

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOD MAMMARI DE TIZI-OUZOU (UMMTO)
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de Master

Spécialité : Génie Civil
Option : Géotechnique et environnement

Thème

**Contribution à l'étude du comportement
hydromécanique de sol non saturé
(Application à une argile de Kabylie)**

Présenté par : M^{me} IDRI SARA

Devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|---------------|
| Mme Belhassani | Maitre de conférences à l'UMMTO | présidente |
| Mme Baidi | Maitre de conférences A à l'UMMTO | Examinatrice. |
| Mme Mobarak Houria | Maitre Assistante « A » à l'UMMTO | Promotrice. |

Promotion : 2017 / 2018

Remerciements

Je tien à saisir cette occasion et adresser mon profond remerciement et ma profonde reconnaissance à M^{me} MOBAREK ma promotrice de mon mémoire de fin d'étude, pour le temps qu'elle a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche et pour aussi sa patience et ses précieux conseils et son orientation ficelée tout au long de mes recherche.

Mes vifs remerciements s'étendent également à M^{elle} BELHASSANI présidente du jury et M^{me} BAIDI examinatrice, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en acceptant d'examiner ce modeste travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tien aussi à exprimer mes sincères et profond remerciements à tous les professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études. Et également sus nourrir mes réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle

Je tien à remercier tous les membres de laboratoire du MDC pour leurs aides et encouragement qui ont fourni pondant toute la période des recherche ainsi que leur sociabilité que j'ai beaucoup apprécié.

Je remercie également tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Enfin je tien exprimer toute ma gratitude a toute ma famille, en particulier ma cher et tendre mère pour sa patience et de m'avoir soutenue pondant tous mon parcours d'étude et aussi mon cher époux pour sa patience et compréhension également, ces encouragement et son soutien ainsi que pour tous les moyens matériels et financiers nécessaires qu'il a met a ma disposition toute au long de ce mémoire.



Dédicaces

Je dédie ce travaille.

-A mon père.

-A ma chère mère, Qui m'a toujours soutenue.

-A mon cher époux et mes chères filles (océane et malak et asma).

-A mes sœurs et mon frère.

-A mon amé mehalla chafia

- à tous ceux qui me sont chers.



Liste des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure I.1. schéma d'une coupe de sol..... | 1 |
| Figure I.2. schéma simplifié des trois phases du sol..... | 2 |
| Figure I.3. types de structures..... | 7 |
| Figure I.4: Limites d'Atterber..... | 9 |
| Figure I.5. Feuillet tétraédrique (T) : a)Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959) ¹ ; b) feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim, 1959)..... | 11 |
| Figure I.6 : a)octaèdre d'aluminium(ou de magnésium d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique D'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959)..... | 12. |
| Figure I.7. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile Gibbs, H.J. (1991)..... | 12 |
| Figure I.8. Structure de la kaolinite (Grim;1962)..... | 14 |
| Figure I.9. Photographie d'une kaolinite vue au Microscope électronique..... | 14 |
| Figure I.10. Structure de la montmorillonite (Grim ;1962) | 14 |
| Figure I.11. Photographie d'une montmorillonite vue au microscope électronique..... | 14 |
| Figure I.12. Structure d'illite (Grim ,1962)..... | 15 |
| Figure I.13. Photographie d'une illite Vue au microscope électronique..... | 15 |
| Figure I.14. Structure d'un chlorite..... | 16 |
| Figure I.15. Photographie d'un chlorite Vu au microscope électronique..... | 16 |
| Figure I.16: Groupes d'argiles..... | 16 |
| Figure I.17. Photographie au Microscope Electronique à Balayage des argiles..... (Mitchell, 1976)..... | 17 |
| Figure I.18. Retrait-Gonflement..... | 20 |
| Figure I.19. Dégradations et fissurations des façades de bâtiment..... | 21 |
| Figure I.20. Dégradation des routes..... | 22 |
| Figure I.21. Tassement uniforme..... | 23 |
| Figure I.22. Tassement différentiel..... | 23 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I.23. Désordres provoqués par le Phénomène de tassement..... | 23 |
| Figure I.24. Un glissement..... | 24 |
| Figure I.25. Caractères communs aux glissements rotationnels..... | 25 |
| Figure I.26. Glissement plan..... | 26 |
| Figure I.27. Glissement complexe..... | 26 |
| Figure II.1 : sol humide et non saturé (M.Callaud 2004)..... | 28 |
| Figure II.2 : Différents états de l'eau dans le sol [P.DELAGE]..... | 29 |
| Figure II.3 : différentes zones de sol dans une nappe libre au repos (Xiang-Ling LI,1999.)..... | 30 |
| Figure II.4. phénomène d'ascension capillaire.Capillaryrise..... | 33 |
| Figure II.5 : Effets de la succion sur les grains du sol. (Ghanem -2011)..... | 35 |
| Figure II.6 : (a) principe de plaque de tensiomètre, (b) plaque de tensiomètre (Cui et Delage (2000))..... | 36 |
| Figure II.7 : Méthode du papier filtre 'Dellage et All)..... | 37 |
| Figure II.8: Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Delage et Al.)..... | 39 |
| Figure II.9 : mise en œuvre de la technique osmotique..... | 41 |
| Figure II.10 : courbe de calibration e la concentration de la solution PEG en fonction de la succion (à 25°C). (Xiang-Ling LI, 1999)..... | 42 |
| Figure II.11: courbe de rétention- phénomène d'hystérésis (Ghanem F 2011)..... | 46 |
| Figure II.12: les courbes de rétention pour différents types de sols (D. G. Fredlund et al. 1994) | 46 |
| Figure II.13. Premier cycle d'humidification drainage sur le limon de Jossigny..... Normalement consolidé ((Fleureau et Indarto 1993)..... | 51 |
| Figure II.14. Photographie au microscope électronique à balayage d'échantillons du limon de Jossigny compactés (Delage et Cui 2000)..... | 52 |
| Figure II.15. Influence de la pression capillaire maximale de drainage du sol sur le | |

Liste des Figures

| | |
|--|-----|
| Chemin D'humidification-drainage. (Fleureau 1993)..... | 53 |
| Figure II.16. Courbe de succion (GHANEM Fadhila(2011))..... | 54 |
| Figure II-17. Différentes phases de la courbe de succion (Ghanem –F)..... | 55 |
| Figure III.1. Origine de matériau utilisé..... | 57 |
| Figure .III .2 Séchage dans une étuve | 59 |
| Figure .III.3 Concassement de matériaux..... | 59 |
| Figure .III.4 Passer dans le tamis 3.15mm | 60 |
| Figure III.5. Matériels utilisés dans l'analyse granulométrique par tamisage..... | 61 |
| Figure.III.6. Matériels d'analyse manipulation du Granulométrique..... | 62 |
| Figure.III.7. Schéma de la manipulation du tamisage..... | 62 |
| Figure III.8. Courbe granulométrique du sol étudié..... | 63 |
| Figure .III.9. Appareil Agitateur et Solution du défloculant..... | 64 |
| Figure III.10. Déroulement de l'essai analyse granulométrique par sédimentation..... | 64 |
| Figure .III .11: Courbe d'Analyse granulométrique par sedimentometrie..... | 65 |
| Figure III.12. Déroulement de l'essai de la pesé hydrostatique..... | 68 |
| Figure III.14. Les étapes de l'essai au pycnomètre | 71 |
| Figure III.15. Matériels utilisés..... | 71 |
| Figure III.16. L'appareil de Casagrand..... | 74 |
| Figure III.17. La manière de préparation l'échantillon..... | 74 |
| Figure .III.18. La limite de liquidité..... | 75 |
| Figure.III.19. La limite de plasticité..... | 76 |
| Figure.III.20. préparation de l'échantillon..... | 76 |
| Figure.III.21 : Le matériau argileux est peu plastique situé au dessus de la ligne de A.. | 78 |
| Figure III.22: Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche)... | 80 |
| Figure III.23. Résultats de l'essai à la sur les différents sites étudier..... | 80 |
| Figure III.24: Préparation de l'échantillon à l'optimum..... | 82. |

Liste des Figures

| | |
|--|-----|
| Figure III.25: Déroulement de compactage de l'argile..... | 82 |
| Figure .III.26: courbe Proctor normal..... | 83 |
| Figure III.27. Déroulement de l'essai oedométrique..... | 85 |
| Figure IV.1 : papier filtre whatman..... | 90 |
| Figure. IV.2. préparation de l'chantions de la succion matricielle (sandwich)..... | 91 |
| Figure IV.3 : Disposition des papiers filtre pour la mesure de la succion matricielle après 15 jours..... | 91 |
| Figure IV.4: mesure de papier filtre avant..... | 93 |
| Figure IV.5: mettre un joint pour évité le contacte de papier filtre avec le sol..... | 93 |
| Figure IV.6: mettre l'échantillon et le papier filtre dans une boite fermé..... | 93 |
| figure IV.7 : courbe d'étalonnage du papier filtre(wathman N ⁰ 4)..... | 95 |
| Figure VI.8. Mise en œuvre de la méthode des solutions salines..... | 87 |
| Figure VI. 9: préparation de la pate..... | 98 |
| Figure VI. 10 : l'échantillon humidification est séchage..... | 99 |
| Figure IV.11 : Dispositif des échantillons dans les dessiccateurs..... | 99 |
| Figure IV.12 : courbe de masse de l'échantillon humide en fonction de temps, (dans la solution MgCl ₂)..... | 99 |
| Figure IV.13: courbe de mesure de la masse humide dans la succion SO ₄ , en fonction de temps..... | 100 |
| Figure IV.14 : courbe de la masse humide mesurée en fonction de temps. | 100 |
| Figure IV.15 : on enlève l'échantillon après stabilisation..... | 100 |
| Figure IV.16: on pèse l'échantillon humide (après extraction des dessiccateurs)..... | 101 |
| Figure IV.17 : On met les échantillons dans de Kerdane afin de remplir tout les pores | 101 |
| Figure IV.18 : la pesée hydrostatique des échantillons..... | 101 |

Liste des Figures

- Figure IV.19** : on pèse l'échantillon après extraction de Kerdane et un papier adsorbant séchage 101
- Figure IV.20** : On met les échantillons à étuvé par une température à 105°C... 101
- Figure IV.21.** Premier cycle d'humidification drainage sur l'argile..... 102

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau I.1 : Ce tableau permet de retrouver les relations | 3 |
| Tableau I.2 Caractéristiques des argiles (Ferrah 2006)..... | 17. |
| Tableau I.3 : valeurs des limites d'Atterbeg de différents minéraux argileux..... | 18 |
| Tableau II.1: succion imposées par la technique osmotique (Derfouf-M)..... | 42 |
| Tableau II.2 : L'humidité relative RH et la succion totale de différentes solutions salines saturées. (Xiang-Ling LI, 1999)..... | 43 |
| Tableau II.3 : caractéristiques des solutions salines utilisées à 20°C..... | 43 |
| Tableau II.4 : Techniques de mesure et de contrôle de la succion..... | 44 |
| Tableau.III .1: Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage | 62 |
| Tableau.III .2: Les résultats essai de sédimentation..... | 65 |
| Tableau.III.3. Résultats de l'analyse chimique..... | 66 |
| Tableau.III.4: Les résultats détermination de la teneur en eau..... | 67 |
| Tableau .III.5.Détermination de la densité humide..... | 69 |
| Tableau .III .6. Détermination de la densité sèche..... | 70 |
| Tableau III.7. Classification des masses volumiques sèches selon Terzaghi..... | 70 |
| Tableau III.8. L'état de saturation du matériau..... | 73 |
| Tableau .III .9: Représentation les résultats de la limite de liquidité..... | 75 |
| Tableau .III .10. Calculant la limite de plasticité..... | 76 |
| Tableau .III.11 : Représente détermination l'indice de plasticité..... | 77 |
| Tableau III.12 : Classification indice de plasticité..... | 78 |
| Tableau.III.13 : Classer l'indice de consistance..... | 79 |
| Tableau.III.14 : plage de consistance des sols plastique d'après ATTERBERG..... | 79 |
| Tableau III.15: Désignation du sol en fonction de son VBS. | 81 |
| Tableau.III.16 : Les résultats de Proctor..... | 82 |
| Tableau III.17 : Classification indice de compressibilité selon Terzaghi..... | 86 |
| Tableau III.18 : Classification indice de gonflement selon Sanglerat..... | 86 |
| Tableau III.19. Caractéristiques d'identification du sol..... | 87 |
| Tableau III.20. Potentiel de gonflement d'après[le Building Research Establishment BRE (1980)] | 88 |
| Tableau III.21. Classification du gonflement d'après [Dakshanamurthy et Raman (1973)]..... | 88 |
| Tableau VI.1 : Résultat de mesure de la teneur en eau de papier filtre Watnman42)..... | 92 |
| Tableau IV.2 : Résultat de la mesure de la teneur en eau de l'argile..... | 92 |
| Tableau IV.3 : Résultat de mesure de la teneur en eau de papier filtre et de l'argile..... | 94 |
| Tableau .VI .5. Concentrations des solutions salines..... | 96 |
| Tableau IV.6: Résultats de la mesure de la masse volumique de kerdane..... | 101 |
| Tableau IV.7 : Récapitulatif des résultats des paramètres d'états mesuré..... | 104 |

SOMMAIRE

Chapitre I : généralité sur les sols

| | |
|--|----|
| I.1.Introduction..... | 1 |
| I.2. Définition des | 1 |
| I.3. Formation des sols..... | 2 |
| I.4. Caractéristiques physiques des sols..... | 2 |
| I.4.1. Poids volumique, teneur en eau, indice des vides..... | 2 |
| I.5. Propriétés des sols | 4 |
| I.5.1. Propriétés à caractère chimique | 5 |
| I.5.2. Propriétés à caractère physique..... | 5 |
| I.5.3. Propriétés fondamentales..... | 6 |
| I.5.3.1. Texture des sols..... | 6 |
| I.5.3.2. Plasticité..... | 6 |
| I.5.3.3. Cohésion | 7 |
| I.6. Caractéristiques dimensionnelles du sol..... | 7 |
| I.6.1. La forme | 7 |
| I.6.2. La dimensions..... | 8 |
| I.7.Généralité sur les argiles..... | 8 |
| I.7.1.Définition des argiles | 8 |
| I.7.2. Origine des argiles | 9 |
| 1.7.3. Argiles et plasticité des sols | 9 |
| I.7.4. Microstructure des argiles | 10 |
| I.7.4.1. Structure des argiles..... | 11 |
| I.7.4.2. Formation des minéraux argileux..... | 12 |
| I.7.4.2.1. Héritage et altération..... | 13 |
| I.7.4.2.2. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation. | 13 |
| I.7.4.2.3. Néoformation en milieux confinés | 13 |
| I.7.5. Les principaux types de minéraux argileux..... | 13 |
| I.7.5.1. La kaolinite..... | 13 |
| I.7.5.2. La montmorillonite..... | 14 |
| I.7.5.3. L'illite | 15 |
| 1.7.5.4. Les chlorites..... | 15 |
| I.7.5.4. les micas..... | 16 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| I.7.6.1a .Echanges de cations | 17 |
| 1.7.7. Méthodes d'identification des minéraux argileux | 18 |
| I.7.7.1. Analyse par diffraction aux rayons X..... | 18 |
| I.7.7.2. L'analyse par différentielle thermique..... | 19 |
| I.7.7.3. Analyse par microscope électronique à balayage et à transmission..... | 19 |
| I.7.7.4. Analyse chimique | 19 |
| I.7.7.5. Spectrométrie infrarouge | 19 |
| I.8.Les principaux problèmes des sols argileux | 19 |
| I.8.1. Phénomène de gonflement..... | 19 |
| 1.8.1.1. Nature du phénomène de gonflement | 20 |
| 1.8.1.2. Conséquences du gonflement | 21 |
| I.8.2.Phénomène de tassement | 23 |
| I.8.3.Phénomène de glissement..... | 23 |
| I.8.3.1.Glislements rotationnels..... | 25 |
| I.8.3.2.Les glissements plans | 25 |
| I.8.3.3.Glislements sur une discontinuité préexistante | 26 |
| I.9. Conclusion | 26 |

Chapitre II. Généralités sur les sols non saturés.

| | |
|--|-----|
| II.1.INTRODUCTION | 27 |
| II.2. Définition des sols non saturés..... | 27 |
| II.3.Composition d'un sol non | 28 |
| II.4.L'eau dans le sol..... | 28. |
| II.5.Le Gaz dans le sol | 30 |
| II.6.Etat des sols..... | 30 |
| II.6.1. Les sols saturés | 30 |
| II.6.2. La capacité au champ..... | 30 |
| II.6.3. Le point de flétrissement..... | 31 |
| II.6.4. Les sols secs | 31 |
| III.7.La succion dans les sols..... | 31 |
| III.7.1.Définition de la succion | 31 |
| III.7.2.Composantes de la succion | 31 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| II.7.2.1. Succion matricielle | 32 |
| II.7.2.2.succions capillaire | 32 |
| II.7.2.3. Succion d'adsorption | 33 |
| II.7.3. Succion osmotique | 33 |
| II.7.4. Succion totale | 35 |
| II.7.5. Effets de la succion sur les particules solides | 35 |
| II.8. Technique de mesure et de contrôle de la succion | 35 |
| II.8.1. Techniques de mesure de la succion | 35 |
| II.8.1.1. Tensiomètre | 35 |
| II.8.1.2. Plaque de succion | 35 |
| II.8.1.3. Méthode psychrométrique | 36 |
| II.8.1.4. Méthode du papier filtre | 37 |
| II.8.2. Technique de contrôle de la succion | 38 |
| II.8.2.1. Méthode de la surpression d'air | 38 |
| II.8.2.2. Méthode osmotique | 39 |
| II.8.2.3. Technique de dessiccateur à vide (Méthode à pression vapeur) | 41 |
| II.9. Relation teneur en eau-succion (la courbe de rétention d'eau) | 44 |
| II.10. Les paramètres d'environnements qui influent sur la précision des essais | 46 |
| II.11. Chemin d'humidification drainage | 46 |
| II.11.1. Chemin humidification drainage sur une pâte | 46 |
| II.11.2. Chemin humidification drainage sur un matériau compacté L'optimum | 49 |
| II.12. Courbe de succion ou de rétention | 51 |
| II.13. différentes phases de la courbe de succion | 52 |
| CONCLUSION | 53 |

Chapitre III. Identification des matériaux

| | |
|---|----|
| III. 1. Introduction | 54 |
| III .2. Situation et description de site étudié | 54 |
| III.2.1. Origine de matériau utilisé | 54 |
| III.2.2. Désordre observé | 55 |
| III.3. Etude géologique | 55 |
| III.4. Identifications des matériaux | 56 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| III.4.1. Analyse granulométrique | 57 |
| III.4.2. Analyse chimique..... | 62 |
| III.4.3. La teneur en eau | 63 |
| III.4.4. Masses volumiques..... | 64 |
| III.4.5. Indice des vides, degré de saturation..... | 67 |
| III.4.6. Limites d'Atterberg..... | 69 |
| III.4.7. bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche..... | 75 |
| III.5. Essais Mécanique..... | 77 |
| III.5.1. Essai Proctor Normal (NF P94-093)..... | 77 |
| III.5.2. Essai œdométrique (NF P94-090-1)..... | 78 |
| III.6. Tableau Récapitulatif des résultats | 82 |
| CONCLUSION | 83 |

Chapitre IV : Technique de mesure et d'imposition de la succion

| | |
|---|-----|
| IV. 1 INTRODUCTION..... | 84 |
| IV. 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL..... | 84 |
| IV.2.1. Mesure de la succion initiale par la méthode du papier filtre..... | 84 |
| IV2.1.1. Essai de mesure de la succion avec la méthode du papier filtre | 84 |
| IV.2.1.2. Déroulement de l'essai..... | 85 |
| IV. 2.2. Méthode des solutions salines..... | 89 |
| IV.2.3 Détermination des paramètres d'état..... | 94 |
| Conclusion..... | 104 |

CONCLUSION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les sols non saturés sont définis comme étant des sols dont les pores sont remplis au minimum de deux fluides qui sont en générale l'eau et l'air. Ce type de sol est très répandu, et constitue l'essentiel des sols dans les régions arides ou semi-arides ; comme l'Algérie. Dans le domaine du génie civil, l'étude de ce type de sol devient de plus en plus l'une des préoccupations principales des géotechniciens, d'une part, parce que la non saturation intervient dans beaucoup de problèmes liés aux ouvrages en terre tels que les barrages en remblais, les remblais routiers,....., les problèmes de stabilité des talus, les tassements différentiels des fondations sous l'effet de fluctuation du niveau de la nappe phréatique ou même sous l'effet des conditions climatiques, etc. d'autre part, l'expérience a montré que les approches classiques de la mécanique des sols saturés sont parfois insuffisantes ou même incapables de prédire le comportement de ce type de sol.

L'intérêt au phénomène de non saturation a commencé à se développer depuis les années 1960 jusqu'à la fin du siècle, la mécanique des sols s'est concentrée principalement sur le cas des sols totalement saturés ou bien entièrement secs. Or, dans le cas général, qu'il s'agisse de sols naturels ou artificiels, les sols sont non saturés : ils contiennent une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. La coexistence de ces trois phases est à l'origine du phénomène de succion dont l'influence sur le comportement mécanique des sols.

Le premier et le deuxième chapitre, consacré à l'étude bibliographique, présente l'état d'avancement de la recherche dans le domaine des sols. Nous avons rappelé quelques notions de base de la minéralogie des argiles. Le troisième chapitre est consacré aux généralités des sols non saturés où nous rappelons succinctement les différentes notions concernant le sol non saturé, ainsi que les équations régissant ce dernier. On aborde le phénomène de la succion qui sera effectivement le paramètre qui nous intéressera le plus lors de notre étude. Il est indispensable de connaître le phénomène de succion, les différentes techniques de mesures et les propriétés de rétention des sols ou la courbe de succion et ses différentes formulations qui servent à mieux comprendre le comportement hydrique du sol. On présente aussi le phénomène de l'hystérésis qui est dû au chemin de séchage et d'humidification.

Le troisième chapitre, consiste à identifier le matériau argile par l'ensemble des essais d'identification au laboratoire, est les Essais Mécanique Proctor Normal Essai oedométrique et essai de gonflement libre

La dernière partie a pour objectif de présenter les différentes techniques expérimentales, le comportement sur chemin drainage humidification à différent états initiaux sera étudié (pate, consolidé, compacté).et le papier filtre

I.1.Introduction

Les roches argileuses sont une catégorie non négligeable des roches sédimentaires présentes sur Terre. Elles sont impliquées dans un grand nombre de problèmes de géotechnique (stabilité de pente, tassement, stabilité d'excavations souterraines etc.,,,). Par ailleurs, le nombre des ouvrages et des structures bâtis a considérablement augmenté, de ce fait les ingénieurs en Génie Civil s'intéressent de plus en plus au comportement de ces formations géologiques.

Ainsi, développer les connaissances sur les roches argileuses s'est avéré nécessaire. Il a fallu pour cela dans un premier temps les définir et les classer puis, dans un second temps développer des outils expérimentaux (installations complexes pour étudier les comportements physico -mécaniques des roches argileuses), théoriques (poroélastoplasticité par exemple, théorie des milieux non saturés) et numériques afin d'étudier, d'analyser et de prédire leur comportement mécanique (déformations et rupture)

I.2.Définition des sols

C'est la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physique, chimique et biologique, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants (Albert demolon).

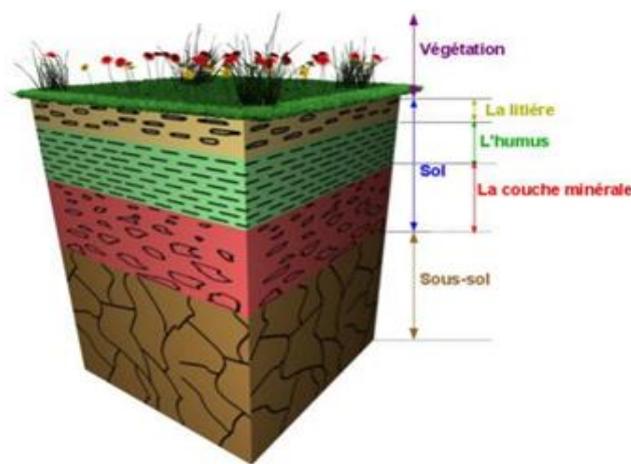


Figure. I.1.schéma d'une coupe de sol. (Albert demolon).

I.3. Formation des sols

La formation et l'évolution d'un sol s'opèrent selon trois processus, plus ou moins simultanés (Guillaud, 1989).

Processus 1 : Altération de la roche mère

La roche mère qui peut être dure (granite, schiste, grés...), tendre (craie, marne, argile...) ou meuble (sables, éboulis, loess...) est fissurée, réduite en éléments plus fins ; elle est désagrégée par l'action de la pluie, du froid et du soleil.

Processus 2 : poursuite de l'altération par les matières organiques

Le sol désagrégé et altéré, constitué de minéraux et d'élément plus au moins pâteux et alors colonisé par une flore et une faune qui s'enrichissent en substances chimiques et organique, dont l'humus.

Processus 3 : Migrations verticales des éléments solubles

Sous climat pluvieux, les éléments solubles migrent vers le bas : C'est le lessivage. Sous climat sec à forte évaporation, les éléments solubles migrent vers la surface et l'enrichissent.

Cette migration des éléments, va créer dans le sol des couches plus ou moins distinctes et définir les horizons, qui constituent le profil pédologique d'un sol.

I.4. Caractéristiques physiques des sols

I.4.1. Poids volumique, teneur en eau, indice des vides

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

Pour cela considérons les représentations suivantes d'un sol dans laquelle les trois phases sont séparées (figure I.2)

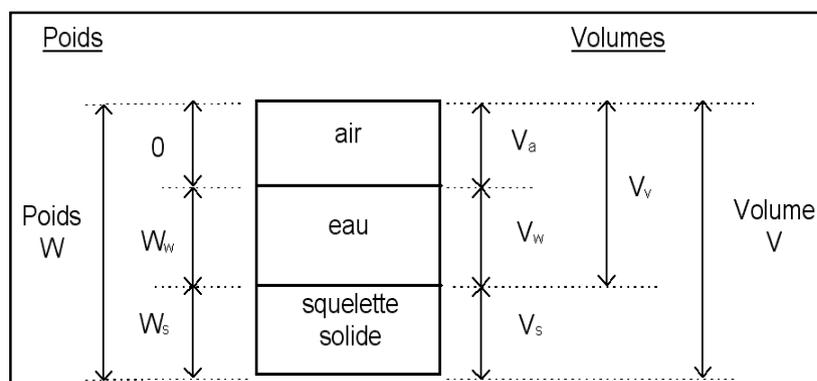


Figure I.2. schéma simplifié des trois phases du sol

- la partie solide (notée s) constituée par des grains minéraux ;
- la phase liquide (w), constituée par l'eau occupant les vides. Si tous les vides sont remplis par l'eau, le sol est dit saturé; sinon, il est partiellement saturé;
- la phase gazeuse (a) une partie des vides non occupés par l'eau est remplie par du gaz, essentiellement de l'air

Les valeurs suivantes sont obtenues en laboratoire à partir d'essais très simples tels que pesée et passage à l'étuve.

Tableau I.1 : Ce tableau permet de retrouver les relations

| | | |
|----------------|----------------------|--|
| γ_h | [kN/m ³] | le poids volumique du sol humide dans l'état où il se trouve ; |
| γ_d | [kN/m ³] | le poids volumique sec (après expulsion de l'eau libre) ; |
| γ_w | [kN/m ³] | le poids volumique de l'eau, égal à 9,81 kN/m ³ ; |
| γ_s | [kN/m ³] | le poids volumique des grains solides (en général compris dans la fourchette 26 à 28 kN/m ³) ; |
| w | [%] | la teneur en eau : rapport du poids d'eau au poids de sol sec ; |
| w_{sat} | [%] | la teneur en eau à saturation : l'eau garnit tous les vides ; |
| e | | l'indice des vides, rapport du volume des vides (air + eau) au volume des grains ; |
| n | | la porosité, rapport du volume des vides au volume total ; |
| S_r | [%] | le taux de saturation, rapport du volume d'eau au volume des vides ; |
| γ_{sat} | [kN/m ³] | le poids volumique du sol saturé ; |
| γ' | [kN/m ³] | le poids volumique immergé : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$. |

Les Paramètres dimensionnels / adimensionnels :

| | |
|--|-----------------------------------|
| Poids vol. total du sol : | $\gamma = \gamma_h = \frac{W}{V}$ |
| Poids vol. sol sec : | $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$ |
| Poids vol. solide [≈27 kN/m ³]: | $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$ |
| Poids vol. de l'eau [≈10 kN/m ³] : | $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$ |
| Poids vol. déjaugé : | $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ |

Paramètres dimensionnels

| | |
|------------------------|-------------------------|
| Indice des vides : | $e = \frac{V_v}{V_s}$ |
| Porosité : | $n = \frac{V_v}{V}$ |
| Teneur en eau : | $w = \frac{W_w}{W_s}$ |
| Degrés de saturation : | $S_r = \frac{V_w}{V_v}$ |

Paramètres adimensionnels

➤ **Les relations entre les paramètres physiques**

Tous les paramètres définis ne sont pas indépendants, les relations les plus importantes existant entre ces différents paramètres sont les suivant :

| | | |
|---|---|--|
| [1] $n = \frac{V_v}{V} \cdot$ | [5] $e = \frac{V_v}{V_s} \cdot$ | [9] $w = \frac{W_w}{W_s} \cdot$ |
| [2] $n = \frac{e}{1+e}$ | [6] $e = \frac{n}{1-n}$ | [10] $w = e \cdot S_r \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$ |
| [3] $n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$ | [7] $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$ | [11] $w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$ |
| [4] $n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w}$ | [8] $e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$ | [12] $w = S_r \cdot \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$ |
| [13] $S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot$ | [14] $S_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \frac{w}{e}$ | [15] $S_r = \frac{w}{w_{sat}} \quad (\gamma_d \text{ constant})$ |
| [16] $\gamma = (1+w)(1-n)\gamma_s$ | [17] $\gamma = \frac{1+w}{1+e} \cdot \gamma_s$ | [18] $\gamma = (1+w)\gamma_d$ |
| [19] $\gamma = \gamma_d + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$ | [20] $\gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot S_r \cdot \gamma_w}{1+e}$ | [21] $\gamma = (1-n)\gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$ |
| [22] $\gamma_d = (1-n)\gamma_s$ | [23] $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$ | [24] $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \cdot$ |
| [25] $\gamma' = (1-n)(\gamma_s - \gamma_w)$ | [26] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$ | [27] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \cdot \gamma_d$ |

I.5. Propriétés des sols :

D'un sol à un autre, les propriétés peuvent être très variables. Elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de silts, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz, les propriétés de la terre sont changeantes. C'est souvent la fraction dominante d'un sol qui régit les propriétés fondamentales du matériau.

I.5.1. Propriétés à caractère chimique

Ces propriétés sont également tributaires de la nature minéralogique et de leur chimie constitutive, de la nature et de la quantité des matières organiques. La quantité en oxyde de fer, de magnésium ou de calcium, en carbonates et en sulfates peut caractériser la terre d'un point de vue chimique. Le sulfate de calcium, particulièrement gonflant à l'hydratation peut être très néfaste ; sa solubilité dans l'eau peut augmenter la sensibilité des argiles (Guillaud, 1989).

I.5.2. Propriétés à caractère physique

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la qualité d'un sol pour la construction (Guillaud, 1989).

- **Ameublissement** : c'est l'aptitude d'un sol à être facilement brisée. Les sols à fraction sableuse dominante se brisent facilement alors que les sols très argileux s'ameublissent très difficilement
- **Adhérence** : c'est l'aptitude d'un sol, pour un certain degré d'humidité, à adhérer aux objets, notamment aux outils. Elle augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour être ensuite diminuer.
- **Masse volumique des grains solides** : Elle s'exprime en kg/m^3 ; par exemple, les micas et les feldspaths ont une masse volumique de 2600 à 2700 kg/m^3 , les sables de 2600 à 3000 kg/m^3 , les argiles de 2500 kg/m^3 .
- **Teneur en eau** : c'est le rapport de la quantité d'eau contenue dans le sol sur la quantité de sol sec, Elle s'exprime en pourcentage pondéral et définit les différents états hydriques du sol. Il s'agit d'eau que l'on peut éliminer par évaporation.
- **Pouvoir absorbant** : c'est la propriété que possède l'argile, l'humus et le complexe argilo humique de retenir à leur surface des ions électropositifs surtout, mais également électro-négatifs, provenant de la solution du sol. La fixation des ions s'explique par les charges négatives et positives entourant les feuillettes d'argile et les micelles d'humus.
- **Perméabilité** : c'est la vitesse de percolation qui dépend de la texture mais surtout de la structure. Elle s'exprime en cm/heure.
- **Résistance sèche** : La résistance à la rupture à l'état sec peut atteindre des valeurs très variables selon les argiles et dépend de la distribution et de la taille des particules, de leur cristallinité mais aussi de la nature des ions échangeables. Les kaolinites ont une résistance de l'ordre de 0.7 à 50 bars, les illites de 13 à 70 bars et les montmorillonites de 20 à 60 bars.

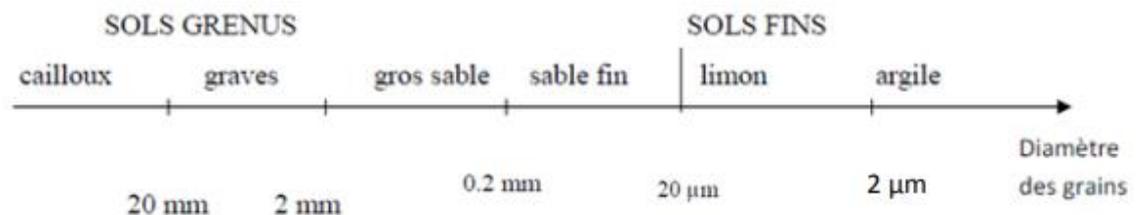
I.5.3. Propriétés fondamentales

L'étude exhaustive des propriétés du sol n'est pas toujours nécessaire. Il convient surtout de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont :

- La texture ;
- La plasticité ;
- La cohésion ;

I.5.3.1. Texture des sols

La texture fait référence à l'apparence extérieure d'un sol ; elle peut varier suivant les dimensions et la forme des particules, ainsi que selon la distribution relative des grosseurs des grains. Par conséquent, les sols à grains grossiers comme les sables et les graviers, ont une texture grossière ; les sols à texture fine, tels que les silts et les argiles, sont constitués essentiellement de grains de minéraux très petits, invisibles à l'œil nu. (A.KOMAR, 1976) La texture d'un sol se mesure par l'analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers : cailloux, graviers, sables et limons et par sédimentométrie pour les fines argileuses. La classification des fractions de grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et se référant aux normes American society for testing material (A.S.T.M., AFNOR) est la suivante :



I.5.3.2. Plasticité

La plasticité se définit comme la propriété d'un sol à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'un sol ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg. Elles s'effectuent sur la fraction du sol dont le diamètre des particules

<0.4mm, la quantité d'eau exprimée en pourcentage, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommé limite de liquidité W_L . Entre l'état plastique et l'état solide la transition est nommée limite de plasticité W_p . A W_L , le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement. A W_p le sol cesse d'être plastique et devient cassant. L'indice de plasticité (I_p) égal à $W_L - W_p$ précise la plage de comportement plastique d'un sol. La combinaison de W_L et W_p précise la sensibilité d'un sol aux variations d'humidité.

I.5.3.3. Cohésion

La cohésion d'un sol exprime la capacité de ces particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction.

I.6. Caractéristiques dimensionnelles du sol

I.6.1. La forme

On peut distinguer trois catégories de formes:

- Les particules sphériques, cubiques (arrondies, anguleuses) : cas des sols grenus (sables)
- Les particules en plaquette: cas des sols fins (argiles)
- Les particules en aiguilles.

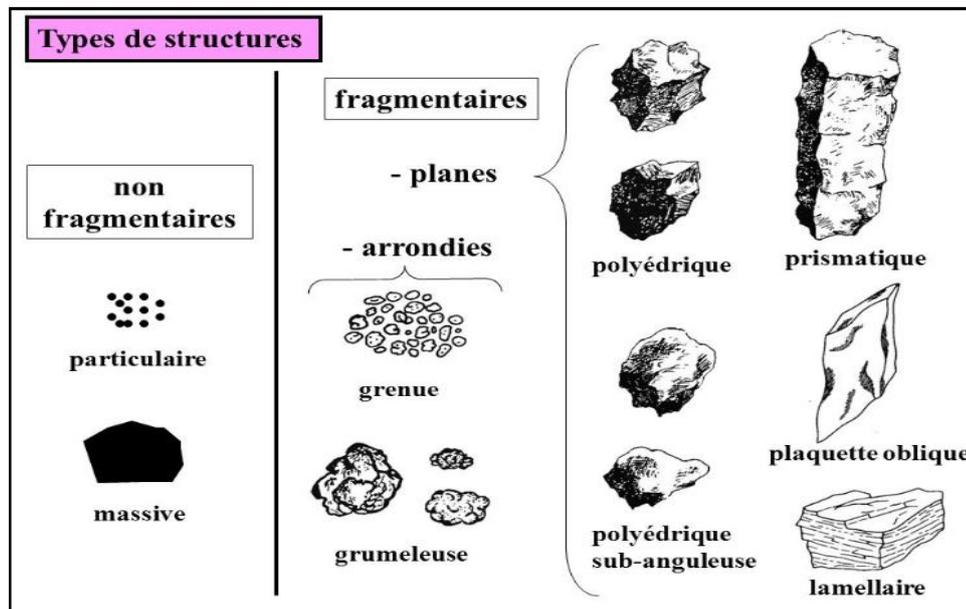
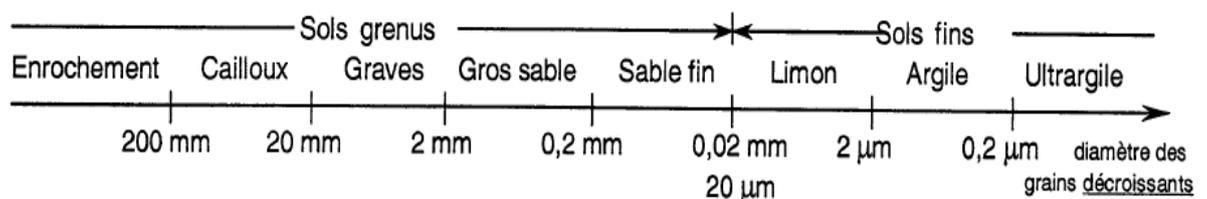


Figure I.3. types de structures. (Guillaud, 1989)

I.6.2. La dimensions

Suivant la taille des grains on définit les catégories de sols :(Jacques lerau-2006)



- Blocs rocheux : $D > 200 \text{ mm}$
- Cailloux : $20 < D < 200 \text{ mm}$
- Gravier : $2 < D < 20 \text{ mm}$
- Sables grossiers : $0,2 < D < 2 \text{ mm}$

- Sables fins : $20 \mu\text{m} < D < 0,2 \text{ mm}$
- Limons ou silts : $2 \mu\text{m} < D < 20 \mu\text{m}$
- Argiles : $D < 2 \mu\text{m}$

I.7.Généralité sur les argiles

I.7.1.Définition des argiles

Une argile c'est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux, silicates d'aluminium en général plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée, capacité plastique, ou bien une structure fibreuse, capacité D'absorption. Vis-à-vis de la géotechnique, on désigne par argile les matériaux de granulométrie inférieure à $2\mu\text{m}$.

Les minéraux les plus communs dans les argiles sont les suivants: La kaolinite, halloysite, montmorillonite, illite et les vermiculites.

La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement et/ou le retrait du sol.

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à fissurer en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol. (Walid ZOUBIR2012)

I.7.2. Origine des argiles

« Le contact des roches et de l'eau produit des argiles, soit à la surface de la terre, soit près de celle-ci » (Velde, 1995).

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et déposés. Certains dépôts se transforment par diagénèse (déshydratation et compactage) et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllosilicates, Ces derniers sont des minéraux argileux. (Walid 2012)

1.7.3. Argiles et plasticité des sols

La teneur et la nature des argiles des sols déterminent largement leurs caractéristiques géotechniques. Le test le plus simple pour déterminer la présence d'argile est le test au bleu de méthylène qui donne une indication sur la teneur en argile des sols et matériaux.

Dans une autre approche, l'échantillon de sol est soumis au test d'Atterberg ce test permet de déterminer la sensibilité d'un échantillon de sol à l'eau sans passer par l'analyse minéralogique de sa partie fine. (CEFOR Lyss2016)

Selon sa teneur en eau (et la nature des minéraux), un sol argileux peut se présenter sous trois états : Vincent (ROBITAILLE, Denis TREMBLAY)

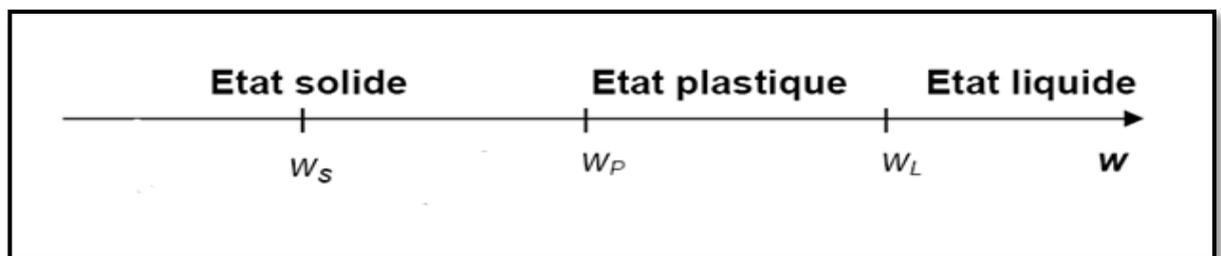


Figure I.4: Limites d'Atterberg

➤ **L'état solide** : Lorsque le sol à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbées sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il y ait rupture.

➤ **L'état plastique** : Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus épais, mais ils se touchent encore, le sol se déforme sans fissures. C'est un sol qu'on peut façonner à la main.

➤ **L'état liquide** : Lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre.

Les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg. Ces limites sont les suivantes :

- **La limite de liquidité W_L** : C'est la teneur eau à partir de laquelle une argile donnée cesse d'avoir un comportement de solide et commence à s'écouler sous son poids propre comme un liquide.
- **La limite de plasticité W_P** : C'est la teneur en eau à partir de laquelle, une argile donnée cesse d'être plastique, c'est-à-dire aisément déformable sans fissuration, et devient fragile et sensible à la fissuration dès les petites déformations.
- **La limite de retrait W_S** : C'est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume.

I.7.4. Microstructure des argiles

Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines. Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles (Jackson & Sherman 1953, cités par Grunberger 1995). De par leur origine détritique et leur nature granulaire, la structure des sédiments argileux est complexe ; la compréhension des mécanismes de déformation de ces matériaux, dans lesquels la chimie de l'eau tient une place prépondérante, passe nécessairement par la connaissance précise de la microstructure.(Guendoud malika2016)

A l'échelle microscopique des argiles, on peut distinguer :

- La structure.
- La texture.

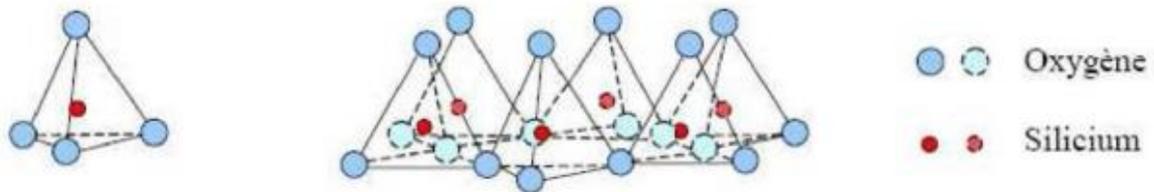
I.7.4.1. Structure des argiles

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Ces phyllosilicates sont formés par un empilement de feuillets, chacun étant formé par un arrangement de deux types de couches, l'une tétraédrique (T) à base de silice (Figure I.4) et l'autre octaédrique (O) à base d'hydroxyde d'aluminium (Figure I.2).

La cristallite (ou unité structurale) est composé d'un feuillet et d'un inter feuillet. Un feuillet est formé de deux ou trois couches. Il existe deux types de couches :

- **La couche tétraédrique** : La structure fondamentale tétraédrique est composée de quatre atomes d'oxygène (O) formant un tétraèdre avec en son centre un

atome de silicium (SiO_4) (Figure I.4). Un feuillet tétraédrique simple résulte d'un arrangement des structures fondamentales tétraédriques. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques. (A.BOTTERO, 1972) (CAILLERE, SIMONNE)



a) Unité tétraédrique à cœur de silicium... b) Schéma d'une couche de tétraèdre $[\text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2]^{6-}$ avec arrangement hexagonal.

Figure I.5. Feuillet tétraédrique (T) : a)Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959)¹ ; b) feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim, 1959).

- **La couche octaédrique** : Est constituée par Al^{3+} ou Mg^{2+} entourés de six groupes hydroxyle OH^- (figure I.5). Son épaisseur est $5,05 \text{ \AA}$ et son bilan des charges +1.

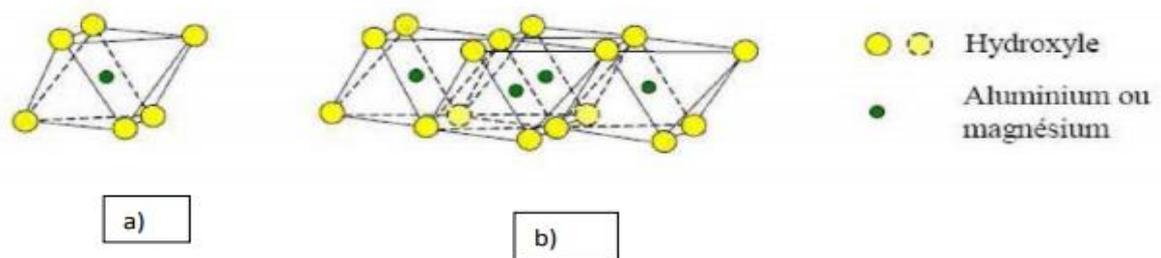


Figure. I.6 : a) octaèdre d'aluminium(ou de magnésium d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique D'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959).

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (**Figure I.6.**)

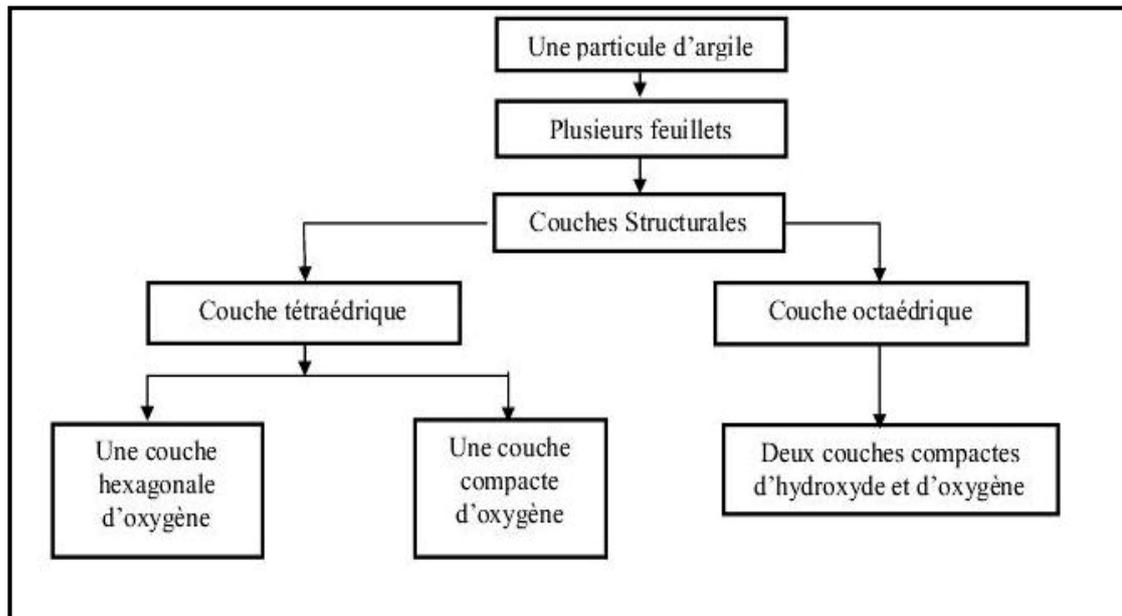


Figure I.7. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile
Gibbs, H.J. (1991).

I.7.4.2. Formation des minéraux argileux

Les sols argileux se forment par un processus lent d'altération sous l'action du climat, suivi de phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation. 90 % des minéraux argileux sont d'origine détritique. L'altération peut être physique (désagrégation des minéraux primaires) ou chimique (par transformation des minéraux). Certains minéraux argileux précipitent à partir d'une solution (minéraux néoformés). (Mesaadia kuoS-Ahras. 2015)

I.7.4.2.1. Héritage et altération

L'altération physique des roches est l'une des origines des minéraux argileux. Ceux qui en résultent sont différents de par la nature des roches mères et du climat.

En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche mère (illite et chlorite), en climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée et donne de la kaolinite en milieu drainé et des smectites en milieu confiné. En climat tempéré et humide, l'altération est modérée, il apparaît des interstratifiés, des illites, des chlorites dégradées et des vermiculites. (A.BOTTERO, 1972)

I.7.4.2.2. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux consiste en une modification du minéral argileux tout en conservant son type de structure (Millot, 1964)

On trouve la transformation par dégradation (soustraction d'ions) et par aggradation (fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que pendant la sédimentation et la diagenèse.

I.7.4.2.3. Néof ormation en milieux confinés

Les minéraux argileux sont formés par précipitation d'ions en solution (silicium, aluminium et potassium) susceptibles de réagir entre eux quand ils sont mis en contact par diffusion ou mélange. Ainsi, on connaît les types suivants de néoformations :

- Néof ormation de sépiolite par concentration des ions par évaporation).

Certains minéraux argileux se forment en surface à partir des ions en solution :

- Néof ormation de glauconie (illite ferrifère) dans les vases littorales
- Néof ormation des "argiles rouges des grands fonds" (smectites ferrifères provenant Des vases calcaires et siliceuses et des cendres volcaniques). (Mitchell 1976)

1.7.5. Les principaux types de minéraux argileux

1.7.5.1. La kaolinite

(Kaolinite, Bertierine, Dickite, Nacrite, Halloysite) C'est une argile blanchâtre dite peu gonflante. Une particule d'argile est formée d'un empilement de plusieurs feuillets. Chaque feuillet a une épaisseur approximative de 7 Å et est composé d'une couche tétraédrique de silice et d'une couche octaédrique d'alumine, Les particules de kaolinite contiennent habituellement entre 70 et plus de 100 couches élémentaires. Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène et les forces de Van der Waals. (Figure I.8).

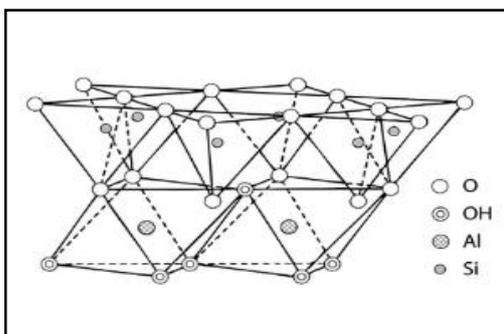


Figure I.18. Structure de la kaolinite (Grim; 1962)

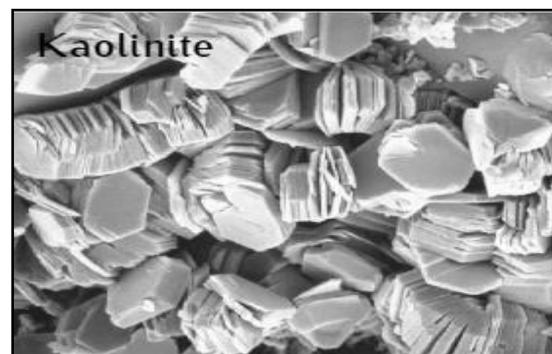


Figure I.9. Photographie d'une kaolinite vue au microscope électronique

1.7.5.2. La montmorillonite

C'est un minéral abondant. Elle est formée de couches élémentaires constituées de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique (Figure I.9) contenant des atomes d'aluminium (gibbsite), c'est un feuillet 2 :1. Elle porte parfois le nom de smaltite. Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurant les liens entre les couches. Ces liens demeurent cependant plutôt faibles, car lorsque la quantité d'eau augmente dans le sol, les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer. Les particules de montmorillonite

Comptent généralement entre une et quelques couches élémentaires et ont une épaisseur variant de 1 à 10 nm ; elles se rangent parmi les plus fines chez les minéraux argileux.

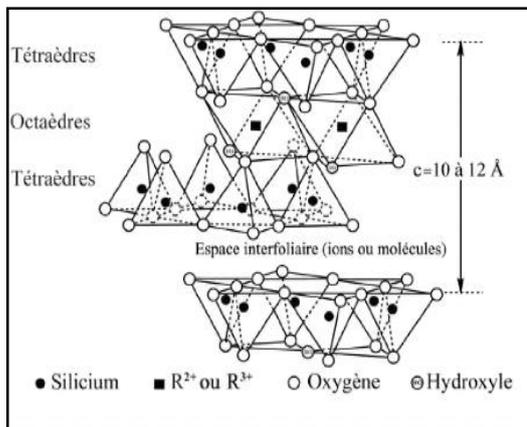


Figure I.10. Structure de la montmorillonite (Grim ;1962)

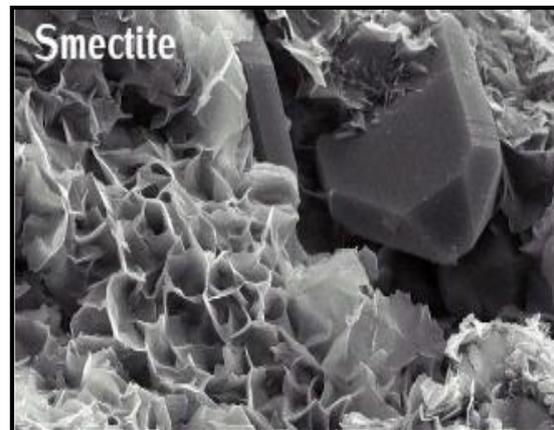


Figure I.11. Photographie d'une vue au microscope électronique

1.7.5.3 .l'illite

L'illite a été par le professeur R.E.Grim. On la considère comme un des minéraux argileux les plus abondants sur la terre.

La structure de base des minéraux de cette famille résulte de l'association d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques, qui l'entourent (**Figure I.11**). Elle ressemble donc à la structure des smectites. Ce pendant, le quart des cations Si^{4+} est remplacé par des cations Al^{3+} (figure 1.8a). Il en résulte un déficit de charges, compensé par l'adsorption d'ion de potassium K^+ , qui s'intercalent entre les feuillets. (GHEDDACHE, 2012).

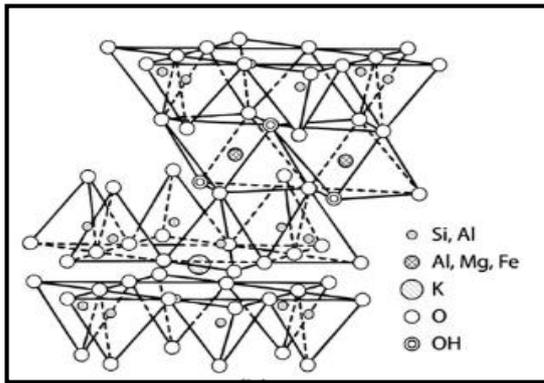


Figure I.12. Structure d'illite (Grim ,1962)



Figure I.13. Photographie d'une illite
Vue au microscope électronique

1.7.5.4. Les chlorites

Les chlorites sont des argiles de composition semblable à celle des smectite. L'espace interfoliaire contient une couche composée de magnésium (Mg^{2+}) et d'ions hydrogène (OH^-).

L'Aluminium (Al^{3+}) est remplacé localement par le fer (Fe^{2+}), La liaison interfoliaire est de ce fait, affaiblie, ce qui permet une infiltration d'eau .Les chlorites existent parfois souvent dans les roches magmatiques. Elles sont également rencontrées dans les roches sédimentaires. Les argiles contenant un pourcentage de chlorite supérieur à 15% peuvent être sujettes de gonflement. (ZENKHRI 2009)

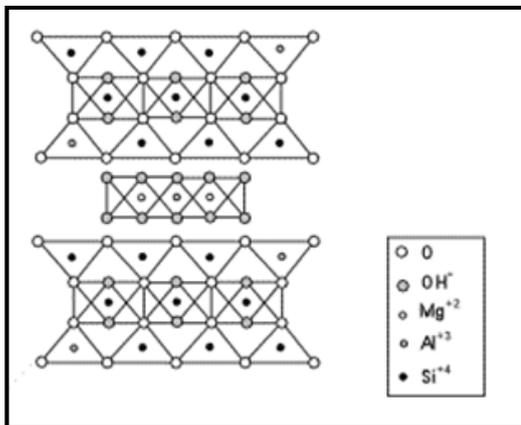


Figure I.14. Structure d'un chlorite

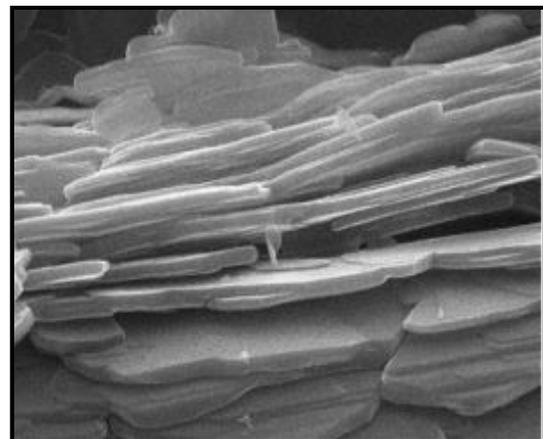


Figure I.15. Photographie d'un chlorite
Vue au microscope électronique

I.7.5.4. les micas

Dans le groupe des micas, l'empilement des feuillets élémentaires est similaire à celui des chlorites et des smectites. L'épaisseur interfoliaire est de 10\AA . Cependant, le quart des cations (Si^{4+}) est remplacé par des cations aluminium (Al^{3+}). Le déficit de

charge de liaison est compensé par des ions potassium (K^+). Selon Kormi (2003), le potentiel de gonflement des micas est inférieur à celui des smectites.

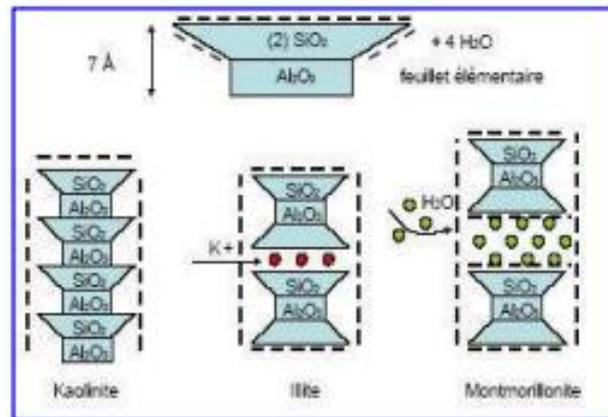


Figure I.16: Groupes d’argiles

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le Tableau I.1 La Figure I.13 présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage.

Tableau I.2 Caractéristiques des argiles (Ferrah 2006)

| Nom | Type | Nombre de feuillets par particule | Diamètre d'une particule (nm) | Epaisseur d'une particule (nm) | Surface spécifique (m^2 / g) | CEC (meq/100g) |
|-----------|-------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------|
| Kaolinite | 1 : 1 | 100 - 200 | 0.1 - 4 | 1 - 10 | 10 - 20 | 3 - 15 |
| Illite | 2 : 1 | 1 - 10 | 0.1 - 1 | 0.003 - 0.01 | 65 - 100 | 10 - 40 |
| Smectite | 2 : 1 | 1 | 0.1 | 0.001 | 700 - 840 | 80 - 150 |

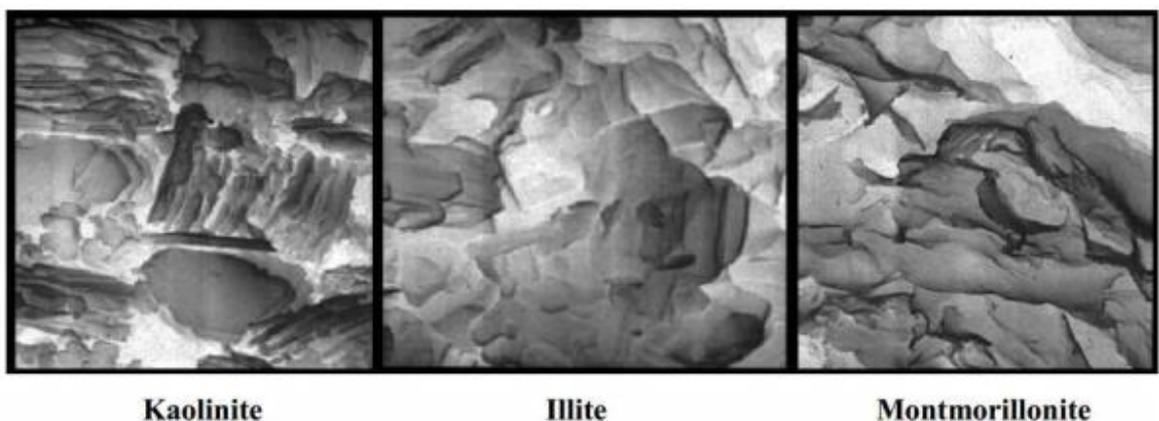


Figure I.17. Photographie au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976).

I.7.6.1a .Echanges de cations

Les minéraux argileux ont la propriété d'interagir avec les cations ou les anions. L'échange des ions se fait autour de la surface extérieure de l'unité structurale. Notant que la réaction d'échange n'affecte pas la structure d'ensemble des minéraux. Les cations échangeables les plus connus sont le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}), l'hydrogène (H^+), le potassium (K^+), le nitrate (NH_4^+) et le sodium (Na^+). L'attraction des ions présents autour d'une particule argileuse est due à la faculté que présente l'argile d'attirer des ions d'une solution. L'attraction des ions vers la surface est due à la charge négative de cette dernière.

Les cations fixés à la surface peuvent être substitués par d'autres présents dans le liquide industriel. Cette substitution de cations par d'autre est appelée échange de cations (Grim, 1968). Comme le montre le tableau I.2, les valeurs de limite d'ATTERBEG d'un minérale argileux peuvent varier considérablement en fonction des cations adsorbés Woodward-clyde et Associates, 1967).

Tableau I.3 : valeurs des limites d'Atterbeg de différents minéraux argileux

| Cation \ Mineral argileux | Na^+ | | K^+ | | Ca | | Mg^{++} | |
|---------------------------|---------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------|-----------|
| | $W_L(\%)$ | $I_p(\%)$ | $W_L(\%)$ | $I_p(\%)$ | $W_L(\%)$ | $I_p(\%)$ | $W_L(\%)$ | $I_p(\%)$ |
| Kaolinite | 29 | 1 | 35 | 7 | 34 | 8 | 39 | 11 |
| Illite | 61 | 27 | 81 | 38 | 90 | 50 | 83 | 44 |
| Montmorillonite | 344 | 251 | 161 | 104 | 166 | 101 | 158 | 99 |

Dans chacun des deux feuillets décrits précédemment, le cation peut être remplacé par un cation de taille voisine (pour « tenir » dans le site octaédrique ou tétraédrique), mais pas nécessairement de même valence. On parle de substitution isomorphe car les dimensions du feuillet restent quasi inchangées. Ces substitutions entraînent alors un excès de charges négatives à la surface des feuillets. Cette électronégativité des feuillets est une des caractéristiques fondamentales des argiles. L'électroneutralité est obtenue par adsorption de cations compensateurs à la surfaces des feuillets : cations (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} ...) provenant du fluide.

Par ailleurs, les bords des cristallites possèdent aussi des charges localisées car ils correspondent à des ruptures de liaisons. La charge des tranches de cristallites dépend alors du pH (Grunberger 1995) : elle est négative en milieu basique, et positive en

milieu acide (en raison de la fixation de protons H^+ sur des ions OH^- présents sur ces bords).

1.7.7. Méthodes d'identification des minéraux argileux

L'identification des minéraux argileux nécessite le recours à un ensemble de moyens expérimentaux, chacun d'eux permettant de cerner tels ou tels paramètres spécifiques des minéraux. (Youdjari Djonkamla2010).

1.7.7.1. Analyse par diffraction aux rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes, les matériaux qui présentent une structure cristalline diffractent les rayons X. Des minéraux dont les structures sont différentes présentent des spectres de diffraction des rayons X différents. En réalité, on a d'abord identifié les divers minéraux en se basant sur les différences qui caractérisent ces spectres. Les spectres de la plupart des minéraux ont été publiés et il est relativement simple de comparer les spectres de diffraction de minéraux inconnus avec ceux des matériaux connus. Cette différenciation ne peut toutefois pas être appliquée aux sols suivants : les mélanges de minéraux, et les sols qui contiennent des matières organiques. Puisqu'il est impossible de procéder à une analyse quantitative détaillée, on ne peut se faire qu'une idée très approximative de la nature et de la quantité des minéraux qui sont présents dans ces sols.

1.7.7.2. L'analyse par différentielle thermique

C'est une technique qui consiste à chauffer continuellement un échantillon de sol inconnu en présence d'une substance inerte de référence, dans un four électrique, à une température d'environ cent degré Celsius. La structure particulière des minéraux argileux déterminera des variations thermiques à des températures bien définies pour des minéraux donnés; les variations enregistrées peuvent ensuite être comparées avec celles des minéraux connus.

1.7.7.3. Analyse par microscope électronique à balayage et à transmission

Ce procédé présente cependant des difficultés sur le plan de l'interprétation et ne permet pas d'obtenir des données quantitatives.

1.7.7.4. Analyse chimique

Sur les matériaux calcaires très purs, l'analyse chimique peut se faire par attaque de l'échantillon à l'acide diluée (HCl 1/20). Pour les sols non calcaires l'attaque sera effectuée par fusion alcaline à température élevée (Voinovich, 1970).

I.7.7.5. Spectrométrie infrarouge

La méthode apporte des informations qualitatives sur l'identification des espèces, l'évolution de la structure lors d'un traitement approprié et l'étude des hydrates. La préparation des échantillons s'effectue selon les techniques adaptées à l'étude des poudres. Chaque espèce argileuse peut être identifiée par son spectre d'absorption caractéristique.

I.8. Les principaux problèmes des sols argileux

I.8.1. Phénomène de gonflement

Le gonflement de sol est un terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente, lié aux changements d'humidité des sols très argileux, qui sont capables de fixer l'eau disponible, mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse (phénomène de retrait).

Le phénomène de retrait et de gonflement des sols argileux occasionne des dégâts considérables aux bâtiments. Il est à l'origine de tassements différentiels des terrains d'assise des constructions qui provoquent des désordres parfois très importants.

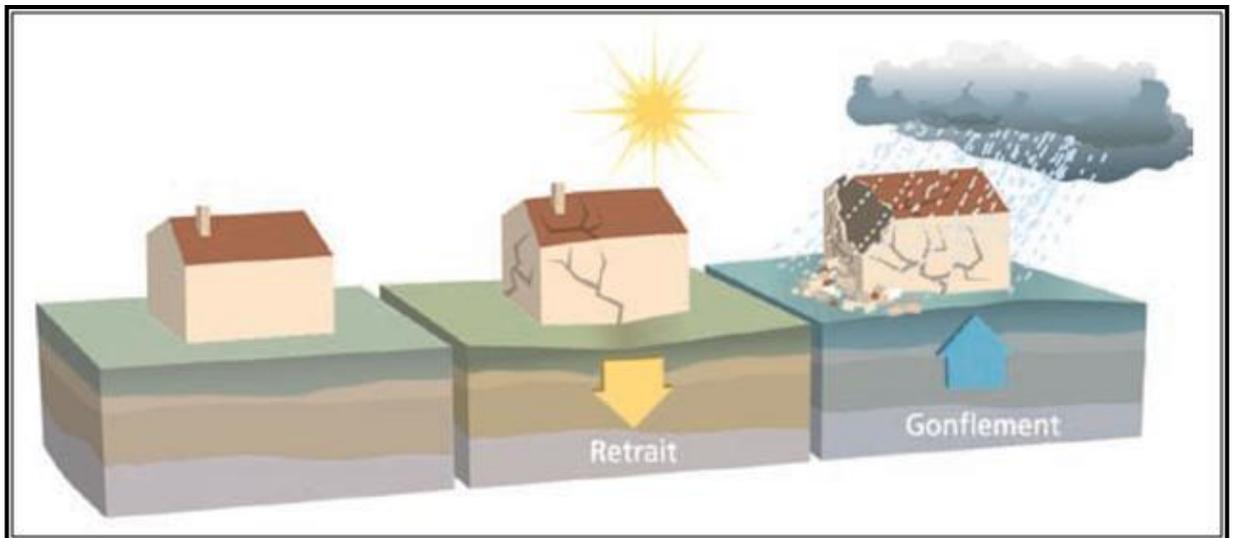


Figure I.18. Retrait-Gonflement

1.8.1.1. Nature du phénomène de gonflement

En général, le retrait/gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau se modifie. Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les sables et

les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais d'une amplitude bien plus petite.

Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants aux bâtis au cours des périodes de sécheresse prolongée. En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche. (Hossein nowamooz 2007)

Les propriétés de gonflement des sols argileux dépendent fortement, de leur composition minéralogique, des pourcentages des différents minéraux ou des types de minéraux dominants, et de leur caractère dispersé. La structure du réseau cristallin des minéraux et leur capacité d'échange ionique joue également un rôle important. Les réseaux cristallins des minéraux argileux sont constitués de deux éléments structurels principaux, des silicates et des aluminates. (Houssine EJJAOUANI 2008)

1.8.1.2. Conséquences du gonflement

Les sols expansifs causent des dégâts aux structures civiles et aux chaussées. Les dégradations causées par le gonflement du sol sont plus spectaculaires que celles de tout autre risque naturel tel que le tremblement de terre et l'inondation (Jones et Holtz, 1973).

Les désordres causés par le gonflement du sol sont amplifiés lorsque l'expansion est différentielle. L'analyse pathologique des désordres occasionnés par le gonflement du sol atteste que ces derniers sont dus à la température, à l'humidité, à l'évaporation, au degré de saturation, à la distribution irrégulière de l'eau dans le sol et à l'hétérogénéité structurelle du sol (Nelson et al. 1992).

Quelques désordres provoqués par ce phénomène :

- **Cas des bâtiments**

Les bâtiments, et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur sols gonflants, présentent souvent des figures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radié... qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs. Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement



Figure I.19. Dégradations et fissurations des façades de bâtiment

- **Cas des chaussées**

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Les désordres subis par la chaussée se résument généralement à des

fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée, en saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords, ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche.





Figure I.20. Dégradation des routes

Autre désordres provoqués :

- Distorsion des portes et fenêtres ;
- Dislocation des dallages et des cloisons ;
- Rupture des canalisations enterrées ;
- Dés encastrement des éléments de charpente ou de chaînage ;
- Décollement des éléments composites (carrelage, plâtre,...).

I.8.2. Phénomène de tassement :

Le tassement par définition est la variation de hauteur d'une couche de sol sous l'effet d'une charge, C'est la déformation verticale du sol due à l'application des contraintes extérieures, Les tassement peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place.

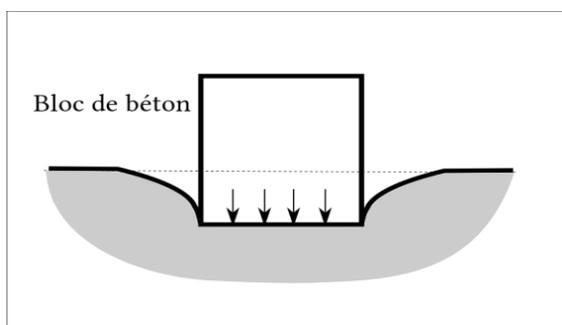


Figure I.21. Tassement uniforme

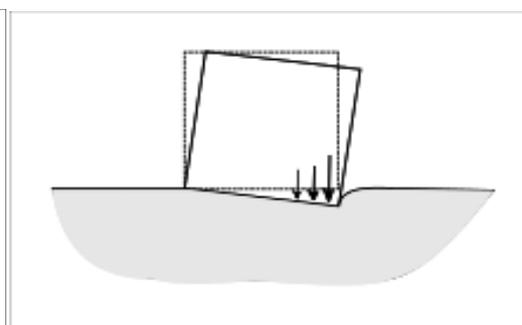


Figure I.22. Tassement différentiel

Quelques désordres provoqués par ce phénomène :



Figure I.23. Désordres provoqués par le Phénomène de tassement

I.8.3. Phénomène de glissement :

Qu'est ce qu'un glissement de terrain ? Le terme de glissement est relativement général relatif à la stabilité des pentes, mais il désigne essentiellement un processus de mouvement de versant. La gravité fait subir continuellement des pressions sur les versants affectant ainsi toutes sortes de matériaux (sols et roches). Les mouvements de masses (de type rotationnel ou translationnel) sont initiés à partir d'une surface dite de rupture créée sous l'action de contraintes tangentielles excédant la résistance au cisaillement des matériaux. On retrouve dans la littérature plusieurs définitions sur les « glissements de terrains » ou « mouvement de masses » dont les plus utilisées sont les suivantes :

- Un glissement de terrain correspond à un : «déplacement d'une masse de terrains meuble ou rocheuse le long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydrauliques ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites».
- Un "mouvement de masse" s'exprime comme étant tout évènement qui se manifeste par un déplacement sur une pente d'une masse de sol et/ou de roche sous l'influence directe de la gravité.
- Un glissement de terrain est un phénomène géologique regroupent un ensemble de déplacements, plus ou moins brutaux, du sol ou du sous-sol sur un plan de glissement incliné. Ils résultent le plus souvent d'une rupture par cisaillement à la limite inférieure de la masse en mouvement. Les volumes en jeu sont compris entre quelques mètres cubes et quelques millions de mètres cubes. L'origine, le déroulement et les effets des mouvements de terrain sont extrêmement hétérogènes.

Les déplacements peuvent être lents (quelques millimètres par an) ou très rapides (quelques centaines de mètres par jour), en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure. Les mouvements lents entraînent une déformation progressive des terrains, pas toujours perceptible par l'homme. Ils regroupent les affaissements, les tassements, les glissements, la solifluxion, le fluage, le retrait-gonflement et le fauchage. Les mouvements rapides se propagent de manière brutale et soudaine. Ils regroupent les effondrements, les chutes de pierres et de blocs, les éboulements et les coulées boueuses

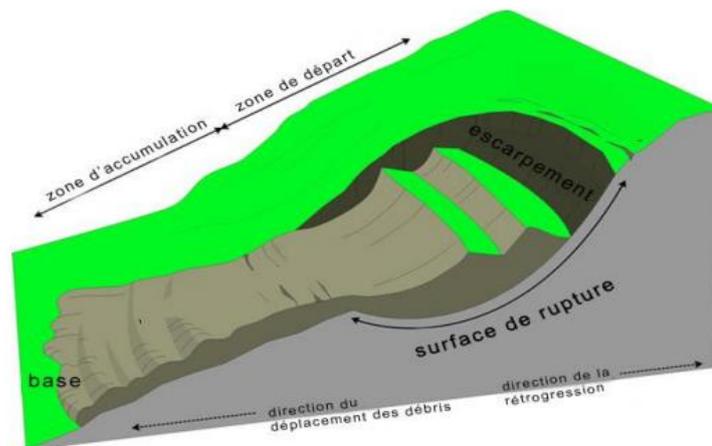


Figure I.24. Un glissement

La plupart du temps, l'eau joue un rôle important dans les glissements de terrain, par l'action des pressions interstitielles, des écoulements souterrains ou par les pressions dues au gonflement des minéraux argileux. En simplifiant beaucoup, on peut distinguer deux types de glissements

I.8.3.1. Glissements rotationnels :

Ce type de glissement est très fréquent. La surface de rupture correspondante a une forme simple et peut être assimilée à un cylindre dans la plupart des cas (Figure I.23).

Sa projection sur le plan transversal correspond à un arc de cercle, d'où le nom de glissement circulaire. Dans le cas contraire, le glissement est non circulaire.

Les glissements rotationnels ont quelques caractères communs, dont on distingue essentiellement

- des fissures de traction apparaissant en tête ;
- un escarpement correspondant au départ de la surface de glissement ;
- un bourrelet de pieds formé à la base par la masse glissée.

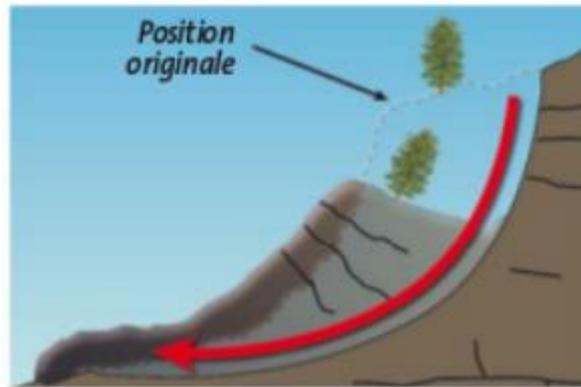


Figure I.25. Caractères communs aux glissements rotationnels

I.8.3.2. Les glissements plans

Qui se produisent soit sur une couche plane peu épaisse de caractéristiques médiocres, soit dans le manteau d'altération, soit dans une couverture d'éboulis (Figure I.24)

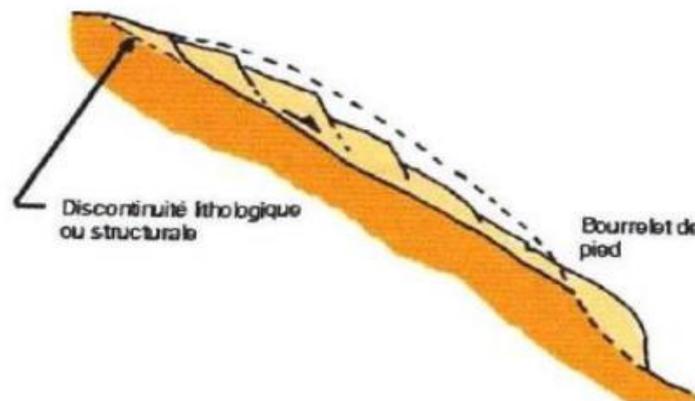


Figure I.26. Glissement plan

I.8.3.3. Glissements sur une discontinuité préexistante

Les discontinuités qui favorisent le glissement le long d'un versant sont celles qui sont sensiblement parallèles aux versants, et constituant des surfaces de glissements potentielles, superficielles quand il s'agit par exemple de la limite qui sépare un sol de la roche qui le supporte, parfois plus profondes, et plus nettes, quand il s'agit de discontinuités structurales dans des roches sédimentaires.

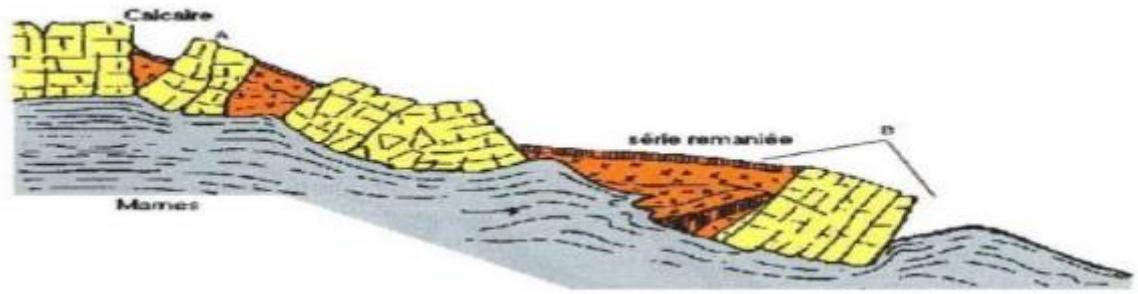


Figure I.27. Glissement complexe

A : Basculement de blocs. B : Glissement rotationnel

II.1. INTRODUCTION

Le sol est un mélange de substances naturelles, comprenant les constituants solides tels que les particules minérales et constituants fluides comme l'air et l'eau. Ces constituants s'interpénètrent et s'influencent réciproquement. Selon la répartition de l'eau ou l'air, le sol peut être soit saturé, soit sec, soit dans un état intermédiaire, qu'on appelle état non saturé. Cet état est caractérisé par la présence d'un potentiel appelé : pression inertielle négative ou généralement suction. Suivant la taille des constituants solides, les limons et les argiles.

La microstructure d'un sol comprend deux aspects : le premier concerne le mode d'arrangement des particules ou texture ; le deuxième est relatif aux interactions entre les particules. Les propriétés physico-chimiques et le comportement hydromécanique du sol sont bien entendu grandement influencés par la microstructure. Une bonne connaissance de l'évolution de cette dernière au cours de différents chemins de sollicitations peut souvent aider à expliquer certains phénomènes tel que le retrait, le gonflement et l'effondrement, etc.

II.2. Définition des sols non saturés

L'hypothèse qui consiste à considérer que le sol se trouve soit dans un état sec, soit dans un état saturé, néglige l'effet de la suction qui se développe au sein d'un sol non saturé et qui conditionne largement son comportement mécanique.

Le domaine des sols non saturés couvre :

- Soit des ouvrages réalisés par compactage tels que les remblais, les digues, les barrages en terre et les barrières géologiques d'étanchéité de centre de stockage de déchets.
- Soit des sols naturels dans les régions arides à semi arides et même dans des régions tempérées ou les couches de surface sont très souvent non saturées (figure II.1)

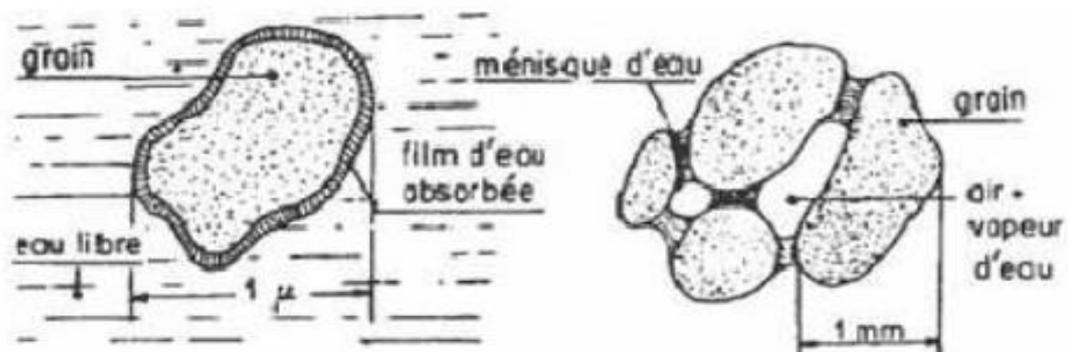


Figure II.1 : sol humide et non saturé (M.Callaud 2004)

Fredlund et Rahadjo (1993), proposent d'ajouter à ces trois phases, un autre système qui présente des propriétés physiques différentes des autres notamment par le pouvoir d'exercer une tension superficielle (Tensil pull). Il s'agit de l'interface eau-air (Contractil Skin). Le comportement mécanique des sols non saturés est ainsi régi par l'interaction entre ces différentes phases. (Cité par CHIKHI K, 2011)

II.3.COMPOSITION D'UN SOL NON SATURÉ

Dans la nature le sol se trouve en général en état non saturé qui est un milieu poreux triphasique composé de trois phases en proportions variables (figure I-1) :

- **La phase solide** : ou squelette solide est constitué par les grains minéraux de l'agrégat.
- **La phase liquide** : constituée par l'eau occupe les vides de l'agrégat. Si tous les vides sont remplis par l'eau, le sol est dit saturé; sinon, il est partiellement saturé ;
- **La phase gazeuse** : dans un sol partiellement saturé une partie des vides de l'agrégat est remplie par du gaz, essentiellement de l'air

II.4.L'EAU DANS LE SOL

L'eau a un effet considérable sur le comportement mécanique des sols et elle peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, suivant l'intensité des forces liant ses molécules aux particules solides, et ces différents états de l'eau dans le sol et ses mouvements permettent de définir différents types (Figure I-2) :

- **L'eau de constitution**, qui entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules de sol sont formées. En général, ce type d'eau influence peu le comportement du sol, sauf lorsqu'il est soumis à une température très élevée et a besoin d'une température de 550 °C pour être éliminée.
- **L'eau liée**, est présente sur la surface des particules fines de sol, grâce aux propriétés colloïdales des particules argileuses, et a une viscosité élevée et ne transmet pas les pressions. Elle a besoin d'une température élevée de 200 °C pour être évacuée ;
- **L'eau libre**, qui s'écoule librement, dans des macroporosités du sol sous l'effet des forces de pesanteur. Elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105 °C; (Azzouz F- Z., 2006)
- **L'eau capillaire ou de rétention**, que l'on rencontre dans les sols non saturés et qui se maintient au contact des particules solides sous l'action des tensions superficielles et prennent naissance à l'interface eau-air. Cette eau, remplit des pores

capillaires, si petits qu'ils ont la taille d'un cheveu et malgré la pesanteur, ne peut s'écouler librement; (Fredlund et al. (1977))

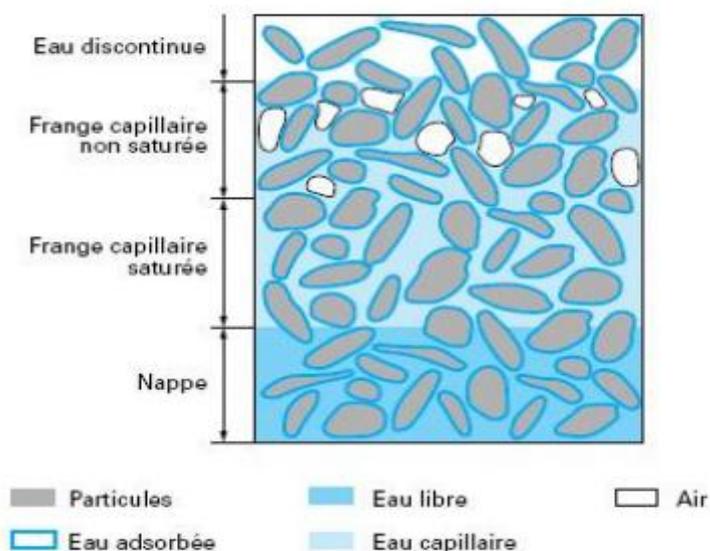


Figure I.2 : Différents états de l'eau dans le sol [P.DELAGE]

Dans le sol, uniquement une partie de l'eau (mobile) qui influe sur la perméabilité des sols non saturés

- la zone de l'eau libre située au-dessous du niveau hydrostatique tel qu'on le mesure dans un piézomètre ouvert;
- la frange capillaire qui comprend elle-même, à sa base, une zone de saturation dans laquelle tous les pores du sol sont remplis d'eau maintenue en équilibre par les tensions superficielles (eau capillaire continue) et, au-dessus, une zone de rétention dans laquelle certains pores sont occupés par l'eau et les autres par de l'air ou la vapeur d'eau (eau capillaire isolée). L'épaisseur de la zone de rétention est plus importante lorsque la nappe baisse que lorsqu'elle remonte;
- enfin, tout à fait en surface, une zone de dessiccation temporaire dont la teneur en eau, très faible, varie selon les conditions extérieures.

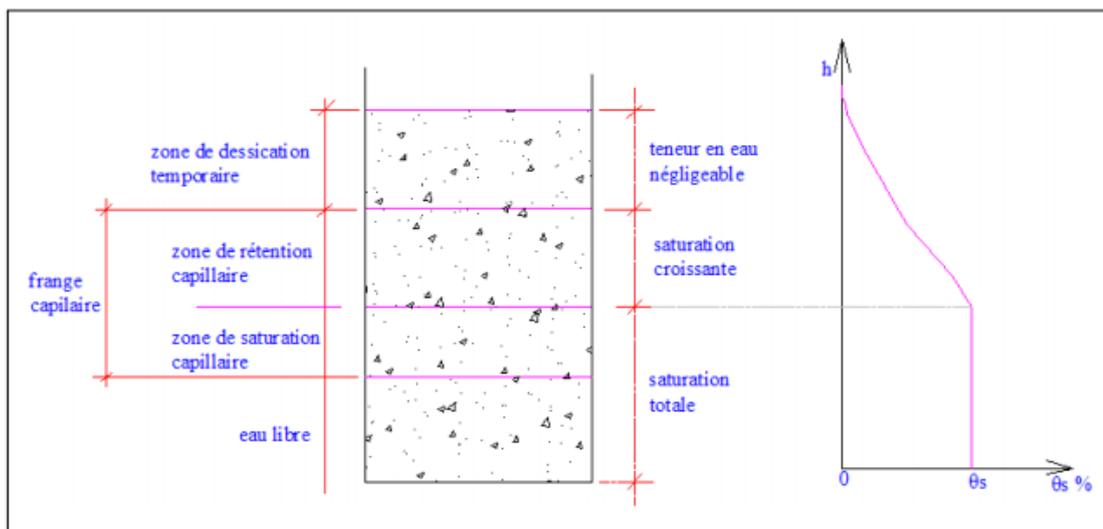


Figure I.3 : différentes zones de sol dans une nappe libre au repos (Xiang-Ling LI,1999).

II.5.LE GAZ DANS LE SOL

L'influence du gaz sur le comportement du sol dépend largement du degré de saturation. Lorsque la phase gazeuse est continue, l'effet du gaz sur le comportement hydromécanique se traduit par l'effet de la succion. Par contre, lorsque la phase gazeuse est discontinue et se présente sous forme de bulles d'air piégées dans l'eau par exemple, la phase fluide (mélange d'eau et de bulles d'air) du sol se comporte comme un liquide très compressible.

II.6.ETAT DES SOLS

On distingue plusieurs états hydriques des sols en fonction de leur engorgement, allant des sols saturés aux sols sec

II.6.1. Les sols saturés

Tous les vides sont remplis, même les porosités les plus larges et le sol ne peut évidemment plus emmagasiner d'eau. Les proportions en eau varient en fonction de la nature des matériaux qui constituent le substrat. Les sols saturés contribuent inévitablement à alimenter les cours d'eau.

II.6.2. La capacité au champ :

La capacité au champ désigne l'état d'humidité dans lequel reste le sol après ressuyage car il reste toujours de l'eau retenue dans les porosités. C'est la capacité de rétention maximale en eau. Le ressuyage consiste en une vidange de macroporosités.

II.6.3. Le point de flétrissement

Le point de flétrissement est le point à partir duquel la plante sent le manque d'eau. Il intervient lorsque l'eau présente dans les microporosités du sol, les capillaires, ne peut plus être absorbée par les poils absorbants des racines des végétaux : la force de succion des capillaires est supérieure à la pression osmotique résultant de l'évapotranspiration. Bien entendu, le point de flétrissement varie si l'on tient compte de la nature des végétaux.

II.6.4. Les sols secs

Cela se produit donc lorsqu'il ne reste plus d'eau dans les capillaires à cause de l'évapotranspiration et de l'évaporation : on le remarque aux fentes de dessiccation qui craquèlent le sol desséché.

III.7. La succion dans les sols

Les sols non saturés sont caractérisés par la présence d'une troisième phase gazeuse en plus des deux phases solide et liquide qui composent les sols saturés. La présence de cette phase gazeuse se traduit par une pression interstitielle négative si l'on considère la pression de l'air comme origine des pressions.

La pression interstitielle négative confère aux sols non saturés des caractéristiques physiques et mécaniques qui les distinguent des sols saturés, et rendent ainsi insuffisantes la théorie de la mécanique des sols classique qui avait comme hypothèse principale la saturation du milieu (DERFOUF-MOUNIR 2011)

III.7.1. Définition de la succion :

La succion est une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains, conduit à des mouvements de l'eau donc c'est une pression négative de l'eau des pores (Silvai, 1966). D'après Bakkari A. (2007) la succion est une mesure de l'attraction entre le sol et l'eau. Ce phénomène permet à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel. La succion est le paramètre le plus important du comportement hydraulique et mécanique des sols non saturés.

La succion du sol peut varier dans un très large éventail, de 0 pour un sol saturé à 106 kPa pour un sol séché à l'étuve. (Cui Y. J. & Delage P)

III.7.2. Composantes de la succion

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965 cité par Fredlund et Rachardjo, 1993). La succion matricielle exprime la capacité de rétention

d'eau des composants du sol. Elle est la somme d'une composante capillaire et d'une composante associée aux forces d'adsorption développées par les particules d'un sol. La succion osmotique du sol est liée aux sels présents dans le sol.

II.7.2.1. Succion matricielle :

La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau de composants du sol, elle est dépendante des propriétés capillaires du milieu et des propriétés d'adsorption développées par les particules d'un sol. Elle est généralement considérée comme la composante dominante de la succion totale dans le cas des sols non-plastique.

II.7.2.2. succions capillaire :

Lorsqu'un liquide et un gaz sont en contact, l'interface entre les deux phases est le siège d'une tension de surface T_s . En effet, une molécule à l'intérieur du liquide n'est pas soumise aux mêmes forces d'interaction intermoléculaires qu'une molécule se situant à l'interface liquide-gaz. Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire (fig.II.6). (Léreau J., (2006).)

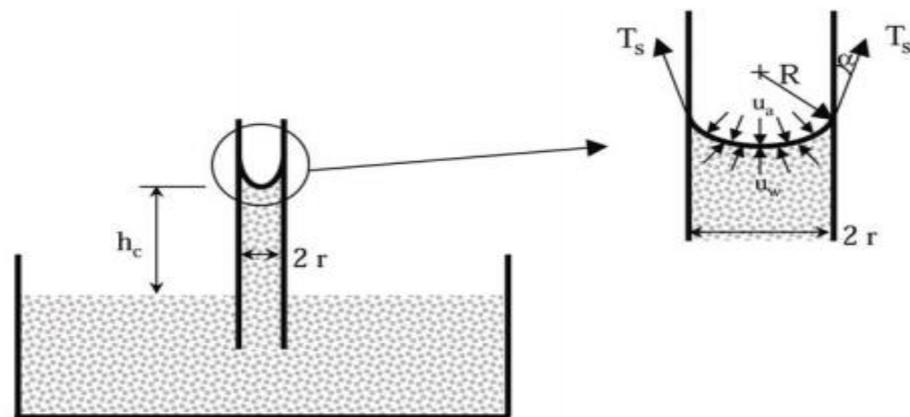


Figure II.4.phénomène d'ascension capillaire.Capillaryrise

La relation de Jurin-Laplace relie la pression capillaire au du tube capillaire. Elle montre que plus le tube est petit, plus la pression capillaire est élevée.

$$P_c = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r}$$

Avec : P_c : pression capillaire(KPa) ;

α : angle de mouillage ;

U_a : pression de l'air au-dessus de l'interface(KPa) ;

U_w : pression de l'eau en dessous de l'interface(KPa) ;

T_s : tension de surface (N.m) ;

r : rayon du tube capillaire(m).

Cette définition a été généralisée à n'importe quel état de contrainte mécanique. Aujourd'hui, en Mécanique des Sols, les deux notions de pression capillaire et de succion sont équivalentes.

II.7.2.3. Succion d'adsorption :

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols grenus, l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement due à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physico-chimique car les argiles sont des particules chargées négativement, et de ce fait, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface.

Selon (Masekanya J-P. 2008), les forces mises en jeu sont :

- la liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ;
- les hydroxydes situés à la surface des feuillets argileux ;
- l'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés par les défauts de charge du feuillet;
- l'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage du feuillet;
- l'attraction électrique du pôle positif du dipôle que forme la molécule d'eau ;
- les forces d'attraction.

II.7.3. Succion osmotique :

La succion osmotique ou pression osmotique est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. Elle existe lorsque l'eau est une solution saline. Si la concentration de sel est faible, ou dans le cas de sable qui ne contient généralement pas de sels cette composante peut être négligée et la succion totale se réduit à la succion matricielle.

La succion osmotique π est identique à la pression osmotique. Elle est créée par la force liée à la répulsion osmotique lorsque des sels solubles sont présents dans l'eau. Elle dépend de leur concentration. On a :

$$\pi = - \frac{\rho_w RT}{W_w} \ln x_T$$

Avec :

R : la constante des gaz parfaits ($R = 8.31432 \text{ J}/(\text{mol K})$)

T : la température absolue ($^{\circ}\text{K}$) ρ_w : la masse volumique de l'eau (kg/m^3)

ω_w : la masse molaire de la vapeur d'eau (18.016 kg/kmol)

x_w : la fraction molaire d'eau dans la solution

Houston et al. 1994 (cité par Alshihabi O., 2002) confirment que la succion osmotique diminue quand le degré de saturation augmente. En géotechnique elle n'est en général pas pris en compte, car son influence serait négligeable (Fredlund & Rahardjo 1993 ; Delage 1999).

II.7.4. Succion totale

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965 cité par MEKKI L2009)

- La succion matricielle qui est liée au phénomène de capillarité et d'adsorption ;
- La succion osmotique.

La succion totale = Σ succion matricielle + succion osmotique

II.7.5. Effets de la succion sur les particules solides :

Dans un sol non saturé, on peut admettre que les pores jouent un rôle semblable aux tubes capillaires. Les tensions superficielles dues aux ménisques trouvent une réaction sur les particules solides (figure II.7). Ces réactions engendrent certaines contraintes supplémentaires sur le squelette du sol. Elles modifient le champ de déformations et le comportement mécanique en général. (Ghanem Fadhila 2011)

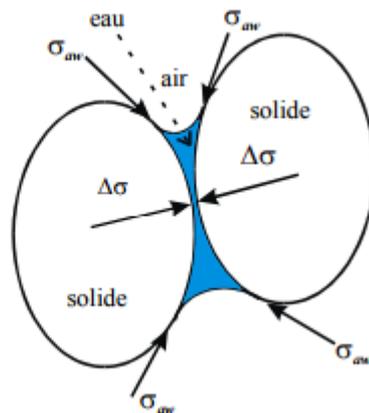


Figure II.5 : Effets de la succion sur les grains du sol. (Ghanem -2011)

II.8. Technique de mesure et de contrôle de la succion

II.8.1. Techniques de mesure de la succion

Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour mesurer la succion dans un sol. La succion totale peut être déterminée par mesure de la pression de vapeur ou de l'humidité relative à l'aide de la méthode psychrométrique ainsi que par la méthode du papier filtre. La succion matricielle peut être obtenue directement ou indirectement.

L'objet de cette partie est de présenter des différentes techniques d'imposition et de mesure de la succion d'un sol intact (à l'état naturel).

II.8.1.1. Tensiomètre

Par définition, la succion matricielle est donnée par :

$$S = U_a - U_w$$

Lorsque la pression d'air est égale à la pression atmosphérique prise comme référence, on a $S = -U_w$ avec $U_w < 0$

Le tensiomètre est destiné à mesurer cette pression négative de l'eau directement dans le sol. C'est une technique essentiellement utilisée in-situ. Le tensiomètre est constitué par un petit réservoir d'eau désaérée une extrémité est recouverte par une couche de céramique poreuse imperméable à l'air, mais perméable à l'eau, afin d'empêcher le passage d'air. Il est connecté à un manomètre via un tube rempli d'eau désaérée. Pour mesurer la pression négative du sol, on introduit le tensiomètre dans un trou foré préalablement dans le sol ou pression négative du tensiomètre, mesurée par le manomètre, fournit directement la pression négative de l'eau du sol.

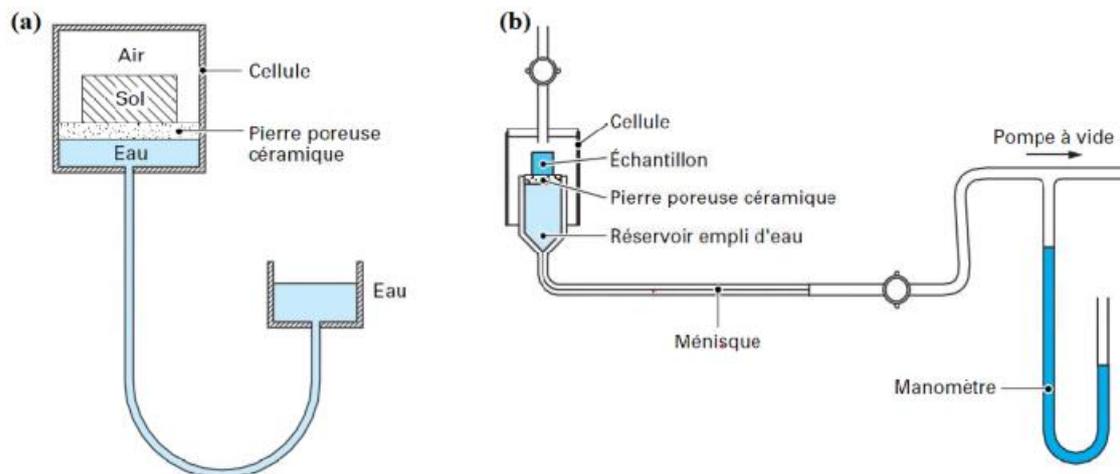


Figure II.6 : (a) principe de plaque de tensiomètre, (b) plaque de tensiomètre (Cui et Delage (2000)).

Cette méthode est limitée à une succion maximale de l'ordre de 500Kpa à cause de la cavitation. En pratique, le tensiomètre doit être placé dans une éprouvette ou dans le sol préalablement foré. Donc, il est nécessaire d'assurer à tout moment un bon contact entre le sol et le réservoir d'eau, au travers de la céramique poreuse, afin d'assurer une continuité de la phase d'eau entre le réservoir et le sol, et cela malgré le retrait éventuel du sol.

II.8.1.2. Plaque de succion

Le principe de la plaque de succion est le même que celui du tensiomètre ; elle sert aussi à mesurer la pression négative de l'eau d'un sol dont l'air est à la pression atmosphérique. Par contre, cette technique est essentiellement utilisée en laboratoire. (La figure II.10(b)). Représente une coupe schématique de cet appareil. Cette méthode est généralement limitée à une succion maximale de l'ordre de 500 KPa.

II.8.1.3. Méthode psychrométrique

Un psychromètre est un dispositif qui permet de mesurer l'humidité relative d'un sol, et par conséquent, sa succion totale. Le principe de l'appareil est de mesurer la température d'une goutte d'eau qui s'évapore, cette température étant inférieure à la température ambiante. La différence entre les deux températures est une fonction de l'humidité relative. Il existe deux types de capteurs utilisant chacun un principe physique différent pour mesurer la température d'évaporation de la goutte d'eau. Il y a les psychromètres à transistors décrits par Richards (1958) cité par Yalçin (1992), et les psychromètres à thermocouple utilisant l'effet Peltier introduits par Spanner (1951).

Cette technique est utilisable pour des succions comprises entre 0,1 et 80 MPa.

II.8.1.4. Méthode du papier filtre

Le papier filtre est également utilisé pour mesurer la succion. La courbe de rétention d'eau du papier filtre est calibrée à l'avance. Lorsque le papier (sec au départ) est mis en contact avec le sol, l'équilibre hydraulique entre le papier et le sol s'établit au bout d'un certain temps par transfert d'eau ou de vapeur. On peut considérer dès lors que la succion est égale à la succion du sol. La succion du papier filtre est donnée par sa courbe de rétention d'eau en mesurant sa teneur en eau après l'équilibre. Donc, la mesure est indirecte. Théoriquement, elle permet de mesurer aussi bien la succion totale que la succion matricielle (Fredlund, et al., 1993). Si le papier est mis en contact direct avec le sol, l'équilibre se fait par transfert d'eau. Dans ce cas on mesure la succion matricielle. Si le papier est suspendu au dessus du sol, l'équilibre sera fait par transfert de vapeur d'eau, on mesure alors la succion totale. Dans ce dernier cas, l'équilibre est en fait contrôlé par l'humidité relative de la phase gazeuse autour du sol.

Cette méthode est simple et facile à mettre en œuvre. Elle est utilisée couramment en laboratoire. Un défaut réside dans sa sensibilité à l'effet d'hystérésis du papier filtre. Normalement, on utilise le papier initialement sec et la courbe de séchage. La température est bien entendu un facteur important pour la précision de la mesure. D'autre part, une balance de haute précision est nécessaire. Enfin, si le papier a été mis en contact avec le sol, il faut s'assurer qu'aucun grain ne reste collé dessus.

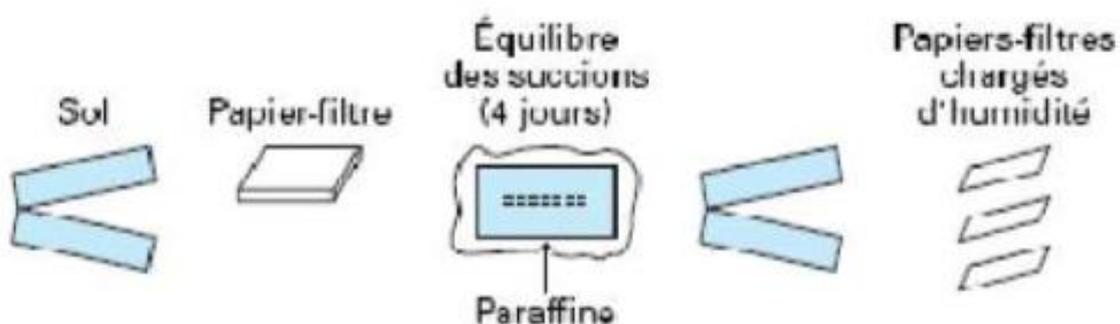


Figure II.7 : Méthode du papier filtre (Dellage et All).

D'après Gardner la gamme de succion accessible par cette technique est comprise entre quelques Kpa (30kpa) et plusieurs centaines de Mpa (100000Kpa).

II.8.2. Technique de contrôle de la succion

Les techniques de contrôle sont conçues de telle manière qu'on puisse imposer une succion au sol et mesurer la teneur en eau correspondant à l'équilibre hydrique..

Il existe essentiellement trois techniques : la méthode de surpression d'air, la méthode osmotique et la méthode à pression de vapeur. Cette dernière méthode permet d'imposer des succions très élevées. Le principe est le même que celui de la dessiccation à vide.

II.8.2.1. Méthode de la surpression d'air

La méthode de surpression d'air est basée sur le principe de la translation d'axe décrit brièvement ci-dessus. On travaille avec l'eau pure, de sorte qu'il n'y a pas de succion osmotique. Dans les essais ordinaire, si l'on prend la pression atmosphérique comme référence (égale à zéro), la succion matricielle est égale à la pression d'eau changée de signe : si l'on veut imposer une certaine succion à l'éprouvette au cours d'essai dans lesquels d'air est à pression atmosphérique, il faut appliquer une pression d'eau négative à l'éprouvette. Mais des difficultés sont rencontrées dans ces conditions à cause de la cavitation : lorsque la pression d'eau se trouve aux environs de 100Kpa, la cavitation apparaît dans le système de mesure. Par conséquent, le système de mesure se remplit de gaz (vapeur d'eau essentiellement) et l'eau est poussée par le gaz dans l'éprouvette. On perd alors le contrôle des essais. Pour éviter ce genre de problème pratique, on recourt à la technique de translation d'axe sur laquelle repose la méthode de surpression d'air. L'objectif de la translation d'axe consiste à appliquer au sol une pression d'air plus haute que la pression atmosphérique (une surpression), tandis que la pression d'eau reste constante. Par exemple, pour avoir $s=100\text{Kpa}$ on peut appliquer une pression d'air $U_a=200\text{Kpa}$ tandis que $U_w=100\text{Kpa}$. Ainsi, la pression d'eau reste positive, ce qui ne pose pas de difficulté expérimentale.

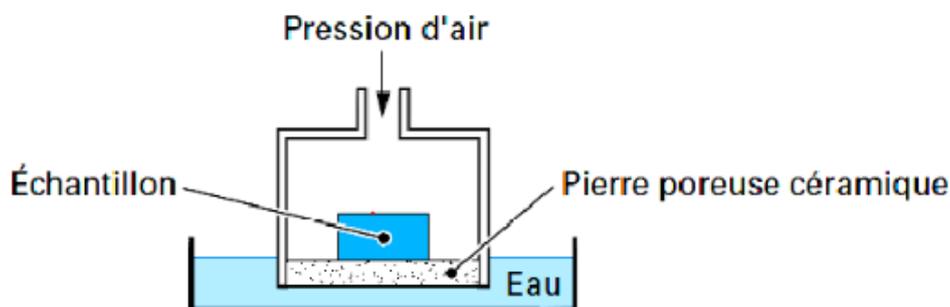


Figure II.8: Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Delage et Al.)

Un disque en céramique avec une forte valeur d'entrée d'air permet d'éviter l'entrée d'air dans le circuit d'eau. Il s'agit d'une sorte de pierre poreuse perméable à l'eau, mais peu perméable à l'air, à condition que la pression d'air appliquée soit inférieure à la valeur d'entrée d'air. Cela permet de contrôler séparément la pression d'air appliquée soit inférieure à la valeur d'entrée d'air. Cela permet de contrôler séparément la pression d'air U_a et celle d'eau U_w . On peut trouver dans le commerce des disques en céramique ayant de différentes valeurs d'entrées d'air. Le principe de translation d'axe est illustré par la figure II.13.

La méthode de surpression d'air est fréquemment utilisée dans l'étude du comportement hydromécanique du sol non saturé : détermination de la courbe de rétention d'eau (la teneur en eau en fonction de la succion), détermination du coefficient de perméabilité hydraulique à une succion donnée, essais œdométrique à succion contrôlée, essais triaxiaux à succion contrôlée, etc. cette méthode est limitée à une succion inférieure à 1500kpa pour des problèmes de résistance de l'équipement d'essai. D'autre part, la pression d'air appliquée doit toujours être inférieure à la valeur d'entrée d'air de la pierre poreuse, si non, l'air entrerait dans le système de mesure et on perdrait alors le contrôle de la succion. (Delage et al).

II.8.2.2. Méthode osmotique

- **Principe de la méthode osmotique**

Le principe de la méthode osmotique est illustré sur la figure II.11. L'eau pure est mise en contact avec une solution à travers une membrane semi-perméable qui laisse les molécules d'eau mais pas grosses molécules du soluté.

Par la suite de la différence de concentration entre l'eau et la solution, l'eau pure a tendance à s'écouler vers la solution à travers la membrane afin d'obtenir un équilibre. Si l'écoulement d'eau est restreint, il y a une différence de potentiel chimique entre l'eau et la solution. Pour équilibrer cette différence de potentiel, une différence de pression entre l'eau et la solution apparaît. Cette différence de pression est la succion osmotique. Par contre, si l'écoulement d'eau n'est pas empêché, un échange d'eau se produit. Il s'arrête lorsque l'équilibre des potentiels chimiques est atteint. Bien entendu, le volume d'eau échangé dépend de la concentration de la solution. (Xiang-Ling LI, 1999).

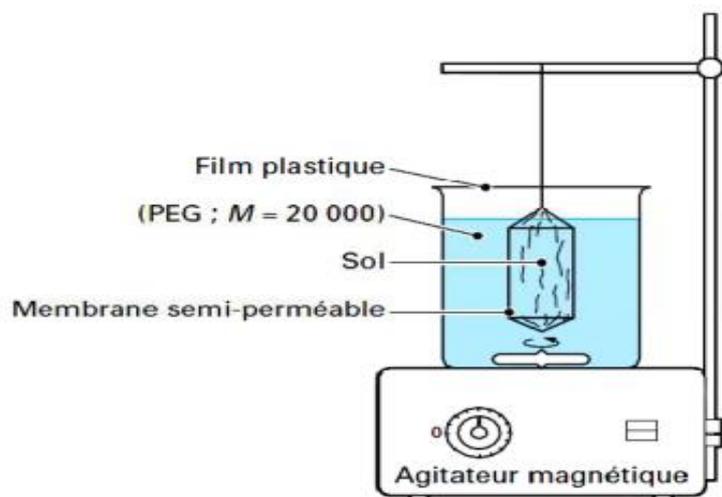


Figure II.9 : mise en œuvre de la technique osmométrique

- **Imposition de la succion par la méthode osmométrique**

Cette méthode repose sur le mécanisme de la pression osmométrique créée dans le sol à l'aide d'une membrane semi-perméable et d'une solution.

Le soluté utilisé est le polyéthylène glycol 20000 (PEG 20000). La taille des molécules de PEG 20000 est plus grande que la taille des pores de la membrane semi-perméable utilisée. De ce fait, la membrane est perméable à l'eau mais pas aux grosses molécules de PEG 20000.

Lorsque le sol est mis en contact à travers une membrane semi-perméable avec la solution de PEG préparée préalablement à une concentration bien déterminée, du fait qu'il existe une différence de potentiel chimique entre l'eau interstitielle du sol et la solution de PEG, un échange d'eau entre la solution et le sol va se produire (tendance à l'équilibre). Si la solution est contenue dans un flacon relativement grand, on peut considérer que cet échange d'eau ne modifie guère la concentration de la solution. Par conséquent, lorsque l'équilibre est établi entre l'eau dans le sol et la solution, on peut considérer que le potentiel chimique de la solution représente la succion dans le sol.

La relation entre la concentration et la succion pour la solution de PEG à 25°C a été calibrée expérimentalement (figure 11.12). Ainsi, à l'aide de la courbe d'étalonnage de la solution de PEG 20000 (concentration- succion) de Williams et Shaykewish (Vicol, 1990), on peut imposer une succion donnée au sol en fonction de la concentration de la solution. (Xiang-Ling LI, 1999).

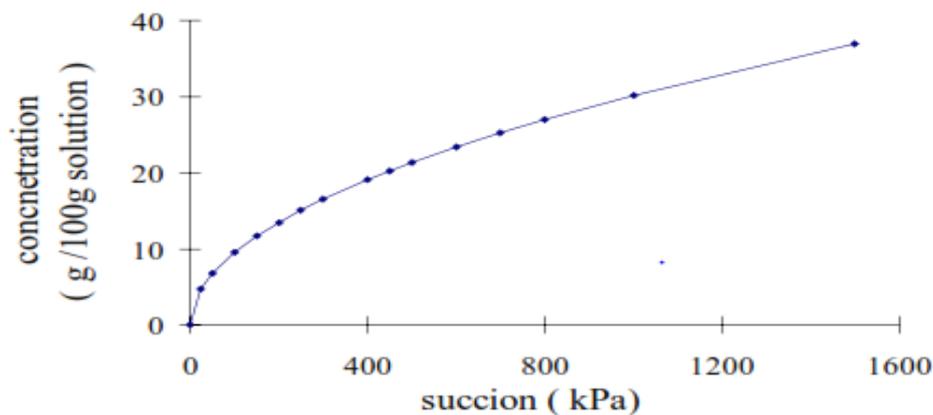


Figure II.10 : courbe de calibration e la concentration de la solution PEG en fonction de la succion (à 25°C). (Xiang-Ling LI, 1999)

Tableau II.1: succion imposées par la technique osmotique (Derfouf-M)

| Technique Osmotique | | |
|---------------------|---------------|------------------------------------|
| Type de PEG | Succion (MPa) | Masse du PEG(g)/500 ml de solution |
| 20 000 | 0.05 | 33.71 |
| | 0.1 | 47.67 |
| | 0.2 | 67.48 |
| | 0.4 | 95.35 |
| | 0.6 | 116.75 |
| | 0.8 | 134.85 |
| | 1 | 150.76 |
| | 1.5 | 184.64 |
| 6000 | 2 | 213.2 |
| | 3 | 261.1 |
| | 6 | 369.25 |
| | 8 | 426.4 |

Il faut noter que la succion imposé dépend également de la température

II.8.2.3. Technique de dessiccateur à vide (Méthode à pression vapeur)

- **Principe de la méthode du dessiccateur à vide**

Cette technique est également basée sur l'équation de Kelvin. On impose l'humidité relative constante à l'aide de solution saline saturée dont les concentrations sont connues. L'échantillon de sol est placé dans une enceinte sous vide contenant une solution de composition chimique connue. Chaque type de solution saline saturée correspond à une humidité relative connue en fonction de ses propriétés physico-chimiques. Lorsque l'équilibre entre le sol et la solution est atteint par transfert de vapeur d'eau, la succion du sol est

équivalente à l'humidité relative de la solution (loi de Kelvin). Le tableau (II.1) fournit les valeurs d'humidité relative mesurées et les succions équivalentes correspondant à différentes solutions salines saturées (Delage et Al., 1996).

Tableau II.2 : L'humidité relative RH et la succion totale de différentes solutions salines saturées. (Xiang-Ling LI, 1999).

| Solutions saturées | Température = 20 °C | | Température = 30 °C | |
|--------------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | RH (%) | Succion (MPa) | RH (%) | Succion (MPa) |
| K_2SO_4 | 97 | 4.113 | 96 | 5.512 |
| KNO_3 | 93 | 9.8 | 91 | 12.734 |
| KCl | 86 | 20.364 | 85 | 21.943 |
| NaCl | 76 | 37.055 | 75 | 38.843 |
| $NaNO_2$ | 66 | 56.104 | 63 | 62.385 |
| $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 55 | 80.721 | 52 | 88.294 |
| $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$ | 44 | 110.85 | 43 | 113.954 |
| KCH_3CO_2 | 20 | 217.31 | 22 | 204.44 |
| KOH | 9 | 325.125 | 7 | 359.059 |

Tableau II.3 : caractéristiques des solutions salines utilisées à 20°C.

| Technique de contrôle par phase vapeur | | | |
|---|--------------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Solution saline saturée | Humidité relative Hr(%) ^o | Succion (MPa) | Masse du sel(g)/500ml de solution |
| Eau distillée | 100 | 0 | |
| NaCl | 37.7 | 137.3 | 179.45 |
| KCl | 85 | 22.59 | 345 |
| $(NH_4)_2SO_4$ | 81 | 29.9 | 375.65 |
| NaCl | 76 | 38.15 | 360 |
| $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ | 32.5 | 156.22 | 730 |
| KOH | 9 | 326 | 1000 |
| H_2SO_4 | 8.5 | 500 | 1litre ⁽¹⁾ |
| Nota : (1) : solution concentrée à 98% | | | |

- **Facteurs influençant sur les mesures par la méthode de la pression à vapeur**

La température est un paramètre fort sensible ici, ici non seulement parce qu'elle intervient directement dans la loi de Kelvin, mais aussi à cause de son influence sur les propriétés physiques et chimiques des solutions. C'est pourquoi l'utilisation d'un bain thermostatique est conseillée.

Delage et Al. (1996) démontent que 1% d'erreur sur la mesure d'humidité relative peut donner une valeur de 1,38MPa d'incertitude sur la mesure de la succion.

Dès lors, cette technique a certaines limites pour une succion inférieure à 10MPa. D'autre part, la mise en équilibre est d'autant plus lente que les éprouvettes sont volumineuses. En conséquence, la durée d'essai est importante.

Les techniques de mesure et de contrôle (ou d'imposition) de la succion présentées ci-dessus sont couramment utilisées dans les recherches sur le comportement hydromécanique des sols non saturés.

Tableau II.4 : Techniques de mesure et de contrôle de la succion.

| Méthode | Succion mesurée | Domaine d'application (kPa) | Temps d'équilibre | Paramètres sensibles |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| Psychromètre | totale | 100-8000 | des heures | Température |
| Dessiccateur à vide | totale | >1500 | des mois | Température |
| Papier filtre | totale ou matricielle | 100-10000 | des semaines 1 semaine | Température |
| Plaque de succion | matricielle | <90 | des heures | bon contact |
| Tensiomètre | matricielle | <90 | des heures | bon contact |
| Surpression d'air | matricielle | 0-1500 | des jours | Température |
| Osmotique | matricielle | 0-1500 | des jours | Température |

La détermination du moment où l'équilibre est atteint est fort délicate et dépend souvent du mode opératoire utilisé. Dans certains cas (méthode de la surpression d'air, plaque de succion, dessiccateur à vide, etc.), elle se fait par pesée des éprouvettes à intervalles réguliers. Ceci présente le risque d'altérer l'éprouvette et le contact entre la pierre poreuse ou la membrane et le sol, par conséquent, apporte une certaine imprécision. Par contre, le psychromètre permet aisément la détermination du moment où l'équilibre est atteint, sans devoir manipuler l'éprouvette. Il suffit de faire des mesures à intervalles réguliers. Lorsque les lectures cessent d'évoluer, l'équilibre est atteint.

La longue durée nécessaire pour atteindre l'équilibre provoque aussi certaines difficultés expérimentales. Par exemple, la membrane semi-perméable utilisée dans la méthode osmotique risque d'être défectueuse au bout d'un certain temps à cause des bactéries se développant dans la solution.

La température conditionne les mesures dans plupart des techniques. Il faut donc prendre plus de précautions que lors d'essais traditionnels

Une analyse détaillée de la validité des résultats fournis par différentes techniques a été proposée par (Ling LI., (1999))

II.9. Relation teneur en eau-succion (la courbe de rétention d'eau)

Considérons un sol initialement saturé en eau. Si on lui applique une pression d'air, à partir d'une valeur de pression critique appelée pression d'entrée d'air du sol, les charges pores commencent à se vider. La loi de Jurin Laplace permet d'affirmer qu'une augmentation de la pression d'air appliquée au sol entraîne un drainage de pore de taille de plus en plus petite.

La succion du sol est reliée à la quantité d'eau qui y est présente à cause d'interactions de type capillaire ou d'adsorption entre l'eau et les particules du sol. Cette relation est une caractéristique spécifique d'un type de sol et peut être déterminée expérimentalement par les méthodes de contrôle de la succion présentées dans ce chapitre. Elle est représentée par une courbe appelée « **courbe de rétention** » (ASTM).

La relation succion – teneur en eau n'est pas univoque. La figure II.13, montre que le sol est plus humide à la dessiccation qu'à l'humidification pour une même valeur de succion.

Il résulte que le sol présente un comportement non univoque, qui fait intervenir à priori l'histoire hydrique du sol, complique singulièrement la description des écoulements dans les sols non saturés. Cette non-unicité est liée au phénomène d'hystérésis qui signifie que les caractéristiques hydrique pour un sol en séchage et en humidification ne sont pas les même.

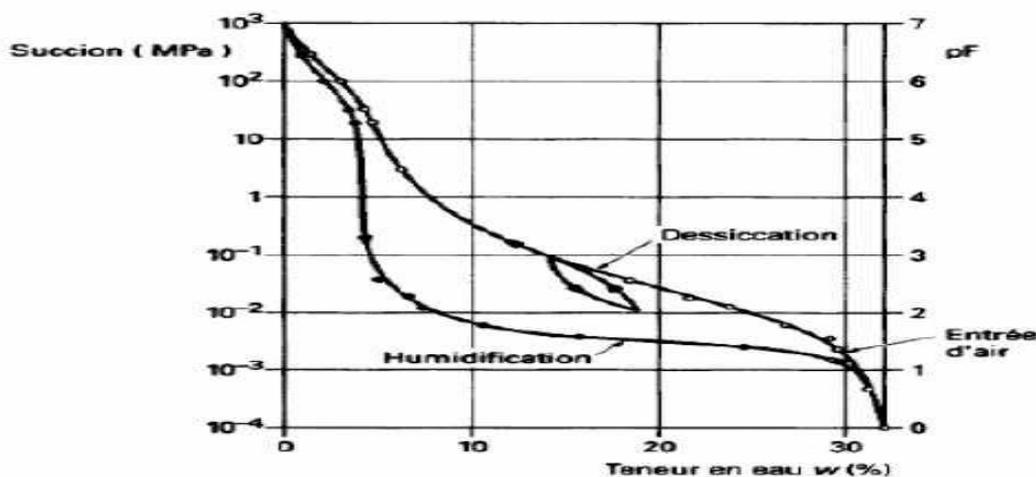


Figure II.11: courbe de rétention- phénomène d'hystérésis (Ghanem F 2011).

Une courbe de succion est propre à un matériau. La pente de cette courbe indique l'effort de drainage pour faire varier la teneur en eau $W(\%)$.

N.B : pF est le logarithme décimal de la valeur absolue de la succion, exprimée en cm d'eau. Il est utilisé pour éviter la manipulation des chiffres aussi importants.

[1Mpa = 10000 cm d'eau = pF] (Schroeder C, 2002) et (Arsenie I-M, 2009).

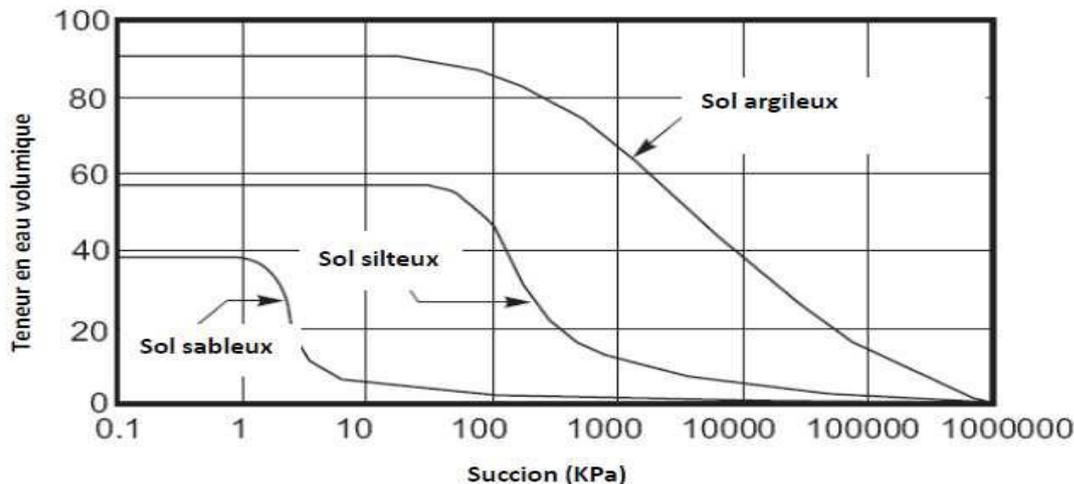


Figure II.112: les courbes de rétention pour différents types de sols (D. G. Fredlund et al. 1994)

II.10. Les paramètres d'environnements qui influent sur la précision des essais

▪ La température

Le flux de l'eau dans le matériau est directement lié à la viscosité de l'eau de plus la valeur de la viscosité est élevée, plus le débit est faible. De façon la viscosité est très sensible à la température ; quand on élève la température, la viscosité diminue pour les liquides et augmente pour le gaz (Joulié 1998). en effet dans les liquides l'élévation de la température, provoque une augmentation des distances intermoléculaires qui génère des frottements plus faible au sein du fluide donc une viscosité plus faible. A l'inverse dans le gaz l'augmentation de température entraîne une augmentation de vitesse des molécules et donc une augmentation du taux de collision. La viscosité augmente donc la température augmente (BOUROKBA MRABET).

▪ Les cycles Dessiccation- Humidification

Les alternances de dessiccation et d'humidification provoquent dans la masse de sol des tensions qui fissurent le sol en tous sens et de plus en plus finement. Lorsque le sol humide se dessèche, l'eau s'évapore et les colloïdes se contractent, créant dans la

matrice soit des fissures apparentes, soit des zones de moindre résistance : le sol se brise facilement. C'est l'effet de retrait qui généralement progressif (BOUROKBA MRABET).

▪ **Nature du percolât**

L'utilisation de l'eau distillée peut causer une augmentation du gonflement et/ou une dispersion, ce qui a pour conséquence de diminuer la valeur de la conductivité hydraulique. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser le fluide que l'on trouve in-situ, afin de limiter tous les risques d'erreurs sur les résultats dus à ce paramètre (Oslen 1965 ; Dunn et Mitchell 1984).

II.11. CHEMIN D'HUMIDIFICATION DRAINAGE

L'action de la pression capillaire ($u_c = u_a - u_w$) est mise en relief sur un chemin de drainage humidification, dans lequel l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte extérieure. Dans la pratique, de nombreux phénomènes suivent en première approximation ce type de chemin : retrait – gonflement dans les sols superficiels lors des variations au niveau de la nappe phréatique ou dans la géotechnique routière. Ce chemin est obtenu par des essais dont le principe est d'imposer au sol une suite de pressions capillaires croissantes jusqu'à séchage complet (drainage), puis appliquer ensuite de pressions décroissantes afin de le réhumidifier (imbibition). Chaque point de la courbe expérimentale correspond à la moyenne de deux échantillons de sol. Une représentation englobant en même temps, la variation des paramètres (pression capillaire, indice des vides, degrés de saturation et teneur en eau) est nécessaire. Cette représentation permettra de mettre en évidence les correspondances entre les variations de ces paramètres. (Fleureau et Indarto 1993).

II.11.1. Chemin humidification drainage sur une pâte

Les chemins de drainage - humidification sont étudiés pour un matériau, initialement préparé sous forme de pâte à $w_P = 1.5 w_L$. Dans le cas général, l'application d'une pression interstitielle négative à un échantillon de sol se traduira simultanément par une variation de volume et de teneur en eau, ou encore d'indice des vides et de degré de saturation. C'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'une représentation globale de l'état du matériau incluant tous ces paramètres.

La représentation constituée par les graphiques $[e, w]$ et $[S_r, w]$ est à rapprocher des abaques proposés par Fredlund et Morgenstern (1976), Biarez et al. (1988) et Zerhouni

(1991), qui permettent de définir l'état du sol à partir d'une figure unique, paramétrée par les différentes variables. Il apparaît néanmoins qu'une représentation explicite est plus claire et plus facile à utiliser qu'une représentation groupée.

Exemple La figure (II.14) représente les résultats d'un essai de drainage humidification sur un limon naturel moyennement plastique (le limon de Jossigny, $w_L = 37\%$, $I_p = 21\%$), (Fleureau et Indarto 1993).

Sur le chemin de drainage (de l'état saturé à l'état sec) on peut retirer les comportements repères suivant :

- Du point initial A au point d'entrée d'air B correspondant à une pression capillaire ($u_a - u_w$) de 0.8 MPa, le sol reste saturé et se comporte de façon analogue à un sol saturé normalement consolidé sur un chemin de consolidation isotrope, avec une variation sensiblement linéaire de l'indice des vides en fonction du logarithme de la pression capillaire.

- Du point B au point C, le sol se désature légèrement, mais cela n'affecte pas sa compressibilité. On note sur le diagramme $[w, e]$ que le point C, dont la pression capillaire ($u_a - u_w$) est de l'ordre de 2 MPa, correspond à la limite de retrait conventionnelle du sol définie par l'intersection de la droite de saturation (d'équation $e = G_s \cdot w$, où G_s représente la densité des grains solides) et de l'asymptote horizontale au palier de retrait pour $w=0$.

- De C à D, le matériau ne se déforme pratiquement plus, tandis que son degré de saturation diminue très rapidement jusqu'à 0. On constate, sur le graphe $[w, S_r]$, que, pendant cette phase de forte désaturation, la variation du degré de saturation est sensiblement proportionnelle à celle de la teneur en eau.

Le chemin d'humidification met en évidence une caractéristique fondamentale du comportement du sol non saturé à savoir l'hystérésis des courbes de variation des différents paramètres en fonction de la pression capillaire. Cette hystérésis est liée à plusieurs facteurs :

- La présence d'air piégé dans le sol.
- Une variation de l'angle de mouillage en fonction du processus (humidification ou dessiccation). En effet le rayon de courbure est plus grand pour un ménisque qui avance que pour celui qui recule.
- La non uniformité géométrique des pores (effet « ink-bottle ») : Durant le drainage, les vides restent remplis d'eau jusqu'à ce que la succion soit suffisamment grande pour que le plus petit des pores se désature. Tandis qu'en humidification les

vides se remplissent d'eau pour une succion plus faible puisque celle-ci correspond au seuil du plus grand des pores.

- Le phénomène de retrait affectant la phase solide sous l'effet de l'augmentation de la pression interstitielle négative est un comportement plastique dans le domaine saturé ou quasi saturé, par conséquent, ce phénomène de retrait n'est pas réversible d'où l'hystérésis observé dans le plan $[\log u_c, e]$.

On retrouve les mêmes phases de comportement :

- De D à C', le comportement volumique est parfaitement réversible, mais on observe une hystérésis importante du degré de saturation. - De C' à B', le matériau se resature, mais présente une forte irréversibilité dans le plan $[u_a - u_w, e]$; la pression capillaire de resaturation $(u_a - u_w)_r$ est sensiblement plus faible que la pression de désaturation.

-Enfin, entre B' et A', le sol se comporte comme un sol saturé surconsolidé. La description du premier cycle d'humidification drainage du limon de Jossigny met en évidence trois phases dans le comportement du matériau, que l'on retrouve dans tous les types d'argile, y-compris les argiles gonflantes (Fleureau et Kheirbek-Saoud, 1993) :

- Pour $u_c < (u_a - u_w)_d$: un domaine saturé où le sol subit des déformations plastiques importantes,

- Pour $u_c > (u_a - u_w)_{SL}$: un domaine non saturé dans lequel le sol se déforme très peu et de façon élastique ; c'est dans ce domaine que l'on observe la plus forte irréversibilité des variations de degré de saturation.

- Dans le domaine intermédiaire entre B et C ($(u_a - u_w)_d < u_c < (u_a - u_w)_{SL}$) : le sol reste quasi-saturé ($S_r > 85\%$) et son comportement est peu différent de celui du sol saturé ; la phase eau reste généralement continue, mais présente des bulles d'air dispersées.

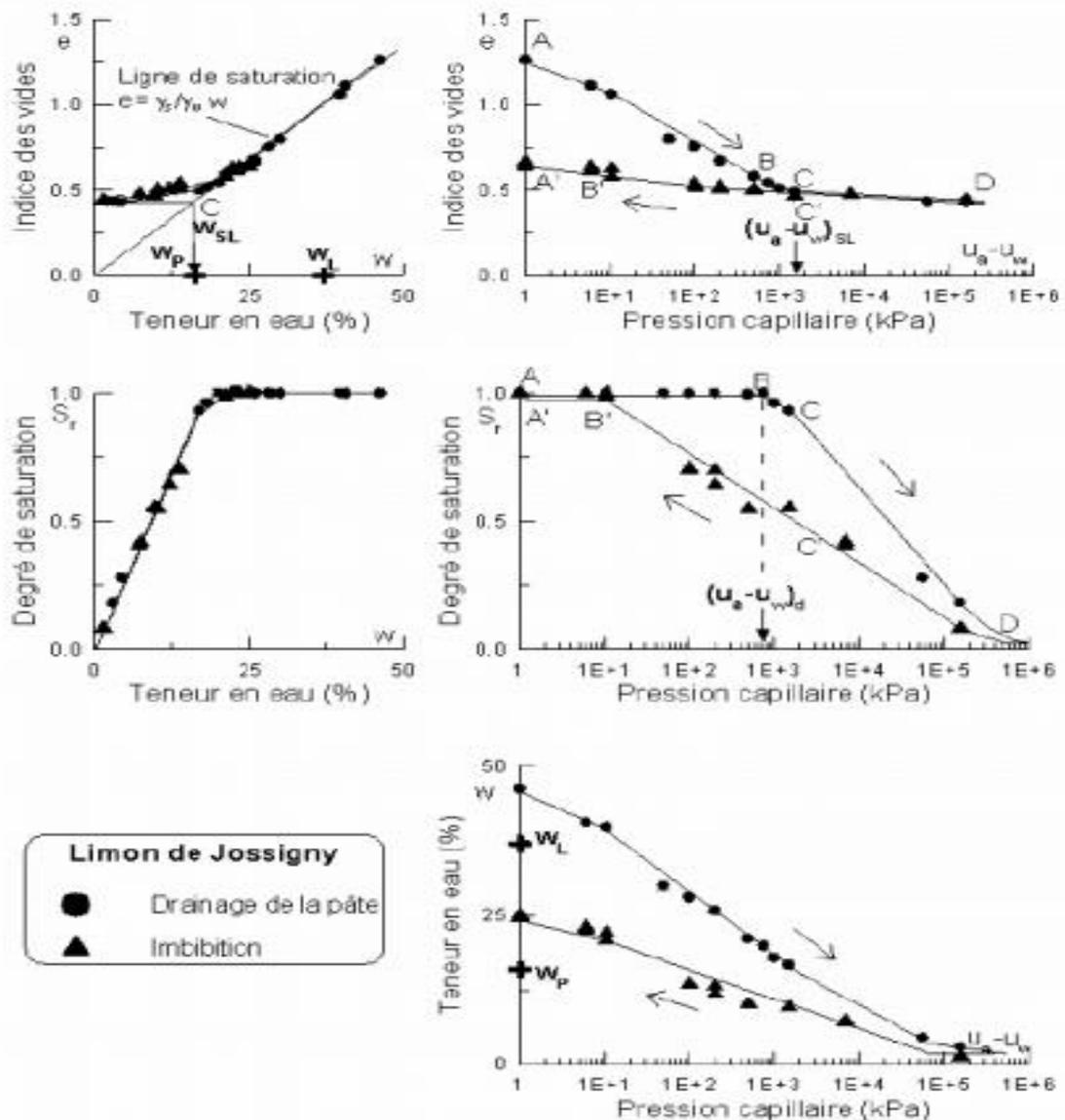


Figure II.13. Premier cycle d’humidification drainage sur le limon de Jossigny Normalement consolidé ((Fleureau et Indarto 1993)

II.11.2. Chemin humidification drainage sur un matériau compacté L’optimum

Cui et Delage (2000) ont réalisé des photographies par microscope à balayage sur les différents états de structure des sols compactés, à la même densité sèche mais à différentes teneurs en eau (figure II.15). Ils ont montré que :

- La macrostructure est prédominante dans les sols compactés du côté sec de l’optimum.
- La microstructure est plus importante pour les sols compactés à l’optimum ou à Une teneur en eau supérieure.

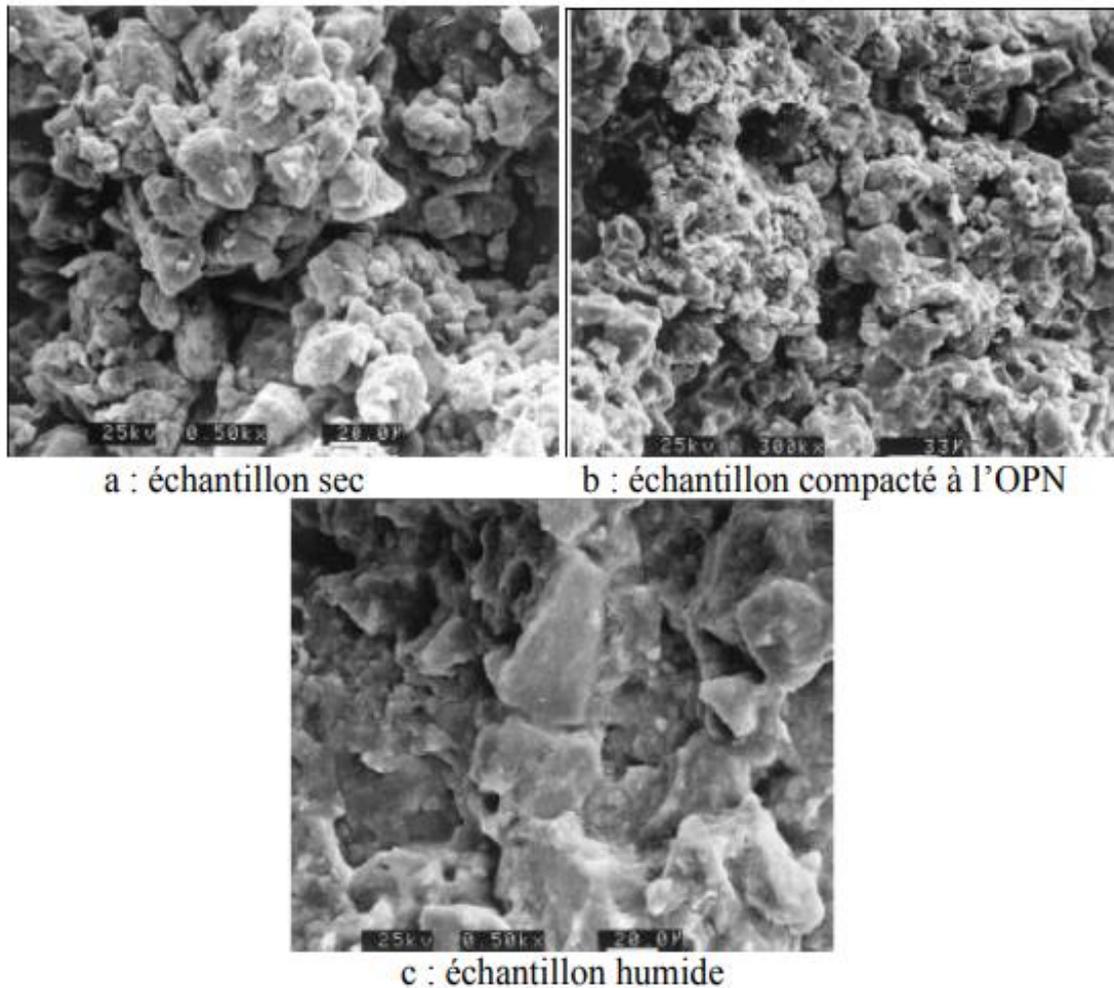


Figure II.14. Photographie au microscope électronique à balayage d'échantillons du limon de Jossigny compactés (Delage et Cui 2000)

Le chemin d'humidification drainage sur le limon de Jossigny compacté à l'OPN est également représenté sur la figure (II.16). Fleureau (1993) a constaté une forte analogie entre ce chemin et celui sur le limon consolidé à la contrainte de 1 MPa, ce qui correspond à la valeur couramment admise de la contrainte effective de consolidation équivalente. Les chemins sur les sols compactés à l'OPN présentent généralement assez peu d'hystérésis dans le plan de l'indice des vides en fonction de la pression capillaire.

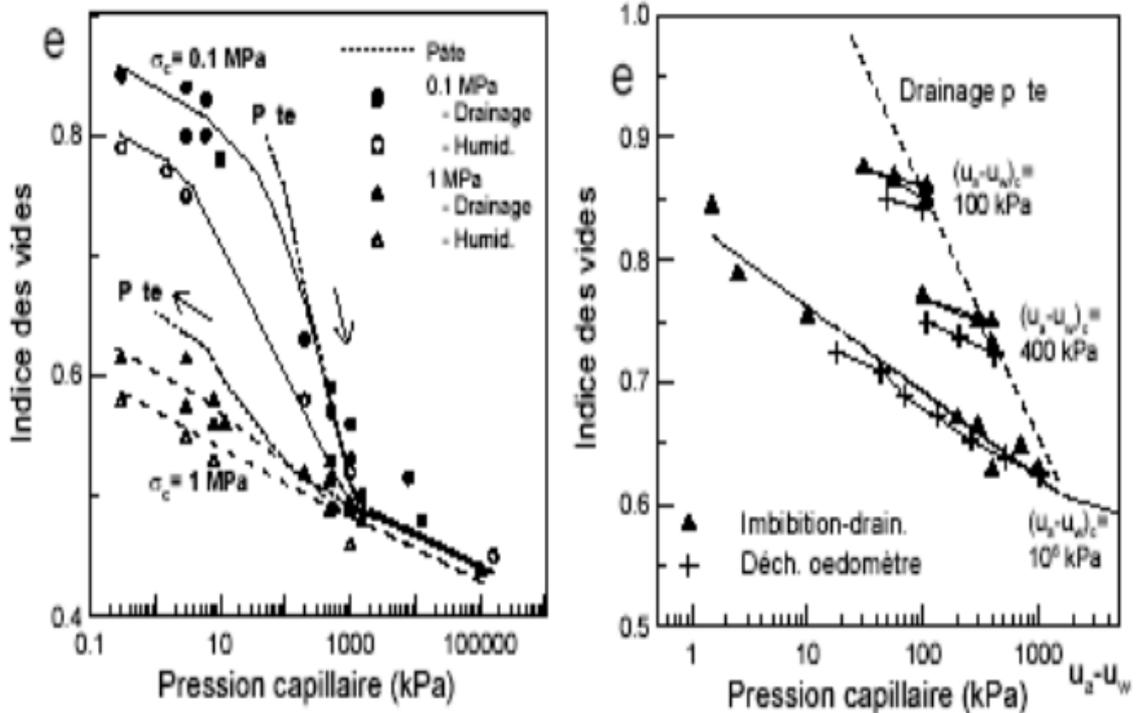


Figure II.15. Influence de la pression capillaire maximale de drainage du sol sur le Chemin D'humidification-drainage. (Fleureau 1993)

II.12. COURBE DE SUCCION OU DE RETENTION D'EAU

C'est une grandeur macroscopique fondamentale en physique du sol car elle exprime l'influence de la structure, de la porosité et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol. Les variations de la succion en fonction de la teneur en eau sont représentées à l'aide d'une courbe appelée courbe de rétention d'eau (Figure II-17) qui est obtenues par Croncy sur un sable argileux (11 % < 2 mm, 31 % < 0,08 mm) [Jean-Pierre MASEKANYA, 2008]. Cette courbe exprime la capacité du sol à attirer et/ou retenir l'eau en fonction de la succion exercée par application de paliers de succion croissante, puis décroissante, le plus souvent à l'aide de la cellule de Richards [Delage P. et al. 2000]. Dans la nature les sols non saturés sont soumis au séchage et au remouillage, phénomènes qui se succèdent en fonction des conditions climatiques. Le séchage a pour effet de diminuer la teneur en eau et par conséquent

D'augmenter la succion. Le remouillage, en revanche, entraîne une augmentation de la rétention d'eau

II.13. différentes phases de la courbe de succion

Phase I : c'est la phase d'effet limite ; au voisinage de la teneur en eau à saturation, où la courbe est pratiquement horizontale. Cette partie de la courbe correspond à la « frange capillaire ». Elle traduit le fait qu'il est en général nécessaire d'exercer une dépression non nulle pour arriver à drainer un milieu poreux. Ceci est dû au fait que les pores ne dépassent pas une certaine taille maximale, et que les rayons de courbure des interfaces eau-air sont nécessairement inférieurs à une valeur seuil R_0 .

Phase II : c'est la phase de transition où la pente de la courbe de succion est relativement forte.

Phase III : de la courbe c'est la phase d'effet résiduelle, où la courbe se réduit à une droite d'une faible pente, voire infinie, à mesure que l'on s'approche de la teneur en eau résiduelle. L'assèchement progressif du sol conduit à donner un rayon de courbure de plus en plus faible aux interfaces, donc à augmenter la succion.

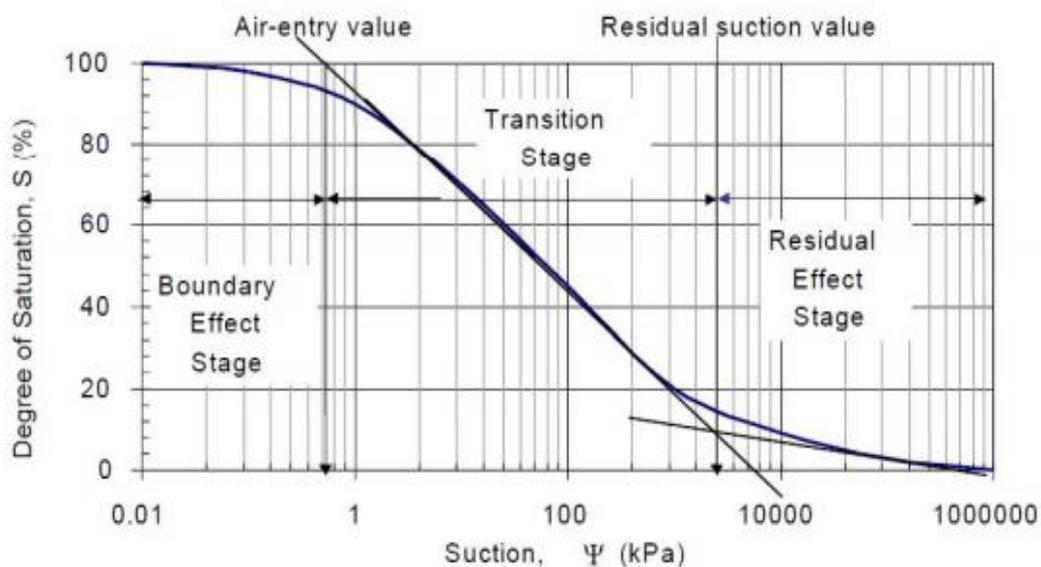


Figure II-17. Différentes phases de la courbe de succion (Ghanem –F)

CONCLUSION

La succion du sol est une variable clé dans les sols non saturés. Dans la pratique, une meilleure connaissance du statut de l'eau et des propriétés de rétention et de transfert de l'eau dans les sols non saturés permet de mieux comprendre le comportement d'ouvrages bâtis en sol non saturé tels que les ouvrages en sol compacté (remblais routiers, barrages en terre, barrières géologiques d'étanchéité de centres de stockage de déchets).

La détermination expérimentale de la courbe de rétention d'eau du sol nécessite beaucoup de temps, d'effort et doit utiliser plusieurs techniques pour obtenir la courbe complète, chacune des techniques n'étant valable que dans un intervalle limité de succion.

La mesure et le contrôle de la succion sont donc des opérations délicates, et les techniques utilisées présentent des avantages et des inconvénients. Généralement la courbe de rétention d'eau du sol n'est pas une propriété qui est régulièrement déterminée dans les laboratoires de mécanique du sol. Donc en absence de données expérimentales, on peut estimer cette courbe à l'aide des modèles de prédiction. La tendance actuelle consiste à établir des fonctions de pedotransfert pour déterminer les paramètres d'un modèle mathématique pour la relation $\theta(\psi)$. A ce propos il est intéressant de relever que les FPT les plus représentatives sont celles qui relient les paramètres qui ont un sens

physique aux caractéristiques texturaux du sol [M. Lamara et al. 2009]. Les fonctions de Pedo-transfert présentent l'avantage d'être économiques et faciles à utiliser.

III. 1.Introduction

Tout projet de construction, que ce soit une route, un pont ou un bâtiment doit être étudié avec des données complètes, ce qui suppose une bonne reconnaissance du sol donc la géotechnique est le domaine d'étude des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des sols en vue de leur application en construction civile. C'est une science basée sur les données recueillies lors des essais en laboratoire et in-situ.

Le travail présenté dans la première partie de ce chapitre est la caractérisation physicochimique et minéralogique d'une argile naturelle de la ville de **Tizi Ouzou**. Cette caractérisation a pour objectif la classification géotechnique de ce sol argileux.

III .2.SITUATION ET DESCRIPTION DU SITE ETUDIE

III.2.1.Origine de matériau utilisé :

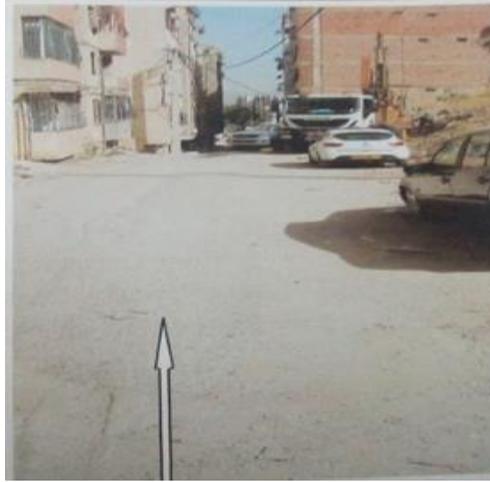
Le matériau étudié dans ce travail est un matériau local souvent rencontrés dans la région de la Grande Kabylie.



Figure III.1.Origine de matériau utilisé

III.2.2. Désordre observé

Le fennomane a affecté un tronçon d'une route menant au lotissement engendrant un bourrelet et des lignes d'escarpement en amont du fennomane.

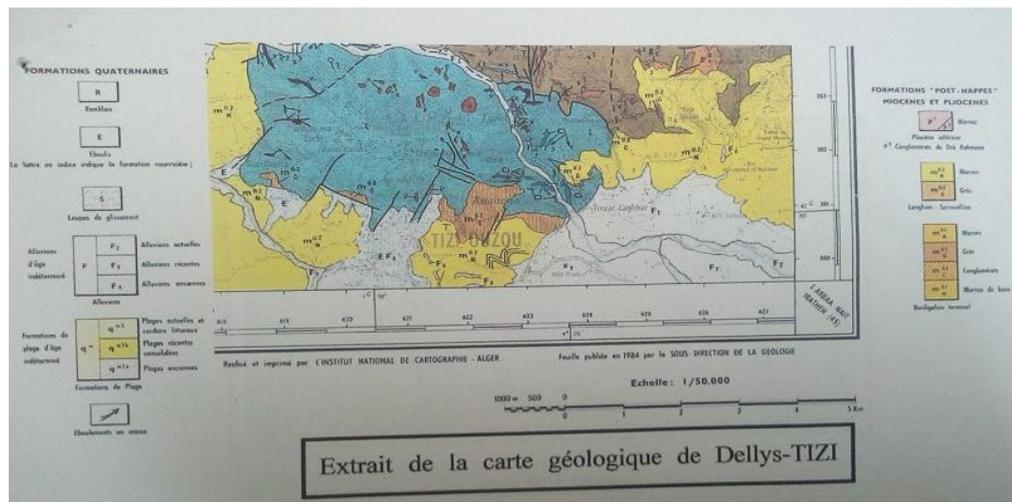


- Prouteau électrique incliné avec



III.3. Etude géologique

La carte géologique de "Delly-tizi ouzou" ainsi que les études géotechniques réalisées dans la zone, nous ont fournis des informations appréciables.



III.4. Identifications des matériaux

Après concassage manuel des blocs argile, des échantillons ont été soumis au séchage dans une étuve à la température 105°C pendant 24 heures. Par la suite, une étude d'identification a été réalisée au laboratoire. Cette étude comporte les différents essais suivants :



Figure .III .2 Séchage dans une étuve



Figure .III.3 Concassement de Matériau



Figure .III.4 Passer dans le tamis 3.15mm

Les essais d'identification au laboratoire de la faculté de Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU Avant de procéder aux essais mécaniques, nous avons réalisé une série d'essais permettant l'identification des matériaux à étudier :

- Granulométrie,
- Teneur en eau,
- Limites d'Atterberg
- Masse volumique,
- Indice des vides et le degré de saturation,

III.4.1. Analyse granulométrique

❖ Analyse granulométrique par tamisage NFP 94-057 /1992.

▪ Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer par lavage les grains agglomérés d'un échantillon d'une masse connue de matériau, puis à les fractionner, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage le refus cumulé sur chaque tamis.

Les dimensions nominales d'ouverture des mailles des tamis et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et des seuils granulométriques utilisés dans la classification.

Les masses des différents refus ou des passants sont rapportées à la masse initiale du matériau sec soumis à essai. Les pourcentages sont exploités et complétés par d'autres paramètres en vue de définir la classe de matériau à laquelle appartient l'échantillon.

▪ lavage du sol :

1).but de l'essai :

L'opération de lavage pour un sol est un préalable indispensable à l'analyse granulométrique. On sépare ainsi sans action mécanique la totalité des grains. L'opération de lavage implique la perte des fines argileuses qu'il faudra calculer.

2).matériels nécessaires :

Un tamis de 80 mm pour le lavage et un ou deux tamis de décharge ,Une balance, un four ou autre moyen de séchage(une étuve),des tares .



Figure III.5. Matériels utilisés dans l'analyse granulométrique par tamisage

3).mode opératoire :

- Prélever une quantité de sol humide d'environ 1000 g
En retirer environ 100 g pour la mesure de la teneur en eau (w). -Effectuer la mesure de la teneur en eau sur ce petit échantillon.
- Peser exactement le reste du prélèvement et le noyer dans de l'eau pour désagréger les agrégats. -Calculer la masse de sol sec (M_s) correspondant à partir de la teneur en eau (w) et de la masse humide (M_h).
 - Laver à grande eau jusqu'à ce que l'eau soit claire.
 - sécher la totalité du refus
 - sécher la totalité du refus- d'après l'échantillon qu'on a on commence par le tamis 5mm ; 4mm, 3.15 ,2.5, 2,1.6, 1.25, 1,0.63, 0.135,0.160 on termine avec le tamis 0.08mm.
- Après on les pèse successivement
- on fin on trouve la masse des refus cumul



Figure.III.6. Matériels d'analyse manipulation du Granulométrie

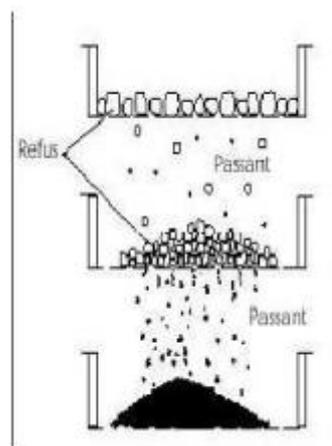
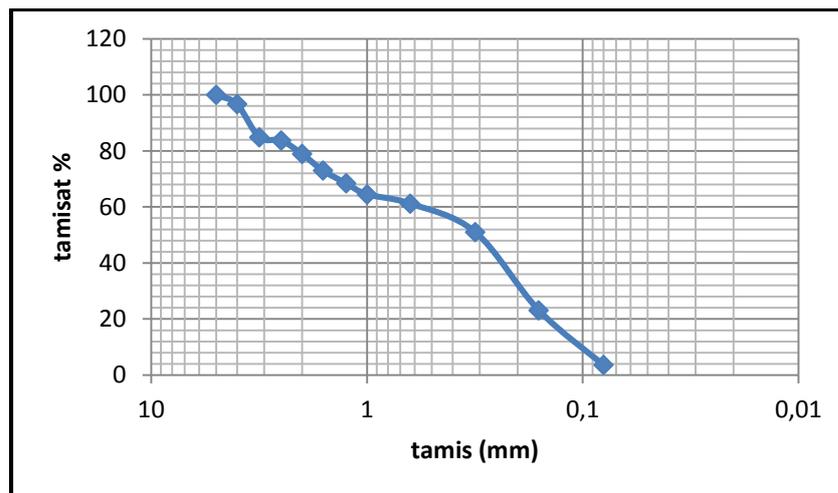


Figure.III.7. Schéma de la Tamisage

Tableau.III .1: Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | Refus cumulé (g) | Refus cumulé (%) | Tamisât cumulé (%) |
|------------------------|-----------|------------------|------------------|--------------------|
| 5 | 0 | 00.00 | 00.00 | 100 |
| 4 | 4.780 | 4.780 | 3.346 | 96.654 |
| 3.15 | 16.860 | 21.64 | 15.146 | 84.854 |
| 2.5 | 1.677 | 23.317 | 16.320 | 83.68 |
| 2 | 6.884 | 30.201 | 21.139 | 78.861 |
| 1.60 | 8.458 | 38.659 | 27.059 | 72.941 |
| 1.25 | 6.598 | 45.257 | 31.677 | 68.323 |
| 1 | 5.646 | 50.905 | 35.631 | 64.369 |
| 0.630 | 4.757 | 55.66 | 38.959 | 61.041 |
| 0.315 | 14.410 | 70.07 | 49.045 | 50.955 |
| 0.160 | 39.720 | 109.798 | 76.853 | 23.147 |
| 0.08 | 27.889 | 137.687 | 96.374 | 3.626 |
| fond | 5.180 | 142.867 | 100 | 00.00 |

**Figure III.8.** Courbe granulométrique du sol étudié.

❖ Analyse granulométrique par sédimentation :

L'analyse granulométrique de la l'argile pour les particules inférieure ou égale à 80 mm se fait par la sédimentation qui est une progression d'un dépôt de particules solides dans un liquide au repos sous l'effet de la gravité.

La sédimentation c'est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage du sol selon la norme **NFP 94-057 /1992**.

La méthode utilise le fait que dans le milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des particules fines est fonction de leur dimension.

- But de l'essai

C'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0.08mm.

▪ Principe de l'essai de sédimentation

- ✓ Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08mm), et récupérer le tamisât, sécher l'échantillon dans une étuve, prendre à 70g de tamisât sec.
- ✓ Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 1litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée (500 ml) et une solution à300ml d'hexamétaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10 \text{H}_2\text{O}$).



Figure .III.9. Préparation de la solution du défloculant.

- ✓ On met 70g de l'échantillon dans l'éprouvette et on mélange le tout.
- ✓ On rajoute de l'eau distillée jusqu'à un litre
- ✓ Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel, retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai), Il faut agiter pendant 1 mn.
- ✓ Après 24 h il faut agiter pendant 2mn.
- ✓ Plonger le thermomètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre; procéder à la prise des lectures du densimètre et de la température aux temps suivant: (0.5 -1 -2 -5 – 10 -20- 40 – 80 – 240- 1440)
- ✓ Calculer le pourcentage des tamisas et complète la courbe granulométrique



Figure III.10. Déroulement de l'essai analyse granulométrique par sédimentation

Cette analyse a été effectuée au laboratoire LCTP (Laboratoire Central Des Travaux Publics) de TIZI OUZOU, les résultats obtenus sont présentés sur le tableau et la courbe ci-dessous ;

Tableau.III .2: Les résultats de l'essai de sédimentation.

| tamis (min) | Tamises % |
|-------------|-----------|
| 0.08 | 100 |
| 0.07 | 64 |
| 0.06 | 51 |
| 0.05 | 44 |
| 0.03 | 38 |
| 0.02 | 37 |
| 0.01 | 37 |
| 0.0016 | 37 |
| 0.0012 | 38 |
| 0.005 | 36 |
| 0.002 | 35 |

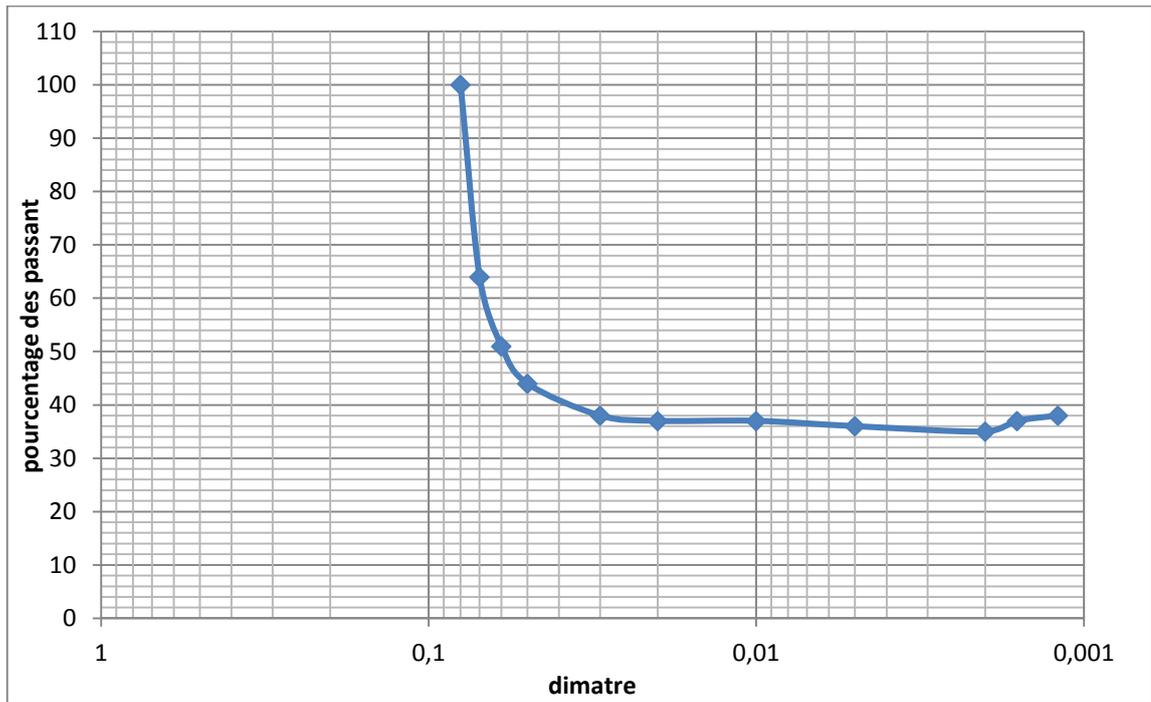


Figure. III.11. Courbe d'Analyse granulométrique par sedimentometrie

Les particules ayant un diamètre inferieure a 80 μm est 93 %.

III.4.2. Analyse chimique

L'analyse chimique est une méthode d'identification d'un sol qui nous permet de déterminer la quantité de :

- Sulfates ;
- Chlorures ;
- Carbonates;
- Et Anhydride carbonique

Cette analyse a été effectuée au laboratoire LCTP (Laboratoire Central Des Travaux Publics) de TIZI OUZOU

Les résultats sont donnés dans le tableau

Tableau.III.3. Résultats de l'analyse chimique

| Composants | Pourcentage % |
|--|---------------|
| Sulfates (CaSO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$) | Traces |
| Chlorures (NaCl) | 0.29 % |
| Carbonates (CaCO_3) | 17.24 % |
| Anhydride carbonique | 7.59 % |

La teneur en CaCO_3 nous conduit à faire la classification ci-dessous (**S.LEROUIL, J.P MAGMAN et F.TAVEN**)

| | | |
|--------------------------------|---|------------------|
| 0 à 10% de CaCO ₃ | ⇒ | Argile |
| 10 à 30% de CaCO ₃ | ⇒ | Argile marneuse |
| 30 à 70% de CaCO ₃ | ⇒ | Marne |
| 70 à 90% de CaCO ₃ | ⇒ | Calcaire marneux |
| 90 à 100% de CaCO ₃ | ⇒ | Calcaire |

D'après le pourcentage de CaCO₃ trouvé, pour le sol étudié est une Argile marneuse

III.4.3. La teneur en eau :

La norme NF P90-050 (octobre 1991) a pour objet la détermination de la teneur en eau pondérale, par la méthode de l'étuvage. La teneur en eau pondérale (W) est rapport de la masse de l'eau interstitielle (m_w) par la masse des grains solides (m_d).

$$W(\%) = m_w/m_d \cdot 100\%$$

Avec :

$$m_w = m_2 - m_1$$

$$m_d = m_3 - m_1$$

Avec :

m_w : la masse de l'eau.

m_d : la masse du matériau sec .

m_1 : masse de la tare,

m_2 : masse totale humide,

m_3 : masse totale sec,

Tableau.III.4: Les résultats détermination de la teneur en eau

| Echantillon N° | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|-------|
| Masse totale du sol humide : m_2 (g) | 320.1 | 308.0 | 666.5 |
| Masse totale du sol sec : m_3 (g) | 280.6 | 268.8 | 591.4 |
| Masse de tare : m_1 (g) | 97.8 | 96.2 | 234.6 |
| Masse de l'eau : m_w (g) | 39.5 | 39.2 | 75.1 |
| Masse du sol sec : m_d (g) | 182.8 | 172.6 | 356.8 |
| Teneur en eau (%) | 21.60 | 22.71 | 21.05 |
| Teneur en eau Moyenne (%) | 21.79 | | |

III.4.4. Masses volumiques

La masse volumique humide (ρ_h) sera déterminée par pesée hydrostatique (avec un échantillon paraffiné). Connaissant (ρ_h) et (w) on déduira la masse volumique sèche d'un élément de roche (ρ_s).

Tandis que la masse volumique des grains solides sera déterminée au pycnomètre à eau

a. Détermination de la masse volumique humide " ρ_h "

La densité humide est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme **NF P94-053**(masse volumique des sols fins). Le résultat est résumé dans le tableau suivant :



Figure .III .12: Déroulement de l'essai de la pesée hydrostatique.

Masse de la paraffine = $M_{\text{humide} + \text{paraffine}} + M_{\text{humide}}$

Volume brut = $M_{\text{humide} + \text{paraffine}} - M_{\text{matériau dans l'eau}}$

Volume de la paraffine = $M_{\text{paraffine}} / \text{densité de la paraffine} = M_{\text{paraffine}} / 0.88$

Volume net = (volume brut) – (volume paraffine)

Densité humide = $\rho_h = \text{masse humide} / \text{volume net} \text{ (t/m}^3\text{)}$

Le tableau ci-après récapitule les résultats des paramètres physiques nécessaires caractérisant l'état du sol.

Tableau .III.5.Détermination de la densité humide

| | 1 | 2 | 3 |
|---|---------|---------|---------|
| Masse de l'échantillon humide (g) | 161.936 | 187.095 | 193.646 |
| Masse humide d'échantillon paraffiné à l'air (g) | 167.464 | 192.492 | 201.587 |
| Masse de l'échantillon paraffiné immergé (g) | 78.5 | 91.5 | 89.3 |
| Masse de la paraffine (g) | 5.523 | 5.397 | 7.941 |
| Volume brut (cm³) | 88.964 | 100.992 | 112.87 |
| Volume de la Paraffine (cm³) | 6.276 | 6.132 | 9.023 |
| Volume net (cm³) | 82.688 | 94.86 | 103.847 |
| ρ_h (g/ cm³) | 1.96 | 1.97 | 1.86 |
| ρ_h moyenne (g/ cm³) | 1.93 | | |

b. Détermination de la masse volumique sèche " ρ_d "

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminé selon la norme **NF P94- 064 (novembre 1993)** par la méthode de pesée hydrostatique. Elle constitue un paramètre utilisé notamment pour déterminer la compacité et la porosité d'une roche.

Elle représente le quotient de sa masse sèche (m_s) par le volume totale (v) qu'il occupe (y compris l'air qu'il contient) :

$$\rho_d (\text{g/cm}^3) = \frac{m_s}{v}$$

$$p_s = p_h / (1+w) = p_h / (1.2209)$$

L'essai consiste à peser l'échantillon de sol sec (m_s), paraffiner aussitôt la totalité de sa surface extérieure puis peser de nouveau et procéder à la pesée hydrostatique (tableau4).

tableau.III .6. Détermination de la densité sèche

| | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Volume totale (V _t en cm ³) | 82.688 | 94.86 | 103.847 |
| Masse humide p_h (g) | 161.936 | 187.095 | 193.646 |
| Masse des grains solides p_s (g) | 132.636 | 153.243 | 158.609 |
| Densité sèche (g/cm ³) | 1.604 | 1.615 | 1.527 |
| ρ_d moyennes (g/cm ³) | 1.59 | | |

Interprétation des résultats

D'après le tableau ci dessous, on peut classer la masse volumique calculé pour l'échantillon étudié.

Tableau III.7 : Classification des masses volumiques sèches selon Terzaghi.

| ρ_d(g/cm³) | Appréciation |
|--|---------------------|
| <1.6 | Faible |
| 1.6 – 1.8 | Moyenne |
| >1.8 | Dense |

➤ Donc l'appréciation de notre sol est **faible**.

c. Densité des particules solides (ρ_s)

La **norme NF P94-054 (octobre 1991)** a pour objet la détermination, au pycnomètre à eau, de la masse volumique des grains solides de sol. Elle s'applique sur échantillons d'éléments de dimension inférieure à 2 mm.

La densité des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w * \frac{m_2 - m_1}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3}$$

Avec :

- M₁ : masse du pycnomètre vide ;

- M_2 : masse du pycnomètre avec échantillon ;
- m_3 : masse du pycnomètre + eau + échantillon ;
- m_4 : masse du pycnomètre plein d'eau ;
- ρ_w : Masse volumique de l'eau égale à $1000\text{kg/m}^3 = 1\text{g/cm}^3$

Le résultat de notre essai est le suivant :

- M_1 : masse du pycnomètre vide = 202.4g
- M_2 : masse du pycnomètre avec échantillon = 252.4g
- M_3 : masse du pycnomètre + eau + échantillon = 793.08g
- M_4 : masse du pycnomètre plein d'eau = 761.6g

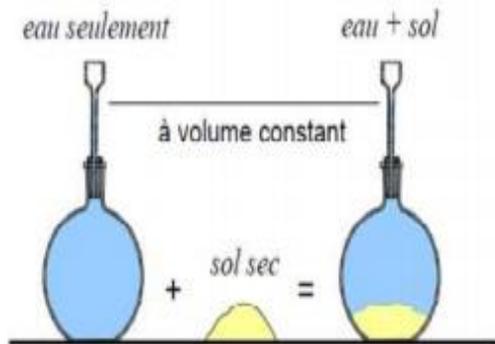


Figure III.14. Les étapes de l'essai au pycnomètre



Figure III.15. Matériels utilisés

D'où La masse volumique des grains solides : $\rho_s = 2.69 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

La phase solide des sols est constituée principalement de silice et d'Alumine. Les éléments simples Si et Al ayant des masses atomiques très voisines, le poids volumique des sols évolue dans une plage très étroite. Les sols organiques et les sols métallifères font exception à ces valeurs, dans le chapitre précédent (la bibliographie) le poids volumique des grains solides varie entre 26 à 27 KN/ m³ pour les sables et l'argile, dans le cas de la marne étudié la masse volumiques des grains solides trouvé est dans la fourchette d'après (J. Lérau)

III.4.5. Indice des vides, degré de saturation

a. Indice des vides "e"

L'indice des vides permet de savoir si les vides sont importants ou non, c'est-à-dire, si notre matériau est dans l'état serré ou lâche.

Il est défini comme étant le rapport entre le volume des vides (V_v) et le volume des particules solides (V_s). Il est défini par la relation suivante :

$$e = V_v / V_s : (\text{L'indice des vides peut être supérieur à } 1).$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_s et ρ_d) selon la formule: $e = [\rho_s / \rho_d] - 1$

Vu que les masses volumiques sont déterminées, on déduit l'indice des vides par la deuxième relation : $e = 0.6981 = 69.81\%$

Interprétation des résultats

Dans le chapitre précédent on constate que l'indice des vides peut varier de 0.30 à 1 (30(%) à 100(%)), et dans des cas extrêmes des argiles de Mexico la valeur de l'indice des vides peut atteindre la valeur de 13 (130%). (Géotechnique 1 J-Léreau)

b. Degré de saturation "sr"

Le degré de saturation, noté S_r , indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau (V_e) au volume des vides (V_v).

Il s'exprime en pourcent. Le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100% (sol saturé). Il peut aussi être défini par la formule suivante :

$$S_r = (\rho_s / \rho_w) * (w / e)$$

Donc le degré de saturation est : 83.68 %

Interprétation des résultats

Le tableau suivant présente l'état de saturation du matériau d'après Terzaghi ;

Tableau III.8. L'état de saturation du matériau.

| Sr (%) | Appréciation |
|------------------|--------------------------|
| 100 | Saturé |
| 76 - 99 | Détrempé |
| 51 - 75 | Mouillé |
| 26 - 50 | Humide |
| 1 - 25 | Légèrement humide |
| 0 | Sec |
| D'après TERZAGHI | |

D'après la valeur calculée de degré de saturation notre sol est en état **Détrempé**.

c. La Porosité

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elle est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V). La porosité peut s'exprimer en pourcentage ou sans dimension.

$$n = V_v / V$$

La porosité et l'indice des vides sont liés par la formule :

$$n = e / (e + 1)$$

Ce qui nous donne une porosité de : $0.4111 = 41.11 \%$

$$n = 41.11\%$$

II.4.6. Limites d'Atterberg

Cet essai est pratiqué sur la fraction granulométrique dont les particules ont une dimension inférieure à 0.40mm et qu'on appelle sol fin, on fait croître la teneur en eau de façon homogène (malaxage), il passe progressivement de l'état solide à l'état plastique, puis à l'état liquide.

La norme NF P94-51 (mars 1993) destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité au rouleau) s'applique aux sols dont les éléments ont une dimension inférieure à 0,4mm.



Figure III.16. L'appareil de Casagrand

Les limites d'Atterberg sont les paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état. Se sont des teneurs en eau pondérales correspondant à des états particules d'un sol.

a. La limite de liquidité (w_l):

teneur en eau au point de transition entre les états liquide et plastique (est celle pour laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique). Elle se détermine à l'aide de l'appareil de casagrande.

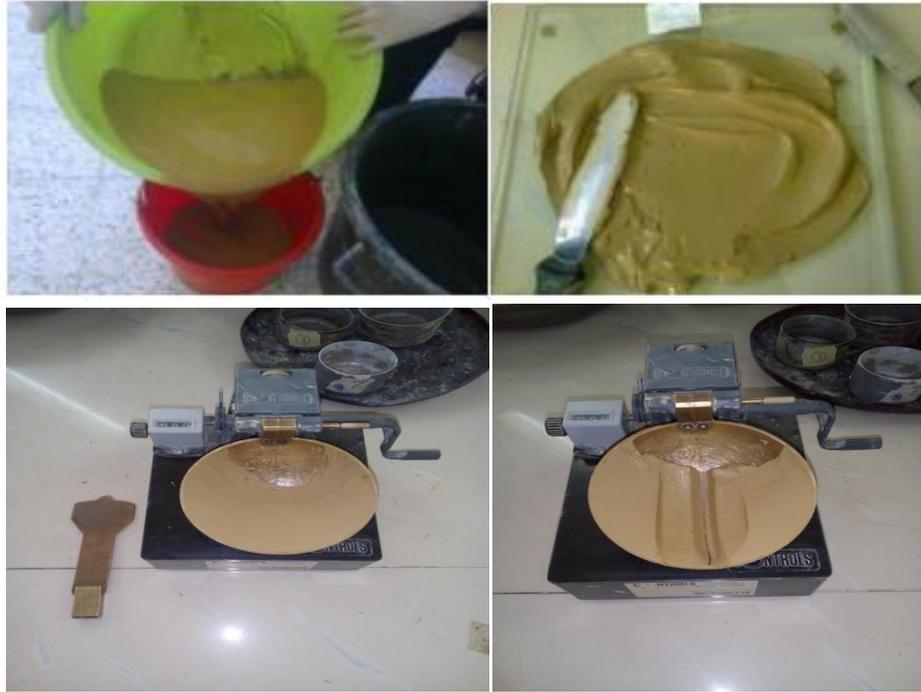


Figure III.17. La manière de préparation l'échantillon

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau .III .9: Représentation les résultats de la limite de liquidité

| | 1 ^{er} essai | | 2 ^{eme} essai | | 3 ^{eme} essai | | 4 ^{eme} essai | |
|-------------------------|-----------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| Nombre coups | 20 coups | | 22 coups | | 29 coups | | 34 coups | |
| Masse totale humide (g) | 22.567 | 23.141 | 26.743 | 25.536 | 31.864 | 29.899 | 33.424 | 36.350 |
| Masse totale sec (g) | 20.566 | 20.841 | 24.062 | 23.021 | 28.681 | 26.559 | 31.587 | 34.239 |
| Masse de la tare (g) | 16.136 | 15.656 | 17.845 | 17.189 | 20.959 | 18.458 | 26.945 | 28.880 |
| Masse de l'eau (g) | 2.001 | 2.300 | 2.681 | 2.514 | 3.183 | 3.340 | 1.837 | 2.111 |
| Masse de sol sec (g) | 4.430 | 5.185 | 6.217 | 5.832 | 7.722 | 8.101 | 4.642 | 5.359 |
| Teneur en eau (%) | 45.17 | 44.36 | 43.12 | 43.10 | 41.21 | 41.22 | 39.57 | 39.39 |
| Moyenne | 44.765 | | 43.11 | | 41.215 | | 39.48 | |

On trace la courbe de la teneur en eau en fonction de nombre des coups, on tire W_L à 25 coups à l'échelle logarithme ;

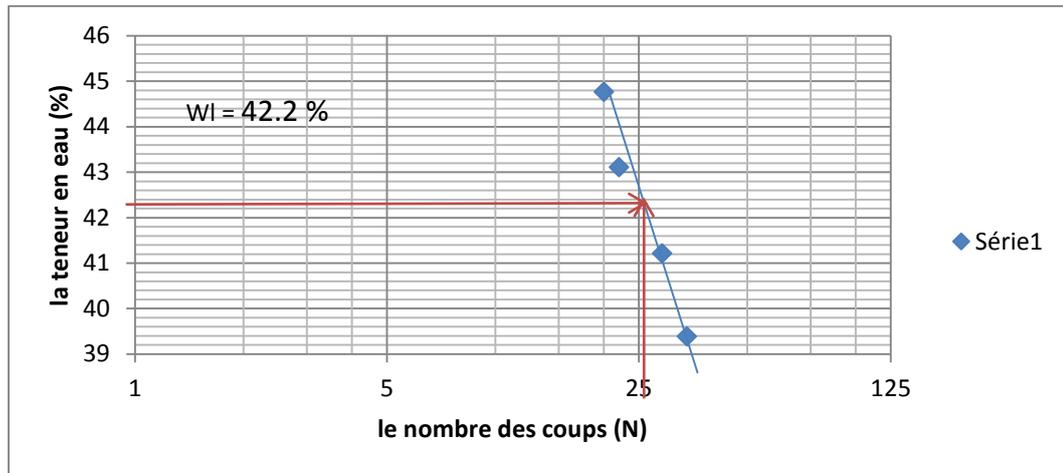


Figure .III.18. La limite de liquidité

À partir de cette courbe on tire la limite de liquidité à 25 coups est égale 42. 2%

b. La limite de plasticité (w_p)

Pour déterminer la limite de plasticité, on forme une boulette à partir de la pâte préparée. À l'aide de la paume de la main, on roule la boulette sur une plaque lisse de façon à lui donner la forme d'un rouleau, sans creux, qui s'amincit progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre et une longueur de 10 cm.

On estime arbitrairement que le sol a atteint la limite de plasticité lorsque le cylindre se brise en deux segments en le soulevant du milieu sur une hauteur variant de 15 à 20 mm. On pèse alors ces derniers sans tarder et on mesure la teneur en eau. On refait l'opération quatre fois pour chacun des échantillons. La limite de plasticité W_P , exprimée en pourcentage, correspond à la moyenne arithmétique des quatre teneurs en eau obtenues.

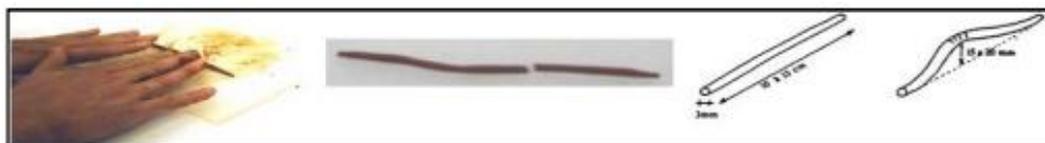


Figure .III.19. La limite de plasticité



Figure.III.20.préparation de l'échantillon

Tableau .III .10. Calculant la limite de plasticité

| | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------|-------|--------|--------|
| Masse totale humide (g) | 9.847 | 10.142 | 27.920 |
| Masse totale sec | 9.577 | 9.841 | 27.740 |
| Masse de la tare (g) | 8.496 | 8.570 | 26.967 |
| Masse de l'eau (g) | 0.081 | 0.301 | 0.180 |
| Masse de sol sec (g) | 0.27 | 1.271 | 0.773 |
| Teneur en eau % | 30 | 23.68 | 23.29 |
| Wp (%) moyenne | 25.65 | | |

Donc :

$$W_P (\%) = 25.65\%$$

c. L'indice de plasticité (Ip)

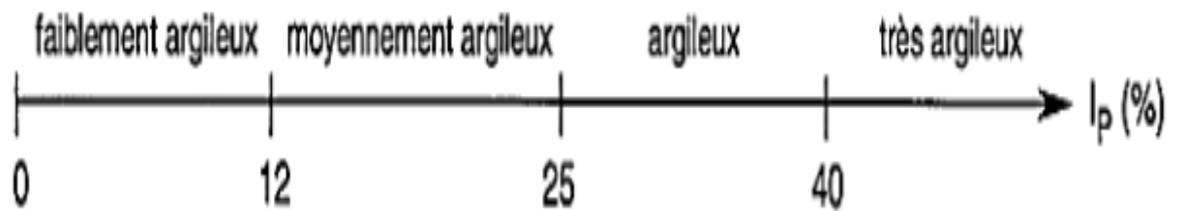
C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité (w_L), qui définit l'étendu du domaine plastique (w_P) d'un sol . cet indice défini l'étendue du domaine plastique.

Avec :

$$I_P = W_L - W_P$$

Il mesure l'étendue du domaine de plasticité, domaine pendant lequel on peut travailler le sol. Il a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique routière.

Le GTR 92 (Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme, 1992) retient pour I_p les seuils d'argilosité suivants

**Tableau .III.11:** Représente détermination l'indice de plasticité

| Limites Atterberg | échantillon |
|-----------------------------------|-------------|
| La limite de liquidité w_l (%) | 42.7 |
| La limite de plasticité w_p (%) | 25.65 |
| L'indice de plasticité I_p (%) | 16.95 |

De ces valeurs, on peut déterminer l'indice de consistance I_c qui permet d'apprécier la consistance des sols plastique en se référant aux plages de valeurs présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.12 : Classification indice de plasticité

| Indice de plasticité | Degré de plasticité |
|----------------------|---------------------|
| $0 < I_p < 5$ | Sol non plastique |
| $5 < I_p < 30$ | Sol peu plastique |
| $30 < I_p < 50$ | Sol plastique |
| $50 < I_p$ | Sol très plastique |

Indice la plasticité : $I_P = w_L - w_P$

$$I_P = 16.95\%$$

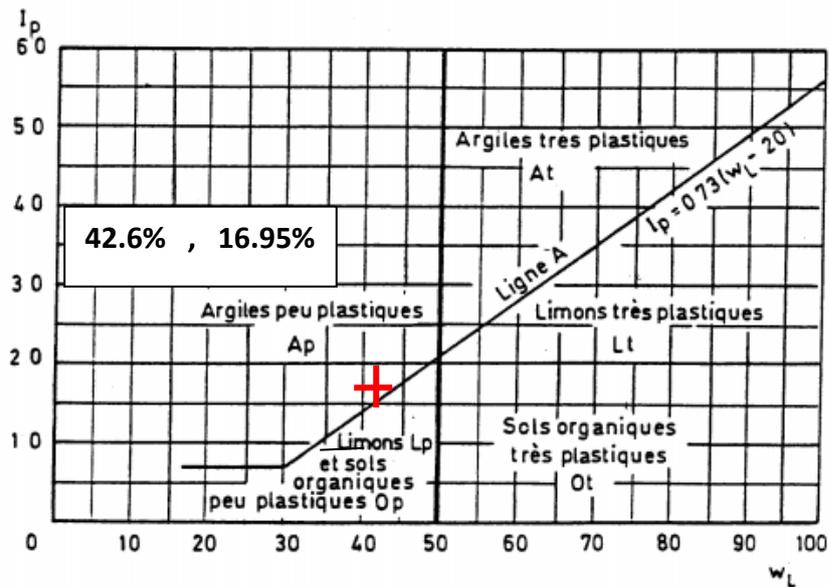


Figure.III.21 : Le matériau argileux est peu plastique situé au dessus de la ligne de A.

Interprétation les résultats :

L'indice de plasticité est égal à 16.95%, donc d'après (Cornell, 1951.et J.M. TCHOUANINANA1999) et l'abaque de Terzaghi on peut dire que le matériau étudié est un sol : Argile peu plastique car :

$$15 < I_p < 40$$

d. L'indice de consistance (Ic)

De ces valeurs, peut être déterminé l'indice de consistance Ic qui permet d'apprécier la consistance des sols plastiques en se référant aux plages de valeurs présentées ci-dessous.

$I_c = (W_L - W) / I_p$ Ce qui donne un indice consistance est 1.20

$$I_c = 1.22$$

L'appréciation de la plasticité de l'argile selon les valeurs des limites d'Atterberg (Abaque de CASAGRANDE), sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.III.13 : Classer l'indice de consistance

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

A partir de ce tableau on déduit que ce matériau argileux est un sol solide $I_c > 1$

Tableau.III.14 : plage de consistance des sols plastique d'après ATTERBERG

| I_c | Appréciation |
|-----------|--------------|
| 0-0.25 | Pâteux |
| 0.25-0.50 | Mou |
| 0.5-0.75 | ferme |
| 0.75-1 | Mi dur |
| >1 | dur |

L'indice de consistance est 1.20 donc d'après ATTERBERG (> 1); De point de vue consistance, c'est une argile dure.

III.4.7. bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche

Cet essai permet de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. L'essai s'effectue sur 70 g de matériau trempé dans 0,5 L de l'eau distillée et maintenu en permanence sous agitation.



Figure III.22: Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche)

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par l'échantillon de sol testé. Plus la fraction argileuse est importante plus elle adsorbe du bleu de méthylène.

Le test permet de repérer l'instant de la saturation au bleu des particules d'argile. On prélève une goutte de liquide contenant le sol imbibé de bleu, que l'on dépose sur un papier filtre spécial.

- ✓ Si la goutte centrale bleu est entouré d'une zone humide incolore le test est négatif, on continue alors le dosage au bleu.
- ✓ Si le test est positif, la zone humide est teintée de bleu c'est-à-dire on arrête le dosage.

La valeur de bleu de sol est donnée par la relation suivante:

$$VBS = Mb/Ms * 100 \text{ avec } Mb = V * 100$$



Figure III.23. Résultats de l'essai à la sur les différents sites étudiés.

Avec :

Mb : la masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g);

Ms : la masse sèche de la prise d'essai (g) ;

V : le volume de solution de bleu utilisée (cm³).

$$VBS = 6.64$$

Le VBS traduit globalement la quantité et la qualité de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol

Ordre e grandeur :

Tableau III.15: Désignation du sol en fonction de son VBS.

| VBS (en grammes de bleu pour 100 g de sol) | Désignation du sol |
|--|-------------------------|
| $VBS \leq 0,2$ | sol sableux |
| $0,2 < VBS \leq 2,5$ | sol limoneux |
| $2,5 < VBS \leq 6$ | sol limoneux - argileux |
| $6 < VBS \leq 8$ | sol argileux |
| $VBS > 8$ | sol très argileux |

Donc le sol testé est sol argileux

III.5. Les essais mécaniques

- Essai Proctor Normal. (NF P94-093)
- Essai oedométrique.

III.5.1. Essai Proctor normal (NF P94-093)

L'essai est réalisé selon la norme française NF P 94-093. L'essai Proctor a pour but de détermination de la teneur en eau optimale pour un sol pour les conditions de compactage fixées, conduisant au mineur compactage possible ou encore à une capacité portante maximale. Dans notre étude l'essai Proctor est réalisée dans le but d'avoir une éprouvette compactée à l'optimum.

Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini dans la norme NF P 94-093. L'échantillon de sol à étudier et à mesure sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

Exécution de l'essai :

Pour l'essai Proctor normal, le remplissage est fait en 03 couches



Figure III.24: Préparation de l'échantillon à l'optimum

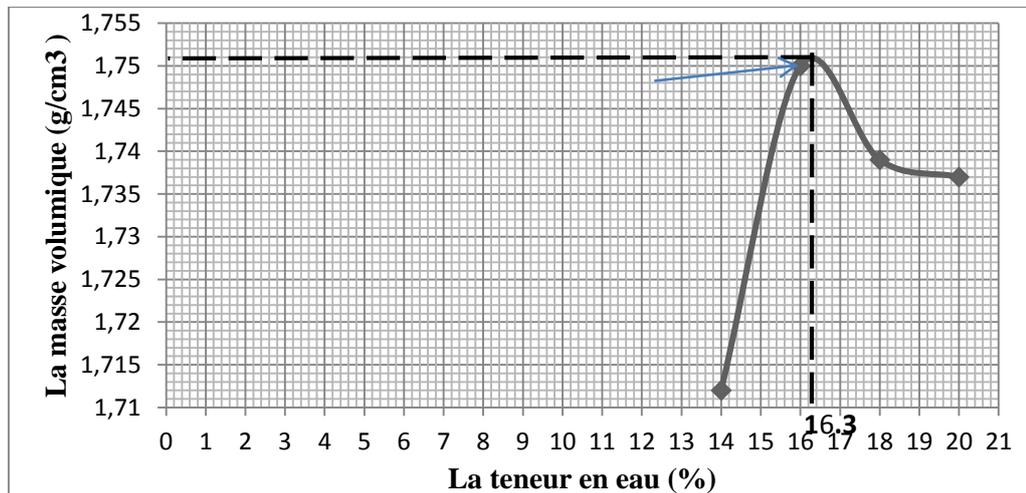


Figure III.25: Déroulement de compactage de l'argile.

Tableau.III.16 : Les résultats de Proctor

| | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Pourcentage d'eau ajouté(%) | 14 | 16 | 18 | 20 |
| Masse de sol humide (g) | 1843 | 1896 | 1919 | 1897 |
| Masse du sol sec (g) | 1617 | 1652 | 1642 | 1640 |
| Masse d'eau (g) | 223 | 244 | 277 | 257 |
| Teneur en eau (%) | 13.97 | 14.76 | 16.86 | 15.67 |
| Densité sèche (g/cm ³) | 1.712 | 1.75 | 1.739 | 1.737 |

De ces résultats on peut tracer la courbe Proctor qui la densité sèche en fonction de la teneur en eau et déterminer ces caractéristiques optimales.

**Figure .III.26:** courbe Proctor normal

En constate que la densité sèche optimale maximale égale 1.751 g/cm³ et la teneur en eau optimale est de 16.3%.

III.5.2.Essai œdométrique (NF P94-090-1)

Cet essai, couramment appeler essai oedométrique, traduit dans la pratique l'idée qui vient à l'esprit quand on veut mesurer la compressibilité d'un matériau : on applique une charge plus forte et l'on recommence les observations, etc. l'interprétation de l'essai consiste à tracer la courbe donnant la variation de l'indice des vide de l'éprouvette en fonction de la contrainte appliquée : C'est la courbe de compressibilité oedométrique ou courbe oedométrique. (Magnan, 2000)

Principe de l'essai

L'échantillon saturé est placé dans une éprouvette cylindrique qui présente des déformations latérales nulle et drainée sur les deux faces intérieures par l'intermédiaire des pierres poreuses. Les déformations verticales ou tassements de l'échantillon après chargement sont mesurés à l'aide d'un comparateur (1/100 de mm). Les charges sont appliquées sur un piston par l'intermédiaire d'un bras de levier. Le chargement s'effectue par paliers lorsque le tassement correspondant au premier palier est stabilisé.

Les caractéristiques obtenues à l'oedomètre

L'essai oedométrique permet de déterminer

- L'indice des vides initial avant la réalisation de l'essai et son évolution au cours de la consolidation.
- Les principaux paramètres d'identification à savoir : la teneur en eau initiale, le poids volumique initial et le poids volumique du sol sec.
- Les paramètres de compressibilité : indice de compression, indice de gonflement et la contrainte de pré consolidation.

➤ L'indice des vides

L'indice des vides être calculé par deux méthodes, l'une nécessite la connaissance du poids volumique des grains solides ; et l'autre est basée sur la connaissance du poids volumique de l'échantillon sec et du poids volumique initial humide de l'éprouvette.

$$e = \frac{h - h_p}{h_p}$$

Avec :

h: hauteur de l'échantillon au moment considéré.

h_p : hauteur équivalente du solide ou hauteur des grains solide. Dans la première méthode l'expression de

h_p est donnée par la relation (1), par contre dans la seconde, elle est donnée par la relation (2) :

$$h_p = \frac{m_s}{\rho_s \times S}$$

Avec :

m_s : Masse de l'échantillon sec.

ρ : Masse volumique des grains solides.

S : section droite de l'enceinte.

$$h_p = H_0 - \frac{m_h - m_s}{\rho_s \times S}$$

Avec :

H_0 : hauteur initiale de l'échantillon.

m_h : Masse initiale humide de l'échantillon.

m_s : Masse de l'échantillon sec.

ρ_w : Masse volumique de l'eau (1 g/cm³).

S : section droite de l'enceinte.

➤ Paramètres d'identification

L'échantillon soumis à l'essai œdométrique sera caractérisé par les paramètres suivants :

Teneur en eau initiale de l'échantillon : $W = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$

Masse volumique initiale du sol sec : $\rho_d = \frac{m_s}{H_0 \times S}$

Masse volumique initiale : $\rho = \frac{W_h}{H_0 \times S}$

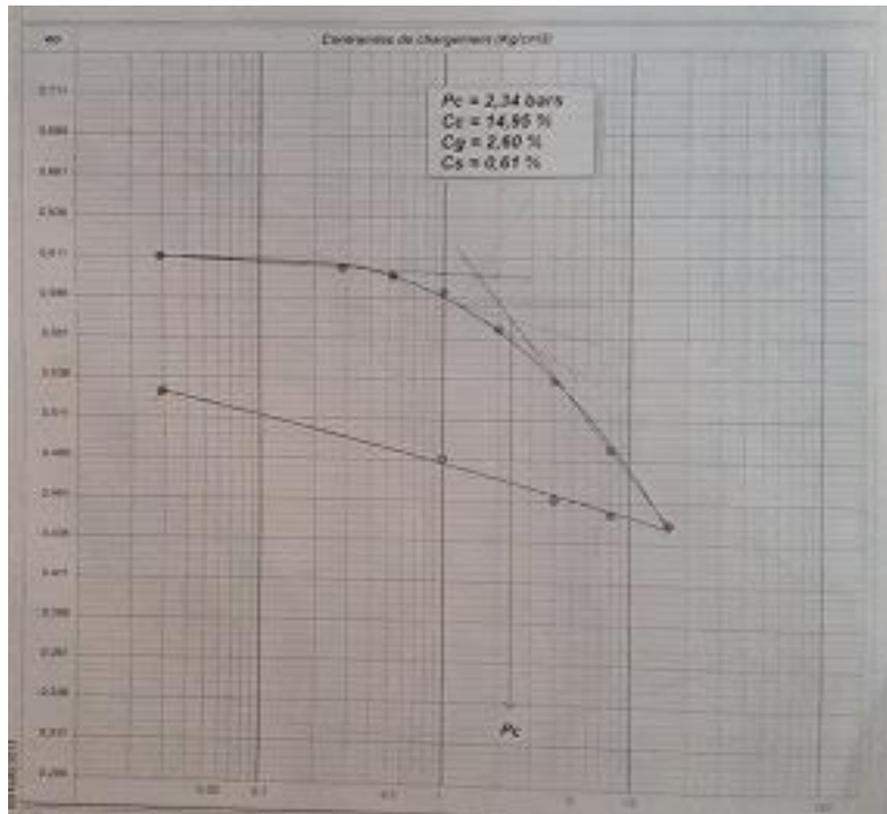
- Une cellule ou enceinte œdométrique de consolidation : moule cylindrique rigide empêche toute déformations radiale lors des essais.



Pierres poreuses (LCTP)



Figure III.27. Déroulement de l'essai œdométrique



D'après les résultats de la courbe obtenue de l'oedométrie le coefficient de compression C_c égale à 14.95 % et l'indice de gonflement C_g égale à 2.60%. On classe l'échantillon suivant les tableaux suivants :

| Cc | Appréciation |
|-----------------|--------------------------|
| <0.02 | incompressible |
| 0.02.0.05 | Très peu compressible |
| 0.05.0.1 | peu compressible |
| 0.1.0.2 | Moyennement compressible |
| 0.2.0.3 | Assez compressible |
| 0.3.0.5 | Très compressible |
| >0.5 | Extrêmement compressible |
| D'après TERZGHI | |

Tableau III.17 : Classification indice de compressibilité selon Terzaghi

| Cg | Appréciation |
|-------------------|---------------------|
| 0.04.0.25 | gonflant |
| 0.2.0.04 | Peu gonflant |
| D'après SANGLERAT | |

Tableau III.18 : Classification indice de gonflement selon Sanglerat

III.6. Tableau Récapitulatif des résultats

Les résultats obtenus pour le sol étudié sont résumé dans le tableau suivant :

Tableau III.19. Caractéristiques d'identification du sol

| paramètre | valeurs |
|---|---------|
| Teneur en eau (%) | 21.79 |
| Masse volumique humide ρ_h (g/cm ³) | 1.93 |
| Masse volumique des particules solide ρ_s (g/cm ³) | 2.699 |
| W_L (%) | 42.2 |
| W_p (%) | 25.65 |
| I_p (%) | 16.95 |
| I_c (%) | 1.21 |
| Tamisats 80 μm (%) | 93 |
| Tamisats 2 μm (%) | 34 |
| VBS (gr/100g de sol) | 6.63 |
| Masse volumique sèche max ρ_d (g/cm ³) | 1.751 |
| Indice des vides e (%) | 69.81 |
| La Porosité (%) | 41.11 |
| Densité des particules solides (ρ_s) | 1.59 |
| Degré de saturation S_r (%) | 83.68 |
| Gonflement vertical (%) | 2.57 |

D'après ces caractéristique, Les particules ayant un diamètre inférieur à 80 μm est 91 %, Les particule ayant un diamètre inférieur a 2 μm est 34%, l'indice de plasticité I_p est de 18.83 % et la valeur de bleu VBS est de 6.63 (gr/100g de sol)

D'après les tableaux (III.21, III.22) on peu déduire que notre sol est moyennement gonflant

Tableau III.20. Potentiel de gonflement d'après[le Building Research Establishment BRE (1980)]

| IP (%) | % < 2 μm | Potentiel de gonflement |
|--------|---------------------|-------------------------|
| >35 | >95 | Très élevé |
| 22-35 | 60-95 | Elevé |
| 18-22 | 30-60 | Moyen |
| <18 | < 30 | Faible |

Tableau III.21. Classification du gonflement d'après [Dakshanamurthy et Raman (1973)]

| Limite de liquidité W_L | Classification |
|---------------------------|-----------------------|
| 0-20 | Non gonflant |
| 20-35 | Gonflement faible |
| 35-50 | Gonflement moyen |
| 50-70 | Gonflement élevé |
| 70-90 | Gonflement très élevé |
| >90 | Gonflement critique |

III.6. Conclusion

Il nous a été possible de caractériser l'échantillon prélevé dans une zone située au lotissement Mokadem en contre-bas de l'établissement de rééducation et de réadaptation de la commune de Tizi-Ouzou.

- D'après les résultats de l'analyse chimique, le taux de carbonates (CaCO_3) est de 17.24 % ce qui nous permet de classer notre sol comme étant une argile marneuse.
- L'analyse granulométrique réalisée donne un pourcentage des passants à 80 μm égale à 91 %. Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine de classe A3 selon la classification GTR
- La valeur au bleu VBS est égale à 6.64, D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol argileux
- les résultats de l'indice de plasticité ($I_p = 16.95\%$) indiquent que le sol étudié est un sol peu plastique.

IV. 1 INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre une partie des résultats expérimentaux obtenus à partir des essais effectués au laboratoire afin de préciser le comportement hydrique de l'argile soumise à un cycle de séchage-humidification en utilisant une méthode d'imposition qui est la méthode des solutions salines saturées et une méthode de mesure par le papier filtre. Les échantillons sont préparés dans deux états initiaux, sous forme de pâte et compactés à l'optimum Proctor. Une étude des différents paramètres d'état (e , S_r , w) en fonction de la pression interstitielle négative (suction) sera menée. Dans un premier temps nous allons détailler le mode opératoire de chaque méthode et les étapes de la réalisation de chaque essai. Ces derniers portent sur des échantillons sous forme de pâte puis sur les échantillons compactés à l'optimum Proctor (OPN). Pour finir, une comparaison des résultats obtenus sur les deux formes d'échantillons sera faite.

IV.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

IV.2.1. Mesure de la suction initiale par la méthode du papier filtre

La méthode du papier filtre est une méthode de mesure de la pression interstitielle négative dans le sol, elle permet de mesurer la suction matricielle (lorsque le papier filtre est en contact direct avec l'échantillon) et également la suction totale.

IV.2.1.1. Essai de mesure de la suction avec la méthode du papier filtre

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la suction, on a utilisé dans ce travail, la technique de papier filtre (**Whatman n° 42**) papier filtres, (figure IV.1)



Figure IV.1 : Papier filtre Whatman N°42

L'essai est réalisé au laboratoire pédagogique à l'université de Mouloud Mammeri (MDS), selon la norme anglaise (D5298- 03). On a utilisé le papier filtre **Whatman N° 42**, dont la courbe d'étalonnage fait objet de la figure....

IV.2.1.2. Déroulement de l'essai

- **Mesure de la succion matricielle**

La mesure de la succion matricielle à l'aide du papier filtre (ASTM D 5298-94) est réalisée selon le protocole suivant :

- Du matériau (argile) compacté à l'OPN, préparer une éprouvette de 2 cm de hauteur, de forme cylindrique ($\varnothing = 5$ cm) ;
- Diviser l'éprouvette en deux couches égales ;
- Insérer trois papier filtre secs entre les deux parties de l'échantillon (sandwich, figure IV.2), filmer l'ensemble et mettre dans une boîte hermétique.
- attendre jusqu'à ce que l'équilibre hydrique soit atteint entre le sol et le papier filtre (15 jours) pour extraire le papier filtre central ;
- Procéder à la mesure de la teneur en eau de l'échantillon et du papier filtre central ;



Figure. IV.2.préparation de l'échantillon de la succion matricielle (sandwich)

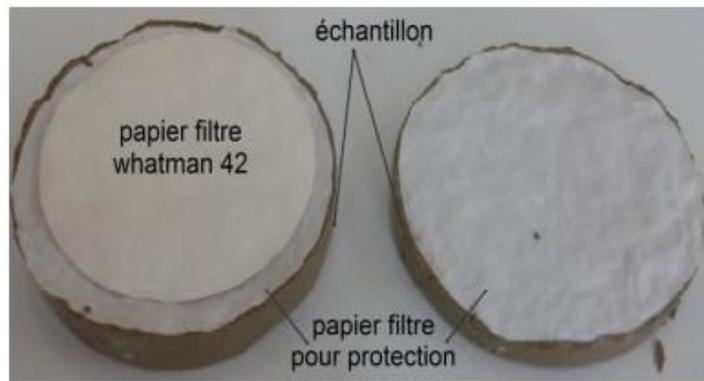


Figure IV.3 : Disposition des papiers filtre pour la mesure de la succion matricielle.

➤ **Calcul de la teneur en eau de papier filtre pour la mesure de la succion matricielle**

Tableau VI.1 : Résultat de mesure de la teneur en eau de papier filtre (Watnman42).

| Echantillon | 01 | 02 |
|---------------------------------------|---------------|--------|
| La masse de papier filtre initial (g) | 0.635 | 0.635 |
| La masse humide de papier filtre (g) | 0.806 | 0.787 |
| La masse sèche de papier filtre (g) | 0.621 | 0.608 |
| La teneur en eau de papier filtre (%) | 29.790 | 29.440 |
| La teneur en eau moyenne (%) | 29.615 | |

➤ **Détermination de la teneur en eau de l'argile**

Les résultats de la mesure de la teneur en eau de la l'argile sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : Résultat de la mesure de la teneur en eau de l'argile.

| Echantillon | 01 | 02 |
|-----------------------------------|--------|--------|
| La masse initiale de l'argile (g) | 727.6 | 698.1 |
| La masse humide de l'argile (g) | 724.4 | 697.3 |
| La masse sèche de l'argile (g) | 631.9 | 612.7 |
| La teneur en eau (%) | 13.055 | 13.807 |
| La teneur en eau moyenne (%) | 13.43 | |

Après avoir calculé la teneur en eau de papier filtre et celle de l'échantillon on détermine la succion matricielle correspond du papier filtre qui n'est autre que celle du sol. Évaluée en utilisant la courbe d'étalonnage (ASTM D-5298-94).

- **Mesure de la succion totale**

Pour mesurer la succion totale du sol, nous pouvons soit placer le papier filtre sur une rondelle en plastique (joint torique) qui repose sur l'échantillon afin d'éviter le contact, soit le suspendre à l'intérieur de l'enceinte hermétique dans laquelle l'échantillon est placé. L'équilibre hydrique entre l'échantillon et le papier filtre est atteint au bout de 15 jours.

**Figure IV.4:** Détermination du poids du papier filtre



Figure IV.5: Disposition de joints entre le papier filtre et l'échantillon



Figure IV.6: Dispositif de conservation

Détermination de la teneur en eau papier filtre

Tableau 3 : Résultat de mesure de la teneur en eau de papier filtre et de l'argile :

| Echantillon | 01 |
|--|---------------|
| Masse humide de l'échantillon (g) | 304.924 |
| Masse sèche de sol l'échantillon (g) | 261.154 |
| La masse d'eau adsorbée | 43.77 |
| La teneur en eau de l'échantillon (g) | 16.760 |
| La masse initiale de papier filtre (g) | 0.468 |
| La masse humide de papier filtre (g) | 0.569 |
| La masse d'eau absorbée par le papier filtre (g) | 0.101 |
| La masse sèche de papier filtre (g) | 0.451 |
| la teneur en eau du papier filtre(g) | 26.164 |

Après avoir calculé les différents teneurs en eau on détermine la succion à partir de la courbe d'étalonnage du papier filtre. Il s'agit de déterminer la succion en fonction de la teneur en eau évaluée.

IV.2.1.3. Détermination des succions initiales totale et matricielle

C'est une méthode simple elle a pour but de mesurer la succion initiale dans le sol à l'aide d'un papier filtre Wayhmane N⁰42, il est caractérisé par la courbe d'étalonnage (succion en fonction de la teneur en eau de papier filtre)

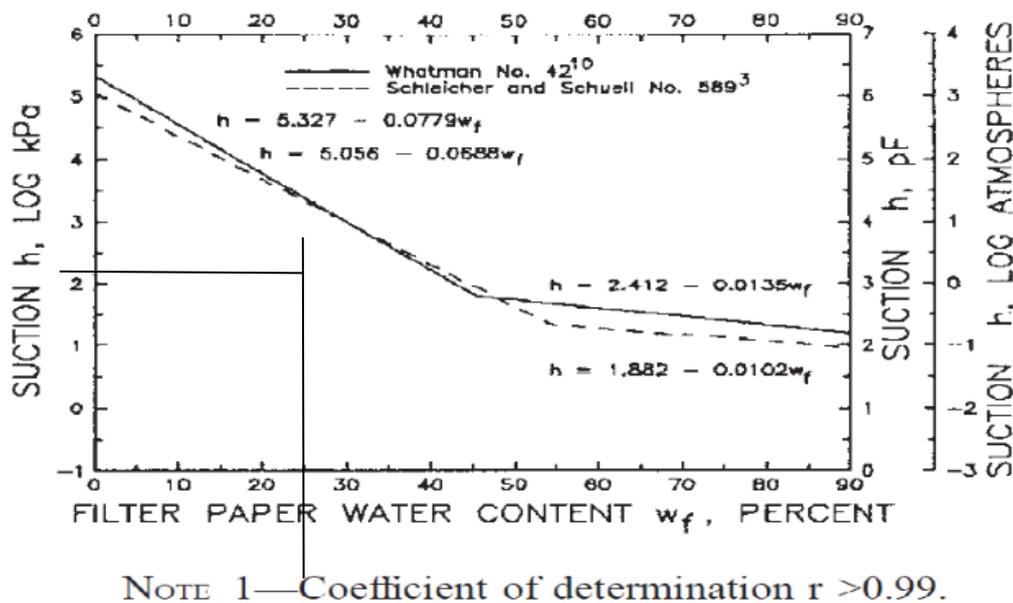


Figure IV.7 : Courbe d'étalonnage du papier filtre (wathman N⁰42)

La courbe d'étalonnage du papier filtre diffère selon qu'il s'agisse de papier filtre initialement sec ou humide. Lee et Wray (1995), Amraoui (1996), et Chaouch (2001) signalent différentes corrélations entre la succion (kPa) et la teneur en eau w_f (%) du papier filtre Whatman n^o42. la norme américaine (ASTM D-5298-94)

➤ On projet la valeur de papier filtre sur la courbe d'étalonnage du papier filtre on trouve la valeur de la succion totale est 1944.57 KPa et la succion matricielle est de 1047.11 KPa.

IV. 2.2. Méthode d'imposition des solutions salines : $u_C > 1500$ KPa

L'étude du comportement séchage humidification des sols intacts requiert l'utilisation de dispositifs expérimentaux permettant d'imposer la succion dans une très large gamme, entre zéro (0) et plusieurs centaines de (MPa). Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire

d'employer au moins deux techniques d'imposition. Dans le cadre des essais qui seront présentés dans ce mémoire, la méthode des solutions salines ont été sélectionnées (Olivier cuisinier 2002).

IV. 2.2.1. Technique de contrôle par phase vapeur (technique des solutions salines saturées)

La méthode des solutions salines est généralement utilisé pour l'imposition de succion allant de quelques MPa jusqu'à des centaines de MPa. Elle est basée sur la loi de Kelvin :

$$S = \rho_w (\rho_w * R * T / M_v) \ln H_r$$

Avec :

R : la constante des gaz parfaits

M_v : est la masse molaire de la vapeur l'eau

H_r : est l'humidité relative de l'air

ρ_w : la masse volumique de l'eau liquide à la température T

✓ La concentration des solutions salines saturées préparées au niveau de laboratoire pédagogique (MDS) sont présenté dans le tableau suivant :

Tableau .VI .5. Concentrations des solutions salines utilisées

| Nombre | Solution saline | Succion(MPA) |
|--------|--------------------------------|--------------|
| 1 | ZnSO ₄ | 12.6 |
| 2 | Mgcl ₂ | 156.22 |
| 3 | KOH | 326 |
| 4 | H ₂ SO ₄ | 500 |
| 5 | K ₂ CO ₃ | 113.2 |

- **Principe de l'essai :**

Le principe général de cette méthode consiste à placer un échantillon du sol dans une enceinte hermétique (appelée dessiccateur) contenant une solution saline saturée. A l'intérieur du dessiccateur, le taux d'humidité relative de l'air H_r est fixé par la solution saline saturée selon la loi de Kelvin. (BOUROKBA MRABENT Souad Amel 2011)

La solution est imposée sur l'échantillon par l'intermédiaire de l'humidité relative de l'air, H_r . Au-dessus d'une solution saline saturée, l'humidité relative de l'air H_r , est définie comme étant le rapport entre la pression de la vapeur d'eau en équilibre avec la solution saline P_v , et la pression de la vapeur saturante, P_{vs} :

$$H_r = [P_v / P_{vs} (T)]$$

La valeur de H_r dépend à la fois de la solution employée (sel et concentration) et de la température.

Vu que le nombre des dessiccateurs disponibles dans laboratoire de mécanique des sols, est insuffisant pour manipuler le nombre important des échantillons, on a utilisé cinq solutions pour réaliser l'essai



Figure VI.8. Mise en œuvre de la méthode des solutions salines saturées.

➤ **Protocole de préparation des échantillons :**

Deux séries d'essais d'humidification/drainage sont effectuées. Les états initiaux des échantillons sont les suivants :

1. **Première série d'essais :** Il s'agit de l'utilisation du matériau sous forme de pâte, dont la teneur en eau W est comprise entre $1,2W_L$ et $1,5W_L$.

Pour préparer l'échantillon sous forme de pâte ($w = 1.5 w_L$), on pèse une portion suffisante du matériau ($M = 200$ g), puis on la malaxe avec une quantité d'eau distillée nécessaire à l'obtention de la teneur en eau désirée (Figure.IV.9).



Figure VI. 9 : préparation de la pâte

Remarque : Pour faire parcourir un chemin d'humidification au matériau sous forme pâte, la moitié des échantillons préparée à base de celle-ci seront mis à l'étuve pendant 24h.

Le reste des échantillons seront utilisés pour leur faire parcourir un chemin de séchage.

Chemin humidification : les échantillons sont préparés à partir d'une teneur en eau qui vaut 1.5 fois la limite de liquidité puis mettre la pâte saturée à l'étuve à une température de 105°C avant de la mettre dans le dessiccateur ;

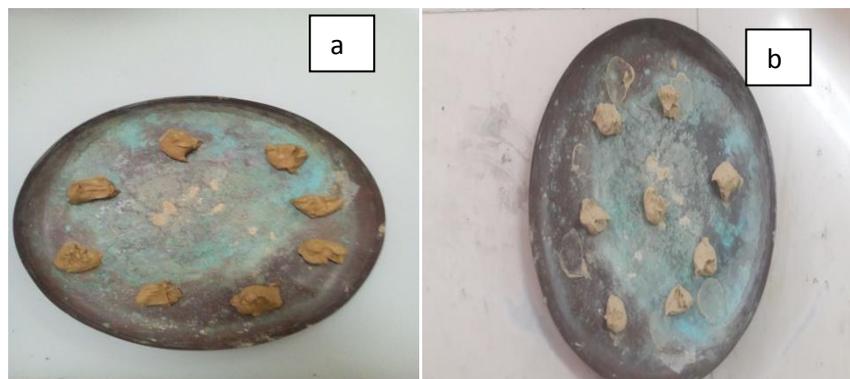


Figure VI. 10 : l'échantillon humidification est séchage. a. Pâte humide ; b. Pâte étuvée

Chemin séchage : les échantillons sont préparés à partir d'état d'une pâte puis mettre la pate saturée tel quel est ($W = 1.5W_i$), Mettre les échantillons sur la grille du dessiccateur ;

2. **Deuxième série d'essai** :) Les échantillons issus du matériau compacté ($\gamma_d = 1.751$ $W_{OPN} = 16.40\%$), sont disposés dans les dessiccateurs pour suivre soit un chemin de séchage ou d'humidification (selon le niveau de succion initiale de l'échantillon relativement à la succion imposée dans le dessiccateur).

✓ Bien sceller les dessiccateurs afin que l'air ambiant n'y pénètre pas (aucun échange d'air avec le milieu extérieur).

- Une fois l'équilibre est atteint, on détermine les paramètres d'état de l'échantillon (e , w , S_r) par la pesées immergées dans le KERDANE

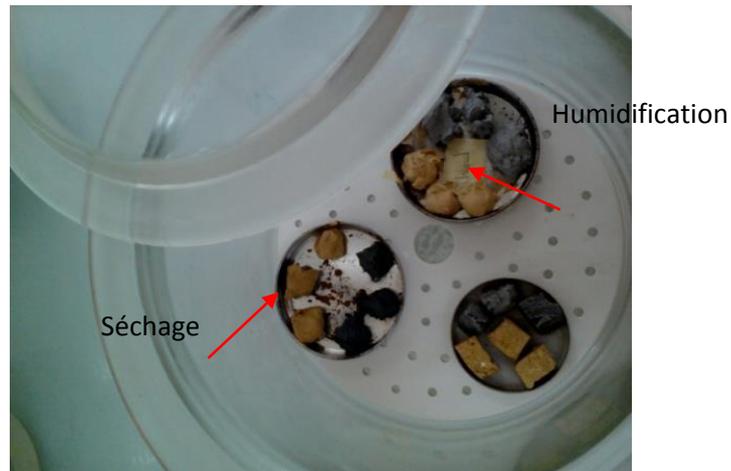


Figure IV.11 : Dispositif des échantillons dans les dessiccateurs

IV. 2.2.2. Evaluation de l'équilibre des succions.

La fin des échanges par phase vapeur entre les échantillons et les solutions salines saturées, représente la phase d'équilibre des succions qui est évaluée par la stabilisation des masses des échantillons. Les variations des masses sont suivies par intervalle de 5 jours pendant une durée totale de 48 jours. Cette durée des essais a été suffisante pour remarquer la stabilisation de la masse des échantillons dans les dessiccateurs, telle que le traduit la courbe de la figure suivante (Figure IV.11-12-13).

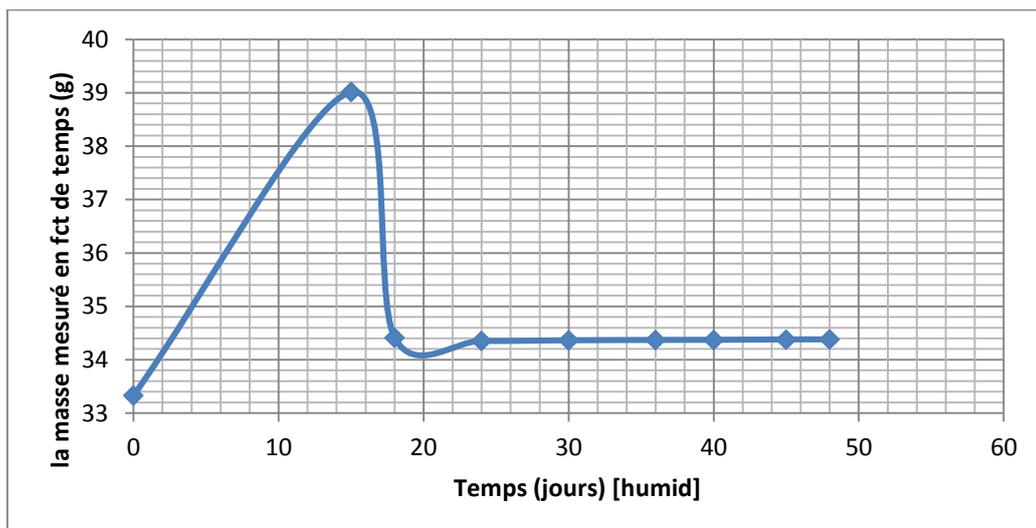


Figure IV.12 : Variation de la masse de l'échantillon humide en fonction de temps, (solution $MgCl_2$)

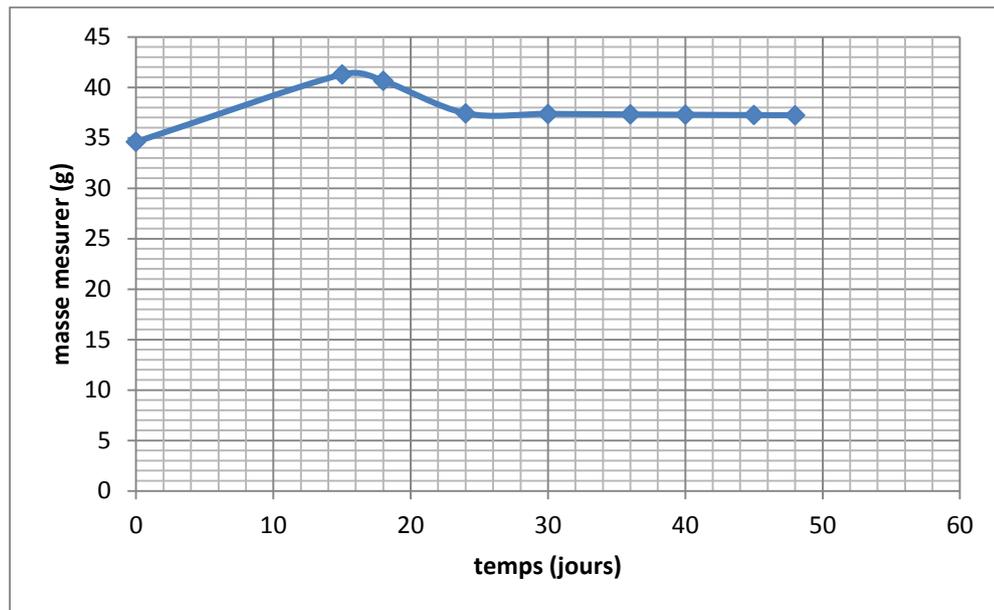


Figure IV.13: courbe de mesure de la masse humide dans la suction SO₄, en fonction de temps.

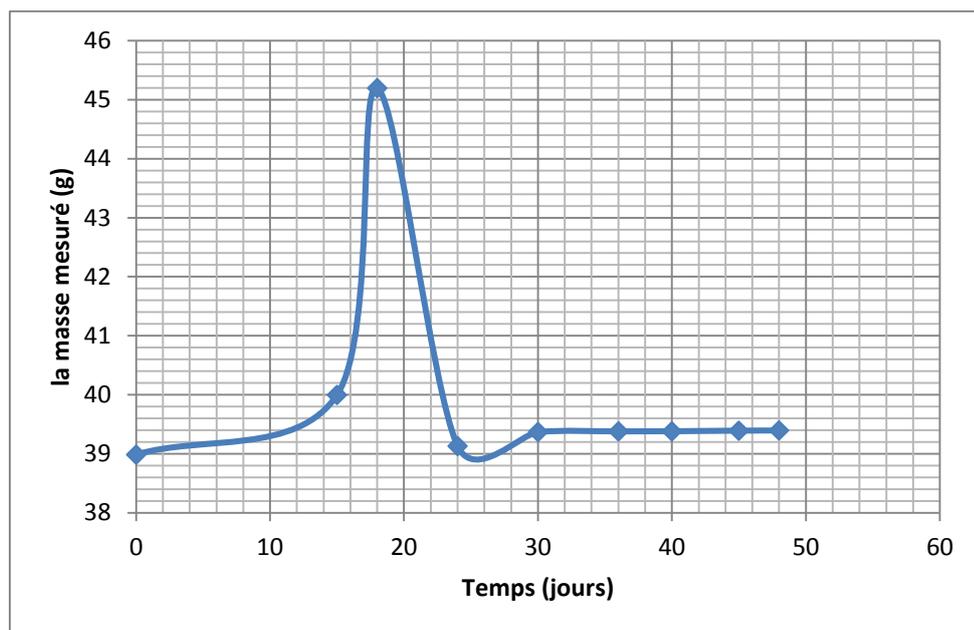


Figure IV.14 : courbe de la masse humide mesurée en fonction de temps.

IV.2.2.4. Détermination des paramètres d'état

La présentation des chemins de drainage humidification nécessite la connaissance des paramètres d'état des différents échantillons, à savoir : teneur en eau, degré de saturation et indice des vides, qui sont déterminés par pesée immergée dans une huile non mouillante utilisée pour remplir les gros pores sans gonfler l'échantillon (essai destructif). Cette méthode a été dérivée par Zerhouni (1991) de celle décrite par Tessier (1975).

L'huile utilisée est généralement du Kerdane dont la densité γ_k/γ_w est de l'ordre de 0,78. Cette huile est non miscible avec l'eau et s'évapore à l'étuve à 105°C.

Vu que la masse volumique du Kerdane dépend de la température, on doit calculer d'abord la masse volumique de Kerdane.

Le principal inconnu est le volume de l'échantillon, sa détermination permettra de déduire les autres paramètres. On procédera par pesée hydrostatique dans une huile non mouillante qui est le Kerdane (pétrole lampant).

• Détermination de la masse volumique de KERDANE

La masse volumique de Kerdane est déterminé au laboratoire à partir de la formule

$$\gamma_K = \frac{MK}{V}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6: Résultats de la mesure de la masse volumique de kerdane

| Echantillon | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|--------|-------|
| La masse de Kerdane (g) | 7.860 | 11.912 | 3.745 |
| Le volume de kerdane(cm ³) | 10 | 15 | 5 |
| La masse volumique (g/cm ³) | 0.786 | 0.794 | 0.49 |
| La masse volumique moyenne (g/cm ³) | 0.776 | | |

On remarque que la masse volumique de huile cité par Zerhouni (1991), et celle mesurer sont dans la marge **d'erreur de 10⁻³ g (0.04)**.

Après avoir atteint l'équilibre, et calculer la masse volumique de Kerdan, on suit les étapes ci- après :

- Peser les échantillons avec une balance de précision 10⁻³ g ;
- Immerger l'échantillon dans du Kerdan, afin que les pores superficiels se remplissent ;
- Peser l'échantillon dans le Kerdane P_{imm} (poids immergé) ;
- Peser l'échantillon une seconde fois P_{hk} (poids humide + poids absorbé ; du Kerdane) après l'avoir essuyé pour retirer le surplus d'huile ;

- Mettre à l'étuve les échantillons après immersion à l'étuve 24 h (105°C) pour obtenir le poids sec ;
- Calcul le volume total de l'échantillon avec la formule suivante :

$$V = \frac{P_{hk} - P_{imm}}{\gamma_k}$$

Avec : $\gamma_k / \gamma_w = 0.776$ (densité du kerdane)

Donc on peut prendre les masse des échantillons et réalisé la pesée hydrostatique pur déterminer les paramètres d'état, le protocole de la pesée hydrostatique est détaillé sur les figure ci-dessous :



Figure IV.15 : on enlève l'échantillon après stabilisation



Figure IV.16: on pèse l'échantillon humide (après extraction des dessiccateurs)



Figure IV.17 : immersion les échantillons dans le Kerdane



Figure IV.18 : Pesée hydrostatique des échantillons



Figure IV.19 : Peser l'échantillon après l'avoir essuyé avec du papier adsorbant



Figure IV.20 : Etuvage des échantillons (105°C).

Après l'étuvage complet des échantillons immergés on calcule la masse sèche des échantillons pour pouvoir calculer les paramètres d'état (la teneur en eau, le degré de saturation et l'indice des vides).

- **Détermination des paramètres d'état**

- Calcul de la teneur en eau (NF P-94 050)
- Calcul le volume total
- Calcul l'indice des vides
- Calcul le degré de saturation

Les autres paramètres (W , e , S_r) sont déduits à l'aide des relations élémentaires de la mécanique des sols.

Les résultats obtenus pour les calculs après l'étuvage complet des échantillons sont présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Récapitulatif des résultats des paramètres d'états mesuré

| Sel | Succion | Etat | N | Mh | (Mh+K)im | Mh+K | Ms | W (%) | γ_b | γ_d | e | Sr |
|-------|---------|-----------|--------------|-------|----------|-------|-------|-------|------------|------------|-------|-------|
| ZNSO4 | 12600 | Compactée | 1 | 5,225 | 3,328 | 5,325 | 4,735 | 10,35 | 13,32 | 18,05 | 0,50 | 56,35 |
| | 12600 | | 2 | 4,33 | 3,141 | 5,016 | 4,472 | 10,24 | 20,02 | 18,16 | 0,43 | 56,77 |
| | 12600 | | 3 | 5,155 | 3,285 | 5,248 | 4,658 | 10,67 | 13,33 | 18,06 | 0,43 | 58,23 |
| HSCO3 | 113200 | Compactée | 1 | 5,141 | 3,036 | 5,502 | 4,332 | 4,24 | 15,87 | 15,23 | 0,77 | 14,73 |
| | 113200 | | 2 | 5,681 | 3,428 | 6,04 | 5,465 | 3,95 | 16,56 | 15,93 | 0,70 | 15,35 |
| | 113200 | | 3 | 5,311 | 3,567 | 5,66 | 5,108 | 3,97 | 13,32 | 18,58 | 0,45 | 23,67 |
| Mgcl2 | 156220 | Compactée | 1 | 5,18 | 3,486 | 5,545 | 5,018 | 3,23 | 19,15 | 18,55 | 0,46 | 19,14 |
| | 156220 | | 2 | 4,563 | 3,08 | 4,832 | 4,426 | 3,10 | 19,17 | 18,53 | 0,45 | 18,43 |
| | 156220 | | 3 | 3,738 | 2,552 | 4,031 | 3,68 | 3,21 | 19,55 | 18,34 | 0,43 | 20,35 |
| koh | 326000 | Compactée | 1 | 6,31 | 4,337 | 6,341 | 6,277 | 0,53 | 18,45 | 18,35 | 0,47 | 3,01 |
| | 326000 | | 2 | 4,563 | 3,143 | 5,016 | 4,54 | 0,51 | 18,61 | 18,51 | 0,46 | 2,38 |
| | 326000 | | 3 | 3,396 | 2,716 | 4,313 | 3,353 | 0,33 | 19,05 | 18,87 | 0,43 | 5,86 |
| H2SO4 | 500000 | Compactée | 1 | 3,323 | 2,587 | 4,111 | 3,853 | 1,81 | 13,63 | 19,28 | 0,40 | 12,22 |
| | 500000 | | 2 | 3,741 | 2,587 | 4,32 | 3,638 | 1,16 | 16,43 | 16,24 | 0,66 | 4,74 |
| | 500000 | | 3 | 5,063 | 3,476 | 5,614 | 5,016 | 0,34 | 18,03 | 17,86 | 0,51 | 4,34 |
| ZNSO4 | 12600 | Séchage | 1 | 4,295 | 2,33 | 4,63 | 3,387 | 1,73 | 18,58 | 17,25 | 0,57 | 36,87 |
| | 12600 | | 2 | 3,835 | 2,664 | 4,2 | 3,564 | 3,23 | 13,30 | 17,66 | 0,53 | 47,44 |
| | 12600 | | 3 | 4,583 | 3,135 | 5,001 | 4,153 | 10,50 | 18,72 | 16,34 | 0,53 | 47,75 |
| H2CO3 | 113200 | Séchage | 1 | 5,296 | 3,511 | 5,613 | 5,031 | 4,03 | 13,13 | 18,38 | 0,47 | 23,20 |
| | 113200 | | 2 | 4,651 | 3,113 | 4,353 | 4,462 | 4,24 | 13,24 | 18,46 | 0,46 | 24,72 |
| | 113200 | | 3 | 4,484 | 2,982 | 4,757 | 4,323 | 3,58 | 13,23 | 18,57 | 0,45 | 21,28 |
| | 156220 | | 1 | 4,27 | 2,347 | 4,87 | 4,156 | 2,74 | 12,88 | 12,54 | 1,15 | 6,42 |
| | 156220 | | 3 | 4,098 | 2,525 | 4,336 | 4,016 | 2,04 | 16,67 | 16,34 | 0,65 | 8,45 |
| | 326000 | | 1 | 4,235 | 2,33 | 4,63 | 4,275 | 1,85 | 18,58 | 18,43 | 0,46 | 10,85 |
| KOH | 326000 | Séchage | 2 | 3,835 | 2,664 | 4,2 | 3,853 | 0,33 | 13,30 | 13,13 | 0,41 | 6,12 |
| | 326000 | | 3 | 4,583 | 3,135 | 5,001 | 4,542 | 1,03 | 18,72 | 18,53 | 0,46 | 6,11 |
| | 500000 | | Séchage | 1 | 5,373 | 3,683 | 5,883 | 5,375 | 0,07 | 18,56 | 18,55 | 0,46 |
| H2SO4 | 500000 | | 2 | 3,843 | 2,336 | 3,843 | 3,833 | 0,10 | 20,22 | 20,20 | 0,34 | 0,84 |
| | 12600 | | 1 | 4,305 | 2,304 | 4,736 | 3,838 | 10,44 | 17,83 | 16,20 | 0,67 | 42,27 |
| | 12600 | | Humidificati | 2 | 3,571 | 2,405 | 3,813 | 3,213 | 11,14 | 13,31 | 17,37 | 0,55 |
| | 12600 | | 3 | 3,574 | 2,417 | 3,828 | 3,201 | 11,65 | 13,28 | 17,27 | 0,56 | 55,84 |
| | 113200 | | 1 | 4,862 | 3,231 | 5,236 | 4,675 | 4,00 | 18,46 | 17,75 | 0,52 | 20,72 |
| | 113200 | | Humidificati | 2 | 4,042 | 2,63 | 4,352 | 3,856 | 4,82 | 18,51 | 17,66 | 0,53 |
| | 113200 | | 3 | 5,253 | 3,502 | 5,66 | 5,01 | 4,37 | 18,55 | 17,67 | 0,53 | 25,43 |
| | 156220 | | 1 | 5,06 | 3,41 | 5,41 | 4,356 | 2,10 | 13,26 | 18,86 | 0,43 | 13,14 |
| | 156220 | | Humidificati | 2 | 4,47 | 2,33 | 4,756 | 4,383 | 1,85 | 13,27 | 18,32 | 0,43 |
| | 156220 | | 3 | 4,2 | 2,83 | 4,531 | 4,131 | 1,67 | 18,16 | 17,86 | 0,51 | 8,81 |
| | 326000 | | 1 | 4,305 | 2,304 | 4,736 | 4,272 | 0,77 | 17,83 | 17,75 | 0,52 | 4,00 |
| | 326000 | | Humidificati | 2 | 3,571 | 2,405 | 3,813 | 3,542 | 0,82 | 13,31 | 13,15 | 0,41 |
| | 326000 | | 3 | 3,574 | 2,417 | 3,828 | 3,543 | 0,70 | 13,28 | 13,15 | 0,41 | 4,64 |
| | 500000 | | 1 | 4,607 | 3,136 | 5,035 | 4,583 | 0,33 | 17,30 | 17,83 | 0,51 | 2,06 |
| | 500000 | | Humidificati | 2 | 4,637 | 2,332 | 4,764 | 4,621 | 0,35 | 13,27 | 13,20 | 0,41 |
| | 500000 | | 3 | 4,321 | 3,181 | 5,152 | 4,233 | 0,51 | 16,63 | 16,60 | 0,63 | 2,21 |

La détermination des paramètres d'état nous permis de dessiner les cinq plans

Chemin séchage-humidification sur une pâte

Les résultats obtenus de l'étude du chemin séchage- humidification sur une argile de tizi Ousou sous forme de pâte ($W = 1.5W_L$) avec $W_L = 42.2\%$) a permis de tracer les courbes dressées sur la figure (IV-21).

Dans le plan A= [W, e], les échantillons suivent dans un premier temps, la droite de saturation, d'équation $e = (\gamma_s / \gamma_w) * w$. En suite lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tendent vers une valeur constante.

La limite de retrait W_r , qui présente le point d'intersection de la droite de saturation de l'asymptote horizontale au palier de retrait pour $W = 0$, est de 9.25 % correspondant à un

indice des vides $e =$ de l'ordre de (0.9 %). Cette limite de retrait correspond par analogie, dans la figure (21-B), à une pression capillaire de limite de retrait notée $S_{rl} = 5000000\text{kPa}$.

Au-delà de la pression capillaire de retrait (S_{rl}), l'indice des vides ne varie plus en revanche le degré de saturation diminue rapidement (graphe D) jusqu'à s'annuler.

D'autre part, cette variation de S_r est pratiquement proportionnelle à la teneur en eau (graphe c).

Sur le chemin d'humidification :

On remarque que l'augmentation de la teneur en eau et le degré de saturation sont sensiblement plus importants suivie d'une légère augmentation de l'indice des vides ; il s'agit d'une phase intermédiaire de saturation où les gros pores se ré-saturent progressivement, dans ce domaine l'hystérésis entre le chemin de drainage et d'humidification est plus important dans le plan (S_r, S).

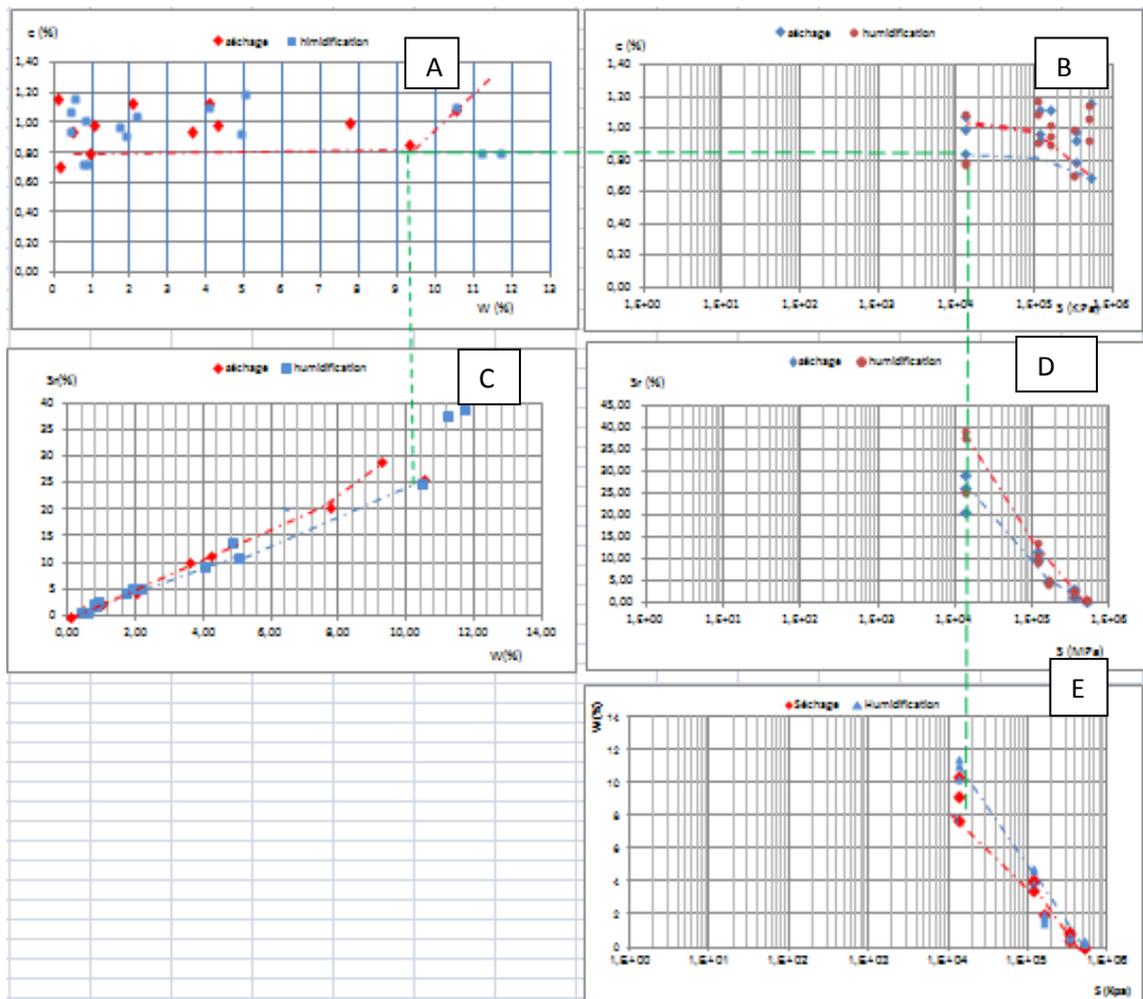


Figure IV.21. Premier cycle d'humidification drainage sur l'argile

Interprétation

Sur le chemin drainage humidification pour la pâte sur le plan A .On remarque qu'avec l'augmentation de la teneur en eau, le volume des vides reste constant l'interaction avec la droite de saturation nous donne la limite de retrait.

Lorsque on Project sur le graphe B on trouve la valeur de succion du retrait, c'est a cette valeur que l'air sort et il se remplace avec l'eau.et lorsque on Project sur Eon trouve la succion de dessiccation a cette valeur du succion on dit que le sol a atteint une valeur très importante du succion est une valeur de teneur eu eau presque nulle.

➤ **Chemin séchage humidification sur une pâte et sur le matériau compacté**

Les résultats des essais de séchage humidification sur une argile de Tizi-Ouzou compacté à l'optimum Proctor sont présentés sur la figure (IV- 22).

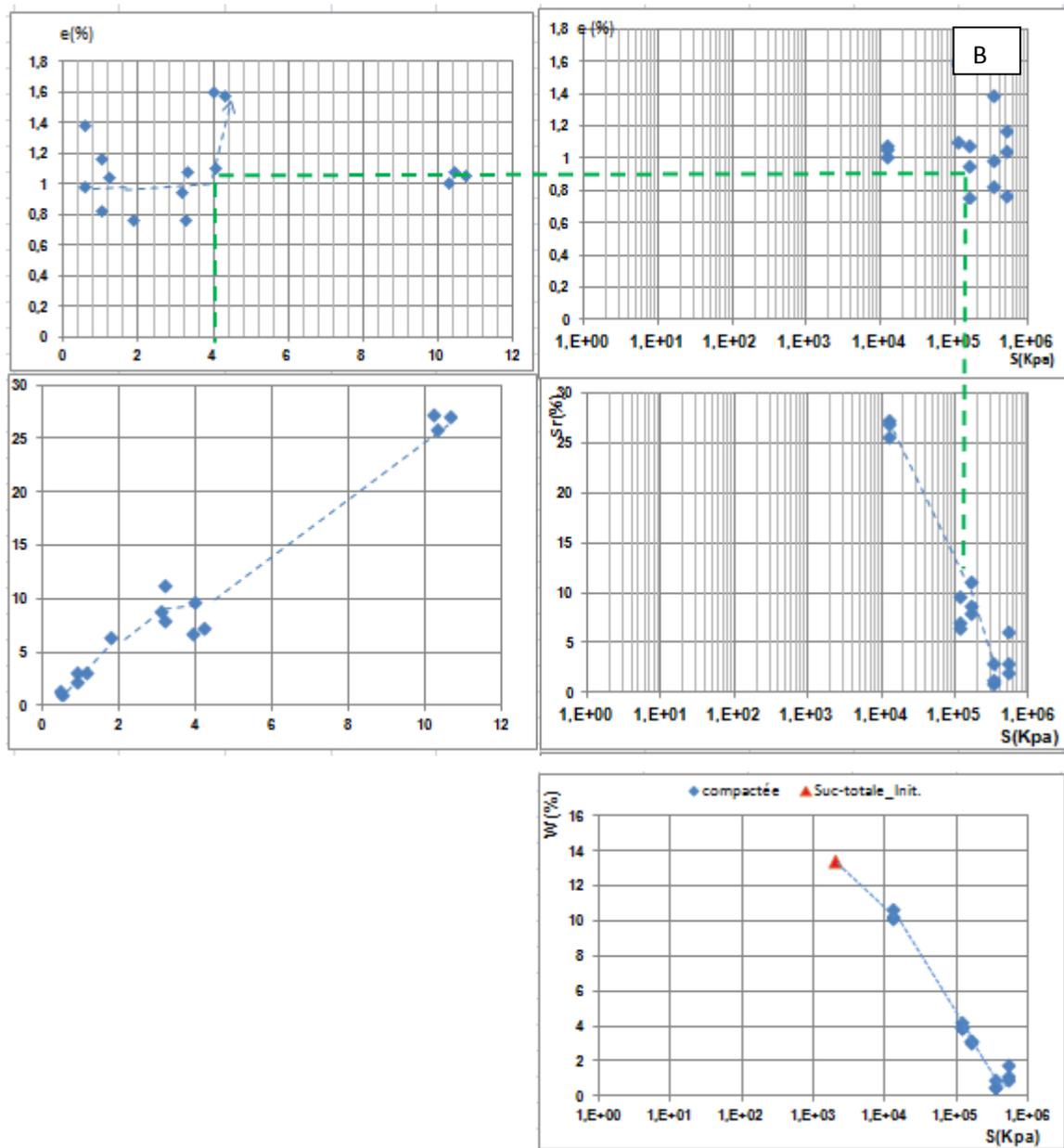


Figure IV.22 : Chemin drainage et d'humidification de l'argile initialement compacté à l'optimum Proctor normal.

On constate qu'à l'optimum Proctor ; la succion mesurée par la méthode du papier filtre (suction initiale); selon la norme ASTM D5298-94 est de 1944.57KPa. Les échantillons suivant un chemin de drainage (séchage) pour les valeurs supérieures de succion et un chemin d'humidification pour les valeurs inférieures à celle-ci.

Dans le plan [w, e] ; les échantillons suivent dans un premier temps de saturation d'équation $e = (\gamma_s / \gamma_w) * w$. en suite ; lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tend vers une valeur constante.

La limite de retrait W_{SL} , qui représente le point d'interaction de la droite de saturation et de l'asymptote horizontale au palier de retrait à $W = 0$, est de 4% correspondant à un indice

des vides $e_{sl} = 1$. Cette limite de retrait correspond, dans le graphe (IV.22. b), à une succion de limite de retrait, noté S_{lr} , d'une valeur de 500000kPa environ.

➤ Chemin séchage humidification sur le matériau compacté

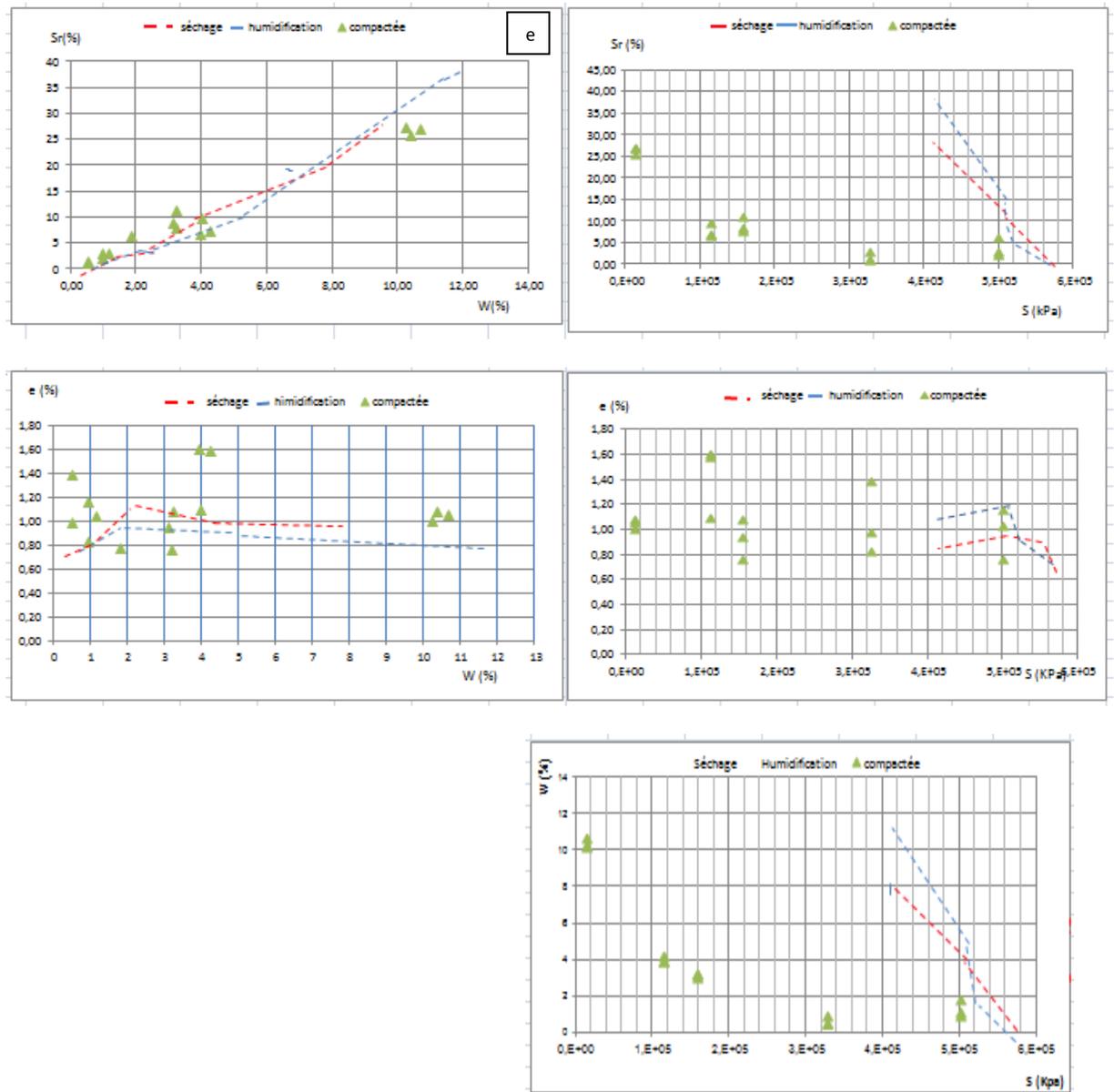


Figure IV.23 : Chemin drainage compactée de l'argile initialement compacté à l'optimum Proctor normal.

Nous avons présenté sur un même graphe les résultats obtenus à partir d'une pâte et d'un matériau compacté (figure IV.23). Sur le chemin de drainage, On remarque : (figure IV.23B) qu'à même pression capillaire, l'indice des vides des échantillons compactés est plus petit que celui des échantillons sous forme de pâte. Sur le chemin d'humidification,

On constate dans les plans de l'indice des vides en fonction de la pression capillaire et la teneur en eau que les chemins d'humidification sur la pâte et sur matériau compacté sont presque parallèles.

➤ **Comparaison entre le chemin séchage humidification sur le matériau sous forme de pâte et à l'état compacté**

Pour avoir l'influence initial (pâte et compactée) sur l'effet de la pression capillaire (suction) sur le comportement de l'argile de tizi Ouzou.

Courbe de la suction

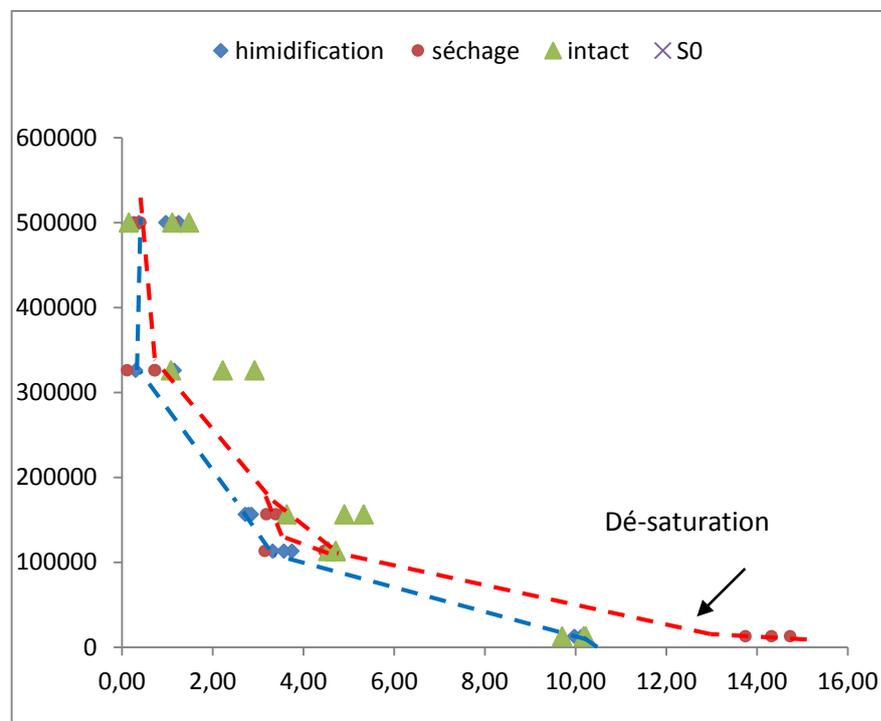


Figure IV.24 : courbe de la suction

La courbe de rétention d'un sol est très dépendante des conditions dans lesquelles s'effectue sa détermination.

Le sol étudié est un sol fin, on remarque que le sol étudié suit un chemin de dessiccation, lorsque la teneur en eau est importante le sol commence à présenter une suction faible inférieure à 10KPa. Donc on peut considérer que le point de la suction initial comme point d'entrée d'air. Cette phase de petite perturbation s'arrête au point de saturation 15.5(%) et une suction de 12.6Kpa.

Dans la deuxième phase la succion présente une variation importante pour les teneurs en eau très faible, la succion peut aller jusqu'à 500000KPa.

D'après les courbes des échantillons compacté et la courbe de succion le comportement de l'argile compacté et la pâte, leur comportement n'est pas le même (irréversible).

Conclusion

Cette étude a permis de présenter globalement l'état du l'argile de site de Tizi Ouzou au cours de cycle de drainage séchage humidification. Les essais ont montré l'existence d'un domaine de pression interstitielle négative ou le sol reste quasiment saturé.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été réalisé dans le but de traiter plusieurs aspect important et qui peuvent se résumer dans les points suivants : le développement et la mise en œuvre de technique expérimentales pour le sol non saturés ; l'application de ces techniques pour la caractérisation du comportement d'un matériau.

Pour effectuer les essais, Il nous a été possible de caractériser l'échantillon prélevé dans une zone situé au lotissement Mokadem en contre-bas de l'établissement de rééducation et de réadaptation de la commune de Tizi-Ouzou.

- D'après les résultats de l'analyse chimique, le taux de carbonates (CaCO_3) est de 17.24 % ce qui nous permet de classer notre sol comme étant une argile marneuse.
- L'analyse granulométrique réalisée donne un pourcentage des passants à 80 μm égale à 91 % .Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine
- La valeur au bleu VBS est égale à 6.64, D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol argileux
- les résultats de l'indice de plasticité ($I_p = 16.95\%$) indiquent que le sol étudié est un sol peu plastique.

Pour effectuer les essais, on s'est basé sur une technique d'imposition par phase vapeur est une autre technique de muser par papier filtre

Cette étude a permis de présenter globalement l'état du l'argile de site de Tizi Ouzou au cours de cycle de drainage séchage humidification. Les essais ont montré l'existence d'un domaine de pression interstitielle négative ou le sol reste quasiment saturé.

