

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Aout 1955 Skikda



Faculté des sciences de Technologie Département de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master Option : Géotechnique

THEME

L'EFFET DES TEMPERATURES SUR LE COMPORTEMENT

MECANIQUES DES ARGILES.

Présenté Par :

Mehria Khalissa

Brighet Cheima

Devant le jury :

Président	Dr : Lebdioui Saad	MCB	Univ 20 Août 55 Skikda
Encadreur	Pr : Rehab Bekkouche Souhila	Pr	Univ 20 Août 55 Skikda
Co-encadreur	Dr : Feligha Marwa	MCA	Univ 20 Août 55 Skikda
Examineur	Dr : Mokhbi Hicham	MCB	Univ 20 Août 55 Skikda

23 JUIN 2024

Remerciements

Nous remercions le Dieu tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nos vifs remerciements sont d'abord adressés à Madame le professeur REHAB BEKKOUCHE SOUHILA, qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail de recherche, collaborer à son enrichissement par ses directives judicieuses, sa patience, sa rigueur, son soutien constant ainsi que sa disponibilité permanente durant la préparation de ce mémoire. Nous tenons à lui exprimer notre gratitude et notre profond respect.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance aux membres de jury :

- Docteur, Mr LEBIDIQUI SAAD de nous avoir honoré de présider le jury de la soutenance.
- Docteur, Mme FLIGHA MARWA, en tant que Co-encadreur.

Nous tenons également à remercier tous le staff du laboratoire LNH.C.

En fin toute personne qui a participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire soit sincèrement remerciée.

Dédicace

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de ma mère disparu trop tôt et à mon cher papa source de vie, d'amour et d'affection.

Quoi que je fasse ou je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit, votre bienveillance

Me guide et votre présence à mes côtés a été ma source de force.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection A Ma tante Maternelle Salima & Ma Tante Maternelle Djamila et ma sœur d'amour Rahma, source de joie et de bonheur.

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.

A Mon papa et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, et qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours. A toute ma famille, et ma proche source d'espoir et de motivation.

Khalissa

Dédicace

*Merci Dieu le tout miséricordieux, ton amour et
tes grâces à mon égard m'ont donné la
persévérance et le courage pour accomplir ce
travail.*

*Je dédie ce modeste travail A mes chers parents,
pour leurs efforts et leurs sacrifices durant
toute ma vie, leurs encouragements et soutien
pour persévérer jusqu'à l'aboutissement de ce
travail.*

*Qu'elles retrouvant, dans ce travail,
l'expression de ma reconnaissance...*

*A mon chers Frère Walid, et Mes sœurs Wided,
Asma, Doha en souvenir de nos éclats de rire et
des bons moments, en souvenir de tout ce qu'on a
vécu ensemble, j'espère de tout mon cœur que
notre relation fraternelle durera
éternellement.*

Cheima

Sommaire

Remerciements	
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique sur les sols.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2 .Définition d'un sol.....	4
I.3. Caractéristiques des sols	6
I.3.1. Caractéristiques minéralogiques	6
I.3.1.1 Minéraux primaires.....	6
I.3.1.2. Minéraux secondaires.....	7
I.3.1.3. Sels solubles	7
I.3.1.4. Matières organiques	7
I.3.2. Caractéristiques physico-mécaniques	7
I.4. Différents types des sols fins	8
I.4.1. Argiles	8
I.4.2.Limons	9
I.4.3. Vases.....	10
I.4.4. Tourbes	11
I.4.5. Marnes	12
I.5. Pathologies liées aux sols argileux	13
I.5.1 Tassement différentiel	13
I.5.2 Fluage.....	13
I.5.3 Gonflement	13
I.5.4 Érosion	14
I.5.5 Sécheresse	14
I.5.6 Instabilité des pentes.....	15
I.6. Conclusion	15
Référence.....	16
Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux.....	17
II.1. Introduction	18
II.1.L'interaction entre les températures très élevées et les sols argileux peut être explorée en examinant plusieurs aspects	18
II.1.1Capacité thermique et conductivité thermique de l'argile	18
II.1.1.1.Rétention d'humidité	19

II.1.1.2. Compaction du sol.....	20
II.1.1.3 Effets sur les organismes du sol	20
II.2. l'influence des températures sur les propriétés physique des sols argileux.....	20
II.2.1 Effets sur la structure du sol	21
II.2.2. Comportement mécanique sous charge	21
II.2.3. Effets sur la rétention d'eau	21
II.2.4. Perméabilité et drainage.....	21
II.2.5. Effets sur la fertilité	21
II.3. L'impact des températures sur la structure et la microstructure des sols	22
II.4. Influences des températures sur la structure et la microstructure des sols argileux....	23
II.4.1. Réorganisation cristalline	23
II.4.2. Expansion et contraction thermique	23
II.4.3. Changements de phase.....	24
II.4.4. Formation et stabilité des agrégats	24
II.4.5. Répartition de l'eau dans le sol	24
II.5. Effet des températures sur le comportement mécanique des sols argileux	24
II.5.1. Effets du gel et du dégel sur les routes et les fondations.....	26
II.5.2. Stabilité des talus et des pentes	26
II.5.3. Comportement des barrages et des digues.....	26
II.6. Effets des températures sur le comportement hydraulique des sols argileux	27
II.6.1. Infiltration et drainage	28
II.7. Variation du volume des sols argileux en fonction de la température	29
II.7.1. Expansion thermique des minéraux argileux	30
II.7.2. Influence de l'eau.....	30
II.7.3. Cycle de gel et de dégel	30
II.7.4. Effets sur les infrastructures	30
II.8. Effet de la température sur la compressibilité des sols.....	31
II.9. Effet des températures sur la résistance au cisaillement des sols argileux	32
II.9.1. Expansion thermique des minéraux argileux	33
II.9.2. Dessiccation et durcissement	33
II.9.3. Changements de structure.....	34
II.9.4. Effet de la pression interstitielle.....	34
II.10. Méthodes d'évaluation et de suivi des dommages causés par la chaleur sur les sols argileux [12]	34
II.10.1 Analyse physique du sol.....	34

II.10.2. Fissuration du sol	34
II.10.3. Densité apparente et porosité	34
II.10.4. Combustion sèche.....	34
II.10.6. Extraction par solvants.....	35
II.10.7. Analyse chimique du sol	35
II.10.8. Évaluation de la biodisponibilité des nutriments	35
II.10.8.1 Tests de lixiviation.....	35
II.10.8.2 Tests de sol en solution.....	35
II.11. Évaluation de la stabilité structurale.....	35
II.11.1. Test de dispersion humide	35
II.11.2. Test de résistance à la compression	35
II.12. Stratégies d'atténuation et de restauration des sols argileux après un incendie.....	35
II.12.1. Évaluation des dommages	36
II.12.2.Érosion et stabilisation du sol.....	36
II.12.3. Restauration de la matière organique	36
II.12.4. Rééquilibrage des éléments nutritifs	36
II.12.5. Gestion de la structure du sol.....	36
II.12.6. Réintroduction de la biodiversité du sol.....	36
II.12.7.Surveillance et suivi continu	37
II.13. Conclusion.....	37
Référence.....	38
Chapitre III : Procédure expérimentale.....	39
III.1. Introduction	40
III.2. Le sol étudié.....	40
III.3. Les essais d'identification	40
III.3.1.Analyse physique	40
III.3.1.1.La teneur en eau de sol à l'état naturel selon la norme (NF P 94-050).....	40
III.3.1.1.1. Définition	40
III.3.1.1.2. But de l'essai.....	41
III.3.1.1.3. Principe de la méthode	41
III.3.1.1.4. Appareillage utilisée	41
III.3.1.1.5. Mode opératoire.....	41
III.3.1.1.6. Résultats obtenus	42
III.3.1.2. Analyse granulométrique selon la norme NF P 94-056.....	42
III.3.1.2.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)	43

III.3.1.2.1.1. Principe.....	43
III.3.1.2.1.2. Appareillage utilisée	43
III.3.1.2.2. Principe de l'essai	43
III.3.1.2.2.3. Appareillage utilisée	43
III.3.1.2.1.3. Mode opératoire.....	44
III.3.1.2.2. Essai granulométrique par sédimentation (NF P 94-057).....	45
III.3.1.2.2.1. Définition	45
III.3.1.2.2.2. Principe de l'essai	45
III.3.1.2.2.3. Appareillage utilisée	45
III.3.1.2.2.4. Mode opératoire.....	46
III.3.1.2.3. Les résultats obtenus	47
III.3.1.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	48
III.3.1.3.1. Définition	48
III.3.1.3.2. Le but de l'essai.....	48
III.3.1.3.3. Principe de l'essai:	49
III.3.1.3.4. Principe de détermination des limites d'Atterberg	49
III.3.1.3.5. Préparation de l'échantillon	49
III.3.1.3.6. Matériel utilisé	50
III.3.1.3.7. Mis en place de l'échantillon.....	50
III.3.1.3.8. Limite de plasticité WP du rouleau.....	51
III.3.1.3.9. Résultats obtenus	52
III.3.2. Analyse chimique	53
III.3.2.1. l'essai chimique	53
III.3.2.1.1. But de l'essai.....	53
III.3.2.1.2. Mode opératoire de l'essai	53
III.3.2.1.3. Les résultats de l'analyse chimique:	55
III.3.2.2. Essai de bleu méthylène (NF P 94-068).....	55
III.3.2.2.1. Introduction	55
III.3.2.2.2. Principe de l'essai	55
III.3.2.2.3. Préparation de l'échantillon	55
III.3.2.2.4. Les résultats obtenus	56
III.3.3. Analyse Mécanique.....	57
III.3.3.1. L'essai Proctor (NF P 94-093)	57
III.3.3.1.1. Définition	57
III.3.3.1.2. Principe.....	57

III.3.3.1.3. Appareillage :	58
III.3.3.1.4. Mode opératoire	58
III.3.3.1.5. Expression des résultats:	59
III.3.3.2. Essai CBR immédiat et après immersion (NF P 94-078)	60
III.3.3.2.1. But de l'essai	60
III.3.3.2.2. Principe	60
III.3.3.2.3. Appareillage	60
III.3.3.2.4. Exécution du poinçonnement	61
III.3.3.2.5. Calculs et résultats	62
III.3.3.3. Essai de cisaillement direct à la boîte selon la norme XP 94-071-1	63
III.3.3.3.1. Définition	63
III.3.3.3.2. Principe de l'essai	64
III.3.3.3.3. Appareillages	64
III.3.3.3.4. Mode opératoire	66
III.3.3.3.5. Les résultats obtenus	66
III.3.3.4. Essai Œdométrique (XP 94-090-01)	68
III.3.3.4.1. But de l'essai	68
III.3.3.4.2. Principe de l'essai	68
III.3.3.4.3. Appareillage	68
III.3.3.4.4. Mode opératoire	69
III.3.3.4.5. Les résultats obtenus	70
III.4. Classification du sol	71
III.4.1. Selon les approches empiriques	71
III.4.2. Classification du sol selon le GTR (Guide des Terrassements Routiers, LCPC, SETRA, 2000):	72
III.5. Conclusion	73
Chapitre IV : Résultats et interprétations	74
IV.1. Introduction	75
IV.2. Interprétation des résultats	76
IV.2.1 Le sol initial	76
IV.2.1 Gonflement libre	77
IV.2.2 Analyses granulométrique	77
IV.2.3 Compressibilité à l'œdomètre	78
IV.2.4 Cisaillement	80
IV.2.5 Limites d'Atterberg selon NF P 94-051	80

IV.2.6 Essai de compactage (Proctor normal)	81
IV.2.7 Essai de compression Uni axial.....	83
IV.3 Résistance à la compression du sol initial.....	84
IV.4. Conclusion	86
Conclusion Générale	87
Résumé	89

Liste des tableaux

Tableau I.1 Dénomination des sols fins calcaires	13
Tableau II.1 Représente l'impact des températures sur la structure et la microstructure des sols argileux.....	22
Tableau II.2 Représente les effets des températures sur le comportement mécanique des sols argileux.....	25
Tableau II.3 Représente les effets des températures sur le comportement hydraulique des sols argileux.....	27
Tableau II.4 Variation du volume en fonction de la température	29
Tableau II.6 Effet des températures sur la résistance au cisaillement des sols argileux.	32
Tableau III.1 : La teneur en eau naturelle W_n	42
Tableau III.2 : Les résultats de granulométrie	47
Tableau III.3 : Résultat de l'essai limite de liquidité	52
Tableau III.4 : Les compositions chimiques du sol étudié.....	55
Tableau III.5 Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate.....	55
Tableau III.6 : Classification des sols d'après l'essai de bleu de méthylène.....	56
Tableau III.7 Conditions des essais Proctor normal et modifi.....	57
Tableau III.8 : Présentation des références de compactage	59
Tableau III.9:Résultat de l'essai CBR immédiat.....	62
Tableau III.10: Résultat de l'essai CBR après immersion	62
Tableau III.11 : L'indice CBR	63
Tableau III.12 : Les paramètres de résistance au cisaillement du sol naturel	68
Tableau III.13 : Résultats d'essai œdométrique du sol non traité	70
Tableau III.14 : Classification des sols	71
Tableau III.15 : Degré de plasticité du sol	71
Tableau III.16 : Classification des sols en fonction de la limite de liquidité.....	71
Tableau III.17: Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité	72
Tableau III.18: Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène	72
Tableau III.19: Tableau Récapitulatif des caractéristiques physiques et mécaniques	72

Liste des figures

Figure I.1 schéma des 3 phases du sol	4
Figure I.2 Différents états de l'eau dans les sols.....	5
Figure I.3 La répartition moyenne en (%) des différentes phases du sol	6
Figure I.4 Photo d'une argile	9
Figure I.5 Photo d'un sol limoneux.....	9
Figure I.6 Photo d'un sol vaseux.....	11
Figure I.7 (a) Tourbe blonde, (b) Tourbe brune, (c) Tourbe blonde.....	12
Figure I.8 Etang de marne.....	12
Figure I.9 Tassement différentiel.....	13
Figure I.10 Phénomène de retrait-gonflement.....	14
Figure I.11 Ruissellement sans végétation	14
Figure I.12 Sécheresse dans les sols argileux	15
Figure I.13 Types de mouvements de terrain	15
Figure II.1. Courbe de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.....	19
Figure II.2 Courbe de la rétention	19
Figure II.3 courbe de compactage des sols argileux.....	20
Figure II.4 Courbe représentative de l'influence des températures sur les propriétés physiques des sols argileux	22
Figure II.5 Effet du gel et du dégel	26
Figure II.6 Courbe représentative du phénomène du Retrait et Gonflement.	28
Figure II.7 Courbe représentative de la variation du volume des sols argileux en fonction des températures	30
Figure II.8 Courbe représentative de l'effet des températures sur la compressibilité des sols argileux	32
Figure II.9 Courbe représentative sur les effets des températures sur la résistance au cisaillement des Sols argileux.	33
Figure III.10: Localisation de ESSEBT la daïra de AZZABA.....	40
Figure III.1 .Etuve de laboratoire.....	41
Figure III.2 .Balance	41
Figure III.3 Une série des tamis	44
Figure III.4 Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie	46
Figure III.5 Granulométrie par sédimentation	47
Figure III.6 : Courbe granulométrique.....	48

Figure III.7 Les phases et les limites d'Atterberg	49
Figure III.8 : Appareillage de Casagrande	50
Figure III.9 Essai de la limite de liquidité (l'appareillage de Casagrande)	51
Figure III.10 : Détermination de la limite de plasticité	51
Figure III.11 La courbe de la limite de liquidité	52
Figure III.12 L'abaque de Casagrande	52
Figure III.13 : Essai d'analyse chimique aux sulfates.....	53
Figure III.14 Essai d'analyse chimique au carbonate.....	54
Figure III.15 : Appareil à mesure pH.....	54
Figure III.16 Le déroulement de l'essai de bleu de méthylène.....	56
Figure III.17 Matériel et outils de compactage au laboratoire	58
Figure III.18 : Courbe Proctor Normal	60
FIGURE III.19 Appareillage de l'essai CBR.....	62
Figure III.20 : Courbe de l'essai CBR immédiat.....	62
Figure III.21 : Courbe de l'essai CBR après immersion	63
Figure III.22 : Principe de l'essai de cisaillement	64
Figure III.23 : Appareille de cisaillement	65
Figure III.24 : Les constituants de la boîte de cisaillement	65
Figure III.25 : Courbe Contrainte/Déformation	66
Figure III.26 : présente la courbe intrinsèque de notre sol étudié.....	67
Figure III.27 : Courbe Tassement/déplacement.....	67
Figure III.28 : Courbe contrainte de cisaillement/déplacement.	67
Figure III.29 : Appareillage œdométrique	69
Figure III.30 Courbe œdométrique	70
Figure IV.1 : essaie Proctor normal	77
Figure. IV.2 : Courbe de gonflement libre sur le sol étudié	77
Figure IV.3 : Courbe granulométrique du sol étudié	78
Figure IV.4 : Courbe de compressibilité a l'œdomètre du sol étudié	79
Figure IV.5 : Courbes de cisaillement	80
Figure IV.6 : Courbe de la limites d'Atterberg du sol étudié	80
Figure IV.7 : Courbe Proctor normal à 50°	81
Figure IV.8 : Courbe Proctor normal à 100°	82
Figure IV.9 : Essai de Compression Simple.....	83
figure IV.10 : courbe contrainte -déformation du sol initial	84
Figure IV.11 : Courbe Contrainte- déformation à 50°	85

Figure IV.12 : Courbe contrainte- déformation à 100°	85
Figure IV.13 : Courbe contrainte- déformation à 150°	86

Introduction

Générale

Introduction

L'étude des propriétés mécaniques et physiques des matériaux naturels est un domaine crucial dans le génie civil et la géologie, particulièrement lorsque ces matériaux sont soumis à des conditions environnementales extrêmes. Parmi ces matériaux, les argiles jouent un rôle prépondérant en raison de leur présence ubiquitaire et de leur utilisation répandue dans diverses applications, allant des fondations des infrastructures aux ouvrages de protection environnementale. Dans ce contexte, le mémoire intitulé « Les effets des températures élevées sur les propriétés mécaniques et physiques des argiles » vise à explorer et à comprendre les changements que subissent les argiles lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées. Ce sujet revêt une importance particulière à l'ère du changement climatique, où des épisodes de chaleur extrême deviennent de plus en plus fréquents, affectant potentiellement la stabilité et la durabilité des structures construites sur ou avec ces matériaux. L'objectif principal de ce travail est d'identifier et d'analyser les modifications des caractéristiques mécaniques, telles que la résistance à la compression et la cohésion, ainsi que des propriétés physiques, comme la porosité et la plasticité, des argiles sous l'effet de températures élevées. En combinant des études expérimentales et des analyses théoriques, ce mémoire cherche à fournir une compréhension approfondie des mécanismes à l'œuvre, offrant ainsi des perspectives pour le développement de stratégies d'adaptation et de mitigation dans le domaine de la construction et de la gestion des sols. En définitive, cette recherche contribuera non seulement à l'avancement des connaissances scientifiques sur les matériaux argileux, mais aussi à la conception de solutions innovantes pour faire face aux défis posés par les conditions climatiques extrêmes, garantissant ainsi la sécurité et la durabilité des infrastructures dans un contexte environnemental en mutation.

**Chapitre I : Etude
bibliographique sur
les sols**

I.1. Introduction

Le sol est un système complexe qui se constitue de particules de différentes tailles avec une composition chimique et minéralogique diverses. Nous présentons dans ce chapitre des généralités sur les sols naturels. Nous avons commencé par une définition et un aperçu général sur les diverses phases du sol. Ensuite, nous décrivons les caractéristiques minérales et physico-mécaniques des sols. Nous avons également cité les différents types de sols fins tels que les argiles, les limons et les marnes Enfin, nous avons terminé ce chapitre par la présentation des différentes pathologies liées à l'utilisation des sols argileux.

I.2 .Définition d'un sol

Le sol est un matériau complexe et variable. Il est hétérogène, d'origine minérale et organique et est constitué de grains et de pores. Le sol est donc un matériau à trois phases, phase solide (Squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse (Figure 1). Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol.

Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse [1]

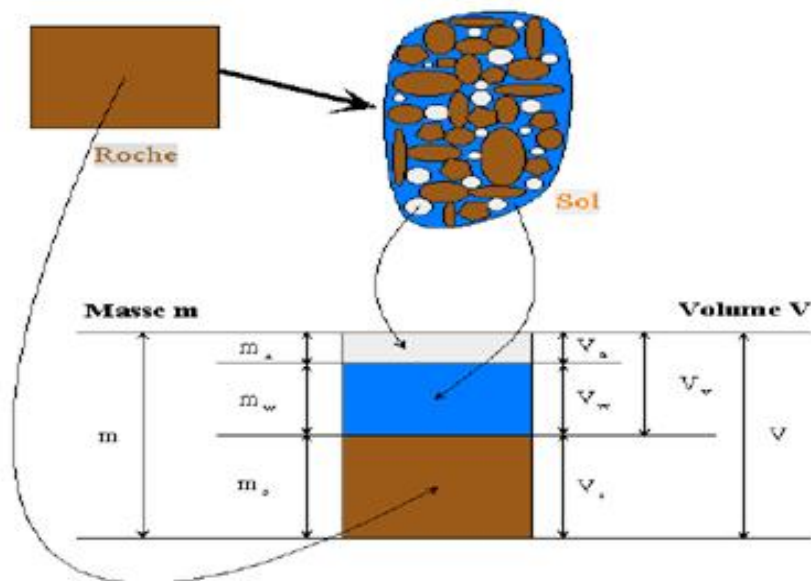


Figure I.1 schéma des 3 phases du sol

a) Phase solide

Les propriétés physiques essentielles d'un sol pour les applications de Génie Civil se déduisent généralement de la taille des grains, de leurs formes, de leurs arrangements, de la qualité de leurs contacts, de leurs compositions minéralogiques, etc. Pour les sols grenus, les grains sont le résultat d'une désagrégation mécanique de la roche mère. Ils gardent par conséquent la même structure minéralogique. Ces éléments sont en général quartzueux,

Donc insensibles à l'eau, c'est le cas des sables et des graviers. Pour les argiles, les particules solides. [1]

Chapitre I : Etude bibliographique sur les sols

Sont le résultat d'une désagrégation de la roche mère suite à des attaques chimiques combinées ou non avec des attaques mécaniques ou physiques. Ces éléments ont donc une structure minéralogique différente de celle de la roche mère. Cette famille de sol est très sensible à l'eau. [1]

b) Phase liquide

Le liquide qui remplit les vides entre les grains du sol est en général l'eau. (Figure 2). Elle se rencontre sous différentes formes :

- **L'eau libre** : dite aussi gravifique parce qu'elle s'écoule sous l'effet de la gravité. C'est l'eau ordinaire rencontrée dans les lacs et les rivières. Elle s'élimine à 100°C et peut contenir des sels minéraux ou de l'air dissous.

- **L'eau capillaire** : c'est une eau qui est maintenue à l'aide de force de tension superficielle entre les points de contact des grains chez les sols partiellement saturés.

Elle ne s'écoule pas sous l'effet de la gravité mais s'élimine à 100°C.

- **L'eau adsorbée** : dite aussi eau hygroscopique. Elle forme une mince couche autour des particules argileuses. Elle possède des propriétés plus proches des solides que des liquides. Elle ne s'élimine qu'à de très fortes températures.

- **L'eau de composition** : Elle est constituée de molécules d'eau qui entrent dans la composition minéralogique de l'élément. Elle ne peut être libérée qu'en détruisant la structure élémentaire du matériau.

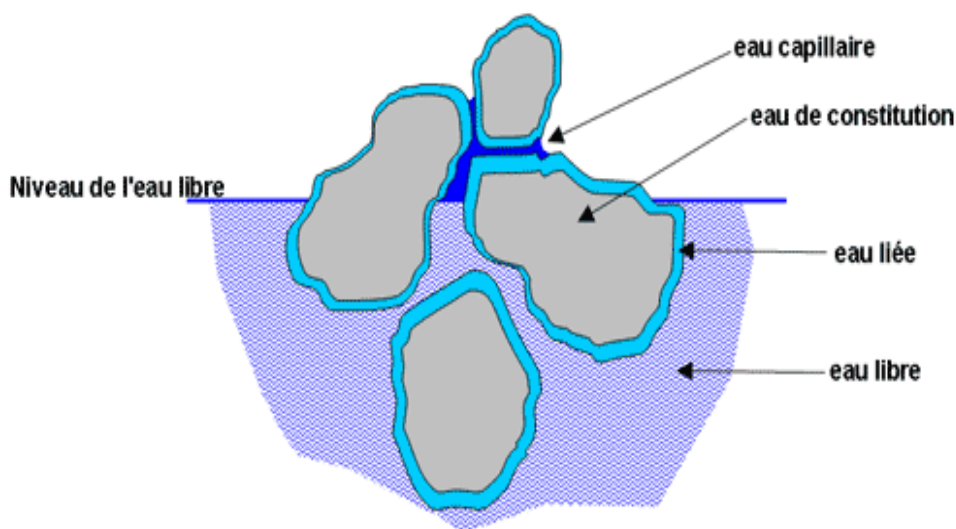


Figure I.2 Différents états de l'eau dans les sols

c) Phase gazeuse

Lorsque le sol n'est pas saturé, la phase gazeuse est constituée par un mélange d'air, de vapeur d'eau et éventuellement de gaz provenant de la décomposition de matières organiques. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol. (Figure 3).

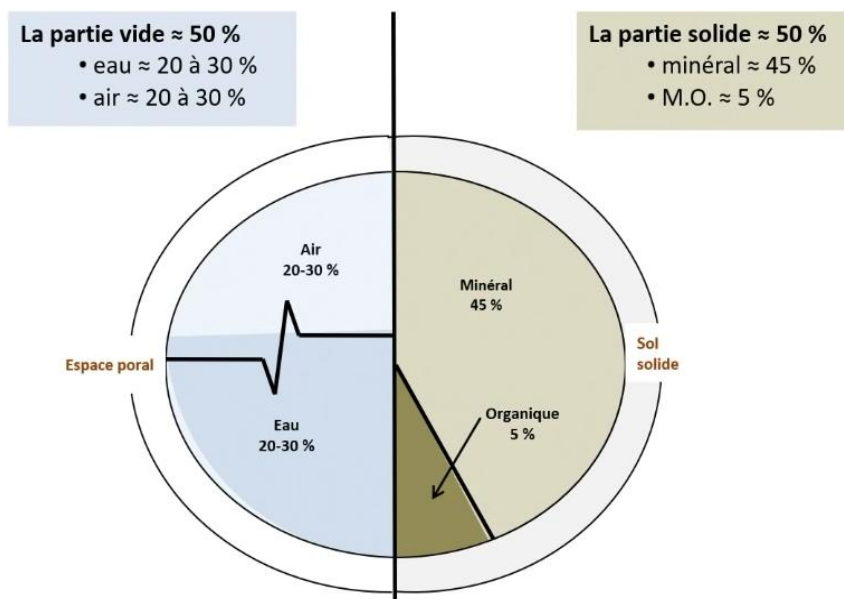


Figure I.3 La répartition moyenne en (%) des différentes phases du sol

I.3. Caractéristiques des sols

Les caractéristiques des sols dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de limons, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz.

I.3.1. Caractéristiques minéralogiques

Lorsque la terre s'est formée, plusieurs roches différentes ont été créées. À l'intérieur de ces roches, il y a beaucoup de minéraux différents. Lorsque ces roches se décomposent, certains de ces minéraux se décomposent et forment des sols. Comme ces minéraux sont petits, ils dominent la partie argileuse du sol. Les sols sont souvent classés en quatre catégories (minéraux primaires, minéraux secondaires, sels et matières organiques) suivant leur composition, leur mode de formation et leur cause de formation. [2].

I.3.1.1 Minéraux primaires

Ce sont les minéraux résiduels qui ont échappé à l'altération, ils sont stables c-à-dire qu'ils conservent la signature minéralogique et géochimique des matériaux source, ou instables c-à-dire primaires n'ayant pas subi suffisamment les effets de l'altération.

Le quartz, les feldspaths et les micas qui se retrouvent dans diverses fractions granulométriques sont les minéraux primaires les plus abondants dans les sols. Ils peuvent résulter d'une simple érosion des substrats avec tris granulométrique au cours du transport, surtout par l'eau, et au cours de la sédimentation. Cette catégorie de minéraux se retrouve souvent dans les sols grenus (sables grossiers, graviers, etc.).

I.3.1.2. Minéraux secondaires

Les minéraux secondaires résultent de la transformation (ou dégradation) géochimique des minéraux primaires, ce qui implique donc un changement de statut minéralogique accompagné d'une réduction de taille. Ils comprennent divers types de minéraux argileux (simples ou inter stratifiés), ainsi que des hydroxydes ou des oxydes généralement de fer, parfois de Manganèse ou d'Aluminium. Les minéraux argileux se cantonnent dans une gamme granulométrique comprennent entre le micron et quatre microns.

I.3.1.3. Sels solubles

Les solutions qui résultent de l'altération par hydrolyse, transportent des éléments chimiques actifs tels que le potassium K, le sodium Na, le calcium Ca, le magnésium Mg. Soit ces éléments quittent définitivement les sites de l'altération, soit ils y demeurent en constituant des phases minérales neuves (carbonates, sulfates, sels). Les carbonates peuvent jouer un rôle de ciment temporaire ou scellant définitif les minéraux argileux. Le potassium et le sodium peuvent aussi subsister dans ou à proximité des minéraux argileux. Par conséquent, ces sels peuvent influencer fortement sur le comportement hydromécanique des sols.

I.3.1.4. Matières organiques

Elles résultent de la transformation hydrolytique ou des résidus biologiques des végétaux à la surface des sols. Ces résidus peuvent être réincorporés plus bas dans le matériau argileux du Sol. La matière organique, à raison de quelques pourcent peut être présente dans les sédiments. Elle se caractérise par une forte capacité de rétention d'eau, ainsi, agit selon le comportement géo mécanique d'un matériau argileux.

I.3.2. Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physiques sont obtenues en laboratoire à partir d'essais très simples tels que les pesées avant et après passage à l'étuve et les mesures devolume.

- **Texture** : Composition granulométrique du sol, c'est à dire la proportion de chacun de ses constituants solides (argiles, sables, graviers...), qui ont des tailles différentes.
- **Structure** : La structure d'un sol est l'assemblage, un moment donné, de ses constituants solides. La stabilité structurale dépend de la matière organique des sols. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère.
- **Porosité** : Volume total des espaces laissés libres entre les agrégats ou les particules solides. Elle conditionne la circulation de l'eau et des gaz dans le sol.
- **La perméabilité du sol** : Dépend de la structure du sol, c'est sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures.

• **Capacité de rétention d'eau** : Quantité d'eau retenue par le sol qui est liée aux particules solides par les forces physiques [3].

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement des sols. Ces paramètres sont obtenus à partir des essais géotechniques en laboratoire, notamment :

• L'essai de compactage Proctor, il a pour objectif d'étudier l'influence de la teneur en eau d'un échantillon de sol sur le poids volumique sec de cet échantillon soumis à une énergie de compactage déterminée. Il permet ainsi, de déterminer la teneur en eau optimale nécessaire pour avoir la densité maximale du sol ou des matériaux analysés.

• L'indice portant immédiat (IPI), à teneur en eau naturelle exprime la capacité au pointage d'une éprouvette de sol compacté à énergie Proctor.

• L'essai de cisaillement direct à la boîte, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol (la contrainte de cisaillement à la rupture τ), ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte normale donnée (σ), suivant un plan de cisaillement horizontale imposée.

• L'essai de cisaillement à l'appareil triaxial, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte de confinement donnée σ_3 .

• L'essai de compression simple appelé également compression non confinée, a pour objectif de mesurer la force axiale de rupture de l'échantillon sous une vitesse de compression donnée.

• L'essai œdométrique, permet d'évaluer le tassement et le gonflement du matériau au cours du temps. Il permet également de classer les sols vis-à-vis de leur compressibilité [1].

I.4. Différents types des sols fins

Les sols à grains fins regroupent tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu. Le diamètre équivalent de ces particules peut varier d'environ 1 nm à 0,08 mm. Les sols à grain fin sont généralement identifiés sur la base de leur plasticité.

I.4.1. Argiles

De manière générale, le mot argile sert à désigner l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 2 μm . En termes de taille de grain, le mot argile a deux sens. Il désigne d'abord, les particules faites des minéraux argileux dont les cristaux excèdent parfois 2 μm , les minéraux argileux proviennent essentiellement de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Cette altération chimique agit de façon que certains minéraux silicates, comme les micas ou les feldspaths sont transformés en d'autres espèces minérales (kaolinite, illite, Montmorillonite), souvent de granulométrie plus fine. Les minéraux argileux sont surtout de la famille de silicates, formés à base de silice (Si) et d'oxygène (O), tels que le quartz et les feldspaths.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les sols

Le mot minéral argileux comprend les minéraux qui font partie du groupe des phyllo silicates, appelés aussi silicates de structure lamellaires [5] (Figure.4) .Un feuillet d'argile est formé par l'association des couches tétraédriques (T) à base de tétraèdres.

Le terme argile désigne ensuite les débris les plus fins de la désagrégation-altération physique des roches appelés la farine de roche ($d < 2 \mu\text{m}$). Cette farine peut contenir une proportion de minéraux argileux plus ou moins importante [5].



Figure I.4 Photo d'une argile

I.4.2.Limons

Les limons, constitués de silt, de loess et de lehm, possèdent un squelette siliceux à silico calcaire à grains fins Fig. 5. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et donc à éviter pour les fondations.



Figure I.5 Photo d'un sol limoneux

I.4.3. Vases

Du point de vue géologique, les vases sont des dépôts formés en eau douce ou salée, constituées de grains généralement très fins (inférieurs à 200 μ avec un pourcentage important de particules inférieures à 2 μ m de nature minéralogique variable, disposés en flocons (structure dite en « nids d'abeilles »).

La vase contient généralement une certaine proportion de matières organiques (le plus souvent inférieure à 10%). Elle peut être tourbeuse si la présence de certains microorganismes favorise la formation de tourbe. Dans les zones littorales, la présence de chlorure de sodium empêche la prolifération de ces micro-organismes, et de ce fait, la vase déposée n'est pas tourbeuse. En se consolidant, la vase perd une partie de son eau, la structure se détruit, et elle se transforme en une argile ou une marne d'autant moins molle que la consolidation est plus importante (Figure 6).

En fait du point de vue géotechnique, on confond souvent vase et argile molle. Pour le géotechnicien, ces sols se caractérisent par :

- Une teneur en eau est généralement voisine de la limite de liquidité, et un faible poids spécifique sec d (souvent inférieur à 10 kN/m³).
- Une teneur en matière organique de 2 à 10 % environ.
- Une faible cohésion non drainée c_u (de l'ordre de 15 kPa en moyenne).
- Une forte compressibilité donnant lieu à des tassements secondaires importants.
- Une faible perméabilité.
- Un état normalement consolidé (avec sur consolidation en surface, et exceptionnellement sous-consolidé dans les couches profondes) [6].

Il existe plusieurs types de vases à savoir :

Vases marines : les vases marines ou de marée, aussi connues sous les noms de tangué, vases marais, vases salines et parfois de vases rivières sont déposées par la marée à l'embouchure des rivières et des ruisseaux qui se jettent dans la mer et sur les bords peu élevés des baies et des anses. Elles se composent principalement de particules rocheuses broyées, sous forme d'un sable très fin, et de limon et d'argile en différentes proportions.

Vases de moules et de coquillage d'huitres : les vases de coquillages sont importantes en raison du carbonate de chaux qu'elles renferment. Vases d'étangs, de lacs et de rivières : ces catégories de vases sont généralement formées par le dépôt des fines substances portées par les eaux des rivières et des ruisseaux. Ce sédiment, qui se compose surtout de particules rocheuses finement broyées, contient souvent une quantité considérable de débris organiques, aussi ces vases sont généralement plus riches en matières organiques que les vases de marées ou d'eau salée [4].



Figure I.6 Photo d'un sol vaseux

I.4.4. Tourbes

La tourbe se définit comme le produit de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, arthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbière sur un intervalle de temps compris entre 1 000 et 7 000 ans. Les tourbes se présentent comme un matériau de texture fibreuse et elles se forment dans le fond des vallées humides et les dépressions marécageuses. Elles peuvent contenir des éléments détritiques : Sables, graviers, vases. Elles contiennent une très forte proportion d'eau. Si la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température causées par son enfouissement, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon (Figure.7).

La tourbe est traditionnellement définie comme synonyme de gazon, étant un tissu végétal partiellement carbonisé formé dans des conditions humides par la décomposition de diverses plantes et mousses. Il existe plusieurs types de la tourbe à savoir :

La tourbe blonde : qui provient de la transformation des sphaignes. Elle est riche en fibre de cellulose et en carbone. Sa texture est fibrique. Ses autres traits essentiels sont sa faible densité, sa forte teneur en eau et sa pauvre teneur en cendre minérale car elle est souvent jeune (2 000 ans).

La tourbe brune : Qui provient de la transformation de débris végétaux ligneux (arbres) et d'éricacées. Elle est composée de fibres mélangées à des éléments plus fins, provenant d'une dégradation plus poussée des végétaux, lui donnant une texture mésique. Elle est plus âgée (5000 ans) que la précédente.

La tourbe noire Qui provient de la transformation des cypéracées. Elle est riche en particules minérales et organiques fines. Sa texture est saphique, c'est-à-dire que la tourbe est plastique et

moins fibreuse. Visuellement, la tourbe noire se distingue facilement de la tourbe blonde par sa couleur foncée.

Une tourbe blonde très ancienne Tend à serapprocher, parcertains caractères, de la tourbe noire.

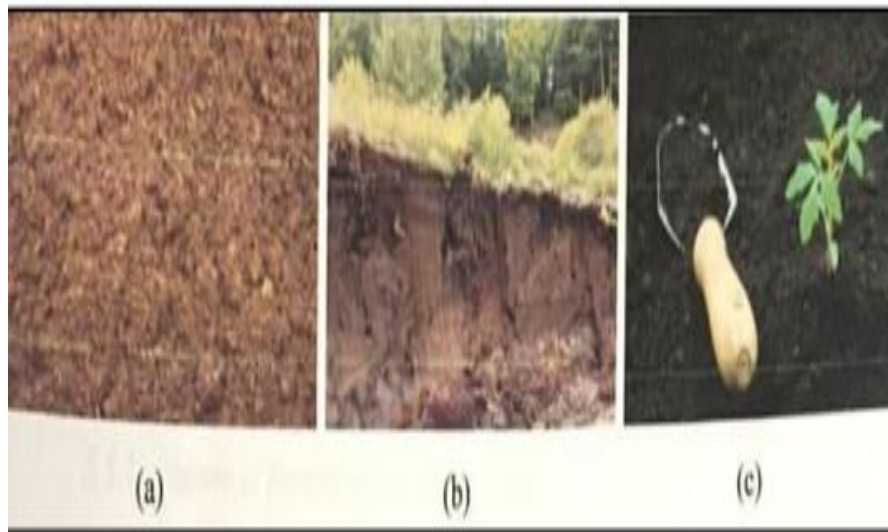


Figure I.7(a)Tourbe blonde, (b) Tourbe brune, (c)Tourbe blonde.

I.4.5. Marnes

Les marnes sont des formations sédimentaires, cohérents, formées dans un milieu marin peu profond (Fig. 8). Les marnes sont constituées essentiellement d'un mélange entre lescalcaires et les argiles, la proportion de ce dernier varie de 30% à 70% (Tab. 1) [7].



Figure I.8Etang de marne.

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Mais, à la différence des argiles, elles font effervescence avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des particules constitutives (minéraux argileux, carbonates et, parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans le groupe des

Chapitre I : Etude bibliographique sur les sols

lutites, ou pyélites. Suivant la composition minéralogique, on peut distinguer des marnes dolomitiques, glauconie uses, magnésiennes, gypseuses, micacées, sableuses, humifères [8]

Tableau 1 Dénomination des sols fins calcaires

Pourcentage de CaCO_3	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

I.5. Pathologies liées aux sols argileux

Les sols argileux présentent plusieurs pathologies en génie civil, notamment:

I.5.1 Tassement différentiel

Les argiles gonflent lorsqu'elles sont humidifiées et se rétractent lorsqu'elles se dessèchent, entraînant des mouvements différentiels.

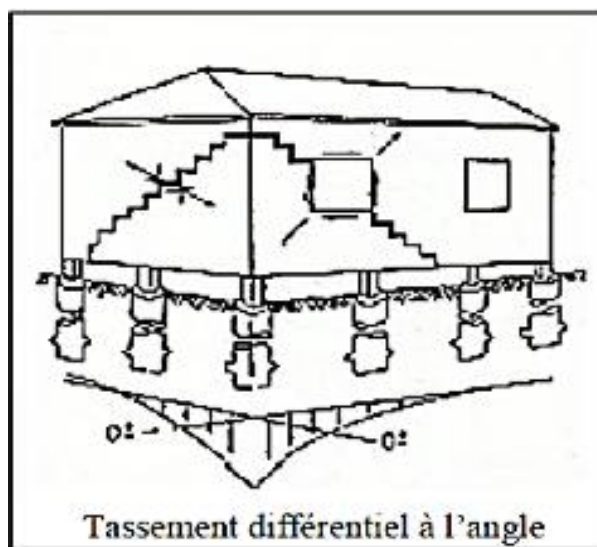


Figure I.9 Tassement différentiel

I.5.2 Fluage

Les argiles peuvent subir un fluage lent sous contrainte constante, ce qui peut causer des déformations permanentes des structures.

I.5.3 Gonflement

Les phénomènes de retrait et de gonflement des sols argileux sont observés depuis longtemps dans les pays au climat sec, où ils sont à l'origine de nombreux désordres causés tant aux bâtiments qu'aux voiries et routes. Il est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux (ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse). Ces variations de volume induisent des

Chapitre I : Etude bibliographique sur les sols

tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année. De fortes différences de teneur en eau vont donc apparaître dans le sol au droit des façades (Figure.10) [10].

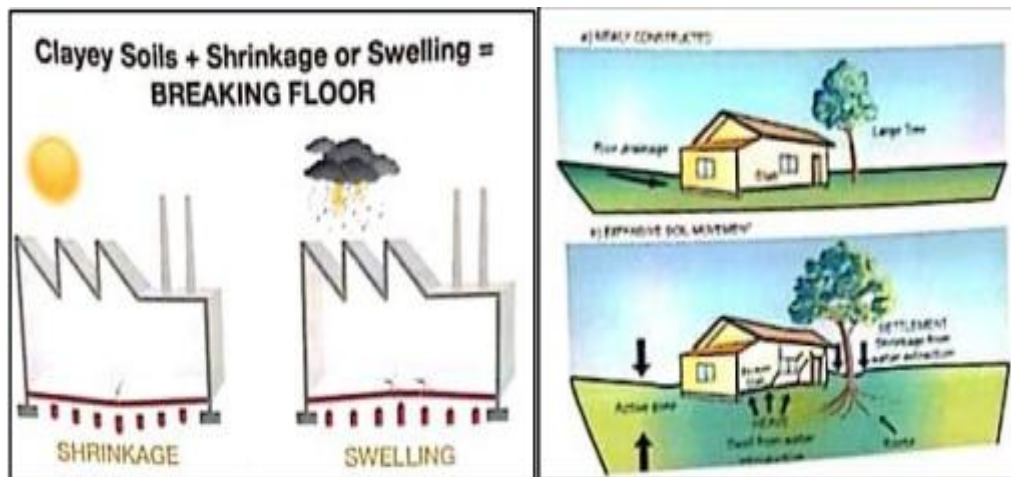


Figure I.10 Phénomène de retrait-gonflement

I.5.4 Érosion

Les sols argileux sont sensibles à l'érosion, en particulier lorsqu'ils sont exposés à l'eau courante, ce qui peut affaiblir les fondations et les structures souterraines.

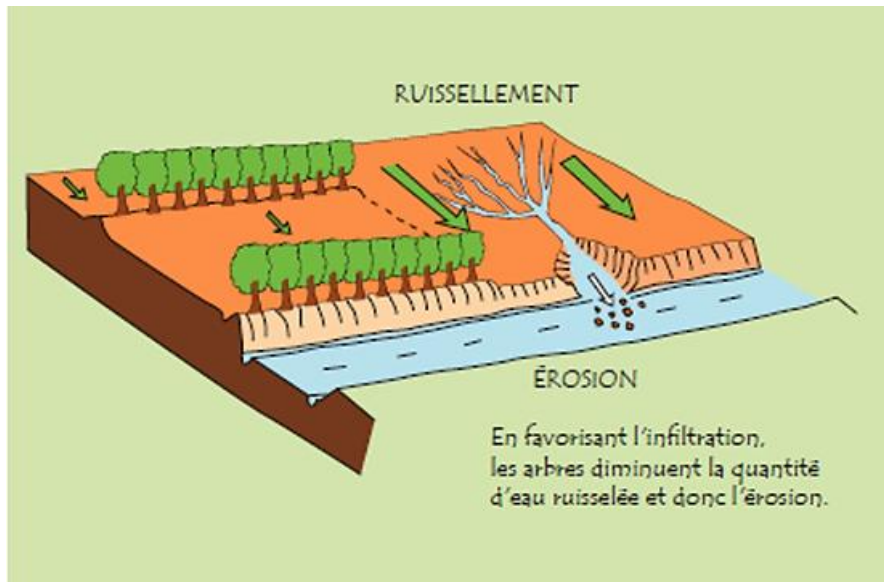


Figure I.11 Ruissellement sans végétation

I.5.5 Sécheresse

En période de sécheresse, les sols argileux ont tendance à se rétracter, ce qui peut entraîner des fissures dans les structures construites dessus.



Figure I.12 Sécheresse dans les sols argileux

I.5.6 Instabilité des pentes

Les pentes construites sur des sols argileux peuvent devenir instables en raison du gonflement, du fluage ou de l'érosion, ce qui entraîne des risques d'effondrement.

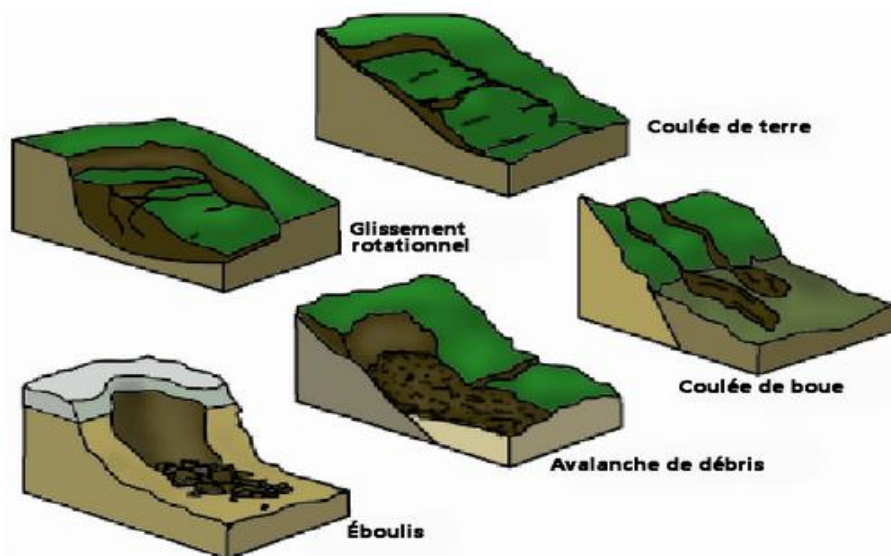


Figure I.13 Types de mouvements de terrain

I.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description des sols fins en général. Nous avons utilisé pour cela différentes échelles de présentation, permettant de montrer les différents minéraux constitutifs et les différentes caractéristiques. Il est important de caractériser les sols et aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires.

Référence

- [1] Lakhdari Kahina. Amélioration de la résistance mécanique à l'action de l'eau d'un sable par incorporation des stabilisants. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou(2016).
- [2] BarkaZeineb, Ait Brahim Nehla. Etude du comportement d'une marne argileuse traitée pour valorisation dans les projets routiers. Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945-Guelma (2017).
- [3] Site internet: <http://keepschool.com/fiches-de-cours/lycee/svt-biologie/sols-proprietesformation.html#>
- [4] Boumzaout Nada, BenamaraMeryem, NouredineKhaoula. Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Mémoire de Master. Université 8 mai 1945-Guelma (2019).
- [5] Abdelhadi El Hachemi. Argile Minéraux Argileux : propriétés physico-chimiques et propriétés colloïde. Mémoire de Master. Université Abdelmalek Essaadi de Tétouan-Maroc(2013).
- [6] Berrabah Fouad. Étude du comportement des remblais renforcés par des géosynthétiques sur sols marécageux. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider– Biskra (2010).
- [7] F.Lamas, C. Irigaray, C.Oteo, J. Chacon. Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls. Engineering Geology (2005).
- [8] Charles Pomerol. MARNES. Encyclopédie Universalis (en ligne). Consulté le 1 Juin 2021. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/marnes/>.
- [9] Terzaghi, K, peck, R, B., & Mesri, G. 1996. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.
- [10] Lambe, T. W., & Whitman, R. V. 1979. Soil mechanics. John Wiley & Sons.
- [11] Bourhail Ferial. Etude comparative sur le comportement des sols fins traités à la Chaux. Mémoire de Master. Université L'Arbi Ben Mhidi-Oum El Bouaghi (2019).
- [12] Craig, R. F. 2012. Craig's Soil mechanics. CRC press.
- [13] NAVFAC. 1986. Soil mechanics design manual. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering command.
- [14] Holtw, R. D., Kovacs, Z. D. & Sheahan, T. C. 2011. An introduction geotechnical engineering. Pearson.

**Chapitre II : l'état de l'art sur
les effets des températures sur
les sols argileux**

II.1. Introduction

Dans le domaine de la géotechnique, où la stabilité des infrastructures et la sécurité des constructions reposent en grande partie sur la compréhension des sols et de leurs réactions aux forces extérieures, l'étude de l'impact des températures sur ces sols constitue un domaine de recherche essentiel. L'état de l'art révèle une complexité fascinante dans les interactions entre les variations thermiques et les comportements géotechniques des sols. Les températures fluctuantes, qu'elles soient saisonnières ou liées au changement climatique, exercent une influence profonde sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des sols, ce qui peut avoir des conséquences majeures sur la stabilité des fondations, la durabilité des ouvrages et la sécurité des infrastructures. Par exemple, dans les régions sujettes au gel et au dégel, les cycles répétés de contraction et d'expansion des sols peuvent entraîner des dommages importants aux fondations et aux structures souterraines. De même, les températures élevées peuvent affaiblir la cohésion des sols argileux, augmentant ainsi le risque de glissements de terrain et d'affaissements. En outre, les variations thermiques peuvent également influencer la teneur en eau des sols, affectant leur portance et leur capacité à supporter des charges. Comprendre ces processus complexes et anticiper leurs effets sur les projets de construction est donc crucial pour les ingénieurs géotechniciens, car cela leur permet de concevoir des solutions adaptées et résilientes face aux défis climatiques actuels et futurs. En explorant les mécanismes sous-jacents de ces interactions et en développant des modèles prédictifs précis, la communauté géotechnique cherche à repousser les limites de la compréhension et de l'innovation, contribuant ainsi à façonner un avenir où les infrastructures sont non seulement robustes, mais aussi durables et adaptées à un climat en évolution constante.

II.1.L'interaction entre les températures très élevées et les sols argileux peut être explorée en examinant plusieurs aspects

II.1.1 Capacité thermique et conductivité thermique de l'argile

L'argile a une capacité thermique relativement élevée, ce qui signifie qu'elle peut stocker et absorber une quantité considérable de chaleur. De plus, sa faible conductivité thermique signifie qu'elle transfère la chaleur plus lentement que d'autres types de sols. Pendant les périodes de températures élevées, les sols argileux peuvent accumuler la chaleur du soleil plus efficacement que les sols plus légers, conduisant à des températures plus élevées à la surface du sol. [1]

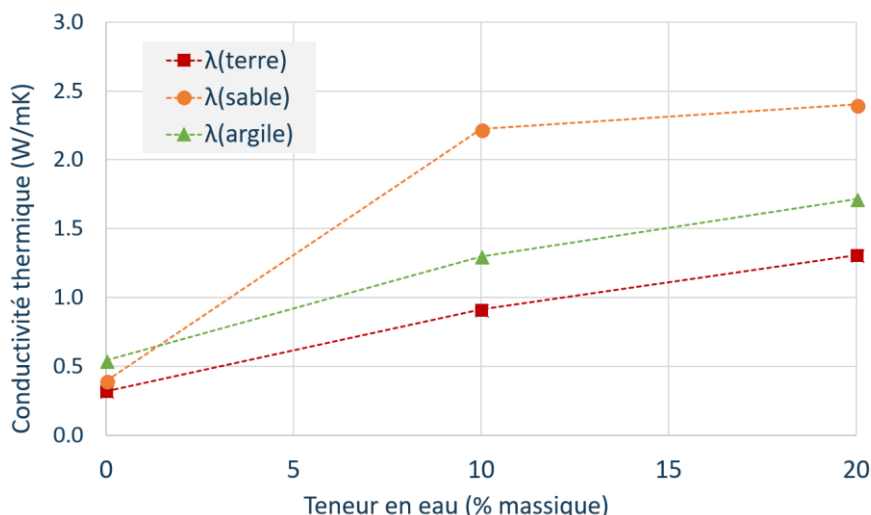
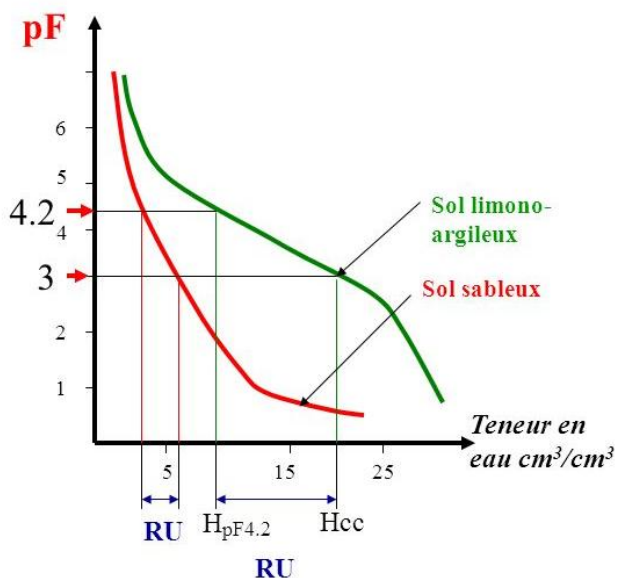


Figure II.1. Courbe de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.

II.1.1.1. Rétention d'humidité

Les sols argileux ont une capacité élevée à retenir l'humidité en raison de leur structure microporeuse. Pendant les périodes de chaleur extrême, cette rétention d'humidité peut être bénéfique en fournissant de l'eau aux plantes et en maintenant une certaine humidité dans le sol. Cependant, cela peut également entraîner une évaporation plus lente de l'eau du sol, ce qui peut contribuer à des conditions de sécheresse prolongée et à une augmentation de la température du sol. [2]

LA COURBE DE RETENTION



Un sol limono-argileux retient plus d'eau qu'un sol sableux (porosité plus grossière)

La distribution des tailles des pores est plus homogène en sol argileux

Gamme d'eau utile : $H_{pF4,2} \rightarrow H_{cc}$

D'après Morel, 1989

Figure II.2 Courbe de la rétention

II.1.1.2. Compaction du sol

Sous l'effet de la chaleur, les sols argileux peuvent subir une compaction accrue. La compaction réduit la porosité du sol, limitant ainsi la circulation de l'air et l'infiltration de l'eau. Cela peut entraîner une augmentation de la température du sol, car la chaleur est piégée plus près de la surface et la capacité du sol à se refroidir par évaporation est réduite. [3]

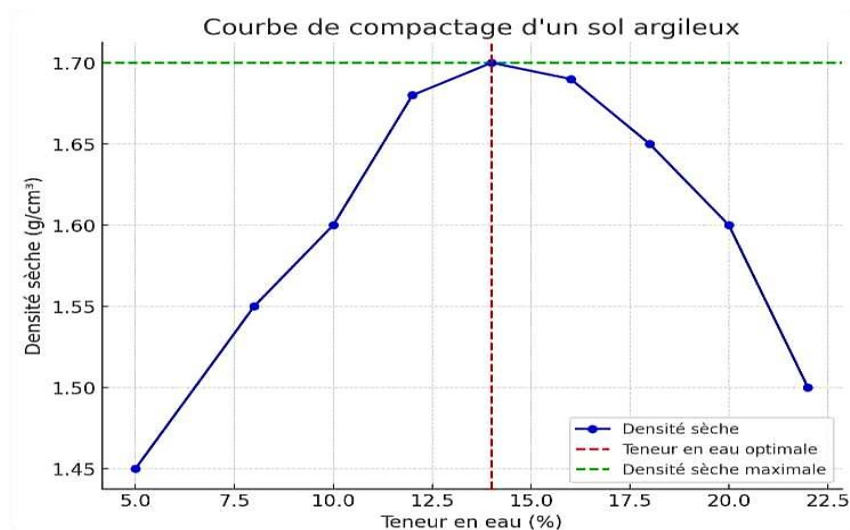


Figure II.3 courbe de compactage des sols argileux

II.1.1.3 Effets sur les organismes du sol

Les variations de température influencent l'organisme des sols argileux en modifiant leur structure et leurs propriétés. Lorsqu'ils sont chauffés, ces sols se dilatent, entraînant des soulèvements et des modifications de la porosité, tandis que le refroidissement cause leur contraction, pouvant provoquer des fissures et une compaction accrue. Les températures élevées augmentent l'évaporation, réduisant la teneur en eau et augmentant la rigidité et la friabilité du sol. À l'inverse, des températures plus basses augmentent la rétention d'eau, rendant le sol plus plastique et moins résistant. Ces variations affectent également les réactions chimiques et biologiques, influençant la stabilité et la fertilité du sol.

En somme, l'interaction entre les températures très élevées et les sols argileux est un processus complexe qui implique à la fois des aspects physiques et biologiques du sol. Comprendre ces interactions est crucial pour prédire les effets du changement climatique sur les écosystèmes terrestres et pour développer des pratiques de gestion durable des sols. [4]

II.2. l'influence des températures sur les propriétés physique des sols argileux

L'impact des températures sur les propriétés physiques des sols argileux est un sujet d'étude approfondi et complexe, car ces sols réagissent de manière dynamique et souvent non linéaire aux variations de température. Cette interaction entre la température et les propriétés physiques des sols argileux est influencée par de nombreux facteurs, notamment la composition minéralogique

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

de l'argile, la structure du sol, l'humidité, la pression, et la durée d'exposition aux températures extrêmes. Exploro0lkns plus en détail l'influence des températures sur les propriétés physiques des sols argileux : [5]

II.2.1 Effets sur la structure du sol

Les températures peuvent avoir un impact significatif sur la structure du sol argileux. À des températures élevées, les forces d'attraction entre les particules d'argile peuvent diminuer, ce qui peut entraîner une augmentation de la porosité et de la perméabilité du sol. Cependant, à des températures extrêmes, les particules d'argile peuvent également subir des changements de phase, tels que la fusion ou la décomposition, ce qui peut entraîner une perte de structure et de cohésion du sol.

II.2.2. Comportement mécanique sous charge

Les températures influencent également le comportement mécanique des sols argileux sous charge. À des températures plus élevées, les sols argileux peuvent devenir plus malléables et plastiques, ce qui peut augmenter leur susceptibilité à la déformation et à la consolidation. Cependant, à des températures extrêmes, les sols argileux peuvent également subir des changements de phase, tels que la fusion ou la décomposition, ce qui peut entraîner une perte de cohésion et de résistance mécanique.

II.2.3. Effets sur la rétention d'eau

Les températures affectent la capacité des sols argileux à retenir l'eau. À des températures plus élevées, l'évaporation de l'eau du sol augmente, ce qui peut entraîner une diminution de la rétention d'eau et une augmentation de la sécheresse du sol. Cependant, à des températures plus basses, l'eau peut geler et former de la glace, ce qui peut également influencer la rétention d'eau et la structure du sol.

II.2.4. Perméabilité et drainage

Les températures ont un impact sur la perméabilité des sols argileux. À des températures plus élevées, les particules d'argile peuvent se dilater, ce qui peut augmenter la perméabilité du sol en ouvrant de nouveaux espaces entre les particules. Cependant, à des températures plus basses, les particules d'argile peuvent se contracter, ce qui peut réduire la perméabilité du sol en obstruant les pores et les canaux d'eau. [6]

II.2.5. Effets sur la fertilité

Les températures influencent également la fertilité des sols argileux en affectant la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. À des températures plus élevées, les processus de décomposition organique peuvent être accélérés, ce qui peut libérer des nutriments dans le sol et

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

augmenter sa fertilité. Cependant, à des températures extrêmes, les micro-organismes responsables de la décomposition peuvent être tués, ce qui peut réduire la disponibilité des nutriments pour les plantes. Les températures ont une influence significative et complexe sur les propriétés physiques des sols argileux, avec des effets variés sur leur structure, leur comportement mécanique, leur rétention d'eau, leur perméabilité et leur fertilité. Une compréhension approfondie de ces interactions est essentielle pour une gestion durable des sols argileux dans un contexte de changement climatique et pour atténuer les effets néfastes sur les écosystèmes et les activités humaines qui en dépendent. [7]

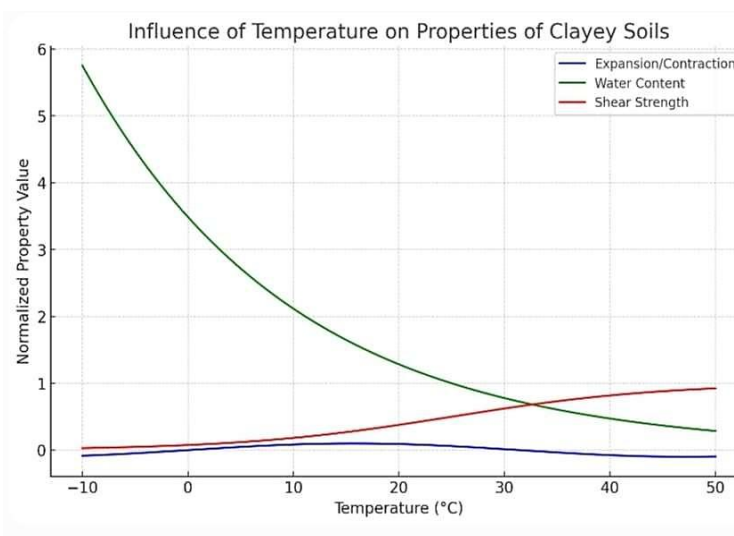


Figure II.4 Courbe représentative de l'influence des températures sur les propriétés physiques des sols argileux

II.3. L'impact des températures sur la structure et la microstructure des sols

Tableau II.1 Représente l'impact des températures sur la structure et la microstructure des sols argileux

Température	Effets sur la structure globale	Effets sur la microstructure	Effets sur la liaison entre les particules	Effets sur les fissures et les pores
Basse (0-1°C)	Structure plus compact et stable	Particule plus rapprochées	Liaison interparticulaire renforcé	Réduction de la taille des pores
Modérée (10-30°C)	Structure stable	Disposition des particules stables	Liaison interparticulaire stable	Taille des pores stable
Elevée (30-60°C)	Légère dilatation de la structure	Augmentation de l'espacement entre les particules	Réduction de la force de liaison entre particules	Augmentation de la taille et des nombres des pores
Très élevée (>60°C)	Dilatation significative, possible de l'agrégation	Séparation accrue des particules	Faiblesse des liaisons, possible désintégration partielle	Formation de fissures, augmentation significative des pores

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

Notes Explicatives :

- **Structure globale :** À basse température, la structure des sols argileux est plus compacte et stable, tandis qu'à des températures élevées, la structure peut se dilater et même se désagréger.
- **Microstructure :** Les particules d'argile sont plus rapprochées à basse température, tandis qu'à haute température, elles s'espacent davantage, affectant la microstructure du sol.
- **Liaison des particules :** Les liaisons entre les particules sont plus fortes à basse température et deviennent plus faibles à mesure que la température augmente, ce qui peut mener à une désintégration partielle du sol.
- **Fissures et pores :** La taille et le nombre des pores augmentent avec la température, et à des températures très élevées, des fissures peuvent se former, augmentant significativement la porosité du sol.

Ce tableau illustre les effets thermiques sur la structure et la microstructure des sols argileux, mettant en évidence l'importance de la température sur la stabilité et l'intégrité des sols.

L'impact des températures sur la structure et la microstructure des sols argileux est un domaine de recherche complexe et multidisciplinaire, qui nécessite une compréhension approfondie des processus physiques, chimiques et thermodynamiques à l'œuvre à différentes échelles. Les températures influencent la structure et la microstructure des sols argileux de manière variée, en modifiant les interactions entre les particules d'argile, l'eau et d'autres constituants du sol. [8]

II.4. Influences des températures sur la structure et la microstructure des sols argileux

II.4.1. Réorganisation cristalline

À des températures élevées, les particules d'argile peuvent subir des changements dans leur arrangement cristallin et leur orientation. Par exemple, la kaolinite peut subir une transformation en mellite et en cristobalite à des températures élevées, ce qui modifie la structure du sol à l'échelle microscopique et peut affecter ses propriétés mécaniques et hydrauliques.

II.4.2. Expansion et contraction thermique

Les températures extrêmes peuvent provoquer une expansion ou une contraction des particules d'argile en fonction de leur composition minéralogique et de leur teneur en eau. Par exemple, les Montmorillonites peuvent se dilater lorsqu'elles sont chauffées en raison de la présence d'eau adsorbée entre les feuillets, ce qui peut augmenter la porosité du sol. À l'inverse, des températures très basses peuvent causer une contraction des particules, ce qui peut réduire la porosité du sol et augmenter sa densité apparente.

II.4.3.Changements de phase

Les températures extrêmes peuvent entraîner des changements de phase dans les minéraux argileux présents dans le sol. Par exemple, la transformation de l'illite en chlorite à des températures élevées peut modifier la structure du sol et ses propriétés hydrauliques. De même, la fusion partielle ou complète de certains minéraux argileux à des températures très élevées peut entraîner la formation de nouvelles phases minérales et la perte de cohésion du sol.

II.4.4.Formation et stabilité des agrégats

Les températures influencent la formation et la stabilité des agrégats dans les sols argileux. À des températures modérées, les particules d'argile peuvent se lier entre elles pour former des agrégats de différentes tailles et formes, ce qui contribue à la structure du sol et à sa stabilité. Cependant, des températures extrêmes peuvent perturber la formation et la stabilité de ces agrégats, ce qui peut affecter la perméabilité et la stabilité du sol.

II.4.5.Répartition de l'eau dans le sol

Les températures influencent la répartition de l'eau dans le sol en modifiant la tension de l'eau et la conductivité hydraulique du sol. À des températures élevées, l'eau peut être évaporée plus rapidement, ce qui peut modifier la distribution de l'eau dans le sol et affecter sa teneur en eau volumétrique. De plus, des températures extrêmes peuvent provoquer la fonte ou la congélation de l'eau dans le sol, ce qui peut influencer la porosité et la perméabilité du sol.

Les températures ont un impact profond et complexe sur la structure et la microstructure des sols argileux, influençant leur arrangement cristallin, leur expansion thermique, leurs changements de phase, la formation d'agrégats et la répartition de l'eau dans le sol. Une meilleure compréhension de ces processus est essentielle pour prédire et atténuer les effets des changements climatiques sur les sols argileux, ainsi que pour optimiser leur utilisation dans diverses applications, de l'agriculture à l'ingénierie géotechnique.

II.5. Effet des températures sur le comportement mécanique des sols argileux

Les températures exercent une influence profonde et complexe sur le comportement mécanique des sols argileux. [9]

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

Tableau II.2 Représente les effets des températures sur le comportement mécanique des sols argileux

Température de l'incendie	Effet sur le comportement mécanique des sols argileux
Faible (moins de 200°C)	<ul style="list-style-type: none">-Légère altération de la structure du sol .-Réduction minimale de la résistance à la compression .-Peu d'impact sur la plasticité et la cohésion du sol .
Modérée (200-400°C)	<ul style="list-style-type: none">-Altération significative de la structure du sol , conduisant à la formation de fissures et de croutes .-Réduction notable de la résistance à la compression .-Augmentation de la plasticité et de la cohésion du sol .
Elevée (400-700°C)	<ul style="list-style-type: none">-Destruction importante de la structure du sol .-Formation de croutes rigides et de fragments de sol .-Baisse significative de la résistance à la compression .-Réduction de la plasticité et de la cohésion du sol
Très élevée (plus de 700°C)	<ul style="list-style-type: none">-Dégâts graves au niveau de la structure du sol , avec une fusion possible des particules d'argile-Formation de croutes dures et de cendres .-Forte diminution de la résistance de la résistance à la compression .-Réduction importante de la plasticité et de la cohésion du sol .

Prenons d'abord les cycles de gel et de dégel. Lorsque l'eau dans le sol gèle, elle se dilate, exerçant une pression sur les particules du sol. Ces cycles peuvent entraîner des mouvements de sol, des fissures et des ruptures de structure, ce qui diminue la résistance et la stabilité du sol. Les répercussions de ces phénomènes se font sentir sur le long terme, affectant la durabilité des infrastructures construites sur ces sols.

Les variations de température ont également un impact sur la teneur en eau du sol. Par exemple, des températures élevées favorisent l'évaporation de l'eau, entraînant un retrait et une diminution de la cohésion du sol argileux. À l'inverse, des températures plus basses peuvent augmenter la saturation en eau du sol, augmentant sa plasticité et sa malléabilité, mais pouvant également réduire sa capacité portante.

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

En outre, les températures élevées peuvent causer des phénomènes de dessiccation, entraînant une contraction du sol et la formation de fissures. Ces fissures compromettent la stabilité du sol et peuvent affecter la sécurité des structures construites sur ces sols.

Comprendre ces interactions complexes entre les températures et les sols argileux est essentiel pour la conception et la construction d'infrastructures durables dans différentes conditions climatiques. Des études approfondies et une gestion appropriée sont nécessaires pour minimiser les risques associés aux fluctuations de température sur ces sols.

Voici quelques exemples concrets pour illustrer l'impact des températures sur le comportement mécanique des sols argileux :

II.5.1. Effets du gel et du dégel sur les routes et les fondations

Dans les régions où les températures fluctuent régulièrement autour du point de congélation, les routes et les fondations construites sur des sols argileux peuvent subir des dommages importants. Les cycles de gel et de dégel provoquent des mouvements du sol, des fissures dans les chaussées et des déformations des fondations, ce qui nécessite souvent des réparations coûteuses.



Figure II.5 Effet du gel et du dégel

II.5.2. Stabilité des talus et des pentes

Les variations de température peuvent également affecter la stabilité des talus et des pentes composés de sols argileux. Par exemple, lorsqu'un sol argileux est exposé à des températures élevées, il peut se dessécher et se contracter, ce qui augmente le risque de glissements de terrain et d'éboulements.

II.5.3. Comportement des barrages et des digues

Les barrages et les digues construits sur des sols argileux doivent être conçus en tenant compte des variations de température. Les températures extrêmes peuvent affecter la capacité portante du sol et la stabilité de la structure, ce qui peut compromettre la sécurité des zones en aval.

Pour des références spécifiques sur ce sujet, je vous recommande de consulter des publications scientifiques et des ouvrages spécialisés en génie civil, géotechnique ou géologie.

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

Ces ouvrages offrent une analyse approfondie des interactions entre les températures et les sols argileux, ainsi que des recommandations pour la conception et la construction d'infrastructures dans des environnements soumis à des variations thermiques.

II.6.Effets des températures sur le comportement hydraulique des sols argileux

Voici un tableau résumant les effets de la température sur le comportement hydraulique des sols argileux :

Tableau II.3 Représente les effets des températures sur le comportement hydraulique des sols argileux

Température	Effet sur la perméabilité	Effet sur la capacité de rétention d'eau	Effet sur la contraction / dilatation	Effet sur la viscosité de l'eau
Basse (0-10°c)	Diminution de la perméabilité	Augmentation de la capacité de rétention d'eau	Contraction des particules d'argile	Augmentation de la viscosité de l'eau
Modérée (10-30°c)	Perméabilité relativement stable	Capacité de rétention d'eau stable	Comportement stable , faible contraction / dilatation	Viscosité de l'eau stable
Elevée (30-60°)	Augmentation de la perméabilité	Diminution de la capacité de la rétention d'eau	Dilatation des particules d'argile	Diminution de la viscosité de l'eau
Très élevée (>60°c)	Forte augmentation de la perméabilité	Forte diminution de la capacité de rétention d'eau	Forte dilatation de la particule, possible des fissures	Forte diminution de la viscosité de l'eau

Notes Explicatives

- **Perméabilité** :La perméabilité d'un sol argileux augmente généralement avec la température car la viscosité de l'eau diminue, facilitant le passage de l'eau à travers le sol.

-**Capacité de rétention d'eau** :La capacité de rétention d'eau diminue avec l'augmentation de la température, car les forces de liaison entre les molécules d'eau et les particules d'argile diminuent.

- **Contraction/Dilatation** : Les sols argileux se contractent à basse température et se dilatent à haute température, ce qui peut provoquer des fissures à des températures très élevées.

- **Viscosité de l'eau**: La viscosité de l'eau diminue avec l'augmentation de la température, ce qui affecte directement la perméabilité du sol.

Ce tableau met en lumière l'importance de la température dans le comportement hydraulique des sols argileux et son impact sur les propriétés physiques et mécaniques de ces sols.

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

Les températures peuvent également avoir un impact significatif sur le comportement hydraulique des sols argileux. Voici quelques-uns des effets les plus courants :

II.6.1. Infiltration et drainage

Les variations de température influencent la capacité des sols argileux à absorber l'eau et à permettre son écoulement. Par exemple, des températures élevées peuvent favoriser l'évaporation de l'eau du sol, ce qui peut entraîner un dessèchement et une diminution de la capacité d'infiltration. À l'inverse, des températures plus basses peuvent entraîner une saturation du sol, limitant ainsi son drainage naturel.

a. Rétrécissement et gonflement

Les sols argileux sont sensibles aux changements de teneur en eau, ce qui peut entraîner des phénomènes de rétrécissement et de gonflement. Les variations de température peuvent influencer ces processus en modifiant la quantité d'eau présente dans le sol. Par exemple, lorsqu'un sol argileux se réchauffe, il peut se dessécher et se contracter, entraînant des fissures et des instabilités. À l'inverse, des températures plus basses peuvent favoriser la saturation du sol en eau, augmentant ainsi son potentiel de gonflement.

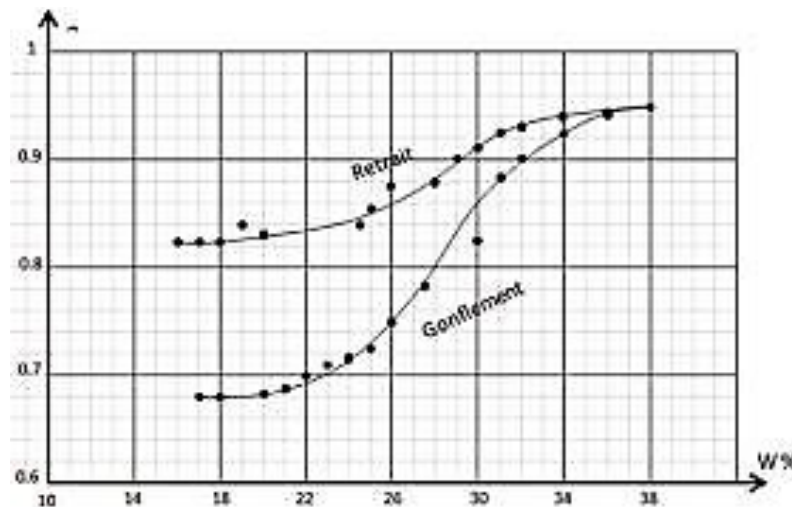


Figure II.6 Courbe représentative du phénomène du Retrait et Gonflement.

b. Perméabilité

Les températures peuvent affecter la perméabilité des sols argileux, c'est-à-dire leur capacité à permettre le passage de l'eau. Par exemple, des températures élevées peuvent favoriser la formation de fissures dans le sol, ce qui peut augmenter sa perméabilité et permettre une infiltration accrue. En revanche, des températures plus basses peuvent entraîner une réduction de la perméabilité en raison de la formation de glace dans les pores du sol.

c. Érosion et sédimentation

Les variations de température peuvent également influencer les processus d'érosion et de sédimentation dans les sols argileux. Par exemple, le gel et le dégel répétés peuvent provoquer le

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

déplacement et le transport de particules de sol, entraînant une érosion des surfaces exposées. De même, des températures élevées peuvent favoriser l'évaporation de l'eau des cours d'eau et des zones humides, ce qui peut entraîner la sédimentation des particules argileuses.

Les températures jouent un rôle crucial dans le comportement hydraulique des sols argileux, influençant leur capacité d'infiltration, leur rétrécissement et leur gonflement, leur perméabilité, ainsi que les processus d'érosion et de sédimentation. Une compréhension approfondie de ces interactions est essentielle pour la gestion et la protection des ressources en eau et des infrastructures construites sur des sols argileux.

II.7.Variation du volume des sols argileux en fonction de la température

La variation du volume des sols argileux en fonction de la température est un phénomène complexe résultant des interactions entre les minéraux argileux, l'eau et les changements thermiques. Voici une explication détaillée de ce processus :

Tableau II.4 Variation du volume en fonction de la température

Température (°c)	Variation du volume du sol argileux	Effet Géotechnique
25	Stable	Aucun changement significatif dans le volume du sol .
50	Légère expansion : petite augmentation du volume	Début de l'expansion du à la chaleur , mais aucun impact majeur sur la structure du sol .
75	Expansion modérée : augmentation modérée du volume .	Légère augmentation de la porosité , pouvant entraîner un léger gonflement du sol
100	Expansion significative : augmentation notable du volume .	Augmentation significative de la porosité , pouvant entraîner un gonflement plus prononcé et des déformations mineurs .
125	Expansion importante : augmentation marquée du volume .	Gonflement important du sol avec des risques accrus de fissuration et de déformation .
150	Expansion maximale : expansion maximale du volume .	Gonflement extrême du sol , risque élevés des fissurations et des déformations sévère et de dommages aux structures .

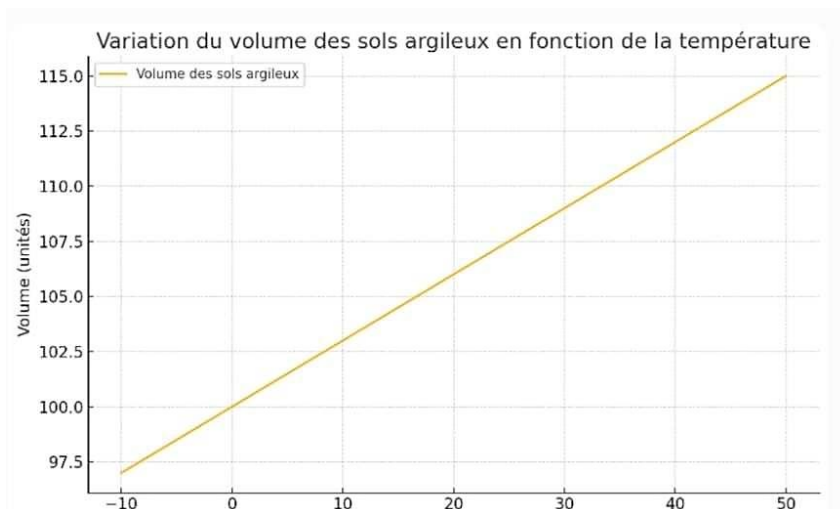


Figure II.7 Courbe représentative de la variation du volume des sols argileux en fonction des températures

II.7.1. Expansion thermique des minéraux argileux

Lorsque la température augmente, les minéraux argileux présents dans le sol peuvent subir une expansion thermique. Cela se produit parce que l'énergie thermique agite les particules du sol, les faisant vibrer et s'éloigner les unes des autres. Cependant, cette expansion est souvent minime en comparaison avec d'autres matériaux.

II.7.2. Influence de l'eau

La teneur en eau joue un rôle crucial dans la réponse du sol argileux aux changements de température. L'eau agit comme un lubrifiant entre les particules d'argile, facilitant leur mouvement. Lorsque la température augmente, l'eau peut s'évaporer plus rapidement, provoquant un retrait du sol et une contraction de son volume. À l'inverse, lorsqu'il fait froid, l'eau peut geler et former de la glace, entraînant une expansion du sol.

II.7.3. Cycle de gel et de dégel

Les cycles de gel et de dégel peuvent être particulièrement dommageables pour les sols argileux. Lorsque l'eau présente dans le sol gèle, elle se dilate, exerçant une pression sur les particules d'argile et provoquant des mouvements de sol. Ce processus peut créer des fissures et des déformations dans le sol, ce qui peut endommager les infrastructures construites sur celui-ci.

II.7.4. Effets sur les infrastructures

La variation du volume des sols argileux en fonction de la température peut avoir des conséquences importantes sur les infrastructures construites sur ces sols. Par exemple, des fondations peuvent se fissurer ou s'affaisser en raison des mouvements du sol causés par les changements de température. Il est donc essentiel de prendre en compte ces effets dans la conception et la construction des projets d'infrastructures.

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

La variation du volume des sols argileux en fonction de la température est un processus complexe influencé par plusieurs facteurs, notamment la composition du sol, sa teneur en eau et les cycles thermiques auxquels il est soumis. Une compréhension approfondie de ces interactions est essentielle pour minimiser les risques pour les infrastructures construites sur des sols argileux.

II.8. Effet de la température sur la compressibilité des sols

Dans les sols sablo-argileux, la relation entre la température et la compressibilité peut être encore plus complexe en raison de l'hétérogénéité de leur composition. Par exemple, dans les sols sablo-argileux, une augmentation de la température peut entraîner une expansion des particules d'argile tout en réduisant la cohésion entre les grains de sable, ce qui pourrait conduire à une augmentation de la compressibilité du sol. Cependant, la situation peut être encore plus nuancée si l'on considère la distribution de la taille des grains et la nature des minéraux argileux présents dans le sol, qui peuvent réagir différemment à la chaleur.

De plus, la variabilité spatiale et temporelle des conditions environnementales peut également jouer un rôle important dans la relation entre la température et la compressibilité des sols. Par exemple, les variations saisonnières de température peuvent entraîner des cycles de gel et de dégel dans les sols, ce qui peut influencer leur structure et leur compressibilité à long terme. De même, les changements à long terme dans le climat peuvent avoir un impact sur les propriétés physiques des sols, ce qui peut également affecter leur compressibilité.

En outre, les activités anthropiques telles que la construction d'infrastructures, l'exploitation minière ou l'agriculture peuvent modifier les propriétés des sols et leur réponse à la température. Par exemple, la compaction du sol due à des activités humaines peut modifier sa porosité et sa perméabilité, ce qui peut influencer sa compressibilité et sa réponse à la température.

La relation entre la température et la compressibilité des sols est un domaine de recherche complexe et en évolution, qui nécessite une compréhension approfondie des interactions entre les facteurs géologiques, hydrologiques et climatiques. Des études supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre ces processus et développer des modèles prédictifs précis pour évaluer l'impact du changement climatique et des activités humaines sur les propriétés mécaniques des sols. [10]

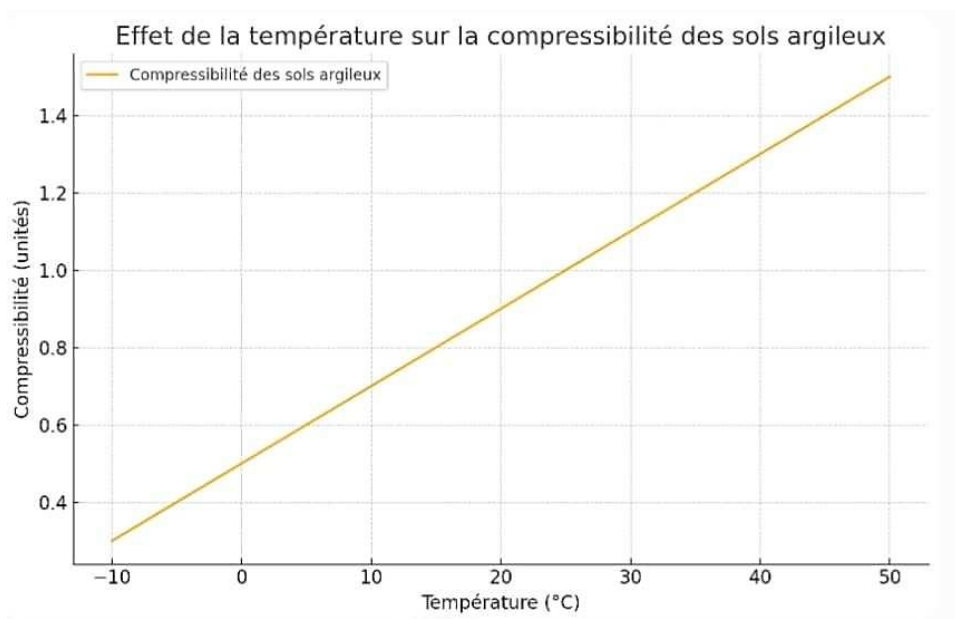


Figure II.8 Courbe représentative de l'effet des températures sur la compressibilité des sols argileux .

II.9. Effet des températures sur la résistance au cisaillement des sols argileux

Tableau II.6 Effet des températures sur la résistance au cisaillement des sols argileux.

Température(°)	Effet sur la résistance au cisaillement	Mécanismes impliqués
0-10	Augmentation de la résistance au cisaillement	Gel de l'eau interstitielle, augmentation de la cohésion
10-25	Stabilité ou légère augmentation	Condition normale l'eau reste liquide
25-40	Diminution progressive de la résistance au cisaillement	Dilatation thermique, réduction de la cohésion
40-60	Diminution marquée	Augmentation de la pression des pores, perte d'adhésion entre les particules
60-100	Diminution significative	Déshydratation partielle, changement minéralogiques
>100	Diminution drastique	Assèchement complet, possible transformation minéralogique

Explications :

- 0 - 10 °C: La résistance au cisaillement augmente car l'eau interstitielle peut geler, ce qui augmente la cohésion entre les particules argileuses.
- 10 - 25 °C: Les conditions restent relativement stables avec une légère augmentation possible de la résistance due à une légère évaporation de l'eau interstitielle, mais globalement, la résistance reste stable.

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

- **25 - 40 °C**: La résistance commence à diminuer progressivement en raison de la dilatation thermique et de la réduction de la cohésion entre les particules.
- **40 - 60 °C**: La diminution de la résistance devient plus marquée car l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression des pores, ce qui réduit l'adhésion entre les particules d'argile.
- **60 - 100 °C**: La diminution est significative car la déshydratation partielle des sols argileux commence à se produire, et des changements minéralogiques peuvent se produire, affectant négativement la cohésion.
- >**100 °C**: La résistance au cisaillement diminue drastiquement en raison de l'assèchement complet et de la possible transformation minéralogique des particules d'argile. [11]

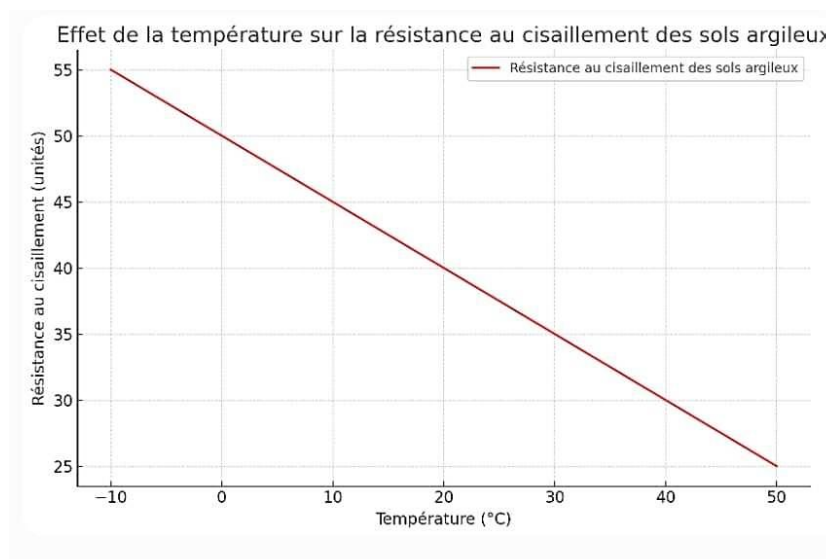


Figure II.9 Courbe représentative sur les effets des températures sur la résistance au cisaillement des Sols argileux.

L'effet de la température sur la résistance au cisaillement des sols argileux peut être assez complexe en raison de la nature particulière de ces sols. Voici quelques considérations :

II.9.1. Expansion thermique des minéraux argileux

Les minéraux argileux, tels que la montmorillonite, la kaolinite et l'illite, ont tendance à se dilater lorsqu'ils sont chauffés. Cette expansion peut affaiblir la structure du sol en réduisant la cohésion entre les particules, ce qui peut conduire à une diminution de la résistance au cisaillement.

II.9.2. Dessiccation et durcissement

Dans certains cas, une augmentation de la température peut provoquer une dessiccation des sols argileux, ce qui peut entraîner leur durcissement. Cela peut augmenter la cohésion entre les particules du sol et potentiellement augmenter la résistance au cisaillement. Cependant, cet effet

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

peut être limité et dépendra également de facteurs tels que le taux d'évaporation et la teneur en eau initiale du sol.

II.9.3. Changements de structure

Une augmentation de la température peut également influencer la structure interne des sols argileux. Par exemple, des processus tels que la réorganisation des minéraux argileux et la migration de l'eau interstitielle peuvent se produire à des températures élevées, ce qui peut affecter la résistance au cisaillement du sol de manière complexe et non linéaire.

II.9.4. Effet de la pression interstitielle

Dans les sols argileux saturés en eau, une augmentation de la température peut provoquer une diminution de la viscosité de l'eau interstitielle, ce qui peut réduire la pression interstitielle dans le sol. Cela peut potentiellement diminuer la résistance au cisaillement en réduisant la force de soutien exercée par l'eau.

L'effet de la température sur la résistance au cisaillement des sols argileux est influencé par une combinaison complexe de facteurs, y compris l'expansion thermique des minéraux, les changements de structure, la dessiccation et les propriétés hydrauliques du sol. Une compréhension approfondie de ces processus est nécessaire pour prédire avec précision le comportement mécanique des sols argileux sous différentes conditions de température.

II.10. Méthodes d'évaluation et de suivi des dommages causés par la chaleur sur les sols argileux [12]

Bien sûr, plongeons plus en détail dans ces méthodes d'évaluation des dommages causés par la chaleur sur les sols argileux :

II.10.1 Analyse physique du sol

- **Formation de croûtes de surface** : Les incendies intenses peuvent conduire à la formation de croûtes de surface, affectant la perméabilité du sol et l'infiltration de l'eau.

II.10.2. Fissuration du sol

La chaleur intense peut provoquer la fissuration du sol, ce qui compromet sa structure et sa stabilité.

II.10.3. Densité apparente et porosité

Les incendies peuvent augmenter la densité apparente du sol et réduire sa porosité, ce qui affecte la capacité du sol à retenir l'eau et à permettre la circulation de l'air

II.10.4. Combustion sèche

Cette méthode implique la combustion de l'échantillon de sol à haute température pour estimer la quantité de matière organique présente en mesurant la perte de poids.

II.10.6. Extraction par solvants

Des solvants peuvent être utilisés pour extraire la matière organique du sol, qui est ensuite mesurée pour estimer sa quantité.

II.10.7. Analyse chimique du sol

a. Nutriments et pH : Les incendies peuvent altérer le pH du sol et les niveaux de nutriments essentiels comme l'azote, le phosphore et le potassium. Des tests chimiques standards peuvent être utilisés pour évaluer ces changements.

b. métaux lourds : Les incendies peuvent libérer des métaux lourds dans le sol, qui peuvent être toxiques pour les plantes. Des tests spécifiques peuvent être effectués pour évaluer les concentrations de métaux lourds dans le sol.

II.10.8. Évaluation de la biodisponibilité des nutriments

II.10.8.1 Tests de lixiviation

Ces tests simulent le lessivage des nutriments dans le sol en soumettant des échantillons de sol à un flux continu d'eau, permettant ainsi de mesurer la quantité de nutriments perdus.

II.10.8.2 Tests de sol en solution

Ces tests impliquent la culture de plantes dans des solutions nutritives contenant des échantillons de sol pour évaluer la disponibilité des nutriments pour les plantes.

II.11. Évaluation de la stabilité structurale

II.11.1. Test de dispersion humide

Ce test évalue la stabilité agrégative du sol en mesurant la quantité de particules de sol dispersées dans l'eau.

II.11.2. Test de résistance à la compression

Ce test mesure la résistance du sol à la compression, ce qui peut être affecté par les changements dans sa structure après un incendie.

En utilisant ces méthodes d'évaluation approfondies, il est possible de comprendre l'ampleur des dommages causés par la chaleur sur les sols argileux et de prendre des mesures appropriées pour restaurer leur santé et leur productivité.

II.12. Stratégies d'atténuation et de restauration des sols argileux après un incendie

Après un incendie, l'atténuation et la restauration des sols argileux nécessitent une approche holistique qui prend en compte les aspects physiques, chimiques et biologiques du sol. Voici une stratégie détaillée : [13]

II.12.1. Évaluation des dommages

Avant de commencer toute action, il est crucial d'évaluer l'étendue des dommages causés par l'incendie en utilisant les méthodes d'évaluation mentionnées précédemment.

II.12.2. Érosion et stabilisation du sol

Mettre en place des mesures d'urgence telles que des barrières anti-érosion pour prévenir l'érosion du sol causée par les pluies après l'incendie.

Envisager la réintroduction de couvertures végétales temporaires comme des pailles ou des filets de jute pour stabiliser le sol.

II.12.3. Restauration de la matière organique

- Appliquer des amendements organiques tels que du compost, du fumier ou des résidus de culture pour restaurer la matière organique perdue pendant l'incendie.
- Favoriser la régénération naturelle en laissant les débris végétaux sur place pour qu'ils se décomposent et enrichissent le sol en matière organique.

II.12.4. Rééquilibrage des éléments nutritifs

- Effectuer des analyses de sol pour déterminer les niveaux de nutriments et ajuster les amendements en conséquence pour rééquilibrer les éléments nutritifs essentiels.
- Utiliser des engrais organiques ou des amendements spécifiques pour fournir des nutriments aux plantes tout en favorisant une libération lente et durable dans le sol.

II.12.5. Gestion de la structure du sol

- Appliquer des pratiques de travail du sol appropriées pour améliorer la structure du sol, comme le labour minimum ou nul, pour préserver la porosité et la perméabilité du sol.
- Introduire des techniques de conservation du sol telles que la couverture morte ou la culture en bandes pour minimiser la compaction du sol et favoriser la formation d'une structure agrégative stable.

II.12.6. Réintroduction de la biodiversité du sol

- Encourager la régénération des communautés microbiennes bénéfiques en introduisant des inoculant microbiens ou en favorisant la repousse naturelle de la végétation pour stimuler l'activité biologique du sol.
- Pratiquer la rotation des cultures pour diversifier les espèces végétales et favoriser une plus grande diversité microbiologique dans le sol.

II.12.7. Surveillance et suivi continu

- Mettre en place un programme de surveillance pour suivre l'évolution de la santé du sol et des écosystèmes après l'incendie.
- Adapter les pratiques de gestion en fonction des résultats de surveillance pour garantir une récupération efficace et durable des sols argileux.

En adoptant cette approche intégrée, il est possible de restaurer progressivement la fertilité et la productivité des sols argileux après un incendie, tout en favorisant la résilience à long terme des écosystèmes affectés.

II.13. Conclusion

L'étude des effets des températures sur les sols argileux revêt une importance cruciale en géotechnique, en raison des implications significatives pour la stabilité des ouvrages et des infrastructures. Les sols argileux, sensibles aux variations de température, présentent des modifications notables de leurs propriétés mécaniques et physiques en fonction des conditions thermiques.

Dans les basses températures (0-10 °C), la résistance au cisaillement augmente en raison du gel de l'eau interstitielle, qui améliore la cohésion et la rigidité du sol. Entre 10 et 25 °C, les sols argileux demeurent relativement stables, avec des variations minimales de leurs propriétés mécaniques. Toutefois, à mesure que la température augmente (25-40 °C), une diminution progressive de la résistance au cisaillement et une augmentation de la compressibilité sont observées, résultant de la dilatation thermique et de la réduction de la cohésion. Les températures plus élevées (40-60 °C) accentuent ces effets, avec une augmentation marquée de la compressibilité due à la pression accrue des pores et à la diminution de la rigidité. À des températures encore plus élevées (60-100 °C), la déshydratation partielle entraîne des changements structuraux dans les sols argileux, aggravant leur compressibilité et diminuant leur résistance au cisaillement.

Au-delà de 100 °C, l'assèchement complet et les transformations minéralogiques potentielles provoquent une augmentation drastique de la compressibilité, accompagnée d'une perte significative de la résistance au cisaillement. Ces effets thermiques sur les sols argileux doivent être pris en compte lors de la conception et de la construction d'ouvrages soumis à des variations thermiques, afin d'assurer leur stabilité et leur durabilité.

En résumé, la compréhension des effets des températures sur les sols argileux est essentielle pour anticiper et gérer les risques liés aux variations thermiques. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'élaboration de modèles prédictifs plus précis et sur l'exploration de méthodes d'ingénierie permettant de mitiger ces effets, contribuant ainsi à une meilleure gestion des infrastructures géotechniques dans des environnements soumis à des fluctuations thermiques.

Chapitre II : l'état de l'art sur les effets des températures sur les sols argileux

Référence

- [1] Gharbi, M. (2017). « Etude des propriétés thermiques des sols argileux de la région d'Alger ». Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB).
- [2] Bouhadeb, M. & Mellal, M.A. (2016). « Caractérisation géotechnique des sols argileux de la région d'Oran (Algérie) ».
- [3] Bensalah, S. (2016). « Etude de la compaction des sols argileux de la région de Constantine. « Université Salah Boubnider – Constantine 3 ».
- [4] Bouzidi, A. (2021). « Impact des températures extrêmes et des incendies sur la faune édaphique des sols argileux de la région de Tlemcen ». Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.
- [5] Belkacem, N. (2018). « Impact des températures élevées sur les propriétés physiques des sols argileux de la région de Constantine. « Salah Boubnider – Constantine 3 ».
- [6] Boualem, K. (2018). « Etude de la perméabilité et du drainage des sols argileux après les incendies : cas de la région de Tizi-Ouzou. « Université Mouloud Mammerie de Tizi-Ouzou ».
- [7] Bouzidi, H. (2020). « Etude de la fertilité des sols argileux après les incendies (cas de la région d'Alger) « Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB) ».
- [8] Benkhaled, R. (2021). « Effets des températures élevées et des incendies sur la structure et la microstructure des sols argileux en géotechnique « étude de cas dans la région d'Oran. » Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed ».
- [9] Khaled Belabes, thèse intitulée « Effets des températures élevées et des incendies sur le comportement mécanique des sols argileux » soutenue à l'université de Constantine 1, en Algérie.
- [10] Samir Boukhatem, thèse intitulée « Effets des températures et des incendies sur la compressibilité des sols argileux » soutenue à l'université Mentouri 1, en Algérie.
- [11] Ahmed Tounsi, thèse intitulée « Effets des températures et des incendies sur la résistance au cisaillement des sols argileux » soutenue à l'université de Sétif 1, en Algérie.
- [12] Article Scientifique « Evaluation and Monitoring Methods of heat damage on clayey soils » paru dans la revue internationale « Geotechnical Engineering journal », écrit par Mounir Djebbar et ses collègues de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB).
- [13] Dr. Fatima Zohra Merzoug Journal Revue Géotechnique Algérienne (page 45-58) Année de publication 2022 Titre de l'article « Stratégies d'atténuation et de restauration des sols argileux après un incendie » Etude de cas en Algérie .

Chapitre III :
Procédure
expérimentale

III.1. Introduction

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

Ces essais sont organisés comme suivant : Caractérisation physique (la teneur en eau, la granulométrie, les limites d'Atterberg), Caractérisation chimique (l'analyse chimique et la Valeur au bleu de méthylène) et caractérisation mécanique (Proctor Normal, CBR, Cisaillement et Œdomètre).

Ce chapitre, consiste à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de notre sol étudié, dans le but de faciliter sa classification selon les différentes méthodes de classification.

Le présent travail a été réalisé au laboratoire **LHNC** de Skikda.

III.2. Le sol étudié

Le terrain de prélèvement des échantillons de sol se situe à «**ESSEBT la daïra de AZZABA**» à la wilaya de **Skikda**, projet « Réalisation d'une cantine scolaire 1000 repas ».



Figure III.10: Localisation de ESSEBT la daïra de AZZABA

III.3. Les essais d'identification

III.3.1. Analyse physique

III.3.1.1. La teneur en eau de sol à l'état naturel selon la norme (NF P 94-050)

III.3.1.1.1. Définition

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau « **W** » contenu par unité de poids de matériau sec.

Chapitre III : Procédure expérimentale

C'est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance du sol.

III.3.1.1.2. But de l'essai

Le but de cet essai est la détermination au laboratoire les différentes densités afin de caractériser un sol pour prévoir son comportement.

III.3.1.1.3. Principe de la méthode

L'essai consiste à déterminer la masse W_w de l'eau contenue dans un échantillon de sol en pesant le matériau en état, puis après l'avoir séché pour éliminer toute l'eau. On obtient alors W_s , la masse des grains solides (la masse de l'air étant supposée nulle). Le séchage se fait par la mise à l'étuve ou au four à micro-onde.

III.3.1.1.4. Appareillage utilisée

- Une balance électrique de précision ;
- Une étuve électrique ;
- Des tares ;
- Cuillères ou louche de laboratoire.



Figure III.1 .Etuve de laboratoire



Figure III.2 .Balance

III.3.1.1.5. Mode opératoire

- On prend trois tares et on les pèse vides ;

Chapitre III : Procédure expérimentale

- On pèse les échantillons avec les tares ;
- On note le poids humide **Mh**;
- On met l'échantillon à l'étuve (105°C / 24h). Après étuvage, on note le poids sec de l'échantillon **Ms**.
- La différence entre le poids humide et le poids sec donne le poids de l'eau **Mw**.

III.3.1.1.6. Résultats obtenus

La teneur en eau s'exprime en pourcentage (%) :

$$W(\%) = Mw/Ms$$

Où:

- **Mw**: est la masse d'eau ;
- **MS**: est la masse de matériau sec.

Tableau III.1 : La teneur en eau naturelle Wn

N° de la tare	Mtare(g)	Mh(g)	Ms(g)	Mw(g)	W(%)	Wmoy(%)
F16	13	53	45	8	25	
B10	13	57	48	9	25.7	25.73
A7	13	56	47	9	26.5	

- D'après le tableau III.1, la teneur en eau naturelle de sol étudié égal **25.73 %**, Donc, le sol étudié est humide.

III.3.1.2. Analyse granulométrique selon la norme NF P 94-056

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leur dimension :

L'analyse granulométrique des sols fait l'objet de deux normes :

- La norme (NF P 94-056) concerne l'analyse granulométrique par tamisage des éléments de dimension supérieure à 80 µm.
- La norme (NF P 94-057) traite de l'analyse granulométrique par sédimentation des éléments passant à travers le tamis de 80 µm d'ouverture.

III.3.1.2.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)

III.3.1.2.1.1. Principe

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. Elle présente les proportions relatives des différentes dimensions de particule, et permet d'identifier quelle fraction de sol contrôle ses propriétés.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (mailles circulaires), emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieurs à 80 µm (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 µm (NF P94-057)

III.3.1.2.1.2. Appareillage utilisée

Pour réaliser cette opération, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Série des tamis de différents diamètres (80 mm—0.08 mm) ;
- Un échantillon de 500 g (argile) ;
- Une balance de 6 Kg, pesant au gramme près ;
- Une étuve thermostatique ;
- Un vibro-tamis électrique (figure III.4).

III.3.1.2.2. Principe de l'essai

L'essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins est en fonction de leurs dimensions.

La loi de Stokes donne, dans le cas de grains spécifiques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains

Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules.

III.3.1.2.2.3. Appareillage utilisée

- Agitateur manuel et densimètre à torpille de plage 0.995 à 1.030
- Agitateur mécanique de type plongeant à vitesse égale à 10000 tr/min avec récipient;
- Thermomètre à 0.5 °C
- Chronomètre ;
- Densimètre ;
- Balance ;

Chapitre III : Procédure expérimentale

- Tamis 80 μm ;
- Bac ;
- Etuve ;
- Deux éprouvettes de 2
- Un mélange d'eau distillée additionnée à un défoulant disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440 cm distillée et de 60 cm préparée et conservée à l'abri de la lumière, au moins, depuis un mois (Figure III.11).



Figure III.3 Une série des tamis

III.3.1.2.1.3. Mode opératoire

- Détermination de la masse sèche de l'échantillon (de 1h à 4h étuvage à 105°C) ; (de 2h à 8h étuvage à 50° C).
- Deviser en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne de tamis d'ouverture de maille croissant de bas en haut et procéder au lavage.
- Séparer par brassage manuel combiné à un arrosage, l'élément retenu sur le tamis d'ouverture de maille plus grande, lorsque le refus sur tamis est propre le tamis est retirer, l'opération se poursuit pour les tamis inférieur.
- Lorsque malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhérentes aux grains, un trempage est nécessaire.
- Verser le contenu de chaque tamis dans un récipient.
- Placer les récipients dans l'étuve, à ce que deux pesées successives ne varient pas de plus de 2/1000.

- Peser le récipient contenant le refus sur le tamis d'ouverture la plus grande.
- Peser le refus cumulés successifs R.

III.3.1.2.2. Essai granulométrique par sédimentation (NF P 94-057)

III.3.1.2.2.1. Définition

L'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille circulaire de 80 μm d'ouverture.

Les particules de taille inférieure à 1 μm , ne peuvent cependant pas être différenciées par cet essai. Cette dernière complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification.

III.3.1.2.2.2. Principe de l'essai

L'essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins est en fonctions de leurs dimensions.

La loi de Stokes donne, dans le cas de grains spécifiques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains

Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules.

III.3.1.2.2.3. Appareillage utilisée

- Agitateur manuel et densimètre à torpille de plage 0.995 à 1.030
- Agitateur mécanique de type plongeant à vitesse égale à 10000 tr/min avec récipient;
- Thermomètre à 0.5 °C
- Chronomètre
- Densimètre
- Balance
- Tamis 80 μm
- Bac
- Etuve
- Deux éprouvettes de 2
- Un mélange d'eau distillée additionnée à un défoulant disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440 cm distillée et de 60 cm préparée et conservée à l'abri de la lumière, au moins, depuis un mois.



Figure III.4 Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie

III.3.1.2.2.4. Mode opératoire

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée. Le tamisât, au tamis de 80 μm , de l'échantillon de sol, préparé selon la NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac, le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entrainer d'éléments fins.

Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve. Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80g (+ ou moins 10g).

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique,

Ajouter 500 cm^3 du mélange spéciale et garder à la température ambiante. Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante. La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau est de défoulant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3min minimum à 10000 tr/min .

Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation, compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm^3 . Verser 2000 cm^3 de la même eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le

Thermomètre et le densimètre parfaitement propre.

Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ; faire les lectures depuis le début de l'essai aussi

Longtemps que nécessaire, aux temps suivants : 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 240 ;

1440 minutes. Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque. À partir de

5mn plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 s avant la mesure (figure III.6).

Chapitre III : Procédure expérimentale



Figure III.5 Granulométrie par sédimentation

III.3.1.2.3. Les résultats obtenus

Le tableau III.2 contient le pourcentage massique de passent, en fonction de la série de tamis utilisés :

Tableau III.2 : Les résultats de granulométrie

Analyse granulométrique		Analyse sédiment métrique	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Diamètre équivalent	Tamisât (%)
80.00	100.00	56.00	89.00
50.00	100.00	40.00	85.00
31.50	100.00	28.00	82.00
20.00	100.00	18.00	78.00
10.00	98.00	13.00	74.00
5.00	93.00	9.00	70.00
2.00	92.00	6.00	70.00
0.40	90.00	4.00	67.00
0.20	90.00	2.00	63.00
0.10	89.00	1.00	56.00
0.08	89.00		

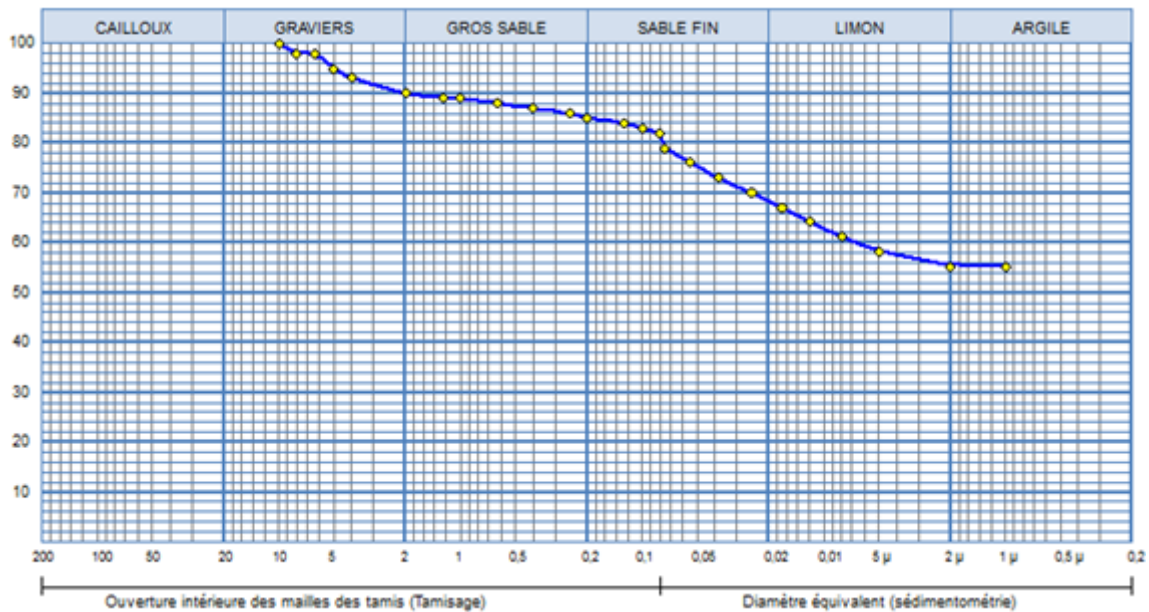


Figure III.6 : Courbe granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique du sol a montré que : Les passant au tamis 80 μm est **89%**.

D'après la courbe

- 10% gravies
- 05% Gros sable
- 17% sable fin
- 13% Limon
- 55% argile

D'après la courbe granulométrique notre sol étudié est une **argile limoneuse légèrement sableuse**.

III.3.1.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)

III.3.1.3.1. Définition

Le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau en quatre états différents (état liquide, plastique, solide avec retrait et sans retrait).

L'intérêt de calculer les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) est de prévoir le comportement des sols fins pendant les phases de terrassement et / ou lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement (contrainte admissible, module d'élasticité) et de prévoir aussi la consistance du sol.

III.3.1.3.2. Le but de l'essai

Les limites d'Atterberg permettent de prévoir le comportement des sols pendant

Les opérations de terrassement en fonction de la teneur en eau, il se fait uniquement sur les éléments fins du sol.

III.3.1.3.3. Principe de l'essai:

- **La limite de liquidité WL** ou **LL** : (teneur en eau pondérale) sépare l'état liquide de l'état plastique;
- **La limite de plasticité Wp** ou **Lp** : (teneur en eau pondérale) sépare l'état plastique de l'état solide ;
- **La limite de retrait Wrou** ou **Lr** : est la teneur en eau pondérale au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon ne varie plus (Figure III.5)
- **L'indice de plasticité Ip** : est la différence entre les limites de liquidité WL et la limite de plasticité Wp. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique. (essai témoin T=24heurs)

$$I_p = W_L - W_p$$

- **L'indice de consistance Ic**: la comparaison de la teneur en eau naturelle W_n d'un sol et des limites d'Atterberg permet de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractériser par son indice de consistance $I_c = (W_L - W_n) / I_p$

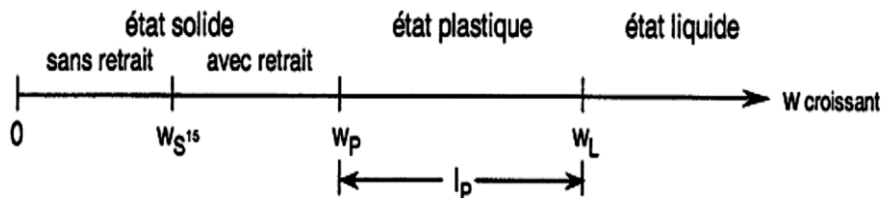


Figure III.7 Les phases et les limites d'Atterberg

III.3.1.3.4. Principe de détermination des limites d'Atterberg

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu soumis à des chocs répétés
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.

III.3.1.3.5. Préparation de l'échantillon

L'essai se fait sur la fraction du matériau appelée (mortier) qui passe au tamis de 0.40 mm, une quantité suffisante de matériau devant être tamisée pour obtenir 150 à 250 g de mortier. Avant le tamisage, le matériau doit être imbibé au moins 12 h, le tamisage s'effectue par voie humide, manuellement en remuant le matériau sur la toile du tamis à l'aide d'un pinceau souple, le refus devra être parfaitement propre. Après décantation de l'eau de lavage, on siphonne l'eau et on met le matériau à sécher.

III.3.1.3.6. Matériel utilisé

1. Pour la préparation du sol

- Un récipient ;
- Un bac de dimension minimales en centimètres 30× 20×8 ;
- Un tamis à maile de 0.4mm d'ouverture.

2. Pour la détermination de la limite de liquidité avec l'appareillage de Casagrande

- D'un socle ;
- D'un support métallique ;
- D'une coupelle : la surface interne de la coupelle est soit lisse soit rugueuse ;
- D'un outil à rainurer ;
- D'une cale de 10mm d'épaisseur ;
- Une étuve dessiccation ;
- Une balance ;
- Des capsules ou boîtes de pétri, spatules, truelles.



Figure III.8 : Appareillage de Casagrande

III.3.1.3.7. Mis en place de l'échantillon

Répartir la pâte à la spatule, de façon homogène, dans la coupelle. La pâte recouvre le fond de la coupelle sauf sur une partie d'environ 3 cm. Épaisseur au centre 15 à 20 mm, pourtour sensiblement horizontal (figure II.6).

Faire une rainure dans l'axe de la coupelle en tenant l'outil sensiblement perpendiculaire à cette coupelle. Tourner la manivelle 2 chocs par seconde.

Compter le nombre de chocs N tout en observant le fond de la rainure. Arrêter lorsque les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur de 1 cm environ.

Si le nombre de chocs est inférieur à 15, laissé sécher l'échantillon puis recommencer l'essai ; Si le nombre est supérieur à 35, ajouter un peu d'eau (bien mélanger), puis recommencer l'essai ; Si

Chapitre III : Procédure expérimentale

$15 \leq N \leq 35$, prélever à l'aide de la spatule un peu de pâte de chaque côté des lèvres de la rainure, et déterminer la teneur en eau W .

Par définition, la limite de liquidité WL est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de **1 cm** pour un nombre de chocs **N égal à 16**.



Figure III.9 Essai de la limite de liquidité (l'appareillage de Casagrande)

III.3.1.3.8. Limite de plasticité WP du rouleau

La limite de plasticité se mesure après celle de la limite de liquidité WL , il faut donc laisser l'échantillon sécher un peu plus. Faire une boulette de pâte et la transformer en un cylindre on le roule (en le roulant) sur une surface plane propre, lisse, sèche et non absorbante (à la main ou à l'aide d'une plaque plane, un aller et retour par seconde).

Par définition, la limite de plasticité WP est la teneur en eau du rouleau qui se fissure au moment où son diamètre atteint $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$. Le rouleau terminé doit avoir 10 cm à 15 cm de longueur et ne doit pas être creux. La limite de plasticité est atteinte lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm

$\pm 0.5 \text{ mm}$.

Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée et légèrement séchée. Si la limite de plasticité est atteinte, déterminer la teneur en eau du rouleau. Faire un minimum de 2 essais et, si les valeurs s'écartent de plus de 2 % de la valeur moyenne, refaire un essai.



Figure III.10 : Détermination de la limite de plasticité

Chapitre III : Procédure expérimentale

III.3.1.3.9. Résultats obtenus

Le tableau.3 présente les lectures pour calculer la limite de liquidité :

Tableau III.3 : Résultat de l'essai limite de liquidité

Nombre des coups	16	21	26	31
Limite de liquidité (%)	42.5	41.5	40.5	39.5
Moyenne	41			

D'après le tableau III.3 on peut tracer la courbe suivante :

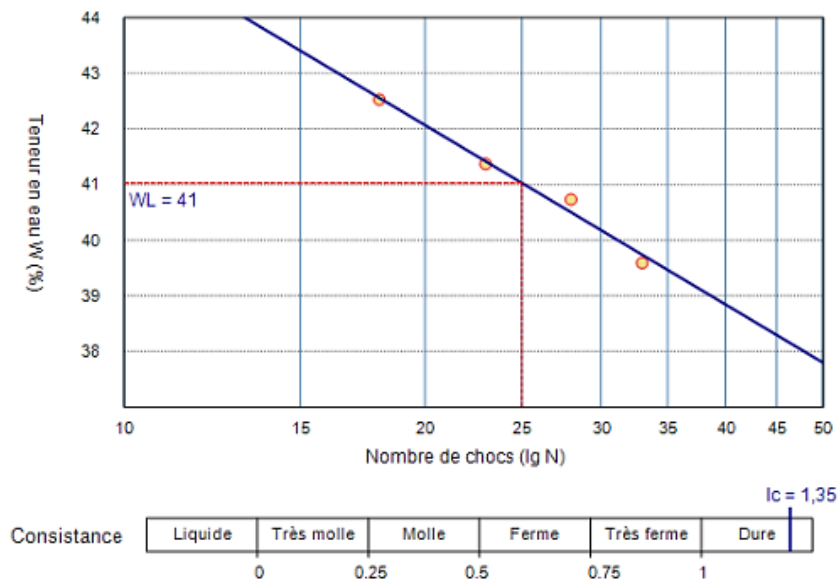


Figure III.11 La courbe de la limite de liquidité

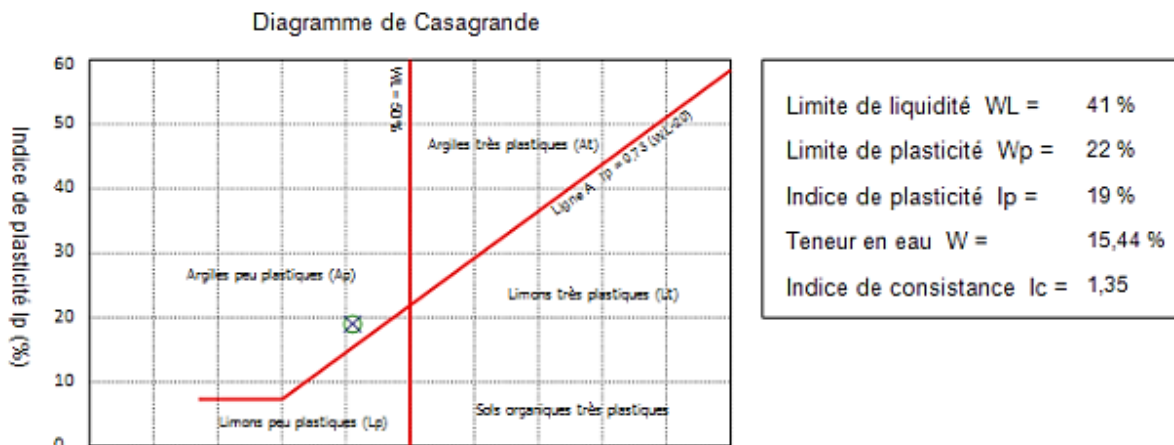


Figure III.12 L'abaque de Casagrande

D'après la figure III.8 ; la limite de liquidité égale **64.5%** et d'après l'essai de plasticité la limite de plasticité égale **31.02%**.

Indice de plasticité :

$$IP = WL - WP$$

$$IP = 19 \%$$

Indice de consistance :

$$Ic = (WL - Wn) / Ip$$

$$Ic = 1.35 \%$$

III.3.2. Analyse chimique

III.3.2.1. l'essai chimique

III.3.2.1.1. But de l'essai

Cette analyse permet de déterminer la composition chimique du sol.

III.3.2.1.2. Mode opératoire de l'essai

➤ **Sulfate :**

- Prendre 200g de l'échantillon.
- Sécher le matériau dans une étuve à $T^{\circ} = 80^{\circ}\text{C}$ en cas nécessaire $105 - 110^{\circ}\text{C}$.
- Après 48H placer dans un dessiccateur, quartage.
- Pulvériser dans un mortier et tamiser à l'échantillon tamis 0.200mm prendre peser 1g (p_0).
- Mettre dans un érlen à 250ml et ajoute 100ml HCL à 10% , bouillir doucement 4 à 5minutes et refroidissement 15minutes .
- Filtration dans un papier filtre N° 541, prendre le filtrat et ajuster jusqu' à 250ml avec l'eau distillée, agitation de filtrat.
- Prendre 100ml de filtrat dans un érlen, ajouter 10ml de BaCl_2 à 5% et bouillire doucement 4 à 5minutes , refroidissement 15minutes .
- Filtration de la solution papier filtre N° 541 prendre peser un creuset vide P_1 , mettre le papier filtre dans le creuset. Calcination des creusets + le papier filtre à 900°C pendant 15minutes et prendre peser le creuset après la calcination P_2 .



Figure III.13 : Essai d'analyse chimique aux sulfates

Chapitre III : Procédure expérimentale

$$SO_3^{2-} = 34.3 * (P_2 - P_1) / P_0$$

$$CaSO_4 = 184.23 * (P_2 - P_1) / P_0$$

➤ Carbonate :

- Prendre 0.5g de l'échantillon, ajouter 10ml HCL à 1N ;
- Ajouter détecteur phinnoftaline 0.1% posé dans étuve période bref ;
- Ajouter NaOH (1N) vers fin parution colore mauve et prendre le volume.



Figure III.14 Essai d'analyse chimique au carbonate

➤ Chlorure :

- Prendre 50g de l'échantillon, et ajouter 100ml avec l'eau distillée effectué opération de vibration à 24h.
- Prendre le PH initial mettre le papier filtre et prendre 25ml de papier filtre.
- Prendre le PH ce moyen uniforme (6.50 – 7.00) et ajouter détecteur K_2CrO_4 à 10%(N) à $AgNO_3$ vers fin parution colore rouge

Remarque : PH<6 ajouter carbonate de calcium $CaCO_3$.

PH>7 ajouter Acide de Sulfurique H_2SO_4 .



Figure III.15 : Appareil à mesure pH

III.3.2.1.3. Les résultats de l'analyse chimique:

Tableau III.4 : Les compositions chimiques du sol étudié

Composition chimique	Sulfates SO_2	Carbonate $CaCO_3$	Chlorure Cl^-
%	Traces	22.40%	0.31%

Tableau III.5 Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate

Teneur en carbonate (%)	Classification	Exemple
<10	Non calcaire	Argile, sable siliceux
10 à 29	Peu calcaire	Argile marneuse
30 à 69	Moyennement calcaire	Marne
70 à 89	Fortement calcaire	Calcaire marneux
≥ 90	Calcaire	Calcaire

III.3.2.2 Essai de bleu méthylène (NF P 94-068)

III.3.2.2.1. Introduction

La valeur au bleu désigné par VBS est le nombre de grammes de bleu nécessaire pour saturer 100 g de fines inférieures à 0.08 mm. Cet essai est réalisé sur la fraction 0/2 mm ou 0/5 mm et ramené par une règle de proportionnalité à la fraction 0/50.

III.3.2.2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

III.3.2.2.3. Préparation de l'échantillon

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau, car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de l'expression donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

On prépare 100 g de fraction 0/2 mm sèche que l'on met à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisé. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

Chapitre III : Procédure expérimentale

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleude méthylène dans la suspension de sol, jusqu' atteindre la saturation des particulesd'argile. On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenableu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12mm). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore négatif ;
- La goutte centrale bleueest positive.

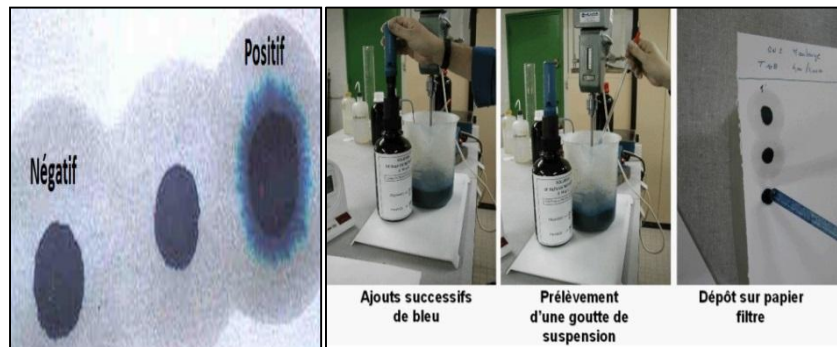


Figure III.16 Le déroulement de l'essai de bleu de méthylène

III.3.2.2.4. Les résultats obtenus

Pour calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante :

$$\text{VBS} = m / B * 100$$

Avec :

- **B** = V *0.01 (B : est la masse de bleu introduite dans la solution (solution à 10g/l) ;
- **m**: La masse sèche de la prise d'essai ;
- **V** : est le volume de la solution de bleu utilisée (exprimé en centimètres cubes).

Dans notre sol, on trouve :

$$\text{VBS} = 4.66 \%$$

D'après le tableau .7 montre la classification de sol selon les valeurs de **VBS** :

Tableau III.6 : Classification des sols d'après l'essai de bleu de méthylène

VBS < 0,1	sol insensible à l'eau
0.2 ≤ VBS < 1.5	peu sensible à l'eau
1.5 ≤ VBS < 2.5	sols limoneux peu plastiques
2.5 ≤ VBS < 6	sols limoneux de plasticité moyenne.
6 ≤ VBS < 8	VBS < 8 sols argileux.
8 ≤ VBS	VBS sols très argileux

D'après le tableau.7 et à partir des résultats obtenus de l'essai VBS, le sol étudié :

Sol limoneux de plasticité moyenne.

III.3.3. Analyse Mécanique

III.3.3.1. L'essai Proctor (NF P 94-093)

III.3.3.1.1. Définition

Les caractéristiques de compactage d'un matériau sont : la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale.

III.3.3.1.2. Principe

Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche de matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau.

Les essais peuvent-être réalisés dans deux types de moule :

- Moule Proctor.
- Moule C.B.R (California Bearing ratio)

Dans chacun de deux moules, on peut réaliser des essais de compactage selon deux modalités :

- L'essai Proctor normal (PN).
- L'essai Proctor modifié(PM).

L'essai PN communique au sol une énergie de compactage relativement modérée, cet essai s'applique donc à l'étude des remblais. L'essai PM, sollicitant le sol d'avantage, il est adapté aux compactages important comme ceux qui subissent les sols de fondation des routes, autoroutes, pistes d'atterrissage.

Tableau III.7 Conditions des essais Proctor normal et modifi

Types d'essais	Type de compactage	
	Proctor normal	Proctor modifié
Poids de la dame	2.49 Kg	4.540 Kg
Hauteur de chute	30.5 cm	45.7 cm
Nombre de coups	Proctor	25
	CBR	56
Nombre de couches	3	5

III.3.3.1.3. Appareillage :

- Balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que es pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- Une enceinte thermique ou un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux ;
- Des récipients (ou sacs) hermétique permettant de conserver la teneur en eau des échantillons ;
- Un pulvérisateur à eau ;
- Un dispositif permettant d'extraire l'éprouvette hors du corps du moule (dans le cas d'un corps de moule monobloc) ;
- Matériels et outillages divers.



Figure III.17 Matériel et outils de compactage au laboratoire

III.3.3.1.4. Mode opératoire

- Préparer le matériau d'abord ;
- Assembler moule + embase + disque d'espacement (si moule cbr)+ disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis peser l'ensemble ;
- Introduire la 1^{er} couche et la compacter placer le moule sur un scole en béton d'au moins 100kg ,ousur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur,pour que l'ensemble de l'énergie appliquée le soit à l'échantillon ;
- Recommencer l'opération pour chaque couche (3 pour de compactage normal, 5 pour modifiés) ;
- Après compactage de la dernière couche ,enlever la rehausse.le sol compacté doit dépasser du moule de 1cm environ .sinon ,recommencer l'essai ;

Chapitre III : Procédure expérimentale

- Araser soigneusement à partir du centre ;on veillera,au cours de l'écrasement à ne pas créer de trous sur la surface arasé ;
- Peser l'ensemble juste arasé ;
- L'embase (disque d'espacement si nécessaire) et prélever 2 prises sur l'échantillon , l'une en haut et l'autre en bas ;en déterminer la teneur en eau w et on prendra la myenne des deux valeurs obtenues ;
- Augmenter de 2% la teneur en eau w de votre échantillon de départ et recommencer 5à 6 fois l'essai ;après avoir à chaque fois bien nettoyer votre moule.

III.3.3.1.5. Expression des résultats:

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- La teneur en eau.
- La masse de matériau sec contenu dans le moule.
- La masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utiliser, déterminé à partir de mesures géométriques réalisées à 0.1 mm près.

Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique $\gamma_d(\text{t/m}^3) = f(w\%)$.

On trace ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux. Sauf dans le cas des matériaux très perméables, cette courbe présente un maximum dont les coordonnées sont dénommées respectivement masse volumique sèche optimum et la teneur en eau optimum Proctor Normal (ou Proctor modifié suivant l'essai réalisé). Ce résultat est exprimé à 0.01t/m^3 près pour la masse volumique et à 0.1 point près pour la teneur en eau (exprimée en pourcentage).

Les caractéristiques à l'optimum Proctor déterminées par cet essai sur les matériaux utilisé sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.8 : Présentation des références de compactage

Type de sol	Caractéristiques à l'OPN	
	W(%)	$\gamma_d(\text{t/m}^3)$
Argile	14.3	1,68

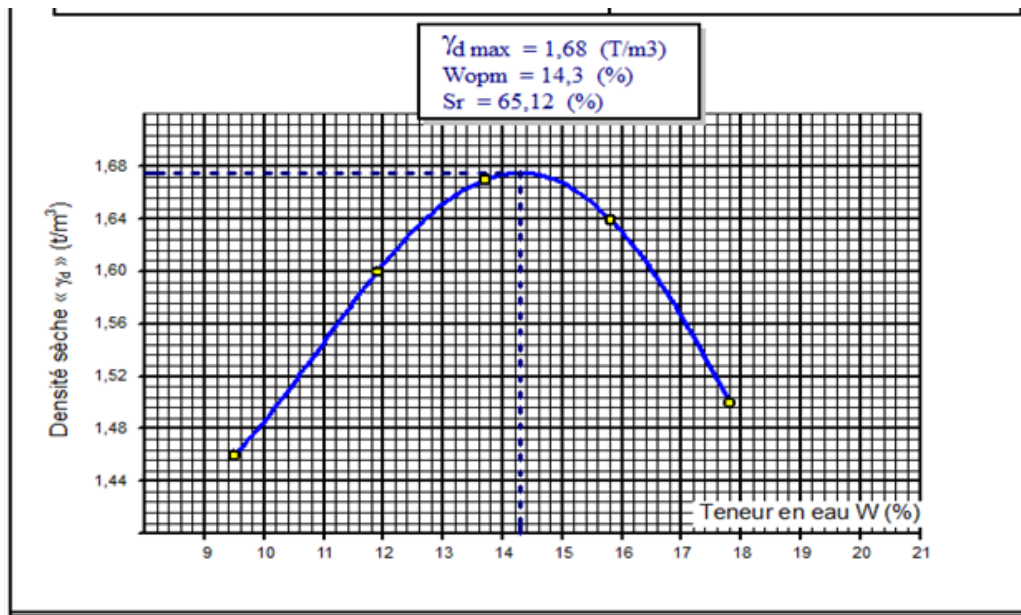


Figure III.18 : Courbe Proctor Normal

III.3.3.2. Essai CBR immédiat et après immersion (NF P 94-078)

Le test CBR (**California Bearing Ratio**) est un test de portance qui permet de mesurer in situ (au pénétromètre pour le protocole de mesure le plus simple) la résistance du sol. Une quantité supérieure à 3% de limon **ou d'argile** compromet la résistance au gel. Un test supplémentaire est nécessaire pour vérifier le caractère non gélif (test CBR après 4 jours d'immersion de l'échantillon dans l'eau). La plupart des tests doivent être réalisés en laboratoire selon la norme **NF P 94-078**.

III.3.3.2.1. But de l'essai

Détermination de la portance du sol donné, il s'agit en fait de comparer la portance du sol que l'on est en train de tester à la portance d'un sol standard de l'état de Californie aux Etats Unis.

III.3.3.2.2. Principe

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observer sur le matériau de référence pour les même enfoncements.

L'indice recherchée est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage des deux rapports ainsi calculés.

III.3.3.2.3. Appareillage

Il comprend :

- le moule de CBR ;
- les dames ou machines de compactage Proctor normal et Proctor modifié;

Chapitre III : Procédure expérimentale

- l'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à raser,...) ;
- le matériel d'usage courant (balances, bacs, étuve ...) ;
- matériels de poinçonnement ;

Il comprend :

- une presse de capacité d'au moins 50kN possédant une course d'au moins 10 mm cette presse doit être équipée :
- d'un poinçon cylindrique en acier de $19,32 \text{ cm}^2 \pm 0.8 \text{ mm}$ de section et de $49.6 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ mm}$ de diamètre, et d'une dizaine de centimètre de longueur minimum.
- d'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de $1.27 \text{ mm/min} \pm 0.1 \text{ mm}$.
- d'un dispositif de mesure l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de 0.1mm.
- d'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement. La capacité de ce dispositif doit être adaptée à l'effort mesuré, sa précision doit garantir la mesure avec une incertitude relative maximum de 1%.

III.3.3.2.4. Exécution du poinçonnement

Interposé deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. S'il est prévu que la contrainte apporté par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6 Kg des surcharges ainsi constituées, il ya a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse. Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment.



Chapitre III : Procédure expérimentale

FIGURE III.19 Appareillage de l'essai CBR

III.3.3.2.5. Calculs et résultats

On calcul les valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement(en KN)}}{13.35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement(en KN)}}{19.93} \times 100$$

L'indice recherché est par convention la plus grand de ces deux valeurs.

L'indice CBR immédiat caractérise l'évolution de la portance d'un sol support compacté à des différentes teneurs en eau.

Les résultats obtenu par cet sont présenté dans le tableau ci-dessous :

➤ **Pour l'essai CBR immédiat**

Tableau III.9:Résultat de l'essai CBR immédiat

Enfoncement	(mm)	0,00	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	Retenue
lecture		0,000	0,100	0,200	0,400	0,700	0,800	1,000	
pression	kn	0,00	0,02	0,05	0,09	0,16	0,18	0,23	0,00
Indice portant immédiat	%				0,68	0,80			0,8

D'après le tableau .9 en trace la courbe de l'essai **CBR immédiat** :

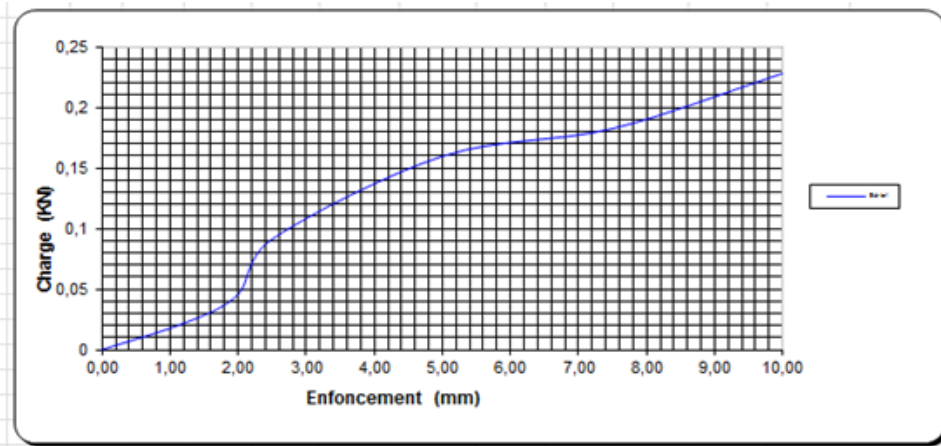


Figure III.20 : Courbe de l'essai CBR immédiat

➤ Pour l'essai CBR après immersion :

Tableau III.10: Résultat de l'essai CBR après immersion

Enfoncement	(mm)	0,00	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	Retenue
lecture	kn	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,500	2,000	
force		0,00	0,06	0,11	0,17	0,22	0,33	0,45	0,00
Indice portant immédiat	%				1,25	1,12			1,3

D'après le tableau.10 en trace la courbe de l'essai **CBR après immersion** :

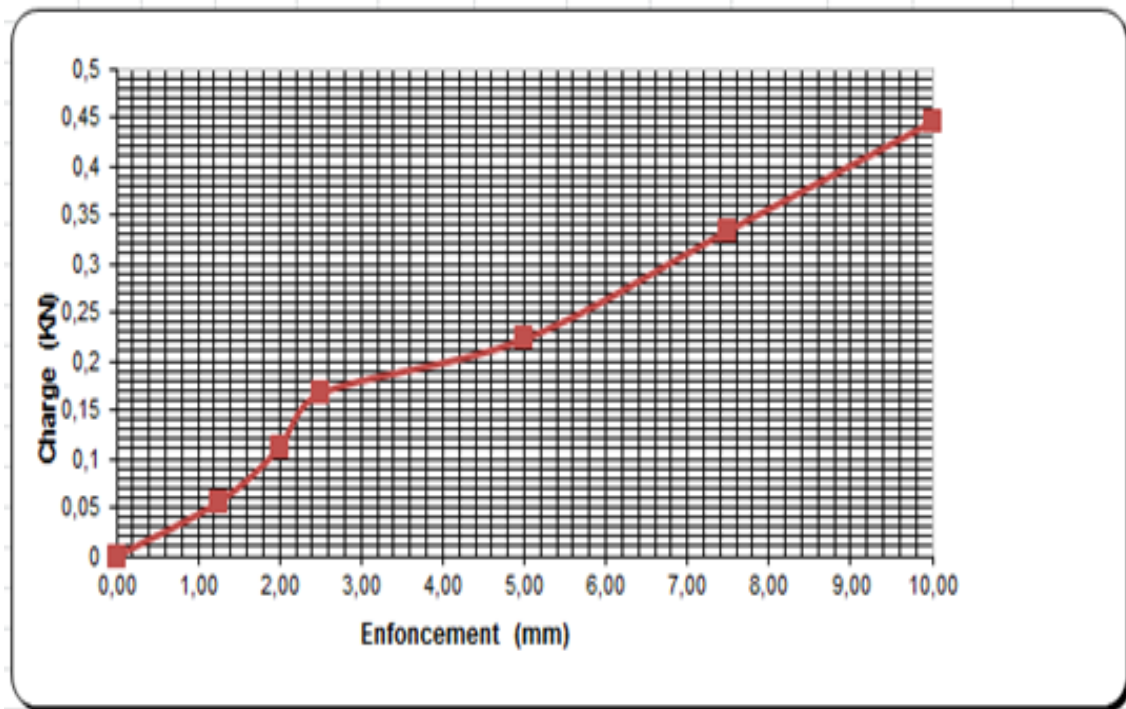


Figure III.21 : Courbe de l'essai CBR après immersion

L'indice CBR des essais de CBR dans le tableau 11 suivant :

Tableau III.11 : L'indice CBR

Type de sol	Indice CBR immédiat IPI (%)	L'indice CBR après immersion IPI (%)
Argile	0.8	1.3

III.3.3.3. Essai de cisaillement direct à la boîte selon la norme XP 94-071-1

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrage de soutènement, remblais, talus...), il est nécessaire de connaître la résistance du sol.

Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

La résistance d'un sol peut être définie par nombreux essais, parmi eux : l'essai de cisaillement rectiligne dit (à la boîte).

III.3.3.3.1. Définition

L'essai de cisaillement à la boîte permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C . Ces valeurs servent entre autres à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

III.3.3.2. Principe de l'essai

Dans l'essai de cisaillement à la boîte, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre. On applique à l'échantillon un effort normal de compression N , verticalement, par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant T , horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure.

Un comparateur mesure la variation de hauteur de l'échantillon (figure III.16).

Plusieurs essais sont effectués en faisant varier (σ) et en trace la courbe intrinsèque.

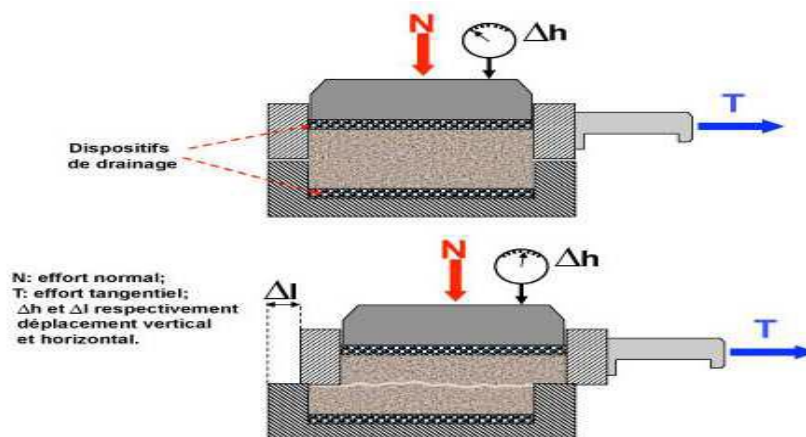


Figure III.22 : Principe de l'essai de cisaillement

III.3.3.3. Appareillages

➤ La machine de cisaillement à déformation contrôlés:

Elle est constituée d'un bâti métallique sur lequel repose :

- Le panneau de commandes;
- Le chariot porte-boîte entraîné horizontalement à vitesse constante par un moteur.
- Il provoque le déplacement de la demi-boîte inférieure et d'une partie de l'éprouvette d'essai;
- Le bras de réaction communiquant à l'anneau dynamométrique les efforts appliqués sur la demi-boîte supérieure lors de cisaillement.
- L'anneau dynamométrique dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement.
- Une table de calibrage est fournie pour permettre le passage du déplacement à l'effort;
- Un système levier-étrier appliquant sur le piston de la boîte les charges normales désirées à l'aide des différents poids.



Figure III.23 : Appareille de cisaillement

❖ La boîte de cisaillement

Elle se présente sous forme de deux demi-boîtes (l'une inférieure, l'autre supérieure), carré intérieurement, de même section droite, de longueur 6 cm.

La demi-boîte supérieure est équipée d'un bras de réaction qui se place lors de l'essai sur l'axe de l'anneau dynamométrique. Elles sont équipées des éléments suivants :

- Deux vis permettant de solidariser les deux demi-boîtes avant l'essai (pour faciliter la mise en place de l'échantillon). Le piston sert à l'application de la charge normale ;
- Deux pierres poreuses plates servent de filtre ;
- Deux plaques de drainage servant à faciliter le drainage de l'échantillon ;
- Le piston et la demi-boîte inférieure possèdent des orifices pour la mise en eau de l'échantillon.



Figure III.24 : Les constituants de la boîte de cisaillement

❖ Les bâtis de consolidation

Les bâtis de consolidation comportent :

- Un disque à l'extrémité sur lequel reposent les poids ;
- Une tige support le comparateur pour la mesure de tassement des éprouvettes d'essais.

❖ Les poids

Ce sont des disques métalliques plats. Ils sont fendus afin de permettre leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge du levier du bâti de consolidation. Chaque bâti de consolidation dispose de sa propre série de poids afin de pouvoir effectuer simultanément la consolidation de différentes éprouvettes d'essai sous les contraintes normales désirées.

❖ Appareillage d'usage courant

- Étuve à 105°C;
- Un chronomètre donnant la seconde ;
- Du papier filtre.

III.3.3.3.4. Mode opératoire

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. L'essai consiste à :

Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant durant la durée de l'essai ($\sigma = N$)

La contrainte de cisaillement augmente avec les déplacements imposés à l'échantillon.

III.3.3.3.5. Les résultats obtenus

La **Figure.27** présente la variation de déformation volumique en fonction de déformation x des trois contraintes normales :

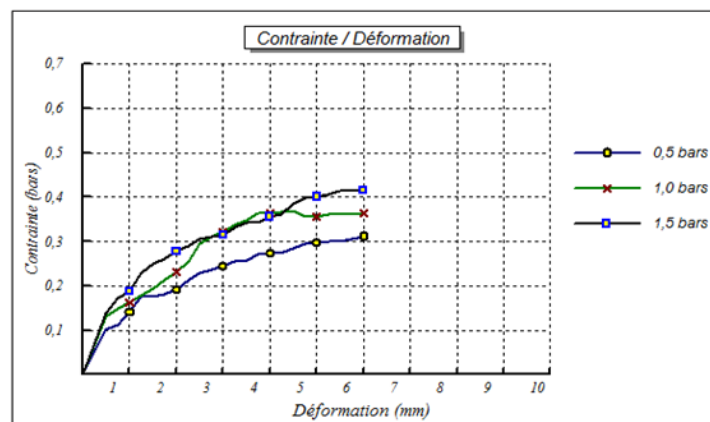


Figure III.25 : Courbe Contrainte/Déformation

Chapitre III : Procédure expérimentale

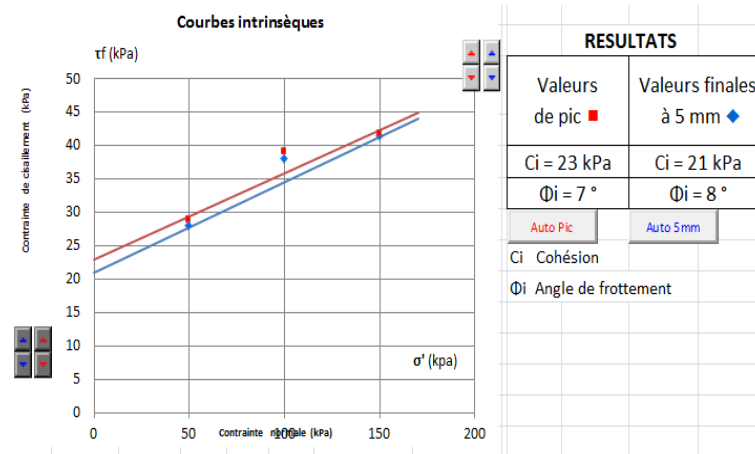


Figure III.26 : présente la courbe intrinsèque de notre sol étudié

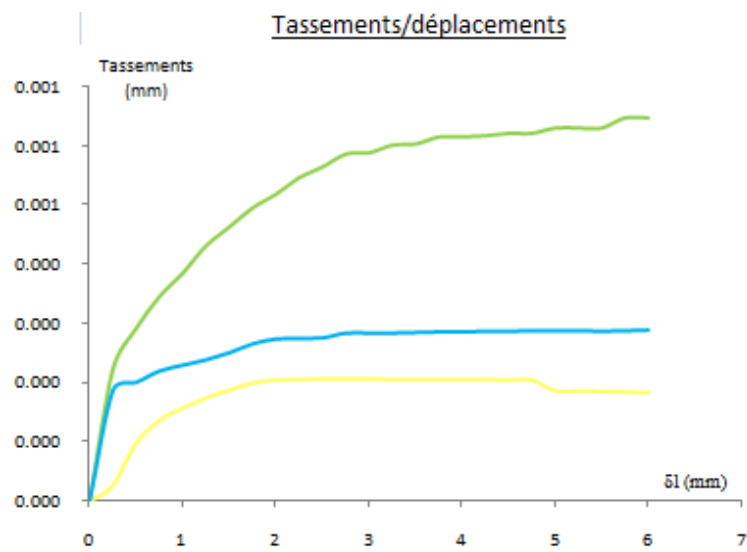


Figure III.27 : Courbe Tassement/déplacement

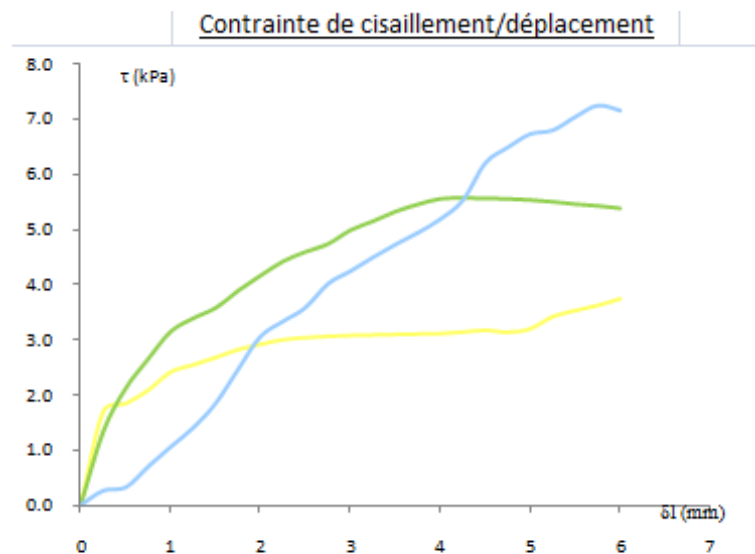


Figure III.28 : Courbe contrainte de cisaillement/déplacement.

Chapitre III : Procédure expérimentale

On rapportant les points (τ , σ) comme montré sur la figure III.28, on constate une variation linéaire de la contrainte de cisaillement avec la contrainte normale appliquée. Ce qui confirme expérimentalement le critère d'équilibre limite énoncé par Mohr-Coulomb, l'ajustement des points expérimentaux par une droite au sens des moindres carrés donne : $\tau = C + \sigma \tan \phi$.

➤ Donc, la cohésion égal **23 KPa** et l'angle de frottement égal **7°**.

Tableau III.12 : Les paramètres de résistance au cisaillement du sol naturel

Type de sol	Cohésion (bars)	Frottement (°degrés)
Sol	0.23	7

III.3.3.4. Essai Œdométrique (XP 94-090-01)

III.3.3.4.1. But de l'essai

Ces essais ont pour objectif d'étudier la consolidation d'un échantillon de sol intact ou remanié, soumis à une charge verticale constante par paliers, drainé verticalement et entouré latéralement d'une enceinte rigide. A partir de cet essai on détermine les caractéristiques suivantes:

C_c : l'indice de compressibilité : qui est la pente de la tangente à la courbe de chargement ;

C_g : l'indice de gonflement : qui est la pente de la courbe de déchargement ;

P_c : l'indice de consolidation ;

σ_p : la contrainte de pré consolidation du sol.

III.3.3.4.2. Principe de l'essai

L'essai est effectué sur une éprouvette de sol placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre).

-Diamètre de la boîte : $D = 60 \text{ mm}$.

-hauteur de l'éprouvette : $\text{Max} (10 \text{ mm} ; 6d_{\text{max}}) \leq H_i \leq 0,4D$.

Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissant et décroissant suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

Les paliers de chargement et de déchargement sont maintenus au moins 24 heures et prolongés si nécessaire dans les conditions fixées par la norme.

III.3.3.4.3. Appareillage

L'appareil spécifique à l'essai (œdomètre) comprend :

- Le bâti permettant d'appliquer les contraintes de chargement sur l'éprouvette ;

Chapitre III : Procédure expérimentale

- La cellule œdométrique ;
- Le dispositif d'application de la charge ;
- Le système de mesurage.

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'appareillage courant pour l'extraction des échantillons de leur conteneur, la préparation des éprouvettes et la détermination des teneurs en eau et des masses volumiques des échantillons de sol.



Figure III.29 : Appareillage œdométrique

III.3.3.4.4. Mode opératoire

- **Déformation de la cellule œdométrique sur son bâti de chargement**

Une mesure de déformation de la cellule est effectuée avec éprouvette témoin métallique placée entre les deux disques drainants, éventuellement recouverts de papier-filtre, en passant par les mêmes paliers de chargement que pour l'essai lui-même.

Cette mesure de déformation de l'appareillage est nécessaire en présence de sols gonflants et lors d'essais sous des contraintes supérieures à 1,6 MPa.

- **Préparation de l'éprouvette**

Nous plaçons l'éprouvette à l'intérieur de la bague, celle-ci est alors taillée avec soins aux dimensions de l'enceinte œdométrique.

- **Déroutement de l'essai**

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette d'aire de section transversale A à une série de paliers de chargement et de déchargement d'intensité constante et à mesurer, pour chacun d'eux, la variation de hauteur ΔH de cette éprouvette au cours du temps.

- **Gonflement de l'éprouvette à la mise en eau**

Dans le cas de sols gonflants, l'éprouvette mise en présence d'eau a tendance à soulever le dispositif d'application de la charge. Celui-ci devra alors être maintenu dans sa position initiale par un chargement qui lui est appliqué immédiatement et progressivement jusqu'à l'apparition du premier tassement stabilisé.

Chapitre III : Procédure expérimentale

La contrainte correspondant à l'apparition du premier tassement compte tenu de la correction de la déformation propre de l'appareillage est notée : σ_{v2} .

Le chargement est ensuite poursuivi avec un taux d'accroissement de la contrainte de chargement n'excédant pas 1 (sans déchargement intermédiaire).

Le dernier palier de ce chargement sera choisi en fonction du respect des deux critères suivants, dans la limite des possibilités de l'appareillage :

- Obtention de trois points alignés sur la courbe de variation de hauteur de l'éprouvette en fonction du logarithme de la contrainte appliquée ($\Delta H, \lg \sigma_v$) ;
- Contrainte $\sigma_{v(n)}$ de ce dernier palier de chargement supérieure à la contrainte effective verticale à laquelle sera soumis le sol, au droit du prélèvement, après construction de l'ouvrage auquel se rapporte l'étude.

L'essai se termine par un déchargement comportant au moins quatre paliers, dont les deux derniers correspondent aux contraintes σ_{v2} et σ_{v1} .

III.3.3.4.5. Les résultats obtenus

Les résultats obtenus par cet sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.13 : Résultats d'essai œdométrique du sol non traité

Pc (bars)	Cc (%)	Cg (%)
1.58	14.99	2.60

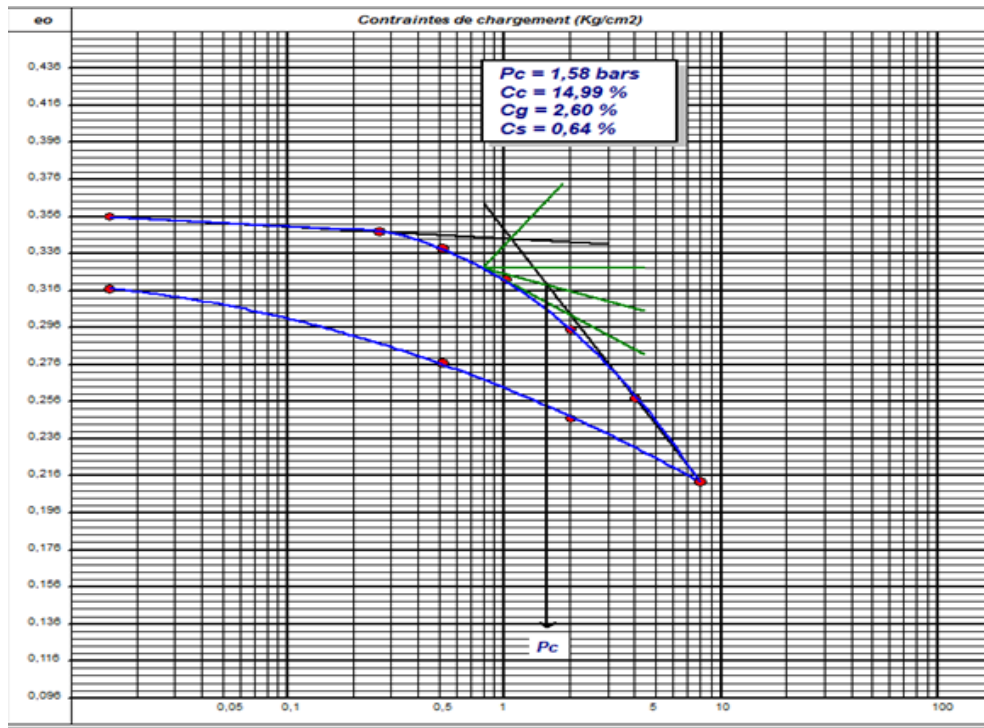


Figure III.30 Courbe œdométrique

III.4. Classification du sol

III.4.1. Selon les approches empiriques

Les limites d'Atterberg constituent des paramètres intéressants dans le cas des sols gonflant En effet ; la littérature contient un nombre considérable d'approches empiriques pour évaluer le potentiel de gonflement en fonction de ces limites.

La Limite de liquidité W_L peut renseigner, cité par[61],sur le taux de gonflement du sol :

Les tableaux présentent les différentes classifications de sol selon l'indice de plasticité I_p :

Tableau III.14 : Classification des sols

Type du sol	Limite de liquidité $W_L\%$	Indice de plasticité $IP\%$
Sable	$W_L < 35$	$IP < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < IP < 25$
Argile	$W_L > 30$	$IP > 15$

Le tableau .15 présente les différents degrés de plasticité du sol selon l'indice de plasticité I_p .

Tableau III.15 : Degré de plasticité du sol

Indice de plasticité IP (%)	Degré de plasticité
12	Non plastique
12-25	Peu plastique ou moyennement plastique
25-40	Plastique
40	Très plastique

Tableau III.16 : Classification des sols en fonction de la limite de liquidité

Limite de liquidité W_L (%)	Classification
0-20	Nom gonflant
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
> 90	Gonflement critique

Chapitre III : Procédure expérimentale

Cette classification montre que:

- Le Sol admet **un gonflement moyen** puisque, la valeur de la limite de liquidité est comprise entre **35 et 50%**.
- L'indice de plasticité IP, peut renseigner, selon [14], cité par [61], sur le taux de gonflement du sol :

Tableau III.17: Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité

Indice de plasticité I_p	Potentiel de gonflement
< 10	Faible
10-20	Moyen
20-35	Elevé
> 35	Très élevé

Cette classification montre que:

- Le gonflement du sol est **moyen**, puisque la valeur de l'indice de plasticité trouvé est comprise entre 10 et 20%.

On considère généralement la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante (tableau.18) en fonction de la valeur de bleu (V_B), [61].

Tableau III.18: Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène

Valeur au bleu	Sensibilité
$V_B < 2,5$	Faible
$2,5 \leq V_B < 6$	Moyenne
$6 \leq V_B < 8$	Forte
$V_B > 8$	Très forte

Selon ces tableaux le sol admet une **moyenne sensibilité** donc un potentiel de **gonflement élevé**.

III.4.2. Classification du sol selon le GTR (Guide des Terrassements Routiers, LCPC, SETRA, 2000):

❖ Récapitulatif des caractéristiques physiques et mécaniques

Tableau III.19: Tableau Récapitulatif des caractéristiques physiques et mécaniques

< 80 μm (%)	W_{opm} (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)	I_C (%)	V_B (%)	C (bar)	\emptyset (°)	IPI (%)	P_c (bars)	C_c (%)	C_g (%)
89	15.44	41	22	19	1.35	4.66	0.23	7	0.8	1.58	14.99	2.60

Chapitre III : Procédure expérimentale

Selon le **GTR**, 2000 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 2000), et d'après les résultats trouvés, on peut dire que le sol étudié est une argile marneuse plastique de la classe **A₃TH (très humide)**. Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible et collant ou glissants à l'état humide d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire).

Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes en place.

Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles développés pour atteindre les objectifs de ce travail, à savoir évaluer les propriétés mécaniques du sol utilisé en fonction des différents paramètres d'identification géotechniques du sol rencontré (classification, granulométrie, quantité des fines, teneur en eauEtc.).

Nous avons présenté les propriétés chimiques, physiques et mécaniques du sol étudié.

Chapitre IV :
Résultats et
interprétations

IV.1. Introduction


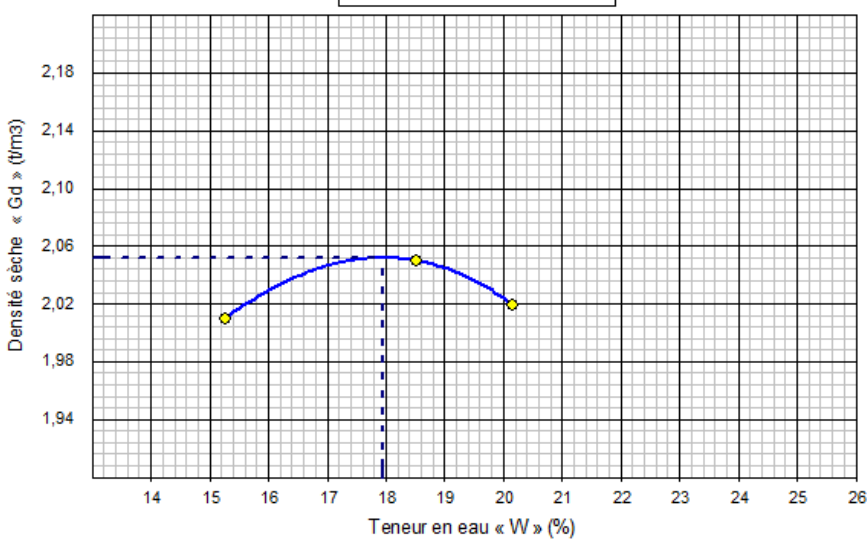
Le présent travail a été réalisé au laboratoire LNHC dans le but d'étudier l'effet des températures sur le comportement mécanique du sol étudié pris de la zone d'ESSEBT, daïra d'Azzaba, Wilaya de Skikda.

Après la réalisation des essais, on présente les résultats ainsi trouvés dans le chapitre précédent, suivi par une interprétation de ces résultats.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.2. Interprétation des résultats

IV.2.1 Le sole initial

	Société de Gestion des Participations Etudes et Engineering « GENE EF » Laboratoire national de l'Habitat et de la construction E.P.E / S.P.A AU CAPITAL DE 150.000.000 DA UNITÉ SKIKDA	RAPPORT D'ESSAI ESSAI PROCTOR NF P 94-093																		
Client : stag Projet : Stag Endroit : stag		N° Projet : XXX-22-001																		
Sondage n° : Profondeur : 00.00 - 00.00 Nature : naturel Date essais :		Densité des grains : 2,65 Refus à 20mm (%) :																		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $\gamma_d \text{ max} = 2,05 \text{ (t/m}^3\text{)}$ $W_{opt} = 17,96 \text{ (\%)}$ </div>																				
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 0.5; padding-left: 10px;"> <p><u>MOULE</u></p> Proctor <input checked="" type="checkbox"/> CBR <input type="checkbox"/> <p><u>ENERGIE</u></p> Normal <input checked="" type="checkbox"/> Modifié <input type="checkbox"/> <p><u>Densité des grains</u></p> Estimée <input checked="" type="checkbox"/> Mesurée <input type="checkbox"/> </div> </div>																				
TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">W (%)</td> <td style="width: 10%;">15,3</td> <td style="width: 10%;">18,5</td> <td style="width: 10%;">20,2</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>Densité (T/m³)</td> <td>2,01</td> <td>2,05</td> <td>2,02</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			W (%)	15,3	18,5	20,2						Densité (T/m ³)	2,01	2,05	2,02					
W (%)	15,3	18,5	20,2																	
Densité (T/m ³)	2,01	2,05	2,02																	
Remarque :																				
Préparé par :	Approuvé par :	Date :																		

© SolTests 2013

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Figure IV.1 : essai Proctor normal

IV.2.1 Gonflement libre

La figure suivante présente la courbe de gonflement libre du sol étudié.

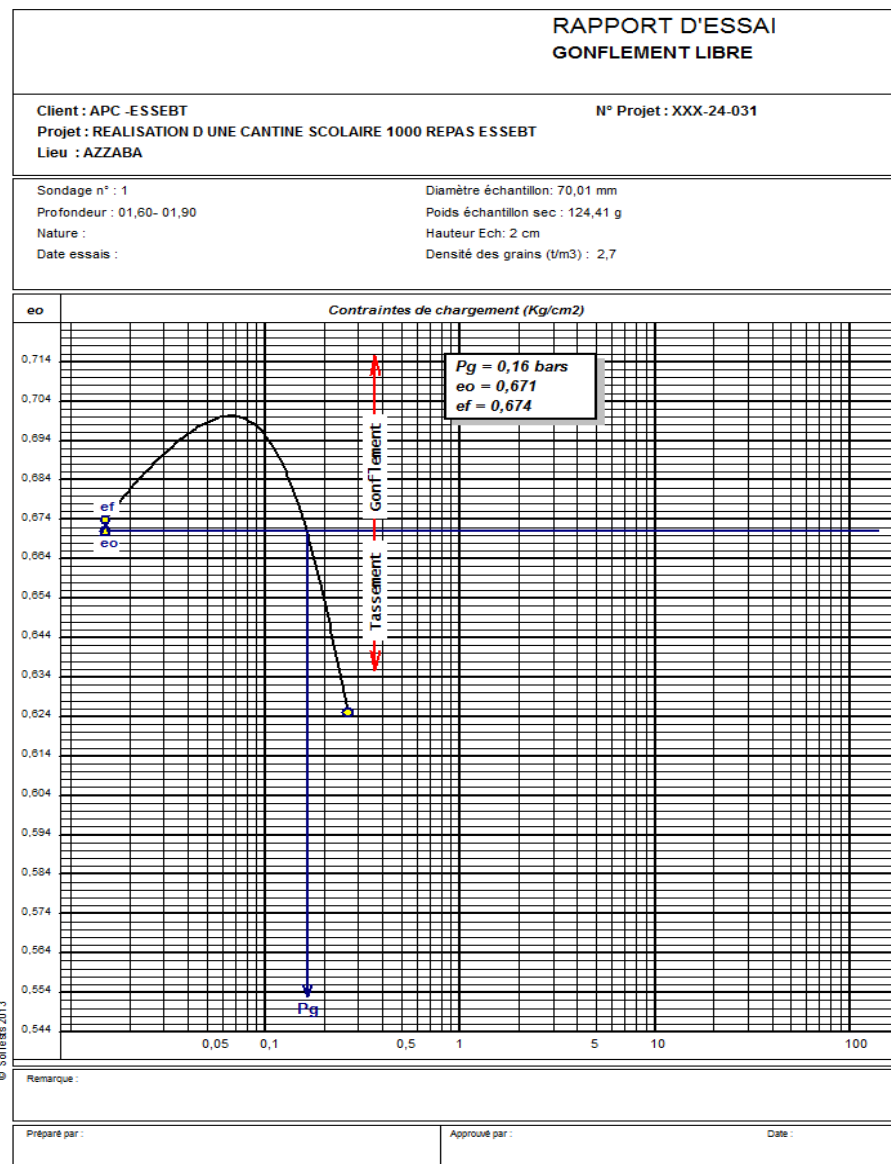
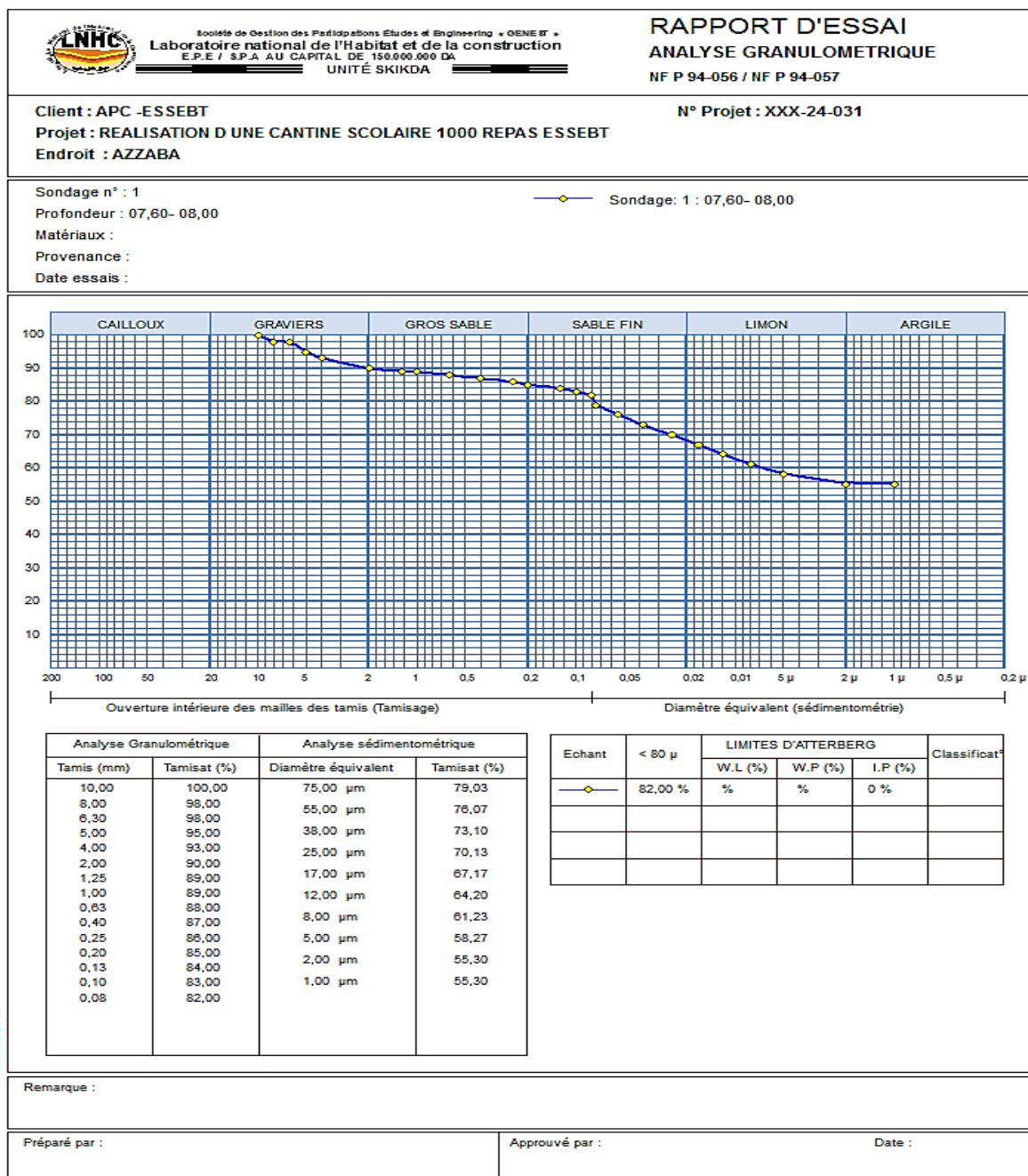


Figure. IV.2 : Courbe de gonflement libre sur le sol étudié

IV.2.2 Analyses granulométrique

La figure suivante présente la courbe granulométrique du sol étudié.

Chapitre IV : Résultats et interprétations



© SofTeate 2013

Figure IV.3 : Courbe granulométrique du sol étudié

IV.2.3 Compressibilité a l'œdomètre

La figure suivante présente la courbe oedométrique du sol étudié.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

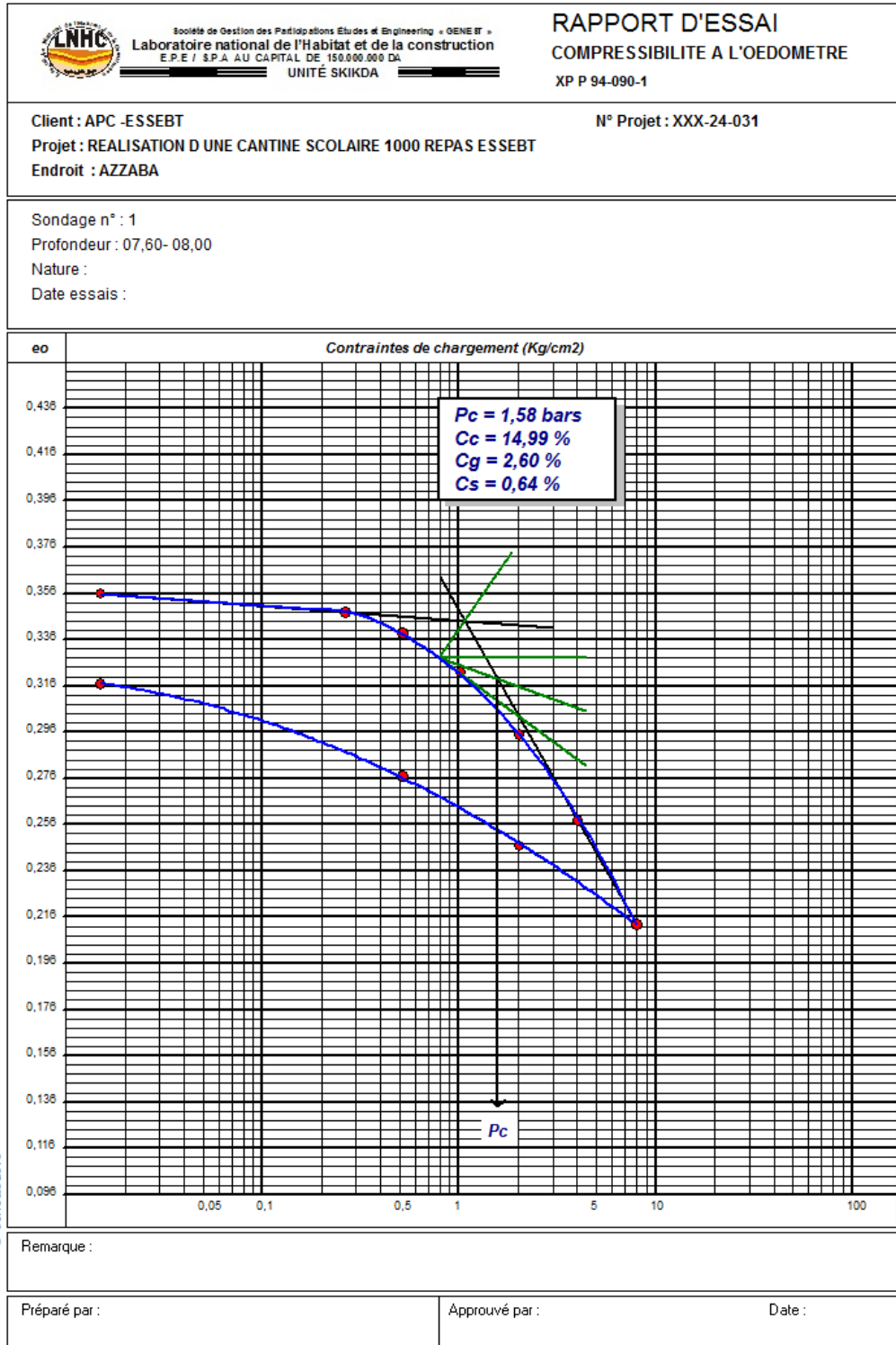


Figure IV.4 : Courbe de compressibilité a l'œdomètre du sol étudié

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.2.4 Cisaillement

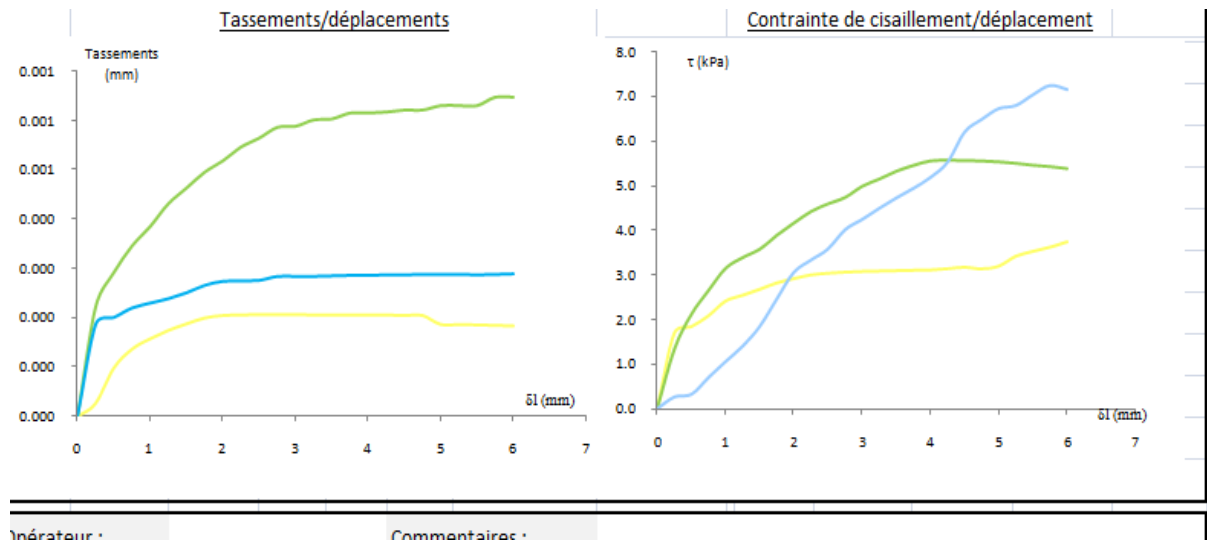


Figure IV.5 : Courbes de cisaillement

IV.2.5 Limites d'Atterberg selon NF P 94-051

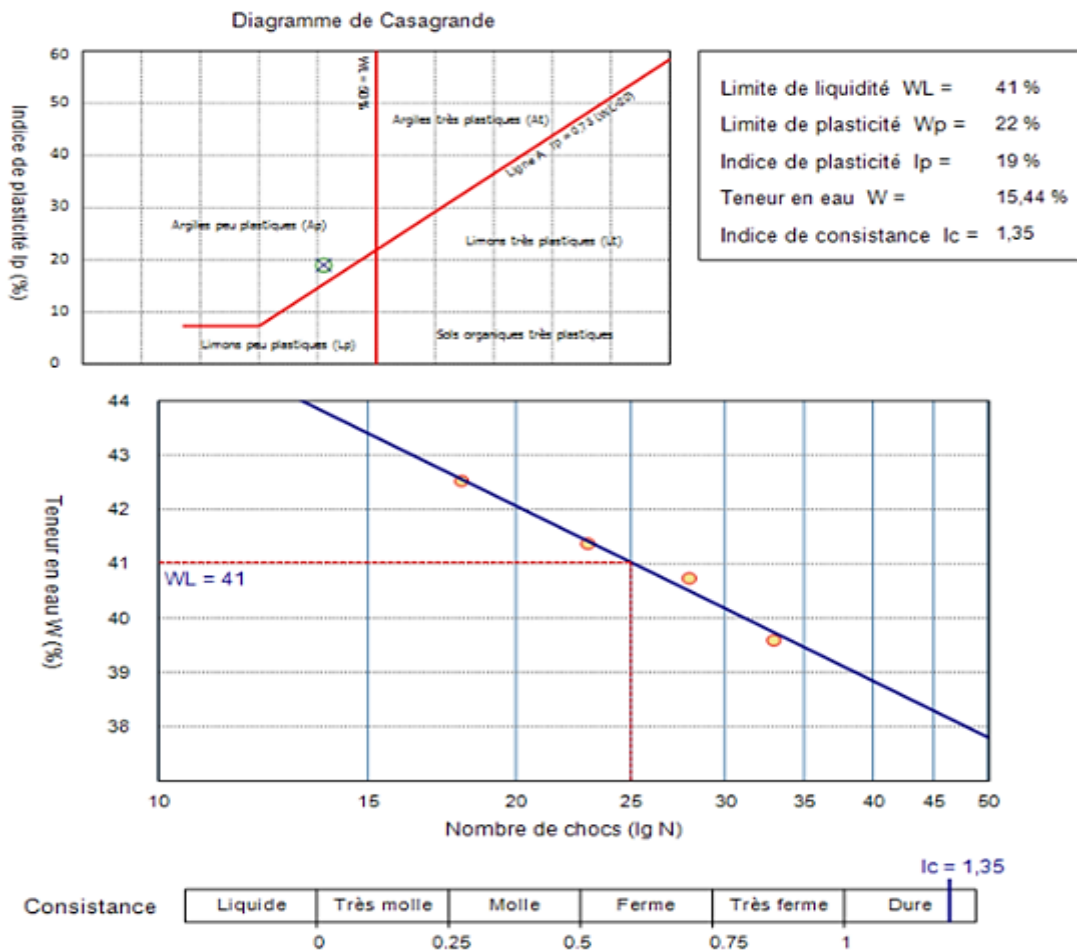


Figure IV.6 : Courbe de la limites d'Atterberg du sol étudié

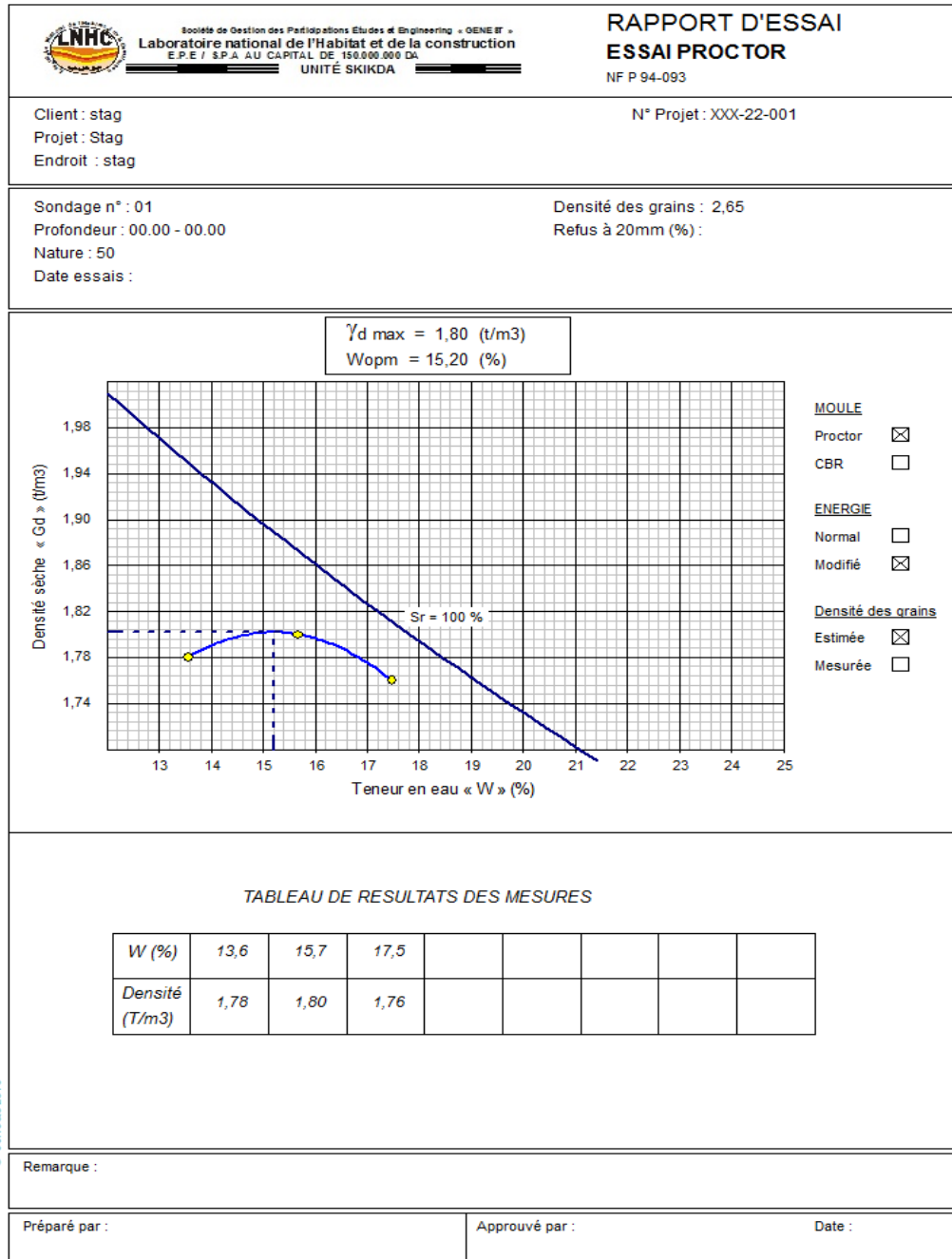
Les résultats de la section suivante sont après exposition au variation de température

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.2.6 Essai de compactage (Proctor normal)

Une série d'essais de compactage a été effectuée dans le but de voir l'effet de variation de température sur les propriétés de compactage du sol étudié. Deux températures ont été proposées, 50° et 100°, ces températures ont été choisies suivant la littérature trouvée et les moyens des laboratoires disponibles dans notre université.

Caractéristiques de compactage du sol à 50°



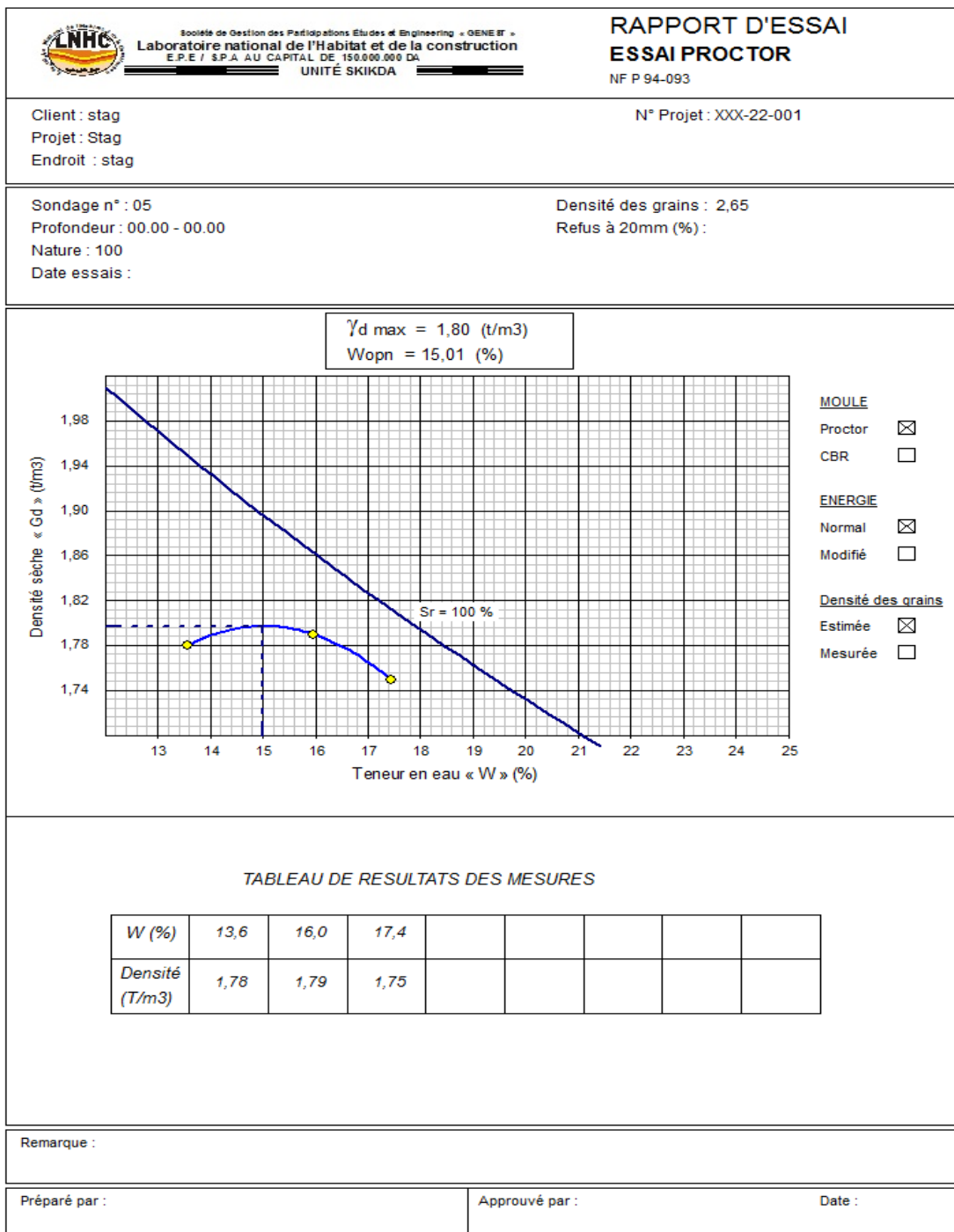
© SolTreats 2013

Figure IV.7 : Courbe Proctor normal à 50°

Chapitre IV : Résultats et interprétations

D'après la courbe de Proctor normal à 50°, on remarque que la densité sèche maximale est d'environ 1.8 T/m³ et la teneur en eau optimale est 15.7%.

Caractéristiques de compactage du sol à 100°



© SoftTests 2013

Figure IV.8 : Courbe Proctor normal à 100°

D'après la courbe la courbe de Proctor normal, on remarque que la densité sèche maximale est d'environ 1.79 T/m³ et la teneur en eau maximale est 16 % à 100°.

IV.2.7 Essai de compression Uni axial

La résistance à la compression simple du sol est déterminée par l'essai de compression simple selon la norme NF P94 -077.

L'essai effectué pour les conditions de masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale du Proctor modifié. Module Young : $\sigma_c = Fr/S$ Avec, Fr (N) : la force de rupture ; S (mm^2) : la section de l'éprouvette ; σ_c (MPa) : résistance à la compression.

La résistance à la compression : $E = \sigma_c/\varepsilon$ Avec, σ_c (MPa) : résistance à la compression et ε : la déformation à la rupture. (NF P94 -077).

L'essai a été réalisé au niveau de laboratoire de matériaux géotechnique de l'Université de Skikda (Figure suivante).



Figure IV.9 : Essai de Compression Simple.

IV.3 Résistance à la compression du sol initial

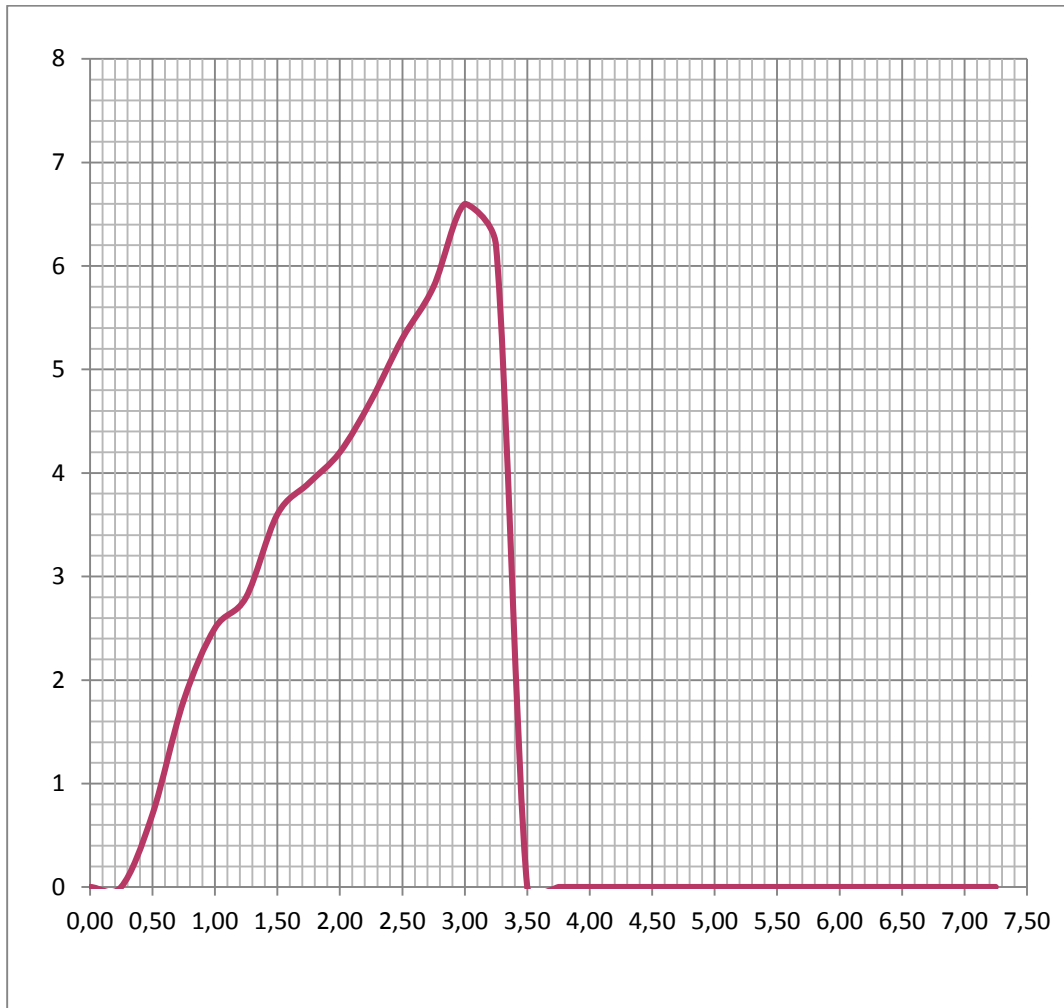


figure IV.10 : courbe contrainte -déformation du sol initial
Résistance à la compression du sol à 50°

La figure ci-dessous montre la courbe de contrainte-déformation du sol à 50°

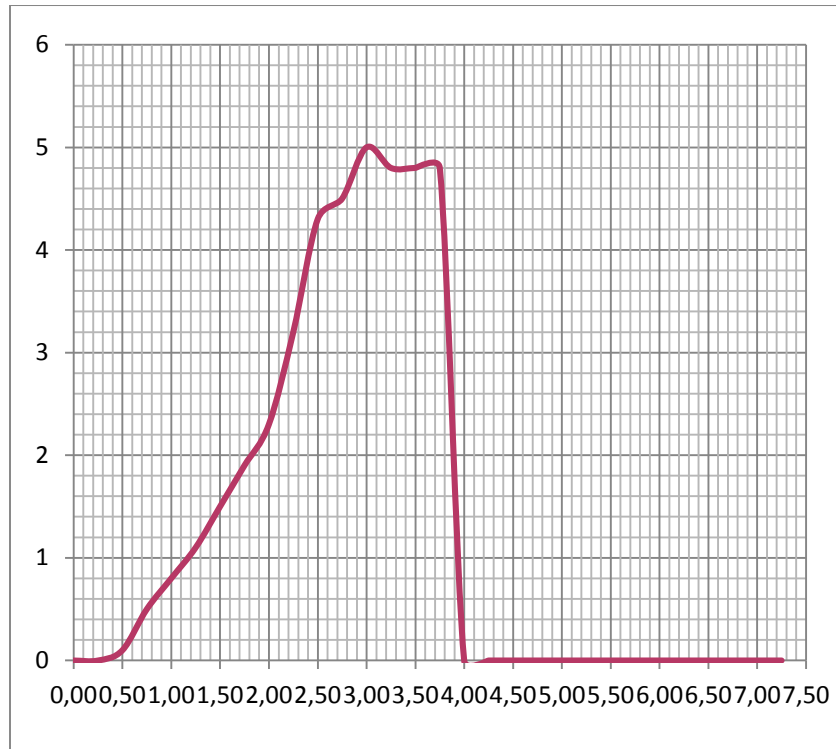


Figure IV.11 : Courbe Contrainte- déformation à 50°

D'après les résultats de l'essai de compression sur le sol étudié à 50°, on trouve une valeur de résistance à la compression non confinée $R_C = 5$ bars.

Résistance à la compression du sol à 100°

La figure ci-dessous montre la courbe de contrainte-déformation du sol à 100°

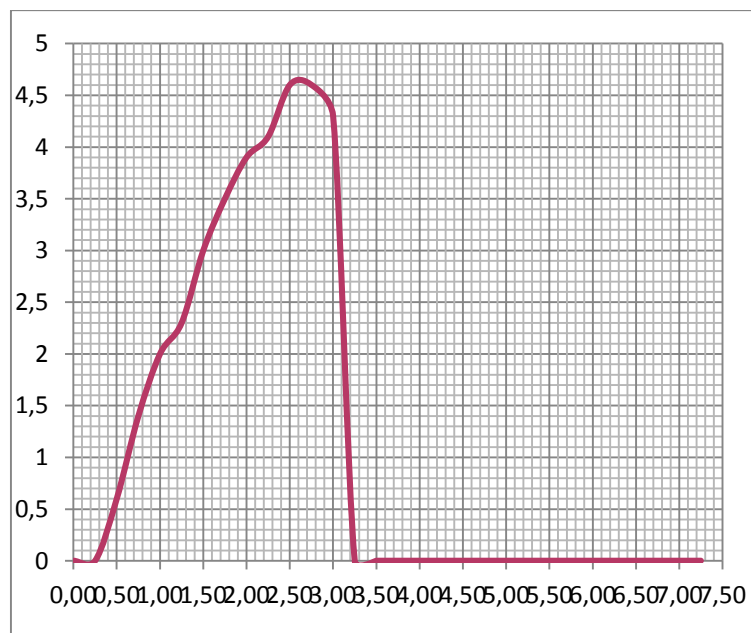


Figure IV.12 : Courbe contrainte- déformation à 100°

Chapitre IV : Résultats et interprétations

D'après les résultats de l'essai de compression sur le sol étudié à 100°, on trouve une valeur de résistance à la compression non confinée $R_C = 4.6$ bars.

Résistance à la compression du sol à 150°

La figure ci-dessous montre la courbe de contrainte-déformation du sol à 150°

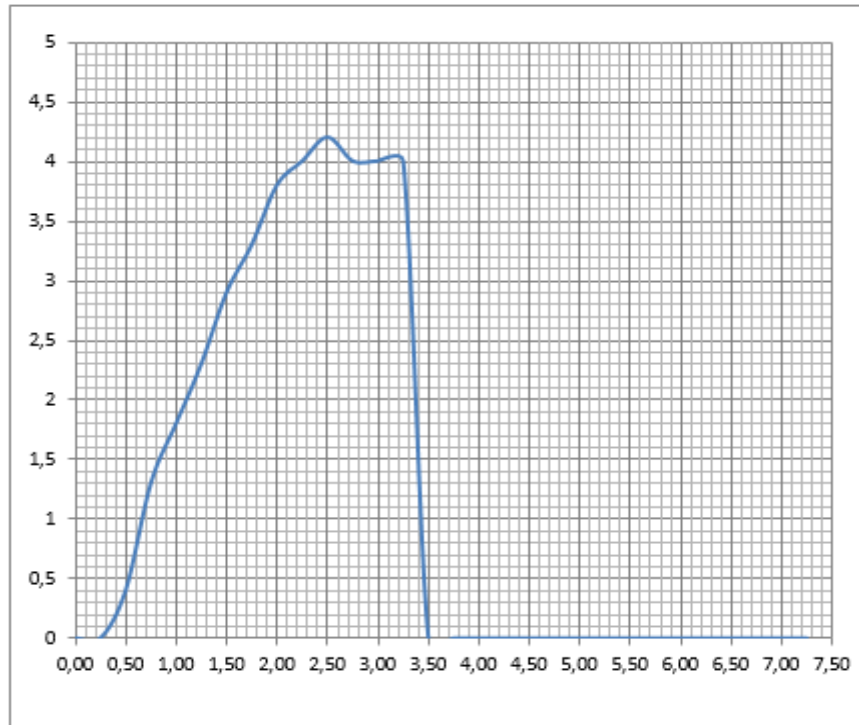


Figure IV.13 : Courbe contrainte- déformation à 150°

D'après les résultats de l'essai de compression sur le sol étudié à 150°, on trouve une valeur de résistance à la compression non confinée $R_C = 4.2$ bars.

On constate que la résistance à la compression non confinée, diminue en fonction de l'augmentation de la température, cette remarque est semblable au résultats trouvés dans la littérature.

Cette diminution est probablement due au changement de structure et de la texture du sol étudié après exposition à des températures plus élevées.

IV.4. Conclusion

Après la réalisation des essais, on a présenté tous les résultats de caractérisation, d'identification on a pu classer notre sol selon les objectifs de notre étude.

Les essais principaux de compression simple montrent le comportement des sols argileux soumises à des températures élevées.

Conclusion Générale

Conclusion

La présente étude sur « Les effets des températures élevées sur les propriétés mécaniques et physiques des argiles » a permis d'approfondir notre compréhension des transformations que subissent les argiles sous l'influence de conditions thermiques extrêmes. À travers une série d'expérimentations et d'analyses théoriques, nous avons pu identifier les principaux mécanismes de changement des propriétés des argiles et évaluer l'impact de la température sur leur comportement. Les résultats obtenus montrent que les températures élevées ont des effets significatifs sur les propriétés mécaniques des argiles, notamment en réduisant leur résistance à la compression et en modifiant leur cohésion. De même, les propriétés physiques telles que la porosité et la plasticité sont également altérées, ce qui peut influencer la performance des structures construites sur ou avec ces matériaux. Ces changements sont d'une importance capitale pour les ingénieurs et les géologues, particulièrement dans le contexte actuel de réchauffement climatique et d'augmentation des épisodes de chaleur extrême. En outre, cette recherche a mis en lumière la nécessité de prendre en compte les effets thermiques dans la conception et la gestion des infrastructures, en intégrant des mesures d'adaptation et de mitigation appropriées. La compréhension approfondie des interactions entre les températures élevées et les argiles permet de mieux anticiper les défis futurs et de développer des solutions innovantes pour assurer la durabilité et la sécurité des constructions. En conclusion, ce mémoire contribue de manière significative à l'enrichissement des connaissances scientifiques sur les matériaux argileux et leurs comportements sous contrainte thermique. Les conclusions tirées de cette étude ouvrent des perspectives intéressantes pour la recherche future et offrent des recommandations pratiques pour les professionnels du génie civil et de la gestion des sols. Il est crucial de continuer à explorer ce domaine afin de mieux comprendre les impacts environnementaux sur les matériaux naturels et de développer des stratégies robustes pour répondre aux défis posés par les conditions climatiques changeantes.

Résumé

Ce mémoire étudie les effets des incendies et des températures très élevées sur les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux. Lors d'un incendie, les températures peuvent atteindre des niveaux extrêmes, provoquant des modifications significatives dans la structure et le comportement des sols argileux.

La cohésion des argiles, qui est la force d'attraction entre les particules du sol, est également affectée par les températures élevées. La déshydratation et la rupture des liaisons interarticulaires réduisent la cohésion, compromettant ainsi la capacité du sol à rester compact et stable. Une cohésion réduite signifie que les sols argileux deviennent plus susceptibles de se désagréger sous l'effet des forces mécaniques, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité pour les structures construites sur ces sols. De plus, les températures élevées diminuent la capacité de rétention d'eau des argiles. En temps normal, les sols argileux peuvent retenir une grande quantité d'eau grâce à leurs fines particules et à leur structure. La cohésion des argiles, qui est la force d'attraction entre les particules du sol, est également affectée par les températures élevées. La déshydratation et la rupture des liaisons interarticulaires réduisent la cohésion, compromettant ainsi la capacité du sol à rester compact et stable. Une cohésion réduite signifie que les sols argileux deviennent plus susceptibles de se désagréger sous l'effet des forces mécaniques, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité pour les structures construites sur ces sols.

De plus, les températures élevées diminuent la capacité de rétention d'eau des argiles. En temps normal, les sols argileux peuvent retenir une grande quantité d'eau grâce à leurs fines particules et à leur structure poreuse. Cependant, l'exposition à la chaleur intense provoque la perte de cette eau, augmentant ainsi la perméabilité du sol. Une perméabilité accrue signifie que l'eau passe plus facilement à travers le sol, ce qui peut entraîner une érosion accélérée et une réduction de la capacité portante du sol. Ces changements dans les propriétés mécaniques et physiques des argiles ont des implications importantes pour la stabilité des structures. Les sols devenant moins cohésifs et plus perméables, ils offrent une base moins stable pour les bâtiments et autres infrastructures. Cela peut conduire à des déformations du sol, à l'affaissement des structures, et à une augmentation des risques d'érosion.

Les incendies et les températures très élevées ont des effets significatifs sur les sols argileux, réduisant leur plasticité, leur cohésion et leur capacité de rétention d'eau. Ces modifications rendent les sols plus vulnérables aux déformations et à l'érosion, compromettant ainsi la stabilité des structures. La compréhension de ces effets est essentielle pour la conception et la maintenance des infrastructures dans des environnements exposés à des conditions thermiques extrêmes.

Abstract

This thesis studies the effects of fires and very high temperatures on the mechanical and physical properties of clay soils. During a fire, temperatures can reach extreme levels, causing significant changes in the structure and behavior of clay soils.

The cohesion of clays, which is the attractive force between soil particles, is also affected by high temperatures. Dehydration and the breaking of interparticle bonds reduce cohesion, thus compromising the soil's ability to remain compact and stable. Reduced cohesion means that clay soils become more likely to disintegrate under mechanical forces, potentially causing stability problems for structures built on these soils.

Furthermore, high temperatures decrease the water retention capacity of clays. Normally, clay soils can retain a large amount of water due to their fine particles and porous structure. However, exposure to intense heat causes this water to be lost, increasing the soil's permeability. Increased permeability means that water passes more easily through the soil, which can lead to accelerated erosion and a reduction in the soil's load-bearing capacity.

These changes in the mechanical and physical properties of clays have important implications for the stability of structures. As soils become less cohesive and more permeable, they provide a less stable foundation for buildings and other infrastructures. This can lead to soil deformations, structural subsidence, and increased erosion risks.

Fires and very high temperatures have significant effects on clay soils, reducing their plasticity, cohesion, and water retention capacity. These changes make the soils more vulnerable to deformation and erosion, thus compromising structural stability. Understanding these effects is essential for the design and maintenance of infrastructure in environments exposed to extreme thermal conditions.

ملخص

تدرس هذه الرسالة تأثير الحرائق والدرجات الحرارية العالية جدًا على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لترب الطين. خلال الحرائق، يمكن أن تصل درجات الحرارة إلى مستويات متطرفة، مما يسبب تغييرات كبيرة في الهيكل والسلوك لترب الطين.

تتأثر التماسك للترب الطينية أيضًا بدرجات الحرارة العالية. الجفاف وكسر روابط بين الجزيئات يقلل من التماسك، مما يضعف قدرة التربة على البقاء مضغوطة ومستقرة. تنخفض التماسك يعني أن ترب الطين تصبح أكثر عرضة للتفتت تحت تأثير القوى الميكانيكية، مما قد يسبب مشاكل في استقرار الهياكل المبنية على هذه الترب.

علاوة على ذلك، تقلل درجات الحرارة العالية من قدرة ترب الطين على احتجاز الماء. في الظروف الطبيعية، يمكن لترب الطين أن تحتجز كمية كبيرة من الماء بسبب جزيئاتها الدقيقة وبنيتها المسامية. ومع ذلك، يسبب التعرض للحرارة الشديدة فقدان هذا الماء، مما يزيد من نفاذية التربة. زيادة النفاذية تعني أن الماء يمر بسهولة أكبر عبر التربة، مما قد يؤدي إلى تسارع عملية الانحطاط وتقليل القدرة التحملية للتربة.

هذه التغييرات في الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للترب الطينية لها تأثيرات هامة على استقرار الهياكل. مع انخفاض التماسك وزيادة النفاذية، توفر التربة أساسًا أقل استقرارًا للمباني والبنى التحتية الأخرى. يمكن أن تؤدي هذه الظروف إلى تشوهات في التربة، وانحدار الهياكل، وزيادة مخاطر التآكل.

في الختام، تعتبر الحرائق والدرجات الحرارية العالية جدًا لها آثار كبيرة على ترب الطين، مما يقلل من درجة المرونة والتماسك وقدرة احتجاز الماء للتربة. هذه التغييرات تجعل التربة أكثر عرضة للانحطاط والتآكل، مما يعرض استقرار الهياكل للخطر. فهم هذه الآثار ضروري لتصميم وصيانة البنية التحتية في البيئات المعرضة لظروف حرارية شديدة.