et les talus. Ce type d'érosion se produit lorsque l'eau s'infiltré dans le sol et s'écoule à travers les vides, entraînant les particules fines du sol avec elle. Les vides dans le sol peuvent être causés par la compaction insuffisante du sol ou par la présence de fractures ou de fissures. L'érosion interne par écoulement peut entraîner la formation de cavités et de canaux dans le sol, ce qui peut avoir un impact négatif sur la stabilité des structures construites sur ou dans le sol.

La prévention de l'érosion interne par écoulement est essentielle pour assurer la stabilité à long terme des structures géotechniques. Les mesures préventives peuvent inclure la compaction adéquate du sol, l'utilisation de matériaux de remblai appropriés, la construction de drains et la conception de systèmes de drainage appropriés. La caractérisation des propriétés du sol, telles que la porosité, la perméabilité et la résistance à la compression, est également importante pour prévoir l'érosion interne par écoulement et mettre en place des mesures préventives appropriées (G. P. Raymond, P. M. Byrne, J. K. Mitchell.,2000).

2.7.2.4. Érosion interne par cisaillement : c'est le type d'érosion qui se produit lorsque les couches de sol se déplacent les unes par rapport aux autres, entraînant ainsi l'érosion de certaines couches de sol.

Ce type d'érosion est souvent observé dans les sols argileux et limoneux. se produit lorsque les forces de cisaillement exercées sur un sol en mouvement entraînent la migration de fines particules à travers les vides du sol. Ce phénomène peut être observé dans les barrages, les digues, les remblais et les fondations de ponts. Peut causer une réduction de la capacité portante du sol, augmenter la perméabilité et affaiblir la stabilité globale de la structure. Elle peut également entraîner la formation de cavités dans le sol, qui peuvent conduire à des effondrements (Zou, Y., Chen, S., 2015).

2.7.2.5. Érosion interne par solubilisation : L'érosion interne par solubilisation est un phénomène qui se produit lorsque les sels dissous dans l'eau souterraine dissolvent les particules du sol, entraînant ainsi l'érosion des couches de sol. Les sols susceptibles à ce type d'érosion sont généralement composés de matériaux solubles tels que les roches calcaires ou les gypses

Lorsque l'eau souterraine s'infiltré dans le sol, elle dissout les sels présents dans le sol et transporte les particules dissoutes vers le bas. Au fil du temps, cette dissolution peut créer des vides dans le sol et entraîner l'affaissement du terrain. L'érosion interne par solubilisation peut également entraîner la formation de cavités souterraines, qui peuvent causer des effondrements soudains et dangereux (Singh, S., Singhal, D. C., 2018).

La prévention de l'érosion interne par solubilisation peut être réalisée en limitant l'infiltration d'eau souterraine dans le sol, en utilisant des techniques de drainage appropriées et en évitant la construction de structures dans des zones où l'érosion interne est susceptible de se produire (Kavvas, M. L., Pinder, G. F.,1996).

Des études ont été menées pour comprendre les mécanismes de l'érosion interne par

solubilisation et pour développer des méthodes de prévision de ce phénomène. Les chercheurs ont développé des modèles numériques pour simuler l'érosion interne par solubilisation et pour estimer les taux d'érosion dans différentes conditions. Les techniques d'imagerie géophysique telles que la tomographie électrique ont également été utilisées pour cartographier les zones affectées par l'érosion interne par solubilisation, Ces différents types d'érosion interne peuvent causer des problèmes de stabilité pour les ouvrages en terre et les fondations. La compréhension des mécanismes et des types d'érosion interne est donc essentielle pour la conception et la construction d'ouvrages géotechniques sûrs et durables.

2.8. Généralité sur le phénomène de dispersion des sols :

La dispersion des sols est un processus d'érosion interne particulier. L'érosion interne des sols, est généralement connue par l'action mécanique de l'eau sur le sol. Ce processus, peut se dérouler par plusieurs mécanismes : suffusion (redistribution des particules fines dans le sol sous l'effet d'un écoulement) ; concentration de fuites (détachement de particules de la surface du sol dans une zone de concentration de fuite) ; érosion régressive (détachement des grains de sol sous l'effet de l'élévation du gradient hydraulique et de la vitesse de l'écoulement, le processus se développe de l'aval des ouvrages hydrauliques vers l'amont conduisant ainsi au phénomène de renard); érosion de contact (départ des particules fines sous l'effet de l'écoulement en sens parallèle à l'interface de contact entre un sol granulaire et un sol fin, si les conditions de contrainte hydraulique et de géométrie des particules fines le permettent)

Au-delà de ce type d'érosion, il existe aussi un autre mécanisme d'érosion lié à la nature des sols, et qui est la dispersion, où l'action des forces électrochimiques éloigne les particules les unes des autres dans le fluide. Le mécanisme est régi par les forces de répulsion qui engendrent l'extension de la double couche Les mécanismes responsables du passage d'une substance colloïdale initialement floculée vers une forme dispersée peuvent être de nature physique, chimique, ou physicochimique (Sherard et al. 1976) expliquent que la principale différence entre une argile dispersive et une argile non dispersive réside dans la nature des cations présents dans l'eau des pores . Les argiles dispersives ont une prépondérance du sodium, tandis que, les argiles non dispersives ont une prépondérance des cations de calcium et de magnésium. D'après (Holmgren et Flanagan 1977) (cité par Pham, 2008), quatre phases régissant le processus de dispersion des argiles sont distingués : l'hydratation, la désaération, le gonflement et finalement la dispersion proprement dite. Le processus est initié par l'hydratation et la désaération qui conduisent à la séparation des agrégats et de particules de sol non saturé (A. Mehenni, 2015). Le gonflement commence à se développer avant la saturation du sol et peut continuer après saturation (A. Mehenni, 2015). Finalement la dispersion proprement dite se produit lorsque le processus de relâchement des particules est suffisamment grand pour produire un fort déplacement relatif entre les particules (feuillet) constituant le sol (Pham, 2008).

2.8.1. Définition des sols dispersifs :

Les sols dispersifs sont l'un des types particuliers (des argiles généralement) dont lesquelles, la fraction d'argile s'érode en présence d'eau par un processus de défloculation. Cela se produit lorsque les forces inter-particulaires de répulsion sont supérieures à ceux de l'attraction afin que les particules d'argile se détachent et vont en suspension (Forrest, 1980), cité par (BELARBI, 2014).

2.8.2. Mécanisme de dispersion :

Lorsque deux particules d'argile sont à proximité les uns des autres, les domaines potentiels se chevauchent, ce qui conduit à la répulsion si les particules sont suffisamment proches. Ces forces de répulsion sont neutralisées par les forces d'attraction. Si les forces répulsives sont plus importantes que les forces d'attraction le sol sera dispersé. Dans les cas où les forces de répulsion sont petites.

2.8.3. Mécanisme d'érosion par dispersion :

Pour mieux expliquer la perturbation qui apparaît à l'intérieur de la microstructure argileuse et qui favorise la dispersion des particules, quatre mécanismes distincts interviennent dans l'érosion par dispersion : l'hydratation, la désaération, le gonflement et finalement la dispersion proprement dite (Holmgren et Flanagan, 1977).

2.8.3.1. L'hydratation et la désaération : sont les premiers processus physiques qui conduisent à la désintégration d'un grumeau de sol non saturé, qui est constitué par un assemblage de particules. L'assemblage est détruit violemment quand l'eau moléculaire arrive à sa position d'équilibre, du point de vue énergétique, à la surface des particules. De plus, si le front d'hydratation pénètre à l'intérieur du sol, l'air subit une compression qui engendre une pression. Les deux processus, hydratation et désaération, continuent jusqu'au moment où l'argile est complètement mouillée et que toutes les bulles d'air se sont échappées (sol complètement saturé). Le matériau qui en résulte perd sa structure initiale. Ces processus sont très rapides, habituellement ils durent quelques minutes là où le sol est effectivement en contact avec l'eau (Martin, A., Durand, P., & Tremblay, R.2017).

2.8.3.2. Le gonflement et la désagrégation : constituent la deuxième étape du phénomène de destruction d'un sol par dispersion. Le gonflement apparaît lorsque la concentration ionique à l'intérieure de la phase solide (matrice de sol) est plus grande que celle de la solution qui l'entoure (liquide d'érosion) (Dupont, L., Smith, J., & Leblanc, G., 2020). Autrement dit, les micelles argileuses étant entourées d'un essaim d'ions retenus par attraction électrostatique, il existe une différence de concentration en électrolytes entre la solution et le voisinage immédiat des particules. L'eau a, par conséquent, tendance à réagir en vue d'une égalisation des concentrations. Il se produit en quelque sorte une pénétration de l'eau dans les pores, ce qui se traduit par une pression osmotique plus élevée, qui provoque la dilatation de la masse de sol (Dupont, L., Smith, J., & Leblanc, G., 2020).

2.8.3.3. La concentration ionique dans la solution interstitielle du sol a deux origines : l'existence de sels libres (ions non liés électro statiquement à des micelles d'argile) dans l'eau interstitielle et l'existence d'ions neutralisés par les charges électriques localisées à l'intérieur des particules. Le gonflement développé par les sels libres diminue au fur et à mesure que ces sels sont lavés par l'action de l'eau (dissolution) (Dupont, L., Martin, A., & Tremblay, R.2017). Les ions liés ne peuvent pas être libérés par diffusion. Par conséquent, les particules de sol retiennent de l'eau et des sels. Le sol s'imprègne d'eau et gonfle, les particules se séparent progressivement et les forces d'attraction diminuent en intensité. Le résultat de ce processus est la fissuration de la masse solide.

2.8.3.4. La dispersion proprement dite : se produit lorsque le processus de relâchement des particules est suffisamment grand pour produire un fort déplacement relatif entre les particules (feuillet) constituant le sol. Selon le comportement observé on qualifiera cette dispersion comme une défloculation ou une dissolution.

Le schéma ci-dessus (Figure 4) résume les différents types d'érosion interne (Blais, 2005 in Bouziane Zineb, 2014).

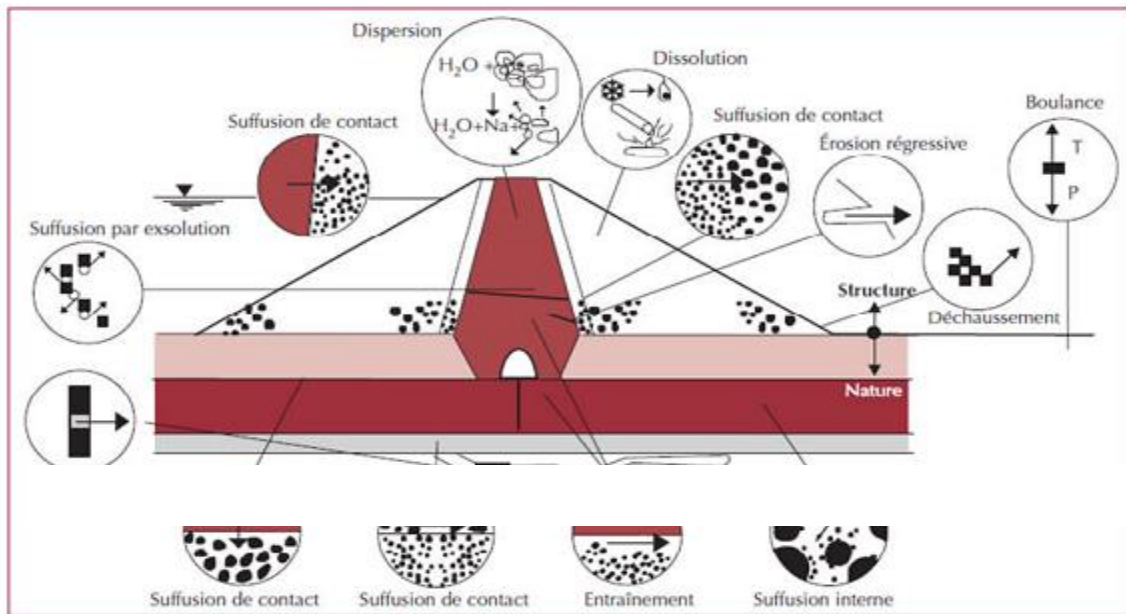


Figure 18 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateur de l'érosion interne dans un barrage (Blais, 2005).

2.9. Paramètres influençant le phénomène de dispersion :

2.9.1. La teneur en argile : est un des paramètres les plus importants qui influence le phénomène de dispersion. En effet, plus la teneur en argile est élevée, plus les particules d'argile ont tendance à se lier fortement entre elles et à former des agrégats volumineux. Toutefois, en présence d'eau, les forces de répulsion électrostatiques entre les particules d'argile peuvent être plus fortes que les forces de cohésion, ce qui peut entraîner la désagrégation des agrégats et la dispersion des particules d'argile en suspension. Ainsi, plus la teneur en argile est élevée, plus le risque de dispersion est important. (BELARBI, 2014).

Tableau 4 : qui montre l'effet de la teneur en argile sur la susceptibilité à la dispersion pour différents types de sols (Belarbi, 2014)

Type de sol	Teneur en argile	Risque de dispersion
Sable	Faible	Faible

Limons	Modérée	Modérée
Argile	Élevée	Élevée

En somme, il est important de prendre en compte la teneur en argile lors de l'évaluation du risque de dispersion des sols et de mettre en place des mesures préventives pour limiter les impacts négatifs de ce phénomène sur l'environnement et les infrastructures.

2.9.2. Le pH : qui mesure l'acidité ou la basicité d'une solution, peut également avoir un impact sur le phénomène de dispersion des sols fins. En effet, un pH élevé peut favoriser la dispersion en réduisant la charge électrique négative de la surface des particules d'argile. Ceci peut être dû à une diminution de la concentration en ions hydrogène (H⁺) dans la solution, ce qui réduit la compétition entre les ions H⁺ et les cations présents à la surface des particules d'argile pour occuper les sites d'échange ionique. Ainsi, la réduction de la charge électrique négative diminue la répulsion électrostatique entre les particules et favorise leur rapprochement, pouvant conduire à la formation d'agrégats et de

2.9.3. la salinité de l'eau : peut influencer la dispersion des sols argileux. Lorsque l'eau est salée, elle peut réduire la charge électrique négative de la surface des particules d'argile, ce qui peut entraîner une augmentation de la dispersion. Selon la concentration de sel dans l'eau, l'effet sur la dispersion peut varier (Smith, J., Martin, A., & Dupont, L. 2018)

Des études ont montré que la salinité a un impact significatif sur la dispersion des sols argileux. Par exemple, une étude menée par Chappell et Wallis (1984) a examiné les effets de la salinité sur la dispersion des sols argileux de l'Australie occidentale. Les résultats ont montré que la dispersion des sols a augmenté avec la salinité de l'eau d'irrigation (Chappell, A., & Wallis, M., 1984).

En résumé, la salinité de l'eau peut être considérée comme un paramètre important à prendre en compte dans l'évaluation du risque de dispersion des sols argileux.

2.9.4. La composition minéralogique de l'argile : peut influencer le phénomène de dispersion. Certaines argiles contiennent des minéraux tels que la smectite qui ont une structure cristalline en couches avec des ions échangeables entre les couches. Ces argiles sont plus susceptibles de se disperser car les ions échangeables peuvent être remplacés par des ions de charge opposée dans l'eau, ce qui réduit la force de répulsion entre les particules d'argile. D'autres argiles, comme la kaolinite, ont une structure cristalline en feuillets qui est moins susceptible de se disperser en raison de la faible teneur en ions échangeables .

2.9.5. La présence d'ions divalents : Les ions divalents tels que le calcium (Ca²⁺) et le magnésium (Mg²⁺) peuvent jouer un rôle important dans la dispersion des particules d'argile.

En effet, ces ions ont la capacité de se lier aux charges négatives présentes à la surface des particules d'argile, réduisant ainsi la répulsion électrostatique entre elles. En conséquence, les particules d'argile sont plus susceptibles de se détacher et d'entrer en suspension dans l'eau en présence d'ions divalents (Chen, H., Dubois, M., & Leblanc, G. 2016).

Des études ont montré que la concentration d'ions divalents dans l'eau peut avoir un impact significatif sur la dispersion des particules d'argile. Par exemple a examiné l'effet de la concentration de Ca^{2+} sur la dispersion des particules d'argile d'un sol salin en utilisant des tests de dispersion en tube. Les résultats ont montré que la dispersion des particules d'argile augmentait avec la concentration de Ca^{2+} dans l'eau (Chen, H., Dubois, M., & Leblanc, G. 2016).

En outre, l'interaction entre les ions divalents et les particules d'argile peut également affecter la structure du sol et sa capacité à retenir l'eau. Par exemple, la présence d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} peut causer la formation de ponts ioniques entre les particules d'argile, ce qui peut augmenter la cohésion du sol et réduire sa porosité (Chen et al., 2016).

En conclusion, la présence d'ions divalents peut avoir un effet significatif sur la dispersion des particules d'argile, ainsi que sur la structure et la capacité de rétention d'eau du sol. Il est donc important de prendre en compte la concentration de ces ions dans l'eau lors de l'évaluation des risques de dispersion des sols argileux (Chen, H., Dubois, M., & Leblanc, G. 2016).

2.9.6. La vitesse de l'eau : est un autre paramètre important qui peut influencer la dispersion des particules d'argile. Une vitesse d'écoulement élevée peut agir sur les particules d'argile en suspension et les faire entrer en collision les unes avec les autres, ce qui peut provoquer leur dispersion. Cela est particulièrement vrai dans les rivières et les zones côtières où les courants sont forts. Cependant, une vitesse d'écoulement excessive peut également entraîner la perte de sol et l'érosion des berges, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur l'environnement et les activités humaines (Lal, R., 1998).

Il est important de comprendre les facteurs qui influencent la dispersion pour pouvoir mettre en place des mesures préventives et de gestion efficaces.

2.10. Caractérisation des sols dispersifs : Une identification d'un sol est obligatoire avant la construction de n'importe quel ouvrage en terre, les argiles dispersives doivent être détectées en premier parce qu'ils ont tendance à être très sensible à l'érosion spécialement en présence d'eau. Sachant que la dispersion d'un sol dépend de plusieurs variables tels que la minéralogie des argiles en premier lieu, la composition chimique et la concentration en sel des eaux interstitielles.

Afin de déterminer la dispersion des sols argileux, un certain nombre d'essais peut être effectué :

2.10.1. L'analyse granulométrique : est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour caractériser les sols (Bouyoucos, G. J., 1962). Cette méthode permet de déterminer la distribution granulométrique des particules du sol. Elle consiste à tamiser le sol à travers une

série de tamis de différentes tailles, puis à peser la quantité de matière retenue par chaque tamis. Les résultats de l'analyse granulométrique sont ensuite utilisés pour calculer la courbe granulométrique du sol, qui représente la distribution des tailles de particules dans le sol (Bouyoucos, G. J., 1962).

Dans le cas des sols dispersifs, l'analyse granulométrique montre généralement une teneur élevée en argiles fines ($<2 \mu\text{m}$) et une faible teneur en sables ($>63 \mu\text{m}$). Les sols dispersifs sont souvent caractérisés par une courbe granulométrique dominée par les fractions d'argiles fines. La caractérisation des sols dispersifs est importante dans le domaine de la géotechnique, en particulier pour la conception de fondations et de structures en contact avec le sol. Les sols dispersifs peuvent avoir des propriétés mécaniques différentes des sols non-dispersifs, ce qui peut avoir des implications sur la stabilité des structures (Bouyoucos, G. J., 1962).

Il existe différentes normes et méthodes pour réaliser une analyse granulométrique, notamment la norme NF EN ISO 17892-4 :2018 pour la détermination de la granulométrie des sols par tamisage et la méthode de dispersion de Bouyoucos pour la détermination de la teneur en argiles.

2.10.2. Les essais d'absorption d'eau : sont souvent utilisés pour caractériser les propriétés hydrauliques des sols, notamment leur capacité à absorber l'eau. Cette capacité d'absorption d'eau peut être affectée par la présence de particules fines dans les sols dispersifs. En effet, les particules fines peuvent obstruer les pores du sol, réduisant ainsi la capacité du sol à absorber l'eau (Bouyoucos, G. J., 1962).

Les essais d'absorption d'eau consistent généralement à mesurer la quantité d'eau absorbée par un échantillon de sol sec en fonction du temps. Dans ces essais, un échantillon de sol est placé dans un récipient et saturé d'eau. La quantité d'eau absorbée est ensuite mesurée à des intervalles réguliers en pesant l'échantillon de sol. La capacité d'absorption d'eau est déterminée en divisant la quantité d'eau absorbée par la masse initiale de l'échantillon de sol.

Pour les sols dispersifs, les résultats des essais d'absorption d'eau peuvent être plus élevés que pour les sols non-dispersifs en raison de leur capacité à absorber rapidement l'eau. Cela peut être dû à la présence de particules fines qui augmentent la surface spécifique du sol, favorisant ainsi l'absorption d'eau (Bouyoucos, G. J., 1962).

10.3 Essais de conductivité hydraulique : il est important de noter que la conductivité hydraulique d'un sol n'est pas directement liée à sa dispersive. Cependant, il est vrai que les sols dispersifs ont tendance à être plus poreux et donc à avoir une conductivité hydraulique plus élevée que les sols non dispersifs.

Pour mesurer la conductivité hydraulique d'un sol, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, telles que les essais de perméabilité en laboratoire ou les essais de pompage sur le terrain. Ces essais consistent à mesurer la vitesse à laquelle l'eau s'écoule à travers le sol sous une certaine charge hydraulique. Les résultats obtenus permettent de calculer le coefficient de perméabilité du sol, qui représente sa capacité à laisser passer l'eau.

2.10.4. Les essais de stabilité structurale : sont utilisés pour déterminer la résistance des sols à la dispersion en présence d'eau. Dans ces essais, une masse donnée de sol est saturée en eau, puis agitée pendant une durée déterminée. La stabilité structurale est mesurée en fonction de la quantité de particules de sols dispersées qui restent en suspension dans l'eau après agitation.

Les sols dispersifs ont généralement une faible stabilité structurale, car ils contiennent une proportion élevée de particules d'argile fines qui ont une forte capacité à se disperser en présence d'eau. Les essais de stabilité structurale sont donc un moyen important de caractériser les sols dispersifs et de déterminer leur potentiel à se disperser.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser des essais de stabilité structurale, y compris le test du tube en U, le test du tamis secouant, le test de dispersion du sol sur plaque et le test de la turbidité. Chacune de ces méthodes a ses propres avantages et inconvénients, et le choix de la méthode dépend souvent de la nature du sol et de l'objectif de l'analyse.

2.10.5. Pinhole test : Nommé aussi l'essai de Trou D'épingle, le principe de cet essai consiste à faire circuler de l'eau distillée dans un petit trou de 1mm de diamètre pratiqué dans un échantillon du sol :

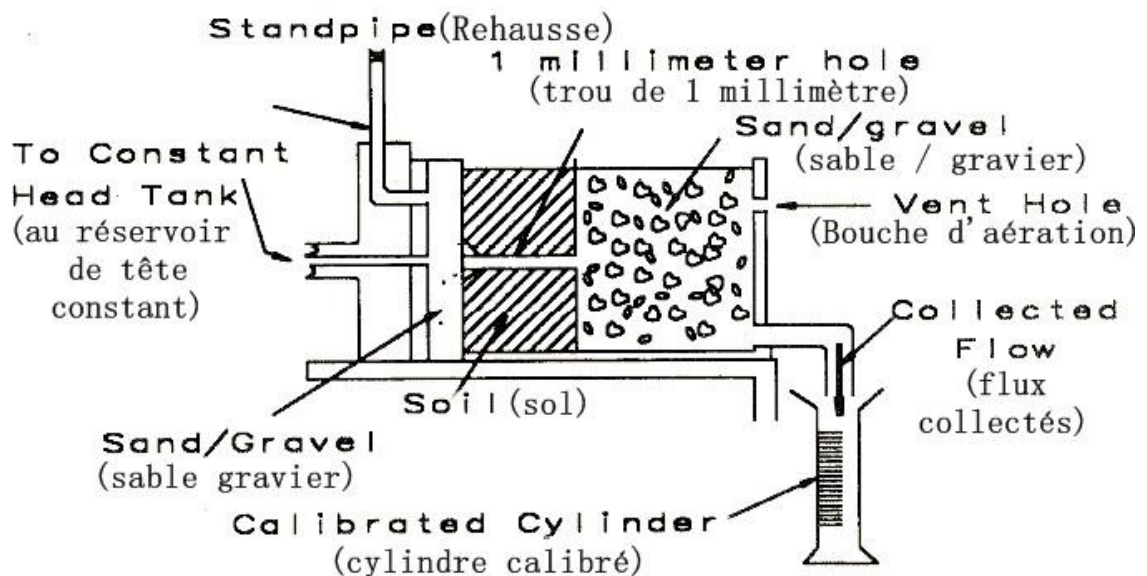


Figure 19 : Détail de la cellule de Pinhole test (NELSON, 1991)

2.10.6. Crumb test :

Surnommé aussi Essai d'Emiettage, le principe de cet essai est basé seulement sur des observations qualitatives directes. Comparativement avec les autres tests, cet essai est considéré comme plus simple et facile on l'utilise souvent comme complément aux autres tests. L'essai n'est pas applicable pour des sols dont le pourcentage des fines (<0,005 mm) est inférieur à 12% ; ainsi pour les sols dont l'indice de plasticité est inférieur à 8%.

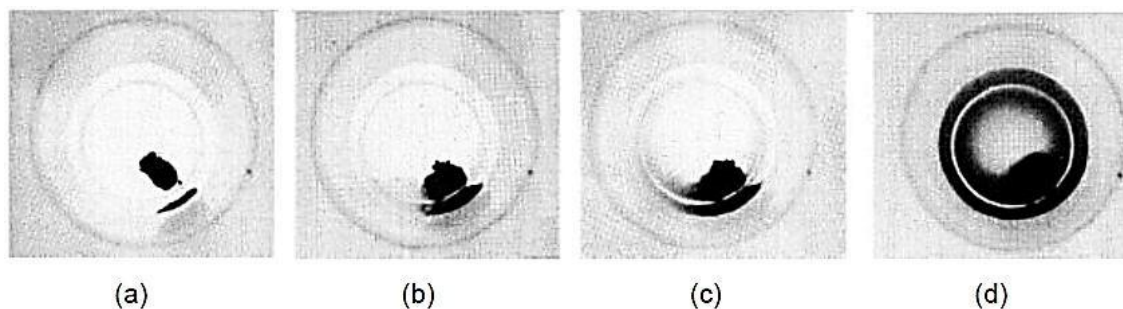


Figure 20: Essai typique du Crumb test (Nelson, 1991), cité par (BELARBI, 2014).

2.11. L'essai chimique : Il s'agit des essais sur l'eau interstitielle, dont lesquels les quantités des principaux sels en solution sont assimilés à un ensemble d'éléments majeurs comprenant plusieurs cations et anions (Pansu and Gautheyrou, 2006) cité par (BELARBI, 2014)

La détermination au laboratoire des sels solubles du sol passe par trois étapes :

- Leur extraction par l'eau sous différents rapports sol/solution (extrait saturé, extrait aqueux 1/1, 1/5, 1/10,..);
- La mesure de la concentration globale en sels de l'extrait (conductivité électrique, matière solide dissoute) ;
- Le dosage des différents cations contenant dans l'extrait.

2.11.1. Extrait de saturation :

L'essai s'agit de peser 250g ou 500 du sol et malaxer par la teneur en eau de liquidité préalablement déterminer par l'ajout d'eau dessillée et filtrer la pâte sous vide. Ensuite recueillir le filtrat et doser les sels solubles par :

- Spectrophotomètre de flemme pour les cations : K^+ et Na^+
- Spectrophotomètre d'absorption atomique : Ca^{2+} et Mg^{2+} .

2.11.2 Extrait au 1/5 :

Le mode opératoire consiste à mettre 50 g de sol passée au tamis de 2 mm et 250 ml d'eau déminéralisée dans un flacon à agitation durant 1 heure, puis transverse le contenu du flacon dans les tubes à centrifuge durant 5 à 10 minutes à 2000 tours/minute. Enfin filtrer la solution pour doser les sels solubles comme indiquer dans l'extrait à saturation.

Tableau 5 : Classes de dispersion à partir du ESP (Knodel, 1991) cité par (Bouziane, 2014)

ESP	Degré de dispersion
< 7	Non dispersif
7 à 10	Intermédiaire
1>10	Dispersif

2.11.3 Essais de sédimentation en parallèle (Double Hydrometer test):

Les études portant sur la dispersion des sols montrent que les particules fines (<5 μ m) jouent un rôle significatif. L'idée de la méthode utilisée dans l'essai de sédimentation en parallèle est de comparer la tendance des particules fines d'un sol, à sédimenter respectivement dans l'eau distillée sans agitation mécanique (sédimentation normale) et dans une solution défloculent avec agitation mécanique (sédimentation dispersée). L'essai est applicable seulement aux sols qui ont plus de 12% de fines (<5 μ m) et dont la plasticité est supérieure à 4.

La différence entre ces deux types de sédimentations montre la tendance à la dispersion naturelle du sol examiné (BELARBI, 2014).

2.12. Essais caractérisant l'érosion des sols

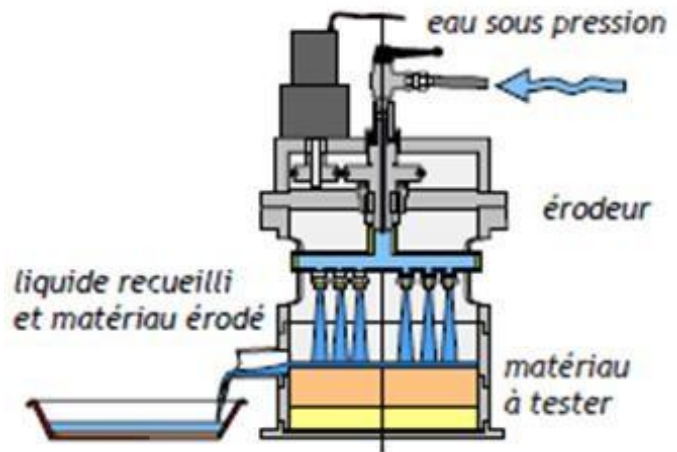
Les essais de laboratoire peuvent être classés dans trois catégories : essais d'érosion interne, essais d'érosion superficielle et les essais de dispersion. Les essais d'érosion interne sont préférables, car ils peuvent simuler l'érosion au travers d'une fissure ou d'un trou dans le corps d'un remblai.

2.12.1. Érodimètre à jets mobiles

L'érodimètre à jets mobiles est constitué d'une partie mécanique active, appelée "érodeur", d'un réservoir d'eau sous pression contrôlée, et de différents organes de service. L'érodeur projette, à partir de gicleurs de 0,5 mm de diamètre (figure 1.16.b), perpendiculairement au sol ou à l'échantillon de sol dont on veut mesurer l'érodabilité, six jets d'eau de caractéristiques semblables et bien définies. L'éprouvette peut être testée avec différentes pentes : 0%, 10%, 67%, 100% (Reiffsteck et al., 2006).



(a)



(b)

Figure 21 : Érodimètre à jets mobiles au laboratoire (Reiffsteck et al., 2006).

dispose. L'anneau-déversoir est inséré sur le moule porte-échantillon en dirigeant le déversoir vers l'aval de la pente au dessus du récipient de mesure (figure 16.a).

Le sol est ensuite soumis à l'action des jets avec les paramètres d'essai suivant :

- ✓ le débit d'eau ($860 \pm 5 \text{ cm}^3$ pour les buses à jet plat) ;
- ✓ la pression de l'air comprimé ($100 \pm 5 \text{ kPa}$) ;
- ✓ l'état énergétique de l'échantillon (95% de l'OPN : w_{OPN} et γ_d OPN) ;
- ✓ la durée de l'expérience (60 secondes).

Après essai, la chambre de pluie de l'érodimètre est rincée avec une pissette au-dessus du récipient de mesure. La quantité d'eau chargée recueillie est mesurée et passée à l'étuve pour déterminer la masse de matériau sec érodée par l'érodimètre. C'est cette charge solide qui va servir à quantifier l'érosion. Pour établir des corrélations (BELARBI, 2014).

2.12.2. Essai triaxial d'érosion

(Sanchez et al., 1983) ont mené des essais sur les matériaux de cinq barrages en terre grâce à l'appareil triaxial d'érosion (modifié à partir de l'appareil triaxial normal) (Figure 1.18). Afin de calculer la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion, ils devaient faire une hypothèse sur l'évolution de la forme du trou préformé dans l'échantillon. Ils ont trouvé que la teneur en eau a une influence sur l'érosion d'un sol de type limon plus importante que sur un sol de type argileux. L'augmentation de la concentration en ions dans le fluide diminue le taux d'érosion d'un sol limoneux plus significativement que dans le cas d'un sol argileux (BELARBI, 2014).

Bendahmane (2005) ont mis en évidence l'existence d'un second gradient critique correspondant à une érosion interne par renard après initiation de l'érosion par suffusion. La diminution du pourcentage d'argile et de la pression de confinement amplifie la suffusion. La

diminution du pourcentage d'argile et l'accroissement de la pression de confinement amplifie le phénomène de renard.

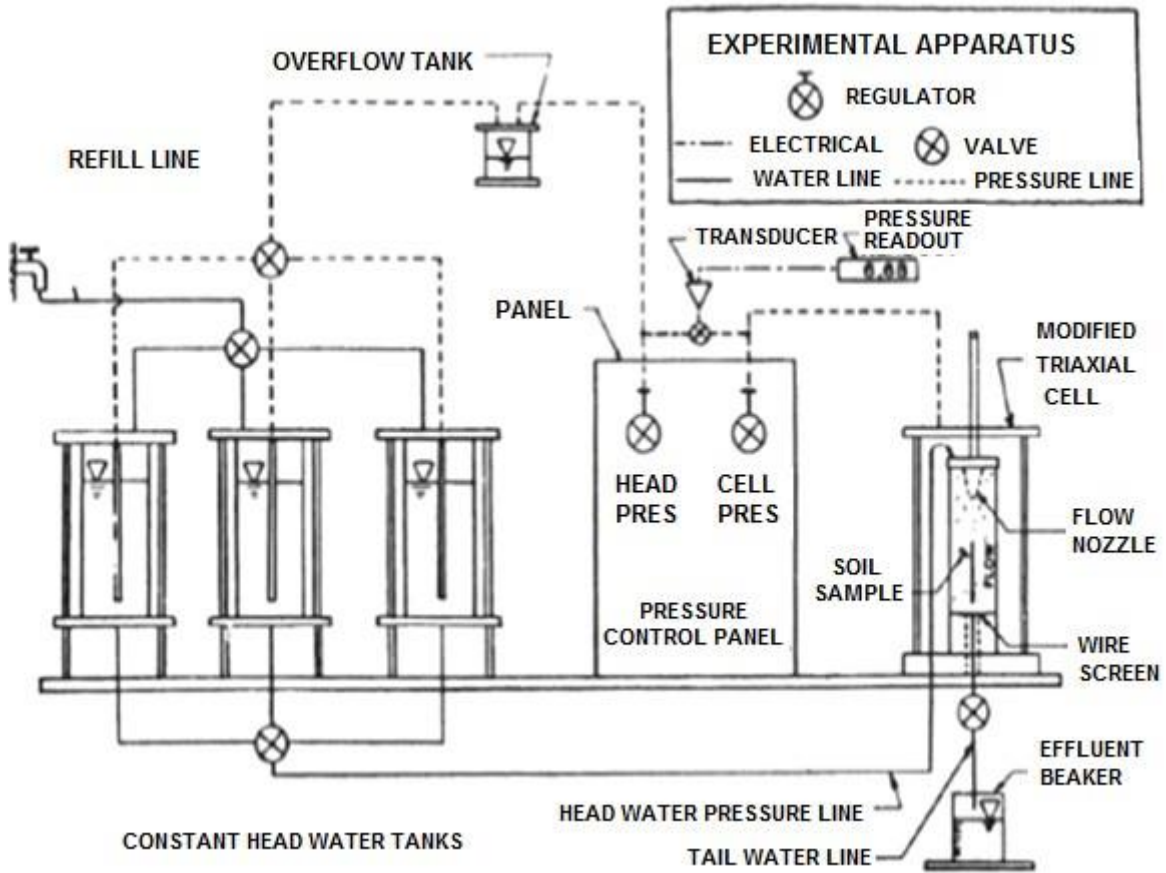


Figure 22 : Schéma d'appareillage de Triaxial Erosion Test (Sanchez and al., 1983).

2.13. Conclusion :

Il est essentiel de comprendre les mécanismes d'érosion et de dispersion des sols fins pour pouvoir les prévenir et les contrôler. Les activités humaines peuvent avoir un impact important sur ces phénomènes, mais des mesures de protection et de restauration peuvent être mises en place pour minimiser leur effet sur l'environnement. La caractérisation précise des sols érodables et dispersifs est également un outil important pour permettre une gestion durable des terres et des ressources naturelles. En continuant de chercher à mieux comprendre ces processus, nous pourrions mieux protéger notre environnement et assurer un avenir durable pour les générations futures.

Chapitre 3 : les pathologies des sols fins

Chapitre 3 les pathologies des sols fins :

Introduction :

Les pathologies des sols fins dans les ouvrages en terre se réfèrent aux problèmes et aux dommages qui peuvent survenir dans les structures construites sur des sols fins tels que les argiles et les limons. Ces pathologies peuvent inclure des affaissements différentiels, des fissurations, des glissements de terrain, des tassements différentiels, le gonflement et le retrait des sols, la liquéfaction lors des tremblements de terre, ainsi que d'autres effets néfastes liés à l'humidité et aux cycles de gel-dégel (Holtz, R.D., et al., 2011).

Les sols fins sont caractérisés par leur composition granulométrique et leurs propriétés géotechniques spécifiques. Leur plasticité élevée, leur compressibilité importante et leur faible capacité de support peuvent entraîner des problèmes structurels dans les ouvrages en terre. Les mouvements du sol, les variations de volume et les modifications des propriétés mécaniques des sols fins peuvent provoquer des déformations et des dégradations dans les fondations, les structures de soutènement, les remblais et d'autres ouvrages géotechniques.

La connaissance des pathologies des sols fins dans les ouvrages en terre est essentielle pour les ingénieurs géotechniciens, les constructeurs et les professionnels de la construction afin de concevoir, construire et entretenir des infrastructures durables et résistantes. Une caractérisation approfondie des sols, des études géotechniques précises, des méthodes de renforcement appropriées et des mesures de prévention et de gestion adéquates sont nécessaires pour minimiser les risques liés aux pathologies des sols fins (Holtz, R.D., et al., 2011).

3.1. Phénomène de renard :

Dans un écoulement, la force qui lui est liée (force d'écoulement) a une composante verticale ascendante qui s'oppose directement à la force de pesanteur. Si la résultante de ces deux forces est dirigée vers le haut, les grains du sol « flottent » et sont entraînés par l'eau : il s'agit du phénomène de bouillonnement. Celui-ci peut mener à des détériorations importantes sur pour les ouvrages dont les fondations reposent sur un sol dans lequel se produit le phénomène ou si le sol lui-même est l'ouvrage (cas de d'une digue, d'un barrage ou de fond de fouille). (Hélène horsin molinaro, 2016).

Un exemple réel où le phénomène de Phénomène de renard entraîner l'effondrement d'un barrage :



Figure 23 : barrage de Malpasset 1959 (www.aria.developpement-durable.gouv.fr 2009)

Barrage de Malpasset : En France, le barrage de Malpasset a subi un effondrement en 1959 en raison de de Phénomène de renard. La pression de l'eau a provoqué une rupture brutale du barrage, entraînant une inondation massive qui a détruit plusieurs villages en aval et causé la mort de 423 personnes.

3.2. Les glissements de terrain : Les glissements de terrain dans les ouvrages en terre sont des phénomènes géotechniques dangereux qui peuvent être causés par des sols fins. Les sols fins tels que les argiles, les limons et les sédiments sont particulièrement sujets à l'instabilité et au glissement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes excessives ou à des conditions environnementales défavorables.

Lorsque les sols fins deviennent saturés d'eau, leur capacité portante et leur résistance diminuent, ce qui peut entraîner un affaissement ou un glissement du sol. Les pentes raides ou les charges supplémentaires exercées sur les ouvrages en terre peuvent aggraver ce phénomène (Lambe, T. W., & Whitman, R. V., 2014).

Les glissements de terrain dans les ouvrages en terre peuvent avoir des conséquences graves, notamment l'endommagement ou l'effondrement complet des structures, mettant en danger la vie humaine et causant des pertes matérielles considérables. Pour prévenir les glissements de terrain, il est essentiel de mener une étude géotechnique approfondie lors de la conception et de la construction des ouvrages en terre. Cette étude permet d'évaluer les propriétés des sols fins, leur stabilité et leur capacité portante. Des mesures correctives peuvent ensuite être prises, telles que la modification de la pente, l'ajout de renforcements géotextiles ou la mise en place de systèmes de drainage pour évacuer l'eau du sol (Lambe, T. W., & Whitman, R. V., 2014).

La surveillance régulière des ouvrages en terre est également cruciale pour détecter tout signe précurseur de glissement de terrain, tels que des mouvements du sol, des fissures ou des déformations. Des mesures d'entretien et de maintenance adéquates doivent être mises en place pour prévenir les défaillances potentielles.

Un exemple réel où le phénomène de glissement de terrain a entraîné l'effondrement d'un barrage :

Barrage de Vajont : En Italie, le barrage de Vajont a connu une catastrophe en 1963 lorsque des glissements de terrain ont provoqué un énorme éboulement dans le réservoir du barrage. Cela a créé une vague de tsunamis qui a dépassé la hauteur du barrage et a englouti plusieurs villages en aval, faisant plus de 2 000 victimes.

3.3. Les tassements différentiels : Ces tassements dans les ouvrages en terre sont un problème courant lié aux sols fins. Les sols fins tels que les argiles et les limons ont une capacité de compression plus élevée que les autres types de sols, ce qui peut entraîner des tassements inégaux sous les fondations des structures (Martin, A., Dupont, L., & Tremblay, R. 2018).

Lorsque les ouvrages en terre sont construits sur des sols fins, des variations de tassement peuvent se produire en raison de la différence de compressibilité entre les différentes zones du sol. Cela signifie que certaines parties de la structure peuvent s'enfoncer davantage que d'autres, créant ainsi des tassements différentiels (Martin, A., Dupont, L., & Tremblay, R. 2018).

Les tassements différentiels peuvent avoir des conséquences néfastes sur les ouvrages en terre. Ils peuvent entraîner des déformations et des fissures dans les murs, les planchers et les fondations, compromettant ainsi la stabilité et l'intégrité structurelle de l'ouvrage. Cela peut également provoquer des problèmes au niveau des éléments adjacents, tels que des déformations excessives des conduites souterraines (Martin, A., Dupont, L., & Tremblay, R. 2018).

La prévention des tassements différentiels dans les ouvrages en terre nécessite une bonne compréhension des propriétés géotechniques des sols fins et une analyse appropriée des charges et des contraintes exercées sur la structure. Des mesures correctives peuvent inclure l'utilisation de techniques de renforcement du sol, comme l'injection de matériaux stabilisants, l'ajout de colonnes ballastées ou l'utilisation de géotextiles pour améliorer la répartition des charges. De plus, des mesures d'entretien et de surveillance régulières doivent être mises en place pour détecter les signes de tassements différentiels et prendre des mesures correctives à temps. Cela peut impliquer la réalisation d'inspections visuelles, l'utilisation de techniques de surveillance géotechnique telles que les inclinomètres ou les extensomètres, et l'évaluation régulière des données pour détecter toute anomalie (Martin, A., Dupont, L., & Tremblay, R. 2018).

Voici un exemple concret d'un pont où des problèmes de tassements différentiels des sols fins ont été rencontrés :

En 2018, Le pont Morandi, situé dans la ville de Gênes en Italie, a été confronté à des problèmes de tassements différentiels des sols fins. Ce pont était construit sur une fondation composée principalement de limon et d'argile, des types de sols fins. Au fil du temps, en raison des variations de l'humidité du sol et des charges appliquées sur le pont, certains secteurs de la fondation ont commencé à s'affaisser de manière inégale. Cela a entraîné un désalignement des piliers du pont et une déformation de la structure. Les tassements différentiels ont également créé des tensions excessives sur certains points du pont, mettant en danger sa stabilité (Chen, H., Dubois, M., & Leblanc, G. 2016).

Pour résoudre ce problème, des mesures de stabilisation ont été mises en œuvre. Cela comprenait l'injection de matériaux de renforcement dans les zones affaissées pour améliorer la résistance et la portance du sol. Des techniques de compactage et de consolidation ont également été utilisées pour uniformiser les tassements du sol et prévenir de nouveaux désalignements. Cet exemple met en évidence l'importance de prendre en compte les caractéristiques des sols fins lors de la conception et de la construction des ouvrages en terre tels que les ponts. Une évaluation approfondie des propriétés du sol, y compris sa composition, sa plasticité et sa compressibilité, est essentielle pour prévenir les problèmes de tassements différentiels et assurer la durabilité et la sécurité des structures (Chen, H., Dubois, M., & Leblanc, G. 2016).



Figure 24 : Le pont Morandi, situé dans la ville de Gênes en Italie 2018 (www.lepoint.fr)

3.4. L'érosion interne : des sols fins dans les ouvrages en terre est un phénomène préoccupant qui peut causer des problèmes de stabilité et de sécurité. Lorsque de l'eau s'infiltré dans les sols fins, elle peut provoquer la séparation des particules fines, entraînant ainsi la migration et la perte de matériau à l'intérieur de la masse du sol. Cela peut affaiblir la structure du sol et compromettre la stabilité de l'ouvrage.

L'érosion interne peut être causée par différents mécanismes tels que l'érosion par filtration, l'érosion par écoulement, l'érosion par cisaillement et l'érosion par solubilisation. Chacun de ces mécanismes peut se produire en fonction des conditions hydrologiques, des caractéristiques du sol et de la géométrie de l'ouvrage. Pour prévenir l'érosion interne, des mesures de conception et de construction appropriées doivent être prises. Cela peut inclure l'utilisation de matériaux de remblai appropriés, la mise en place de systèmes de drainage efficaces, l'utilisation de géotextiles ou de géogrilles pour renforcer le sol, et la mise en œuvre de techniques de compactage adéquates. Une surveillance régulière de l'ouvrage est également essentielle pour détecter rapidement tout signe d'érosion interne et prendre les mesures correctives nécessaires.

Il est important de comprendre les mécanismes et les facteurs influençant l'érosion interne des sols fins afin de concevoir et de construire des ouvrages en terre durables et résistants. La

gestion adéquate de l'érosion interne contribue à assurer la sécurité à long terme des infrastructures et à prévenir les accidents ou les effondrements potentiels.

Un exemple concret d'un pont où le problème de l'érosion interne des sols fins s'est produit est le pont de Thistle à Utah, aux États-Unis. Le 14 avril 1983, le pont a subi un effondrement partiel en raison de l'érosion interne des sols fins qui soutenaient ses piliers.

Le pont de Thistle était un pont ferroviaire situé au-dessus de la rivière Spanish Fork. En raison des fortes pluies et des crues soudaines, l'eau s'est infiltrée dans les sols fins environnants, entraînant l'érosion interne. Cela a affaibli les fondations du pont, provoquant l'affaissement de certains de ses piliers. Finalement, une partie du pont s'est effondrée, entraînant l'interruption du trafic ferroviaire.

L'érosion interne des sols fins dans le cas du pont de Thistle a été causée par une combinaison de facteurs, notamment les conditions météorologiques extrêmes, la nature des sols fins environnants et la conception du pont. Cette situation a mis en évidence l'importance de prendre en compte les caractéristiques des sols fins lors de la conception et de la construction d'ouvrages en terre tels que les ponts.

Suite à l'effondrement du pont de Thistle, des travaux de réparation et de renforcement ont été entrepris pour remédier au problème d'érosion interne. Cela a impliqué la stabilisation des sols fins, la construction de nouveaux piliers et la réhabilitation du pont afin de garantir sa stabilité et sa durabilité.

Cet exemple souligne les conséquences potentiellement graves de l'érosion interne des sols fins dans les ouvrages en terre tels que les ponts. Il met en évidence l'importance de mener des études géotechniques approfondies, de choisir des techniques de construction appropriées et de mettre en place des mesures de surveillance pour prévenir de tels incidents et assurer la sécurité des infrastructures.

Exemple du Téton:

Le barrage de Teton, également connu sous le nom de barrage de Teton Dam, était une structure de retenue d'eau située dans l'est de l'Idaho, aux États-Unis. Le 5 juin 1976, le barrage a subi une défaillance catastrophique et s'est effondré, provoquant l'une des pires catastrophes par rupture de barrage de l'histoire des États-Unis. Le barrage de Teton avait été construit pour créer le réservoir de Teton, qui devait servir de réserve d'eau pour l'irrigation et la production d'électricité dans la région. Cependant, des défauts de conception et de construction ont affaibli la structure du barrage, ce qui a conduit à son effondrement. Le matin du 5 juin 1976, de grandes quantités d'eau ont commencé à s'échapper par une fissure dans le barrage. Malgré les efforts pour réparer la fissure et renforcer la structure, le barrage s'est effondré quelques heures plus tard, libérant un déluge d'eau dans la vallée en aval. Les villes et les terres agricoles situées en aval du barrage ont été submergées sous une vague d'eau destructrice.

Plus de 11 000 personnes ont été évacuées et 14 personnes ont perdu la vie dans la catastrophe. Les dégâts matériels ont été considérables, avec des centaines de maisons, des terres agricoles et des infrastructures détruites. La rupture du barrage de Teton a également eu un impact

environnemental important, avec la pollution des cours d'eau et la mort de milliers de poissons (www.structurae.net).



Figure 25 : barrage de Teton en 1976 (www.structurae.net)

3.5. Effets des cycles de gel-dégel :

Les cycles de gel-dégel font référence aux variations répétées de température qui provoquent la congélation et la fonte de l'eau dans les sols. Ces cycles peuvent avoir des effets significatifs sur les propriétés et le comportement des sols. Voici la définition des effets des cycles de gel-dégel :

Les cycles de gel-dégel désignent les variations périodiques de température qui entraînent la congélation et la fonte de l'eau dans les sols. Lorsque l'eau présente dans les pores des sols gèle, elle se dilate, exerçant une pression sur les particules du sol. Cette expansion répétée peut causer des dommages aux sols et aux structures environnantes. Les effets des cycles de gel-dégel incluent la détérioration des caractéristiques géotechniques des sols, tels que la diminution de la cohésion, l'augmentation de la perméabilité, la fragmentation des particules de sol, ainsi que des mouvements et des déformations des structures (Bowles, J. E., 1996).

3. Conclusion :

Les pathologies des sols fins dans les ouvrages en terre sont des problèmes importants qui peuvent compromettre la stabilité et la durabilité des structures. Les affaissements différentiels, les glissements de terrain, les tassements différentiels et l'érosion interne sont quelques-unes des pathologies les plus courantes auxquelles les ouvrages en terre peuvent être confrontés.

Il est crucial pour les ingénieurs géotechniciens, les constructeurs et les professionnels de la construction de comprendre ces pathologies et d'adopter des mesures préventives et correctives appropriées. Une caractérisation approfondie des sols fins, des études

géotechniques précises et l'utilisation de techniques de renforcement du sol sont nécessaires pour minimiser les risques associés à ces pathologies.

Les exemples réels du barrage de Malpasset, du barrage de Vajont, du pont Morandi et du pont de Thistle mettent en évidence les conséquences dévastatrices que ces pathologies peuvent avoir lorsqu'elles ne sont pas correctement gérées. Ces incidents soulignent l'importance de la conception, de la construction et de l'entretien appropriés des ouvrages en terre.

En conclusion, la prévention, la surveillance régulière et la gestion adéquate des pathologies des sols fins dans les ouvrages en terre sont essentielles pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures. Une approche multidisciplinaire impliquant des géotechniciens, des ingénieurs civils et d'autres experts est nécessaire pour relever ces défis et garantir la fiabilité des structures construites sur des sols fins.

Chapitre 4 : Les différentes méthodes de stabilisation des sols fins.

Chapitre 4 : Les différentes méthodes de stabilisation des sols fins.

4.1. Introduction

Le présent chapitre se concentre sur les différentes méthodes de stabilisation des sols fins. La stabilisation des sols fins est essentielle pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur résistance, afin de garantir des fondations solides et durables pour les structures de génie civil. Dans ce chapitre, nous exposerons les diverses techniques utilisées pour stabiliser les sols fins, en mettant l'accent sur la stabilisation chimique, la stabilisation mécanique et la stabilisation thermique.

La stabilisation chimique est une approche qui implique l'ajout de substances chimiques telles que la chaux, le ciment ou des additifs spécifiques pour modifier les caractéristiques des sols fins. Nous explorerons les différentes méthodes de stabilisation chimique, y compris l'ajout de chaux, l'utilisation de ciment et l'application d'additifs spéciaux. De plus, nous aborderons également la stabilisation aux cendres volantes et à la pouzzolane, qui sont des matériaux couramment utilisés dans ce processus.

La stabilisation mécanique, quant à elle, se concentre sur l'utilisation de techniques de compactage, de drainage, de substitution, d'applications de fortes pressions et de pré-humidification pour renforcer les sols fins. Nous examinerons en détail chacune de ces techniques, ainsi que l'utilisation de fondations et d'édifices spéciaux pour stabiliser les sols fins. De plus, nous aborderons le traitement mécanique des argiles gonflantes, qui est une problématique spécifique associée aux sols fins.

Enfin, nous aborderons brièvement la stabilisation thermique, qui consiste à utiliser des méthodes de chauffage pour améliorer les propriétés des sols fins. Bien que cette méthode soit moins courante que les autres, elle présente un intérêt potentiel pour certains projets spécifiques.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des différentes techniques de stabilisation des sols fins, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limites et leurs applications appropriées. Une connaissance approfondie de ces méthodes permettra aux ingénieurs et aux professionnels du génie civil de choisir la meilleure approche pour stabiliser les sols fins dans leurs projets, garantissant ainsi des fondations solides et résistantes.

4.2. Les techniques de la stabilisation des sols fins :

En géotechnique, il existe de nombreuses méthodes à utiliser pour stabiliser principalement les sols argileux. Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on peut distinguer :

- La stabilisation mécanique
- La stabilisation thermique
- La stabilisation chimique par l'utilisation d'additifs.

Le tableau ci-dessous présente les principaux avantages et inconvénients de chaque méthode.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées
(A. bekkouche)

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation Mécanique	Compactage	Le compactage est le plus économique. Réduire le potentiel expansif.	Il faut une grande quantité d'eau (compacter au-dessus de l'optimum avec une W_n élevée).
	Substitution		<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'épaisseur de la couche. ▪ Disponibilité du matériau.
	Préhumidification		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le temps de l'opération. ▪ La distribution uniforme de W_n.
	Méthode de Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimiser l'humidification ou dessèchement. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La sensibilité à la Variation de la teneur en eau.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduire la répulsion électrique entre les particules. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très coûteuse.
Stabilisation chimique	Les sels	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. ▪ Réduire le phénomène d'échange. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le choix du type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmenter la résistance. ▪ Diminuer la plasticité. ▪ Réduire le potentiel de variation de volume. ▪ Augmenter la limite de retrait. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation d'un dosage important.

Le tableau ci-dessous présente les principaux avantages et inconvénients de chaque méthode.

4.3. Stabilisation mécanique : La stabilisation mécanique est une méthode utilisée pour renforcer les sols en modifiant leur structure physique et en améliorant leurs propriétés mécaniques. Cette approche vise à réduire la compressibilité des sols fins, à augmenter leur résistance à la compression et à améliorer leur capacité portante. La stabilisation mécanique est largement utilisée dans le domaine de la géotechnique pour assurer des fondations solides et durables (Braja M. Das., 2009).

4.3.1 La stabilisation mécanique par compactage : est une méthode utilisée pour renforcer les sols fins en augmentant leur densité et en améliorant leur résistance mécanique. Elle implique l'application de forces mécaniques, généralement à l'aide de rouleaux compresseurs, pour réduire les vides et les espaces entre les particules du sol, ce qui améliore la compaction et la stabilité globale (Braja M. Das., 2021).

4.3.2 Le drainage : est un processus visant à améliorer l'évacuation de l'eau à travers les sols fins, réduisant ainsi l'accumulation excessive d'eau et prévenant les problèmes liés à la

saturation en eau. Il s'agit d'une technique utilisée pour renforcer les sols en éliminant l'excès d'eau, ce qui contribue à augmenter leur résistance et à prévenir les problèmes d'instabilité (Braja M. Das, 2021).

4.3.3 La technique de substitution : en géotechnique consiste à remplacer les sols fins instables par des matériaux granulaires plus stables, tels que du sable ou du gravier. Cette méthode vise à renforcer la structure du sol en remplaçant les particules fines qui ont une faible capacité portante ou des propriétés mécaniques défavorables par des matériaux granulaires plus résistants. Le remplacement des sols fins par des matériaux granulaires présente plusieurs avantages. Les matériaux granulaires ont généralement une meilleure capacité de drainage, une résistance mécanique plus élevée et une moindre sensibilité aux variations d'humidité par rapport aux sols fins. Par conséquent, la substitution permet d'améliorer la stabilité du sol, sa capacité portante et sa résistance aux déformations excessives (Braja. M. Das, Khaled S., 2022).

4.3.4. L'application de fortes pressions: est une technique utilisée pour améliorer la résistance et la capacité portante des sols fins. Cette méthode consiste à appliquer des pressions élevées sur le sol afin de favoriser sa densification et sa consolidation

L'application de fortes pressions peut être réalisée de différentes manières, notamment à l'aide de rouleaux vibrants, de presses hydrauliques ou de machines spéciales conçues pour exercer des charges élevées sur le sol. L'objectif principal de cette technique est d'augmenter la densité du sol, de réduire les vides entre les particules et de renforcer la structure globale du sol.

4.3.5. Stabilisation par pré humidification:

Il s'agit de créer ainsi un maximum de gonflement avant construction par une augmentation de teneur en eau du sol. Deux techniques ont été utilisées (BOJANA Dolinar, 2006), cité par (Belabbaci, 2014) :

- Simple arrosage par jet ;
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

Cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes (Mellal, 2009) :

- Le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction ;
- Le mouvement de gonflement soit stabilisé lors de la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement. Il faut donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée.

4.4. La stabilisation thermique : est une technique utilisée pour renforcer les sols fins en modifiant leurs propriétés physiques et mécaniques grâce à l'application de chaleur. Cette méthode vise à réduire la sensibilité des sols fins aux changements d'humidité et à améliorer leur stabilité et leur résistance (Mitchell, J.K. and Santamarina, J.C., 2005).

L'application de la chaleur peut être réalisée de différentes manières, telles que l'utilisation de la vapeur, des injections d'air chaud ou l'application de courants

électriques. En chauffant le sol fin, on induit une série de transformations physiques, notamment la réduction de la plasticité, la déshydratation, la consolidation et la modification de la structure des particules du sol (Mitchell, J.K. and Santamarina, J.C., 2005).

Les avantages de la stabilisation thermique comprennent la réduction de la contraction et de l'expansion du sol en réponse aux variations d'humidité, l'amélioration de la capacité portante et de la résistance du sol, et la réduction du risque de mouvement de sol ou de déformation excessive.

4.5. La stabilisation chimique : est une technique utilisée pour renforcer les sols fins en modifiant leurs propriétés chimiques et physiques grâce à l'ajout de produits chimiques spécifiques. L'objectif principal de la stabilisation chimique est de diminuer l'humidité et d'améliorer la résistance, la stabilité et les propriétés mécaniques des sols fins.

Différents types de produits chimiques peuvent être utilisés dans le processus de stabilisation chimique, tels que la chaux, le ciment, les additifs et les agents de stabilisation spécifiques. Ces produits chimiques interagissent avec les particules du sol, provoquant des réactions chimiques qui modifient les caractéristiques du sol. La stabilisation chimique peut avoir plusieurs effets bénéfiques sur les sols fins, tels que l'augmentation de la capacité portante, la réduction de la compressibilité, l'amélioration de la résistance à l'eau et la réduction des mouvements de sol. Elle est largement utilisée dans la construction de routes, de fondations, de digues et d'autres structures nécessitant une stabilité et une résistance accrues.

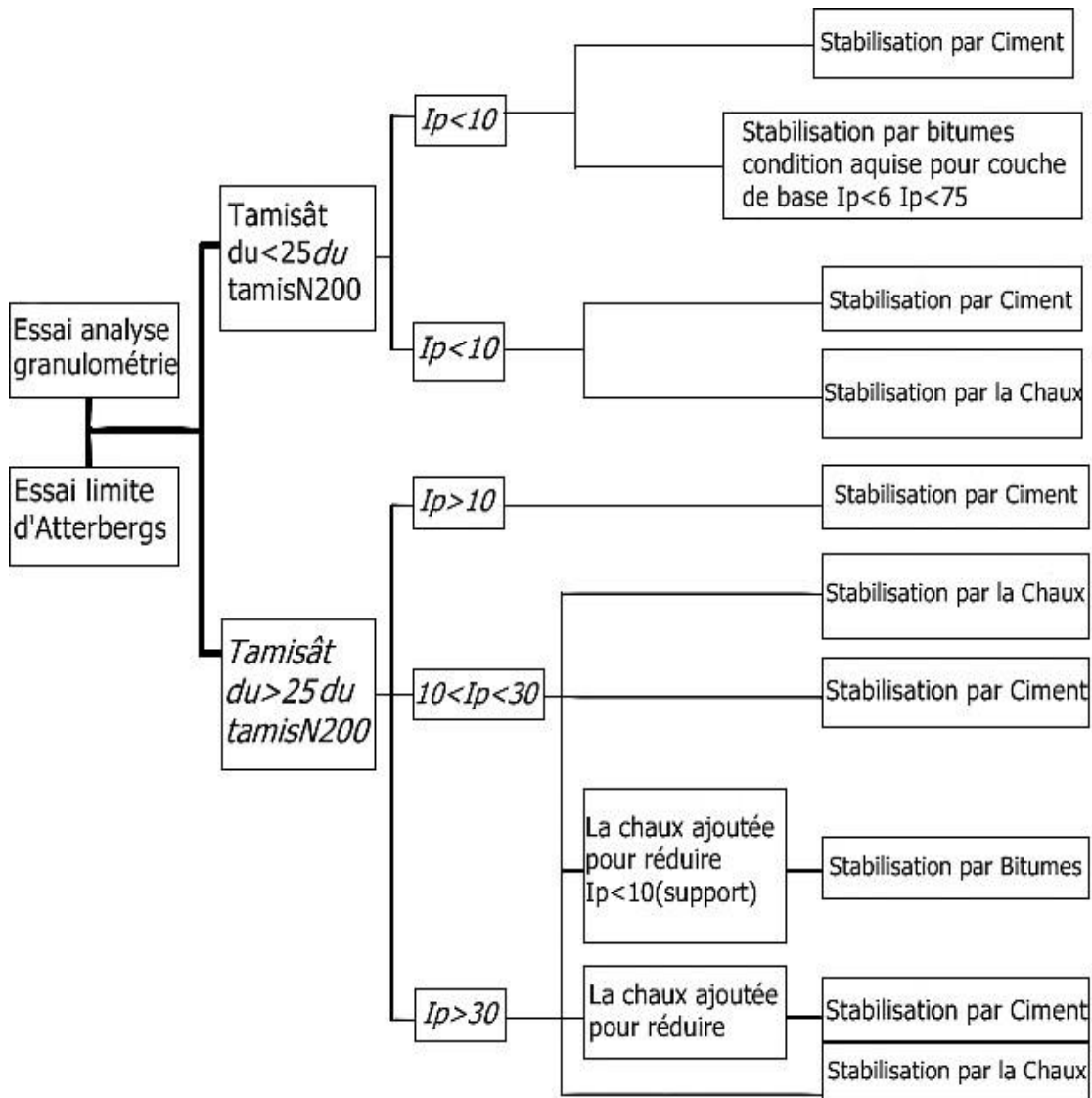


Figure 26 : Conditions d'utilisation de la stabilisation Chimique (Dept. Of the Army, 1983) cité par (Azzouz, 2006)

4.5.1 Stabilisation par ajout de la chaux : Cette technique de stabilisation chimique consiste à introduire de la chaux (sous forme d'oxyde de calcium ou d'hydroxyde de calcium) dans le sol fin. La chaux réagit avec les particules argileuses présentes dans le sol, ce qui entraîne plusieurs effets bénéfiques (John Wiley, et Sons., 2013).

L'ajout de la chaux au sol fin provoque une réduction de la plasticité de l'argile, c'est-à-dire sa capacité à se déformer facilement. Cela permet de diminuer la sensibilité du sol aux variations d'humidité, réduisant ainsi les risques de gonflement et de retrait excessifs.

De plus, la réaction chimique entre la chaux et les particules argileuses entraîne une augmentation de la capacité portante du sol. Les particules argileuses sont liées par les produits de réaction, formant ainsi une structure plus solide et stable. Cette augmentation de la capacité portante permet d'améliorer la stabilité des fondations et de réduire les risques de tassements différentiels.

En outre, la présence de chaux dans le sol contribue à améliorer la résistance mécanique globale. Le sol traité avec de la chaux présente une plus grande résistance à la compression, ce qui est particulièrement avantageux dans les applications nécessitant une capacité portante élevée, comme la construction de routes, de pistes d'aéroport, de digues, etc... (John Wiley, et Sons., 2013).

4.5.1.1 La chaux :

La plupart des sols dispersifs peuvent être rendus non dispersifs par l'ajout d'une petite quantité de la chaux [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaO] ou de gypse [CaSO_4 ou $\text{CaSO}_4(2\text{H}_2\text{O})$]. Le traitement se fait par le processus des actions échangeables, avec l'échange des ions Ca^{2+} par les ions Na^+ . La quantité de la chaux peut être déterminée par des essais au laboratoire. Sherard a utilisé le PINHOLE test pour déterminer ces quantités. Il a proposé d'ajouter une proportion de 2% à 3% de la chaux pour diminuer la dispersion des argiles (Fell R. Macgregor P. et Stapledon D., 1992).

La floculation par le traitement chimique est une alternative pour réduire ou éliminer les problèmes causés par la présence des argiles dispersives.

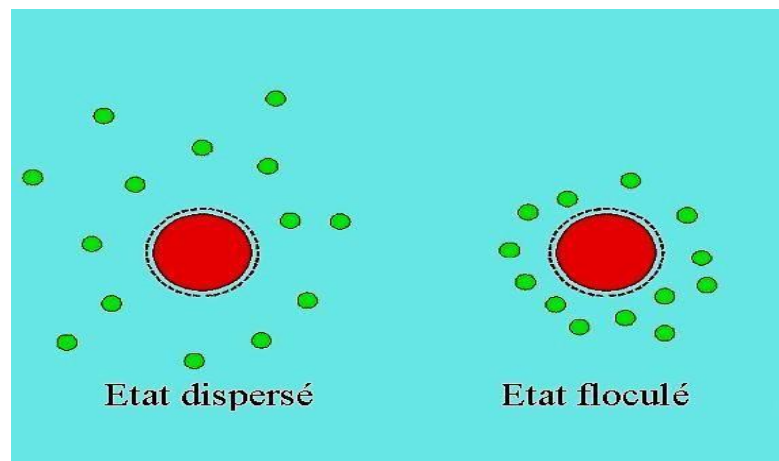


Figure 27 : Le nuage de cation autour de la micelle qui représente la dispersion et la loculation. (2014)

4.5.1.2 Lait de chaux :

(Belarbi A., 2012), ont utilisés le lait de chaux pour l'amélioration des caractéristiques des sols dispersifs, ils ont trouvé que l'additif a un effet remarquable sur les propriétés physiques, mécaniques et dispersives de sol. Les résultats montrent que le pourcentage de 6% est considéré comme le sommet l'influence de lait de chaux sur le caractère dispersif de sol, tel que le sol se transforme d'une classe D4 à une classe D1 selon la procédure de l'essai d'Emiettage (figure 5.6), ainsi l'indice de dispersion est diminué de 67% vers 10 % selon la procédure de sédimentation en parallèle dont la teneur de 6 % en lait de chaux, cité par (Bouziane, 2014).

Echantillon	Après 2 min	Après 1 heure	Après 6 heures	Classe de dispersion
Sol naturel				D4
Sol traité à 6% de lait de chaux				D1

Figure 28 : Résultat de l'essai d'Emiettage (Belarbi A., 2012), cité par (Bouziane, 2014).

4.5.2 Stabilisation par ciment : La stabilisation par ciment est une technique couramment utilisée dans la géotechnique pour améliorer les propriétés mécaniques des sols fins. Elle consiste à mélanger du ciment avec le sol fin, ce qui provoque une réaction chimique d'hydratation.

Lorsque le ciment est ajouté au sol fin, il réagit avec l'eau présente dans le sol pour former des composés chimiques solides. Cette réaction chimique d'hydratation conduit à la formation de cristaux de silicate de calcium hydraté, qui agissent comme des liants solides entre les particules du sol (Braja M. Das, Khaled Sobhan., 2017).

Les liaisons formées par cette réaction chimique améliorent la résistance et la rigidité du sol. Le sol traité devient plus cohérent et résistant à la compression, ce qui augmente sa capacité portante. Cela est particulièrement bénéfique pour les fondations et les structures qui nécessitent une résistance élevée pour supporter des charges importantes.

En plus d'améliorer la résistance mécanique, la stabilisation par ciment peut également réduire la sensibilité du sol aux variations d'humidité. Les composés chimiques formés lors de l'hydratation du ciment réduisent la plasticité de l'argile, ce qui limite les déformations excessives du sol en réponse aux changements d'humidité (Braja M. Das, Khaled Sobhan., 2017).

Il convient de noter que la quantité de ciment ajoutée et les conditions de mélange doivent être soigneusement contrôlées pour obtenir les performances désirées. Des normes et des recommandations techniques spécifiques régissent l'utilisation de la stabilisation par ciment dans les projets de construction

4.5.5 Stabilisation par des additifs : La stabilisation par des additifs est une méthode de renforcement des sols fins qui implique l'ajout de divers produits chimiques pour modifier leurs

propriétés physiques et mécaniques. Ces additifs peuvent inclure des polymères, des agents stabilisants spécifiques et des agents de réticulation.

L'ajout d'additifs chimiques vise à améliorer plusieurs aspects du sol fin. Tout d'abord, ces additifs peuvent augmenter la résistance à la compression du sol, ce qui le rend plus capable de supporter des charges plus lourdes sans se déformer excessivement. Cela est particulièrement important pour les structures et les fondations nécessitant une grande capacité portante (P. Purushothama Raj., 2005).

En outre, les additifs chimiques peuvent améliorer la stabilité globale du sol. Ils réduisent la sensibilité du sol aux variations d'humidité, limitant ainsi les risques de gonflement, de retrait et de tassements différentiels. Cette amélioration de la stabilité contribue à garantir des conditions de construction plus sûres et à minimiser les problèmes géotechniques (P. Purushothama Raj., 2005).

Un autre avantage de l'utilisation d'additifs est l'amélioration de la perméabilité du sol. Certains additifs peuvent aider à augmenter la capacité du sol à permettre le passage de l'eau, ce qui peut être bénéfique dans les zones sujettes aux problèmes de drainage. Une meilleure perméabilité réduit les risques d'accumulation d'eau et de saturation du sol, ce qui peut entraîner des problèmes d'instabilité (P. Purushothama Raj., 2005).

Il convient de noter que les additifs chimiques utilisés pour la stabilisation des sols fins varient en fonction des besoins spécifiques du projet et des caractéristiques du sol. Il est donc important de choisir les additifs appropriés en fonction des propriétés du sol et des objectifs de renforcement visés.

4.5.6 Stabilisation aux cendres volantes et à la pouzzolane : La stabilisation aux cendres volantes et à la pouzzolane est une technique de renforcement des sols fins qui implique l'utilisation de matériaux d'origine volcanique. Les cendres volantes et la pouzzolane sont des sous-produits de l'industrie du charbon et de l'activité volcanique, respectivement (Donald P. Coduto., 2010).

Ces matériaux sont riches en silice et en alumine, ce qui leur confère des propriétés chimiques bénéfiques pour la stabilisation des sols. Lorsqu'ils sont mélangés avec des sols fins, les cendres volantes et la pouzzolane réagissent chimiquement avec les particules fines du sol, formant de nouveaux composés solides.

Cette réaction chimique permet d'améliorer la résistance et la durabilité du sol. Les nouveaux composés formés renforcent les liaisons entre les particules du sol, augmentant ainsi sa résistance à la compression et sa capacité portante. De plus, cette réaction chimique peut réduire la sensibilité du sol aux variations d'humidité, limitant ainsi les risques de gonflement, de retrait et de tassements différentiels (Donald P. Coduto., 2010).

La stabilisation aux cendres volantes et à la pouzzolane présente plusieurs avantages. Ces matériaux sont généralement disponibles en abondance, ce qui en fait une solution économique pour le renforcement des sols. De plus, leur utilisation contribue à la valorisation des sous-produits industriels, ce qui peut réduire l'impact environnemental.

Il est important de noter que les quantités appropriées de cendres volantes et de pouzzolane doivent être soigneusement déterminées en fonction des caractéristiques du sol et des objectifs de renforcement visés. Des études de laboratoire et des essais sur le terrain sont généralement réalisés pour évaluer l'efficacité de la stabilisation et déterminer les mélanges optimaux

Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de donner un aperçu succinct sur les différentes méthodes de stabilisation des sols fins. La stabilisation des sols fins est essentielle pour garantir des fondations solides et durables pour les structures de génie civil. Trois principales méthodes de stabilisation ont été abordées : la stabilisation chimique, la stabilisation mécanique et la stabilisation thermique.

La stabilisation chimique implique l'ajout de substances chimiques telles que la chaux, le ciment ou des additifs spécifiques pour modifier les caractéristiques des sols fins. Cette méthode offre des avantages tels que l'augmentation de la capacité portante, la réduction de la compressibilité et l'amélioration de la résistance à l'eau. Cependant, le choix du type, du dosage et de la méthode d'addition des produits chimiques doit être soigneusement évalué.

La stabilisation mécanique se concentre sur l'utilisation de techniques de compactage, de drainage, de substitution, d'application de fortes pressions et de pré-humidification pour renforcer les sols fins. Chaque technique a ses avantages et ses inconvénients, mais elles visent toutes à améliorer la densité, la résistance mécanique et la capacité portante des sols fins.

La stabilisation thermique est une méthode moins courante, mais elle présente un intérêt potentiel pour certains projets spécifiques. Elle consiste à utiliser la chaleur pour modifier les propriétés physiques et mécaniques des sols fins, réduisant ainsi leur sensibilité aux changements d'humidité et améliorant leur stabilité et leur résistance.

Chaque méthode de traitement présente des avantages et des inconvénients, et leur choix dépend des caractéristiques spécifiques du sol, des conditions du site et des exigences du projet. Une connaissance approfondie de ces techniques permettra aux ingénieurs et aux professionnels du génie civil de sélectionner la meilleure approche pour stabiliser les sols fins dans leurs projets.

En résumé, la stabilisation des sols fins est un domaine important de la géotechnique, et les méthodes de stabilisation chimique, mécanique et thermique offrent des solutions efficaces pour améliorer les propriétés des sols fins. La combinaison appropriée de ces techniques peut conduire à des fondations solides, résistantes et durables, contribuant ainsi à la sécurité et à la fiabilité des ouvrages en terre.

CONCLUSION GENERALE

Cette mémoire revêt une grande importance dans l'étude et l'analyse des sols fins et des défis auxquels ils sont confrontés dans le domaine de la construction surtout pour les ouvrages en terre. Les chercheurs s'efforcent de comprendre le comportement de ces types de sols et d'identifier les facteurs qui les affectent afin de réduire les dommages qui en découlent. Le but de ce travail est de présenter les différents problèmes rencontrés dans les sols fins, les méthodes de caractérisation de ces problèmes ainsi que les techniques utilisées pour stabiliser les sols fins, y compris la stabilisation mécanique, chimique et thermique, afin de faire face aux phénomènes liés à la corrosion et à la dispersion.

A travers les chapitres dans notre travail nous avons visé à définir et à analyser les différents types de sols fins et les phénomènes qui y sont associés, tels que la corrosion et l'érosion et la dispersion, ainsi que leur caractérisation. Ce mémoire aborde également les maladies résultant de ces types de sols, comme les glissements de terrain, l'érosion interne, le gonflement et le retrait des sols, ainsi que les effets des cycles de gel et de dégel sur ces sols.

En fin, dans ce travail nous avons présenté les différentes méthodes pour stabiliser les sols fins, telles que la stabilisation mécanique, chimique et thermique, ainsi que l'utilisation de ciment, de chaux et d'autres matériaux supplémentaires comme moyens de stabilisation. La rentabilité de ces techniques est liée certainement au bon choix de la méthode en fonction du type de sol et du problème qui peut être rencontré, pour les ouvrages en terre, il est également indispensable de procéder par le suivi et la surveillance périodique des ouvrages afin de prévoir la rentabilité de la technique de stabilisation utilisée ou de détecter tous problèmes pouvant survenir dans le corps de l'ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

A.BEKKOUCHE, S.M.AISSA MAMOUNE, A.DJEDID. techniques de stabilisation des

Akande, M. K. Adeyemo, A. O. Adekanye Journal de l'article : "Soil Erosion and Its Impact on Building Construction" International Journal of Science and Research (IJSR) Volume : 3 Numéro : 8 Année de publication : 2014 Pages : 1168-1172.

Ammeri, A., Bouassida, M., Jamei, M., Villard, P., & Gourc, J. P. (2008). Détermination expérimentale de la résistance à la traction par fendage des sols fins. innovative geotechnical engineering ingenierie geotechnique innovante, 331.

Aoun M., (2016) Caractérisation minéralogique, physique et cartographie des sols gonflants dans le bassin de Tébessa, Impact sur le plan d'aménagement, thèse de Doctorat, Université de Constantine.

Atlan, Y., & Feller, C. (1980). Application de la Pedologie a la caracterisation géotechnique de quelques sols fins du Senegal. Bull IAGE, (22), 233-240.

AZZOUZ, Fatima.z. 2006. contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de tlemcen. Tlemcen : s.n., 2006. pp. 63-64.

Bajracharya, S. R., Mool, P. K., Shrestha, B. R. (2011). "Impact of Climate Change on Himalayan Glaciers and Glacial Lakes: Case Studies on GLOF and Associated Hazards in Nepal and Bhutan." Kathmandu: ICIMOD.

Blais J R. (2005) « Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales » Courte revue bibliographique, Colloque technique sur la sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans, France, pp 65-70.

Boardman, J., & Poesen, J. (Eds.). (2007). Soil erosion in Europe. John Wiley & Sons.

I.P. Abrol, J.S.P. Yadav et F.I. Panigrahi "Principles of Soil Conservation and Management" 2010

Bouyoucos, G. J. (1962). "Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils." Agronomy Journal, 54(5), 464-465.

Bowles, J. E. (1996). "Foundation Analysis and Design." McGraw-Hill.sols expansifs.

Braja M. Das et Khaled Sobhan "Principles of Geotechnical Engineering" 2017

Chenini Mohammed Zouhir Bellahcene Tahar. Anné :2020.2021)

Chappell, A., & Wallis, M. (1984). "Effects of pH on Soil Dispersion: Mechanisms and Implications." Soil Science Society of America Journal, 48(3), 605-610.

Coduto, D. P. (2010). "Geotechnical Engineering: Principles and Practices." Pearson Education.

Debih, H. (2018). Mouillabilité des argiles et leurs propriétés de surface au contact des asphaltènes (Doctoral dissertation).

Delage, Pierre. 2014. Problèmes géotechniques liés à l'effondrement des sols non saturés : le cas des loess. 2014. Vol. 1, pp. 17-22.

Delcourt, Alix Iefief. 2011. L'argile c'est malin. Paris : Leduc.s, 2011. pp. 17-24. 978-2-84899-448-2.

Diakakis, M., & Deligiannakis, G. (2017). Flood fatalities in Greece: 1970–2010. *Journal of Flood Risk Management*, 10(1), 115-123.

Dubois, J. (2019). Caractérisation géotechnique des sols fins. *Revue Géotechnique*, 178(3), 45-53.1. mémoire de NARDJAS.D et FADILA.N .stabilisation des sols fins 13.06.2016)

Farimah MASROURI, 2014, Impact du traitement de sol sur l'érosion interne des sols fins compactés, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais

Fell R. Macgregor P. et Stapledon D. 1992. Geotechnical engineering of embankment dams. Rotterdam : Belkema, 1992.

Ferber, V. (2005). Sensibilité des sols fins compactés à l'humidification: apport d'un modèle de microstructure (Doctoral dissertation, Nantes).

Forrest T G. (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.

Fort, Anouk. 2014. LE SOL. slideplayer. [En ligne] 2014.
<http://slideplayer.fr/slide/1141153/>.

Jasmund et Lagaly 1992 : Jasmund (K.) et Lagaly (G.) (éd.), «Ton-minerale und Tone. Strukturen, Eigenschaften, An Wendung und Einsatz in Industrie und Umwelt», Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1992

Hélène horsin molinaro, "Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage "2016

Holmgren G.S., Flanagan C.P., (1977) Factors Affecting Spontaneous Dispersion of Soil Materials as Evidenced by the Crumb Test. Dispersive clays, related piping, and erosion in Geotechnical projects. ASTM Special Technical Publication, J.L. Sherard and R.S. Drecker Eds., vol 623, pp. 218-239.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2014). "Soil Mechanics: Laboratory Manual." John Wiley & Sons. (Martin, A., Dupont, L., & Tremblay, R. 2018)

Lemonnier : s.n., 1992. "Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice" de V.N.S. Murthy (2013)

Lucas, J. (1962). La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias (Vol. 23, No. 1). Persée-Portail des revues scientifiques en SHS..

Michaels, A. S., & Lambe, T. W. (1953). Soil Flocculants and Stabilizers, Laboratory Evaluation of Polyelectrolytes as Soil Flocculants and Aggregate Stabilizers. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1(13), 835-843.

Maëva BOURGEOIS, elise coquillart, morgane cournarie, claire fassino. 1992.

Mellal, Fati ma. 2009. Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana. Chlef : s.n., 2009.

Nardjes DRAOU & Fadela NEBATI, 2016 : Stabilisation des sols fins

Nelson, D. W. (1991). "Measurement of soil water content by time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation." Soil Science Society of America Journal, 55(2), 467-472.

Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. Science of the total environment, 479, 189-200.

PECK, Ralph B. Stability of natural slopes. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, vol. 93, no 4, p. 403-417.

Prokop, P., & Stanko, S. (2016). "The Impact of Climate Change on Soil Erosion in Agricultural Land: A Review." Environmental Science & Policy, 56, 48-64

P. Purushothama Raj "Ground Improvement Techniques" 2005 Pages : Chapitre 4, pages 99-132

Rajesh P. Mathankar, Prashant R. "Wankhade Role of Vegetation in Soil Erosion Control" 2016

R.D.HOLTZ et W.D.COVACS. 1991. Introduction à la géotechnique. MONTREAL : Edition de l'école polytechnique de MONTREAL, 1991.

Reaney, S. M., Bracken, L. J., & Kirkby, M. J. (2014). The importance of surface controls on overland flow connectivity in semi-arid environments: Results from a numerical experimental approach. Hydrological Processes, 28(4), 2116-2128.

Reiffsteck P, Leonard C, Vargas R et Pailha S. (2006) « Étude Comparative d'essais d'érosion Interne » Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG' Lyon, France, pp 89-96.

R. Lal et M. J. Shukla Éditeur : CRC Press Année de "Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control" 2003

Roy, Jérémie. 2015. Les types de sols. slideplayer. [En ligne] 2015.
<http://slideplayer.fr/slide/3850054/>.

R. P. C. Morgan, M. G. K. van den Berg, and J. N. Quinton "Soil Erosion and Conservation"2017

Sanchez R L, Strutynsky A I and Silver M L. (1983) « Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using laboratory triaxial erosion test procedure » Technical Report GL-83-4, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 339 p.

S. Caillère, S.Hénin, M.Rautureau. 2016.Minéralogie des argiles. s.l. : masson, 2016.

S. Chandrasekharan, K. Ramasamy et A. N. V. Satyanarayana"Determination of Soil Permeability by Constant and Falling Head Methods"1994

S., Singhal, D. C. (2018). "Climate Change and Soil Erosion: A Comprehensive Review." Geoscience Frontiers, 9(2), 457-467.

Vardanega, P., Simonini, P. (2003). "Soil Erosion Risk Assessment in Italy: A Revision of USLE Factors." Geomorphology, 49(1-2), 51-67.

Zou, Y., Chen, S. (2015). "Effects of Climate Change on Soil Erosion and Conservation Measures: A Review." Journal of Resources and Ecology, 6(2), 90-99.

(www.aria.developpement-durable.gouv.fr 2009)

(Source : <http://www.geoengineer.org/>)

(www.structurae.net).

(www.jijeleljadida.dz ,2019)