الجـــــــــــــــــمهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي و البـــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلمســـــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrage d'Art

Par : ABDALLAH Lotfi et BENNOUR Aicha

Sujet

RISQUE RETRAIT ET GONFLEMENT DES ARGILES DANS LES CHAUSSEES

Soutenu publiquement, le 14 / 06 /2026, devant le jury composé de :

M, ABOU-BEKR Nabil	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme, KHELIFI Zakia	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
M, AIT SALEM Ahmed A	Docteur	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme, BENCHOUK Assia	Professeure	Université de Tlemcen	Co-Encadrante

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

Au commencement de ce travail, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, dont la guidée et le soutien nous ont accordé la force, la détermination et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail scientifique.

C'est avec un profond sentiment de reconnaissance et une infinie estime que nous adressons nos plus sincères remerciements à ***Madame Assia Benchouk,*** *professeure à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, directrice du laboratoire, et notre estimée enseignante durant plusieurs années universitaires. Nous la remercions chaleureusement pour son encadrement avisé, sa rigueur scientifique, ainsi que pour la confiance et la bienveillance dont elle a su faire preuve à notre égard. Son rôle de directrice de laboratoire a été une source d'inspiration et un moteur précieux tout au long de ce parcours.*

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude et notre sincère admiration à ***Monsieur Aït Salem Ahmed,*** *Docteur à la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen. Son aide précieuse, ses conseils éclairés et son accompagnement infaillible ont été d'un soutien inestimable. Nous avons été particulièrement touchés par sa générosité intellectuelle, sa disponibilité exceptionnelle et son humanité, qui ont fait de lui bien plus qu'un encadrant : un véritable guide et un modèle de dévouement scientifique.*

Nous adressons nos vifs remerciements à ***Monsieur Nabil Abou-Bekr,*** *professeur à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence du jury de soutenance, ainsi que pour l'évaluation rigoureuse et équitable de ce travail.*

Nos remerciements vont également à ***Melle Khelifi,*** *qui nous a fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury de soutenance, et pour l'intérêt bienveillant qu'elle a porté à notre recherche.*

Nous n'oublions pas de rendre hommage à ***Monsieur Hamzaoui Fethi****, qui a donné généreusement de son temps et de son énergie pour le bien de notre département. Son engagement, ses efforts constants et son dévouement désintéressé méritent toute notre admiration et notre profonde reconnaissance.*

Nous tenons aussi à exprimer notre sincère gratitude aux membres du laboratoire (EOLE) pour leur aide précieuse, leur esprit de collaboration et les facilités qu'ils nous ont offertes, lesquelles ont largement contribué à la réussite de ce travail.

Une pensée chaleureuse et une vive reconnaissance vont à nos camarades de promotion, en particulier ceux de notre département de ***Génie Civil****, spécialité* ***Voies et Ouvrages d'Art****, avec qui nous avons partagé les joies et les défis de ce parcours universitaire. Leur entraide, leur bonne humeur et leur soutien mutuel resteront gravés dans notre mémoire.*

Enfin, et c'est là le cœur même de notre reconnaissance, nous nous inclinons avec une profonde humilité et un amour infini devant nos très chers parents. Ils sont bien plus que notre point de départ : ils sont la raison secrète de nos pas, la lumière cachée derrière chaque succès. C'est grâce à leur sacrifice silencieux, à leurs nuits blanches et à leurs prières

discrètes que nous avons pu prendre notre envol. Si nous avons atteint aujourd'hui l'horizon de la connaissance et gravi les sommets de l'excellence scientifique, c'est uniquement parce qu'ils nous ont portés sur leurs épaules depuis le premier jour.

À nos frères et sœurs, à notre famille proche et élargie, ainsi qu'à tous ceux qui nous sont chers : vous avez été notre refuge, notre force tranquille, et nos plus fidèles soutiens. Dans les moments de doute, votre présence et vos encouragements ont fait toute la différence. Nous ne saurions assez dire combien nous sommes heureux de vous avoir à nos côtés. ***À eux, à vous tous, nous devons tout. À vous, notre éternelle gratitude***

Nous prions Dieu, le Clément et le Miséricordieux, d'accorder à chacun succès, bonheur et réussite dans cette vie et dans celle à venir.

Table des matières

Notations 2
Résumé 4
Introduction Générale 7
Chapitre 1 : Généralité sur les Chausées
I. INTRODUCTION : 3
II. LES CHAUSSEES : 3
II.1 DEFINITION ET ROLE DES CHAUSSES : 3
II.2 ES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE : 3
II.2.1 Les Chaussées Rigides : 3
a) Sol nature : 3
b) Couche de fondation : 4
c) Revêtement : 4
II.2.2 Les chaussées semi-rigides : 4
II.2.3 Les chaussées Souples : 5
a) La plate-forme support de la chaussée : 5
b) Les couches d'assise : 6
c) Les catégories de Classification des chaussées souples : 7
II.3 CHOIX DE TYPES DE STRUCTURE DU CHAUSSEES : 8
II.4 PATHOLOGIE DE CHAUSSES : 8
II.4.1 LES TYPES DE PATHOLOGIES DES CHAUSSEES : 8
a) Les fissures : 8
c) Les déformations : 10
d) Les arrachements : 12
e) Remontées : 13
II.4.2 Les solutions techniques de traitement des pathologies 14
III. Évolution de la structure des argiles en fonction des différentes sollicitations : 14
III.1Conséquences techniques et économiques sur les chaussées : 15
VI. Conclusion 16
Chapitre 2 : Sols non saturés et Compactage
I. Introduction : 18
II. Définition des sols non saturés : 18
II.1 Comportement des sols non saturés : 18
II.2 L'eau dans le sol : 19
II.3 Sol non saturé et phénomène de capillarité : 19

III. La Succion dans les sols : 21
III.1 Différents Types De Succion : 21
III.1.1 Succion capillaire : 21
III.2 Effets De La Succion Sur Les Particules Solides : 24
IV. Mécanisme du retrait–gonflement 24
IV.1 Retrait et gonflement comme réponse à la variation de la Succion : 24
IV.2 Rôle de l'état initial, de la microstructure et du chemin hydrique 25
IV.3 Retrait des sols gonflant : 25
IV.5 Déformations différentielles et effets sur les pathologies de chaussée 27
IV.5 Transferts hydriques sous chaussée : 27
IV.5.1 Infiltration verticale (pluie, fissures, surface) : 27
IV.5.2 Drainage latéral (accotements, fossés, écoulements) : 27
IV.5.3 Remontée capillaire (nappe proche) : 28
IV.6 Zone active : définition, profondeur et rôle dans le retrait-gonflement : 28
V. Le compactage des sols : 28
V.1 Application du compactage : 29
V.2 Les facteurs d'influence : 29
V.2.1 Influence de la teneur en eau : 29
V.4 Microstructure des sols fins compactés : 32
V.5 Effets du compactage sur certaines propriétés du sol : 32
V.6 Le compactage dynamique : 34
V.6.1 Essai Proctor : 34
V.7 COMPACTAGE STATIQUE : 34
V.8 Comparaison du compactage statique et du Proctor en laboratoire : 35
V.9 Influence du mode de compactage sur les caractéristiques mécaniques : 36
V.10 Problèmes liés au compactage : 36
VII Conclusion 40

Chapitre 3 : Comportement Hydrique

I. Introduction : 42
II. Choix du sol : 42
III. Essais d'identification des sols étudiés : 43
III.1 Caractérisation physico-chimique du sol : 43
III.1.1 Composition minéralogique des différents matériaux : 43
III.2 Caractéristiques géotechniques : 44
III.2.1 Analyse granulométrique 44
III.2.2 Les limites d'Atterberg : 45

III.3 Classification du Tuf de Béni-Saf : 46
III.4 Classification GTR de l'argile de Boughrara : 46
III.5 Essai Proctor : 47
IV. Préparation des échantillons : 48
V. Chemin drainage humidification : 50
V.1 Techniques d'imposition de la Succion : 50
V.1.1 Méthode osmotique : 50
V.1.2 Méthode des solutions salines : 54
V.1.3 Mesure des paramètres d'état : 57
V.2 Techniques De mesure De La Succion : 59
V.2.1 Méthode du papier filtre : 59
V.3 Résultats et interprétation : 62
V.3.1 Mesure de la succion par la méthode du papier filtre : 63
V.3.2 Courbes des chemin de drainage / humidification : 64
V.3.3 Ajustement de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC) par l'équation de Van-Genuchten 68
V.3.4 Analyse de la limite de retrait et comportement hydro-mécanique des matériaux : 70
V.3.5 Évaluation de l'aptitude des matériaux TUF et TUF + argile en construction routière : 70
VI. Conclusion 71
Conclusion Générale 73
Références : 75

Liste Des Figures

Figure I.1 : Structure d'une chaussée(boumehraz,2017) 3
Figure I.2_structure d'une chaussées semi -rigides(boumehraz,2017) 4
Figure I.3_Structure d'une chaussée souple(boumehraz,2017) 6
Figure I.4_fissure longitudinale(techniroute.lu) 8
Figure I.5_fissure transversale(enuomachinery.net) 8
Figure I.6_Faïençage(tpdemain.com) 9
Figure I.7_Affaissement de rive (tpdemain.com) 10
Figure I.8_Flache (tpdemain.com) 10
Figure I.9_orniérage (texum.swiss) 11

Figure I.10_Pelade (tpdemain.com) 11
Figure I.11_plumage (tpdemain.com) 12
Figure I.12_Nids de poule (ville.chateauguay)..... 12
Figure I.13_ressuage (routes-transports)..... 13
Figure I.14_ évolution de la structure des argiles en fonction des différentes sollicitation…… 15
Figure II.1_sol humide et sol non saturé (M.Callaud 2004) 17
Figure II.2_Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique. (INPL Nancy, 2016)…… 19
Figure II.3_Tube capillaire et pressions correspondantes (rpn.univ-lorraine)..... 19
Figure II.4_Actions de forces sur une molécule d'eau(L'eau dans les sols non saturés……..... 21
Figure II.5_ Remontée capillaire dans un tube d'eau dans les sols non saturés) 22
Figure II.6_Représentation schématique d'un sol non saturé (L'eau dans les sols non saturés)… 23
Figure II.7_Effets de la succion sur les grains du sol (GHANEM.F.2011.)..... 24
Figure II.8 Différentes phase du retrait (Schubert, 1982) 25
Figure II.9_courbe de retrait classique (Schubert, 1982) 26
Figure II.10_ Compactage de surface d'une chaussée routière (hesus.com) 29
Figure II.11_ Courbe Proctor typique d'un sol(researchgate.net)..... 29
Figure II.12_ Influence de la nature du sol sur l'optimum Proctor (archive.univ-biskra.dz)……...30
Figure II.13_influence de l'énergie de compactage(genie-civile.blogspot.com) 31
Figure II.14_Courbe de compactage pour une énergie de compactage donnée(staff.univ-batna2.dz) 31
Figure II.15_Effet du compactage sur la structure d'un sol(rpn.univ-lorraine.fr)..... 32
Figure II.16_Courbes de compactage Proctor normal et modifié(omran ,2002)..... 35
Figure II.17_Appareil de compactage statique d'un échantillon de sol en laboratoire.... 35
Figure II.18 : premier cycle de drainage humidification sur l'argile vieux pré initiale sous forme de pate a wi=1,5 WL (indarto,1991) par (derfouf,2014)..... 38
Figure II.19 : Chemin séchage-humidification (T-OPM et T-OPN et T-4MPa). (Mekaideche,2021) 40
Figure III-1_Échantillons de tuf (A)et d'argile(B) utilisés dans l'étude..... 41
Figure III.2_ présente la localisation géographique du site de prélèvement des échantillons étudiés, situé dans la région de Boughrara à Tlemcen 42
Figure III.3_DRX du tuf de Béni-Saf (Ait Salem.2024)..... 43
Figure III.4_DRX de l'argile de Boughrara (Ait Salem ,2024)..... 43

Figure III.5_Courbes granulométriques du tuf, de l'argile et du mélange de tuf renforcé par 30 % d'argile. 44

Figure III.6_La relation entre la limite de liquidité, l'indice de plasticité et le domaine d'acceptation. 45

Figure III.7_Compactage dynamique OPN , OPM pour le tuf de Béni-saf ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,47

Figure. III.8_Courbe de compactage dynamique de l'argile de Boughrara (DERFOUF 2014)…… 48

Figure III.9_Mélange de tuf et d'argile humidifié 49

FigureIII.10_Dispositif expérimental de la technique osmotique(BENCHOUK,2005) .. 50

Figure III.11_type de PEG utilisée 51

Figure III.12_ Les équipements et étapes de laboratoire pour le contrôle osmotique et le traitement des échantillons 54

Figure III .13_ Succion imposée par un sel donné en fonction de la température (Benchouk,2005) 55

FigureIII.14_Dispositif expérimental de la technique solution saline 57

Figure III.15_Principe de la méthode de mesure de la succion par papier filtre. 60

Figure III.16_Types de papiers filtres utilisés 60

Figure III.17_Dispositif expérimental de la technique du papier filtre 62

Figure III.18_Courbe d'étalonnage pour la détermination de la succion par la méthode du papier filtre. (ASTM, D. 5298-03) 63

Figure III. 19_Chemin drainage humidification TUF, TUF+ARGILE 67

Figure III. 20_L'évolution de la teneur en eau volumétrique en fonction de la teneur en eau…… 69

Liste Des Tableaux

Tableau III .1_Résultats de l'analyse granulométrique des deux matériaux étudiés……43

Tableau III.2_Résultats de l'essai Proctor (normal et modifié) ……..…44

Tableau III.3_Composition des mélanges étudiés ……...44

Tableau III.4_Références des membranes semi-perméables utilisées(BENCHOUK,2005)…47

Tableau III.5_préparation des solutions PEG en fonction de la succion appliquée……..48

Tableau III .6_Concentrations des solutions salines utilisées…….…..51

Tableau III.7_Résultats des paramètres d'état pour une succion de 2000 kPa……..…55

Tableau III .8_ Résultats de la teneur en eau du papier filtre et de la succion des différents échantillons étudiés……...60

Tableau III .9_ Les caractéristiques initiales des échantillons compactés …… ……..61

Tableau III .10_ les paramètres de l'équation de Van Genuchten (VG).…… ……..… 64

Notations

GTR : Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des Couche de Forme

CaCo3 : Teneur en carbonate

d10 : Diamètre des grains correspondant à 10% de passant

d30 : Diamètre des grains correspondant à 30% de passant

d60 : Diamètre des grains correspondant à 60% de passant

ESV : Équivalent de Sable Visuel

ESP : Équivalent de Sable au Piston

T : la tension superficielle

h : hauteur de montée de l'eau dans le tube

d : diamètre du tube capillaire

α = l'angle de contact entre la surface de l'eau et la paroi du tube

γ_w: poids volumique de l'eau

γ_d:Poids volumique sec

γ_{Dmax}: Poids volumique sèche maximale

ρ_w: masse volumique de l'eau

Uw : pression de l'eau dans le sol

Uc : succion capillaire

Ua : pressions d'air

σ_s: la tension de surface eau-air

θ: L'angle de raccordement entre le ménisque et le solide

r :rayon du tube capillaire

s : la succion totale

S_m: la succion matricielle

S_{osm}: la succion osmotique

S_c: la succion capillaire

S_{ad}: la succion d'adsorption

OPN : Optimum Proctor Normal

OPM : Optimum Proctor Modifié

W: Teneur en eau

W_{OPT} :Teneur en eau optimale de compactage

e : Indice des vides

e^0: Indice des vides initial

Sr: Degré de saturation

VBS : valeur au bleu de méthylène

WL : limite de liquidité

WP : limite de plasticité

WR : limite de retrait

D_{ms}: pente moyenne de la relation entre la teneur en eau et le logarithme de la succion lors du drainage

R^2: coefficient de détermination de la régression

PEG : Polyéthylène Glycol

Résumé

Cette étude s'intéresse à un problème bien connu en géotechnique routière : le retrait et le gonflement des argiles dans les chaussées. C'est l'un de ces phénomènes qui, silencieusement, finit par fragiliser les routes et réduire leur durée de vie. Le travail que nous avons mené porte essentiellement sur le comportement des sols non saturés. Plus précisément, nous avons étudié un tuf provenant de la région de Béni Saf, ainsi qu'un mélange entre ce même tuf et une argile prélevée du côté de Boughrara. Pour cela, des essais en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons compactés.

L'objectif était de mieux comprendre le comportement hydromécanique de ces matériaux. Pour y arriver, nous avons mis en œuvre différentes techniques de contrôle et de mesure de la succion. Le contrôle de la succion a été fait avec la méthode osmotique et la méthode des solutions salines. Quant à la mesure de la succion, elle a été réalisée par la méthode du papier filtre. Ces essais nous ont permis de tracer les chemins de drainage et d'humidification des matériaux, et d'analyser comment leur comportement évolue quand les conditions hydriques varient.

Les résultats obtenus montrent que la succion, tout comme le compactage, joue un rôle très important sur le comportement des sols non saturés, en particulier sur les phénomènes de retrait et de gonflement. L'étude a aussi permis d'évaluer, dans une perspective routière, le comportement de l'argile seule et celui du mélange tuf-argile. Au final, ce travail apporte une contribution à la compréhension des mécanismes du retrait-gonflement, dans l'espoir de réduire les désordres observés sur les chaussées et d'améliorer la stabilité des infrastructures routières.

Mots-clés : retrait et gonflement, argile de Boughrara, tuf de Béni Saf, sols non saturés, succion, drainage-humidification, compactage, chaussées.

الملخص

تهتم هذه الدراسة بمشكلة معروفة جيداً في الجيوتقنية الطرقية، ألا وهي ظاهرة انكماش وانتفاخ الطين داخل الرصفات الطرقية. إنها واحدة من تلك الظواهر التي، بصمت، تنتهي إلى إضعاف الطرق وتقليل عمرها الافتراضي. العمل الذي قمنا به يتعلق أساساً بسلوك التربة غير المشبعة. وبشكل أكثر دقة، قمنا بدراسة التوف القادم من منطقة بني صاف، وكذلك خليط من نفس هذا التوف مع الطين المأخوذ من منطقة بوغرارة. ولتحقيق ذلك، أُجريت تجارب مخبرية على عينات مدموكة.

كان الهدف هو فهم أفضل للسلوك الهيدرو ميكانيكي لهذه المواد. وللوصول إلى ذلك، قمنا بتطبيق تقنيات مختلفة للتحكم في الشفط وقياسه. تم التحكم في الشفط باستخدام الطريقة الأسموزية وطريقة المحاليل الملحية. أما قياس الشفط فقد تم بطريقة ورق الترشيح. هذه التجارب مكنتنا من رسم مسارات الجفاف والترطيب للمواد، وتحليل كيفية تطور سلوكها عندما تتغير الظروف الرطوبية.

النتائج المتحصل عليها تبين أن الشفط، وكذلك الدمك، يلعبان دوراً مهماً جداً في سلوك التربة غير المشبعة، وخاصة في ظاهرتي الانكماش والانتفاخ. كما أتاحت الدراسة تقييم سلوك الطين وحده وكذلك سلوك خليط التوف والطين في المنظور الطرقي. في النهاية، يساهم هذا العمل في فهم آليات الانكماش والانتفاخ، على أمل تقليل الاضطرابات الملاحظة على الرصفات الطرقية وتحسين استقرار البنى التحتية الطرقية.

كلمات مفتاحية: انكماش وانتفاخ، طين بوغرارة، توف بني صاف، تربة غير مشبعة، شفط، جفاف-ترطيب، دمك، رصفات طرقية.

.

Abstract

This study focuses on a well-known problem in road geotechnics: the shrinkage and swelling of clays in pavements. It is one of those phenomena that, quietly, ends up weakening roads and reducing their service life. The work we carried out mainly concerns the behaviour of unsaturated soils. More specifically, we studied a tufa from the Béni Saf region, as well as a mixture of this same tufa with a clay taken from the Boughrara area. For this purpose, laboratory tests were conducted on compacted samples.

The objective was to better understand the hydro-mechanical behaviour of these materials. To achieve this, we implemented different techniques for controlling and measuring suction. Suction was controlled using the osmotic method and the saline solution method. Suction measurement was carried out using the filter paper method. These tests allowed us to establish the drying and wetting paths of the materials, and to analyse how their behaviour changes when hydraulic conditions vary.

The obtained results show that suction, as well as compaction, play a very important role in the behaviour of unsaturated soils, particularly in shrinkage and swelling phenomena. The study also made it possible to evaluate, from a road engineering perspective, the behaviour of the clay alone and that of the tufa-clay mixture. Ultimately, this work contributes to a better understanding of shrinkage-swelling mechanisms, in the hope of reducing pavement distress and improving the stability of road infrastructures.

Keywords: shrinkage and swelling, Boughrara clay, Béni Saf tufa, unsaturated soils, suction, drying-wetting, compaction, pavements

Introduction Générale

Les infrastructures routières, on le sait bien, sont un pilier essentiel pour le développement économique et social. Sans elles, pas de mobilité, pas de transport de marchandises, pas d'échanges. Mais leur durabilité, leur efficacité, tout cela dépend d'une chose qu'on voit mal : le sol qui les porte. Et malheureusement, certains sols posent problème. C'est le cas des argiles. Leur comportement, c'est l'un des plus grands défis pour les routes, parce qu'elles provoquent des déformations, des fissures, et abîment les revêtements beaucoup trop tôt.

Pourquoi ? Parce que l'argile, elle réagit à l'eau. Quand l'humidité augmente, elle gonfle. Quand la sécheresse arrive, elle se rétracte. Ces mouvements, même faibles, finissent par casser la route. Et derrière, ce sont des coûts d'entretien et de réparation qui explosent. Pour compliquer les choses, la plupart du temps, ces sols ne sont ni complètement secs ni complètement saturés. On parle alors de sols non saturés, avec une notion très importante, celle de succion, qui contrôle tout leur comportement hydromécanique.

Dans ce travail, nous avons donc mené une étude expérimentale pour analyser le retrait et le gonflement des argiles dans les chaussées. Les essais ont porté sur deux matériaux : le tuf de Béni-Saf, et l'argile du barrage de Boughrara, ainsi que sur des mélanges entre eux. L'objectif principal est simple : comprendre comment les propriétés géotechniques et hydriques influencent le comportement, pour ensuite proposer des solutions qui renforcent la stabilité des routes.

Pour cela, nous avons utilisé plusieurs techniques de mesure de la succion : la méthode osmotique, la méthode de la phase vapeur, et la méthode du papier filtre. Chacune a ses avantages, et ensemble elles permettent d'avoir une image assez complète.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

- Le premier pose les bases : généralités sur les chaussées, pathologies courantes, et revue de ce qu'on sait sur les argiles.
- Le deuxième chapitre entre dans le vif des sols non saturés : succion, mécanismes de retrait et de gonflement, compactage.
- Enfin, le troisième chapitre présente les matériaux étudiés, les techniques expérimentales, les caractéristiques géotechniques du tuf et de l'argile, et les résultats obtenus sur les mélanges.

Au bout du compte, ce que nous espérons, c'est apporter une compréhension plus fine du comportement des argiles sous les routes, et contribuer à formuler des solutions techniques pour réduire les risques liés au retrait et au gonflement.

Chapitre 1 :

Généralité sur les Chaussées

I. INTRODUCTION :

Le phénomène de retrait gonflement des sols argileux constitue l'un des enjeux géotechniques les plus critiques affectant la stabilité et la durabilité des infrastructures routières. Les sols argileux se caractérisent par une forte sensibilité à la variation de leur teneur en eau une augmentation de l'humidité entraîne un gonflement volumique, tandis qu'une diminution de cette teneur provoque un retrait du sol.

La gravité de ce phénomène réside dans ses effets directs et néfastes sur les différentes couches de la chaussée, se traduisant par l'apparition de tassements différentiels, de fissures longitudinales et transversales, d'ondulations de la surface routière, ainsi que par une dégradation significative du niveau de service et de la sécurité de la circulation.

II. LES CHAUSSEES :

II.1 DEFINITION ET ROLE DES CHAUSSES :

Les chaussées est un surface plane imperméable et résistante qui a pour rôle de protéger le sol support des agressions générées par le trafic ou les conditions climatiques.

II.2 ES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE :

Selon leur comportement mécanique, les chaussées peuvent être classées en trois grandes catégories de structures :

- Les chaussées rigides
- Les chaussées semi-rigides
- Les chaussées souples

II.2.1 Les Chaussées Rigides :

Grace à leur grande cohésion, ces structures résistent par effet de dalle. Elles transmettent les charges avec une surface de pression relativement importante. Ainsi, les efforts parvenant aux couches sous-jacentes sont d'autant plus faibles que l'épaisseur de la dalle est élevée.

Elles sont constituées d'une dalle reposante, soit directement sur le sol naturel soit par l'intermédiaire d'une couche de fondation

a) Sol nature :

Le sol situé sous la plateforme de la chaussée doit présenter des caractéristiques volumétriques stables, de sorte qu'il ne subisse ni retrait ni gonflement lors du chargement de la dalle ou de la couche de revêtement. L'utilisation de remblais sujets à des tassements différés est proscrite, tout comme les couches hétérogènes susceptibles de provoquer des tassements différentiels affectant la stabilité de la structure de la chaussée. Il est préférable que le sol soit homogène et dense afin d'assurer une répartition uniforme des charges et un comportement mécanique stable des couches supérieures.

b) Couche de fondation :

La couche de fondation contribue à assurer la solidité et la stabilité de la route. Elle joue également un rôle important pour les raisons suivantes

- Fournir une surface plane pour soutenir la dalle supérieure
- Remplacer les sols mous qui pourraient se comprimer ou gonfler
- Maintenir la stabilité des dalles au niveau des joints

c) Revêtement :

Le revêtement est généralement constitué de dalles en béton séparées par des joints permettant la dilatation et la contraction.

Les chaussées rigides présentent plusieurs avantages :

- Faible besoin en entretien
- Grande résistance aux solvants et à la chaleur, ce qui les rend adaptées à des conditions de service sévères
- Épaisseur réduite par rapport aux autres types de revêtement, un atout important surtout lorsque la nappe phréatique est proche de la surface.

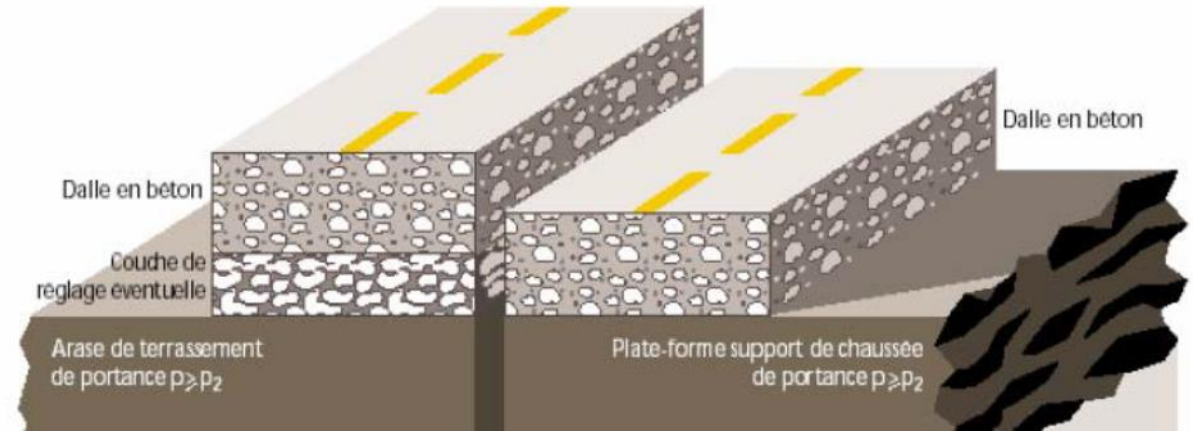


Figure I.1 : Structure d'une chaussée(boumehraz,2017)

II.2.2 Les chaussées semi-rigides :

Les structures semi-rigides représentent une solution intermédiaire entre les chaussées rigides et les chaussées souples.

Ces structures offrent une plus grande flexibilité que le béton classique, mais présentent une résistance mécanique moindre. Elles nécessitent cependant des fondations suffisamment épaisses et solides pour assurer la stabilité des couches supérieures et la capacité de support des charges.

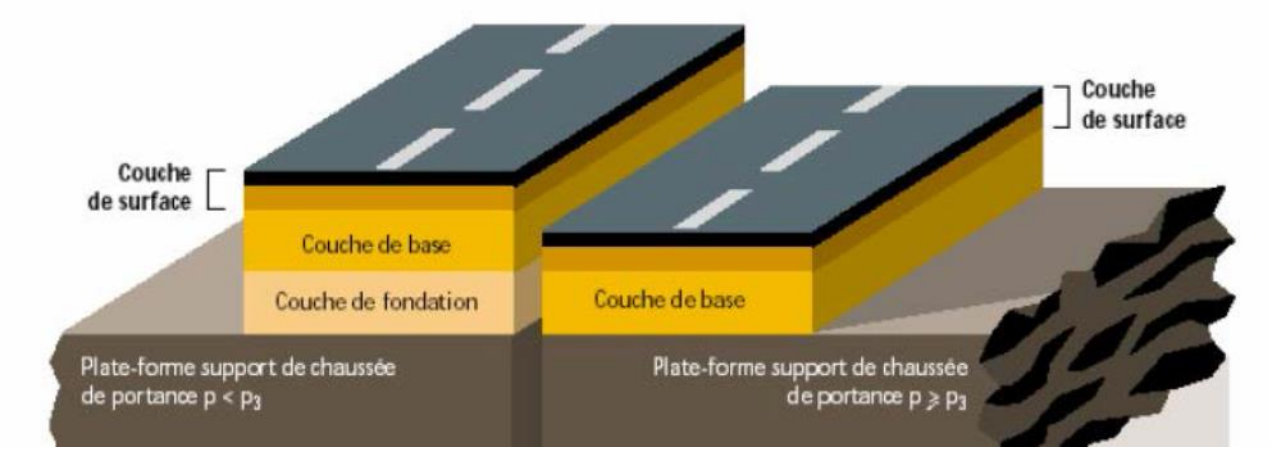


Figure I.2_structure d'une chaussées semi -rigides(boumehraz,2017)

II.2.3 Les chaussées Souples :

Ce sont des structures de chaussées dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent sont traitées aux liants hydrocarbonés. La couche de fondation et/ou la couche de base peut être constituées de grave non traiter.

Elles sont capables de se déformer de façon plus ou moins importante aux passages des charges roulantes, permettant ainsi de localiser les pressions induites dans un faible rayon. Pour réduire les contraintes parvenant au sol-support, il faut donc augmenter l'épaisseur de chaussée. Ainsi, les chaussées souples sont à grande épaisseur disposée en plusieurs couches de qualités géotechniques améliorées de haut en bas.

a) La plate-forme support de la chaussée :

Elle est constituée du sol-terrassé ou sol support surmonté généralement d'une couche de forme.

Le sol support :

C'est le sol dont sa mise en place constitue les Travaux de Terrassements. Il est soit le sol en place, lorsque la route est en déblai, soit le sol rapporté lorsque la route est en remblai.

En général, on considère la couche des 30 cm supérieurs, il est amélioré lorsqu'il est compressible ou faiblement portant. Cette épaisseur peut varier selon la méthode de dimensionnement.

Matériaux utilisés : sol naturel, sable, gravier, ou sol stabilisé au ciment ou à la chaux pour améliorer la capacité portante

Couche de forme :

Les caractéristiques des sols peuvent varier considérablement au sein d'un même projet. Pour améliorer et uniformiser la portance du sol, il est nécessaire d'intercaler un élément de transition entre le sol-support et les couches de la chaussée, appelé couche de forme constituée de matériaux granulaires roulés ou concassés, matériaux stabilisés avec des liants hydrauliques

La fonction de la couche de forme est de protéger le sol-support des dommages causés par les engins lourds et de fournir un appui solide et stable aux couches supérieures, facilitant ainsi

leur compactage sans déformation. L'épaisseur de cette couche est généralement comprise entre 20 et 30 cm, en fonction des caractéristiques du sol

b) Les couches d'assise :

Ce sont la couche de fondation et la couche de base.

La couche de fondation :

L'objectif principal de cette couche est de réduire les charges transmises à la plate-forme

Elle ne supporte quelles contraintes verticales et doit être peu déformable et plus résistante que les couches sous-jacentes .

Généralement, la partie inférieure de cette couche est rendue peu perméable afin de drainer les eaux qui pourraient s'infiltrer à travers la couche de base. Cette zone permet également de prévenir la remontée capillaire de l'eau depuis la plate-forme. L'épaisseur de la couche de fondation varie entre 15 et 30 cm selon le dimensionnement et le trafic

Les matériaux utilisés dans cette couche : matériaux granulaires, traités ou non, grave bitumineuse, grave stabilisée, ou grave non traitée.

La couche de base :

À ce niveau, les efforts dus au trafic restent importants et les effets des conditions environnementales ne sont pas totalement absorbés. Par conséquent, les matériaux utilisés doivent présenter une bonne qualité géotechnique, c'est-à-dire :

- Posséder une granulométrie adaptée pour éviter la ségrégation lors des manipulations
- Offrir une résistance suffisante aux efforts par frottement interne, ce qui nécessite des agrégats durs et résistants, proportionnellement aux sollicitations
- Le rôle principal de cette couche est d'augmenter la capacité portante de la structure. Grâce à son épaisseur et à la qualité des matériaux elle contribue également à la rigidité flexionnelle et à la résistance globale à la fatigue. De plus elle facilite le drainage de l'eau

La couche de surface :

Elle comprend la couche de roulement, également appelée couche de revêtement, et peut être complétée par une couche de liaison située entre la couche de roulement et les couches d'assise.

Elle est réalisée à partir d'un mélange d'agrégats de haute qualité et de liant hydrocarboné.

La couche de revêtement doit présenter une résistance suffisante au poinçonnement et à l'usure, du fait de son exposition directe aux conditions atmosphériques et aux sollicitations du trafic. Elle doit également offrir une bonne régularité de surface, être peu glissante et étanche.

Les revêtements se répartissent en deux grandes catégories :

- Les enduits superficiels à une ou plusieurs couches
- Les enrobés bitumineux.

Les principales fonctions de la couche de surface sont d'assurer le confort et la sécurité des usagers en premier lieux et de résister aux efforts horizontaux exercés par les pneumatiques et enfin empêcher la pénétration de l'eau dans les différentes couches de la chaussée, afin d'éviter la désolidarisation des granulats et le ramollissement des sols fins, entraînant une diminution de leur portance.

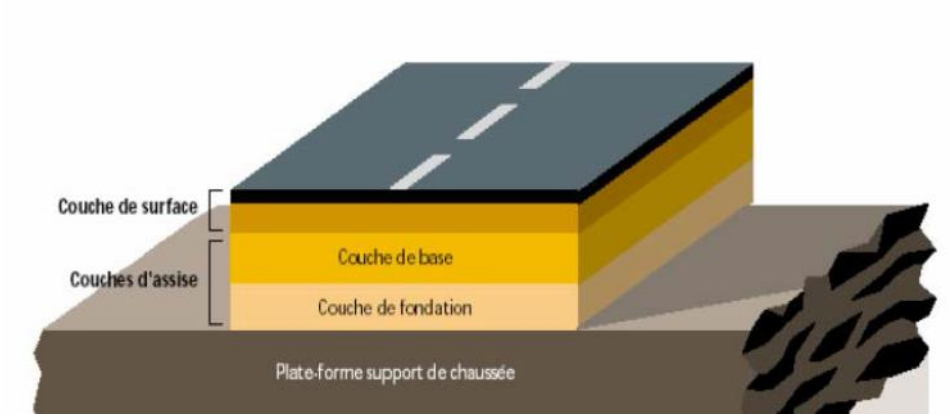


Figure I.3_Structure d'une chaussée souple(boumehraz,2017)

c) Les catégories de Classification des chaussées souples :

Les chaussées souples peuvent être classées selon différents critères

Selon le type de trafic :

- Trafic léger : routes rurales ou chemins secondaires, faible épaisseur totale (30 à 50 cm).
- Trafic moyen : routes départementales, épaisseur totale 50 à 70 cm.
- Trafic lourd : routes nationales ou autoroutes, épaisseur totale 70 à 100 cm ou plus

Selon la structure :

- Simple couche liée : toutes les couches traitées avec liant hydrocarboné, fondation et base minces.
- Double couche : couche de base et de fondation distinctes, souvent la fondation moins liée ou non traitée.
- Multicouche : plusieurs couches superposées avec amélioration progressive de la qualité des matériaux de bas en haut.

Selon le type de matériaux :

- Granulats non traités : utilisés dans fondation ou base pour trafic léger.
- Granulats stabilisés : traités au ciment ou à la chaux, utilisés pour fondation ou base dans trafic moyen.
- Graves bitumineuses ou enrobés : utilisés pour couche de base et couche de surface, surtout pour trafic lourd.

II.3 CHOIX DE TYPES DE STRUCTURE DU CHAUSSEES :

Le choix du type de structure à adopter pour une chaussée dépend des facteurs suivants :

- L'importance de la circulation ;
- La qualité du sol de la plateforme ;
- La disponibilité financière

II.4 PATHOLOGIE DE CHAUSSES :

Les fissures constituent des dégradations de la chaussée sous forme de petites fentes dans le revêtement. Leur gravité dépend de la surface affectée, de leurs dimensions, de leur forme et de l'espacement entre elles. Elles peuvent concerner aussi bien la surface que la structure de la chaussée.

La pathologie routière vise à analyser l'évolution de l'état et de la durée de vie des routes, à diagnostiquer les désordres, à en identifier les causes et à proposer des solutions de réparation adaptées

II.4.1 LES TYPES DE PATHOLOGIES DES CHAUSSEES :

Les pathologies des chaussées se manifestent sous différentes formes de dégradations qui affectent leur performance et leur durabilité. On distingue principalement :

- Les fissures,
- Les déformations,
- Les arrachements,
- Les remontées.

a) Les fissures :

Fissures longitudinales :

Fissure sensiblement parallèle l'axe de la chaussée, l'apparition de ces pathologies peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- Fatigue de la chaussée
- Retrait du sol argileux à la suite d'une longue durée de sécheresse
- Sous-dimensionnement des couches inferieures
- Mauvaise construction du joint longitudinal entre deux bandes d'enrobés



Figure I.4_fissure longitudinale(techniroute.lu)

Fissure transversale :

Il s'agit de fissures sensiblement perpendiculaires à l'axe de la chaussée, pouvant être périodiques ou isolées, avec un espacement variable. Elles peuvent affecter tout ou une partie de la chaussée. Cette pathologie est généralement consécutive à :

- Un défaut de joint de reprise des travaux de revêtement en enrobé
- Retrait hydraulique des couches traitées
- Mouvement des couches inférieures dont les tassements non uniformes



Figure I.5_fissure transversale(enuomachinery.net)

b) Faïençage :

Pathologie se caractérise par un réseau de fissures résultant du croisement de fissures longitudinales et transversales, formant un motif irrégulier et parfois très dense. Ce phénomène peut rapidement altérer l'imperméabilité du revêtement.

Le niveau de gravité du faïençage se détermine en fonction de la taille des mailles du réseau et de l'éventuelle présence d'arrachements au niveau des fissures. Cette pathologie est consécutive généralement à :

- Manque d'imperméabilité de la couche de surface
- Remontées d'eau dans les corps de la chaussée
- Fatigue intense de la chaussée et notamment des couches supérieures en matériaux bitumineux



Figure I.6_Faïençage(tpdemain.com)

c) Les déformations :

Affaissement de rive :

L'affaissement de rive correspond à un enfoncement prononcé et localisé, situé entre le bord de la chaussée et la bande de roulement de rive.

Les Causes possibles :

- Absence ou mauvaise qualité des accotements ou des trottoirs
- Drainage localement défectueux des eaux pluviales
- Pollution ou dégradation des matériaux constituant le corps de chaussée
- Retrait hydrique du sol support sous l'effet des conditions climatiques et de la végétation.

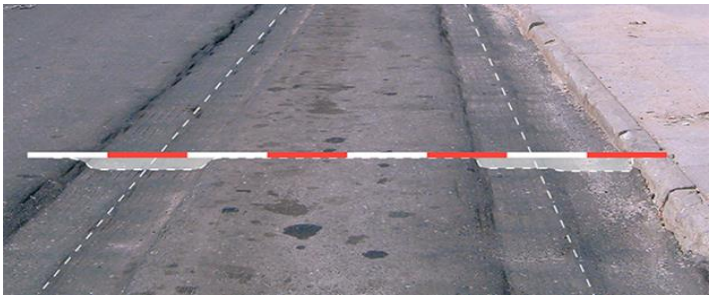


Figure I.7_Affaissement de rive (tpdemain.com)

Flache :

La flache est un enfoncement ponctuel et marqué, localisé sur la chaussée. Ce type d'affaissement se présente généralement sous une forme circulaire.

Les Causes possibles :

- Défaut de portance localisé du sol support ou des couches de chaussée ;
- Défaut localisé de mise en œuvre ;
- Infiltration des eaux pluviales due à la perméabilité excessive des couches supérieures.



Figure I.8_Flache (tpdemain.com)

Orniérage :

L'orniérage est une déformation permanente longitudinale de la chaussée, résultant du tassement progressif de la structure sous l'effet du passage répété des charges roulantes.

Les causses possibles :

- Compactage insuffisant de l'enrober lors de l'exécution
- Mauvais remblaiement et réfection de tranchées
- Fatigue des chaussées
- Usure de l'enrobé en surface



Figure I.9_orniérage (texum.swiss)

d) Les arrachements :

Pelade :

La pelade est une dégradation de surface qui peut affecter les enduits superficiels ainsi que les enrobés de la couche de roulement. Elle se caractérise par un arrachement des matériaux par plaques, provoqué par l'action des efforts horizontaux duaux trafic.

Les causses :

- Faible épaisseur de la couche de roulement avec collage défectueux de la couche de roulement dû à un insuffisance ou l'absence de la couche d'accrochage
- Mauvais collage support



Figure I.10_Pelade (tpdemain.com)

Plumage :

Sous l'effet des sollicitations du trafic, l'arrachement des gravillons conduit à une augmentation de la rugosité de la surface de roulement.

Les causes possibles :

- Utilisation de gravillons sales
- Compactage insuffisant
- Répandage de liant inadapté
- Remise trop rapide sous circulation



Figure I.11_plumage (tpdemain.com)

Nids de poule :

Cavité circulaire créée à la surface de la chaussée par le détachement de matériaux.

La désagrégation et le départ de ces matériaux sont dus à :

- Une pollution par remontée d'argile dans le corps de chaussées
- Infiltration des eaux pluviales espar percolation
- Une mauvaise mise en œuvre de la couche de roulement



Figure I.12_Nids de poule (ville.chateauguay)

e) Remontées :

Remontées d'eau ou de boue :

Les remontées d'eau à la surface de la chaussée se produisent lorsque l'eau s'infiltre depuis le sol ou le système de drainage.

Les Causes principales :

- La remontée de la nappe phréatique ;
- Le bouchage éventuel du système de drainage.

Ressuage :

Les exsudés de liant apparaissent à la surface d'un revêtement bitumineux, suite à une remontée du liant ou à l'enfoncement des gravillons

Cette dégradation est généralement consécutive à :

- Un défaut de dosage de bitume
- Un enfoncement des gravillons d'un support très mou
- Des très fortes températures combinées à circulation très dense



Figure I.13_ressuage (routes-transports)

II.4.2 Les solutions techniques de traitement des pathologies

La prévention et le traitement des pathologies liées au retrait-gonflement reposent sur une approche combinant amélioration du sol support et adaptation de la structure de chaussée.

Les principales solutions techniques comprennent :

a) Amélioration ou stabilisation du sol :

Le traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques permet de réduire la plasticité du sol, d'améliorer sa portance et de limiter son potentiel de gonflement. Cette technique agit à la fois sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques du matériau.

b) Amélioration du drainage :

La maîtrise des échanges hydriques constitue un élément essentiel. La mise en place de dispositifs de drainage longitudinal ou transversal permet de limiter les variations de teneur en eau dans le sol support.

c) Renforcement structurel :

L'augmentation de l'épaisseur des couches ou l'utilisation de matériaux plus rigides permet de mieux répartir les contraintes et de réduire l'impact des mouvements différentiels.

d) Substitution de sol :

Dans les cas les plus défavorables, le remplacement partiel ou total du sol expansif par un matériau plus stable peut être envisagé.

III. Évolution de la structure des argiles en fonction des différentes sollicitations :

La structure des argiles évolue sous l'effet combiné des sollicitations hydriques et mécaniques.

L'humidification provoque une diminution de la succion et permet l'insertion progressive de molécules d'eau entre les feuillets argileux, notamment dans les minéraux de type smectite. Ce mécanisme engendre une augmentation de l'espacement inter foliaire et un gonflement volumique mesurable.

Des observations expérimentales montrent que les épisodes pluvieux peuvent induire des phases de gonflement en profondeur, particulièrement dans les sols riches en montmorillonite (Boussafir, 2006).

Le drainage ou la dessiccation entraîne une perte d'eau et une augmentation de la succion. Ce processus provoque un rapprochement des feuillets et une diminution du volume global du sol. Le retrait correspond ainsi à la contraction volumique liée à la perte d'eau (Boussafir, 2006).

Sous chargement, la structure poreuse du sol se réorganise, ce qui modifie la distribution des contraintes internes. Lorsque les conditions hydriques sont défavorables, la portance du sol peut être significativement affectée, compromettant la stabilité des infrastructures reposant sur ces terrains (GTR, 2024).

Ainsi, l'évolution structurelle des argiles résulte de l'interaction complexe entre sollicitations hydriques et mécaniques, ce qui explique la sensibilité particulière des sols argileux sous les chaussées.

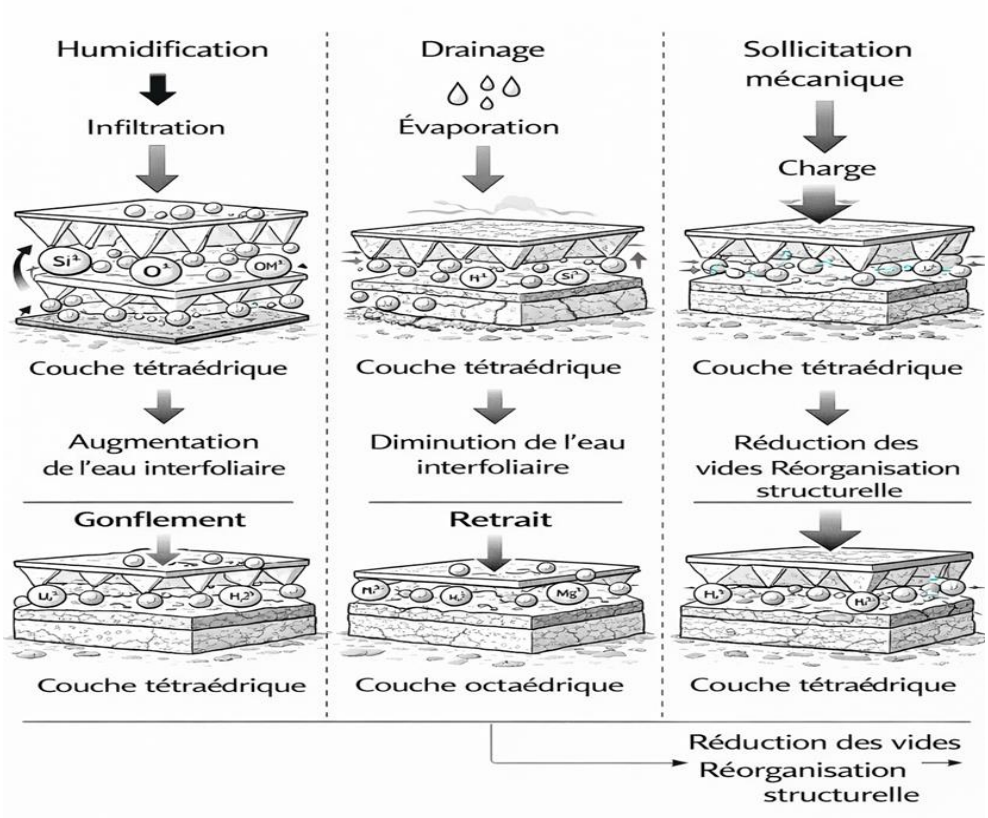


Figure I.14_ évolution de la structure des argiles en fonction des différentes sollicitations

III.1Conséquences techniques et économiques sur les chaussées :

Les variations volumétriques des sols argileux induites par les cycles de retrait et de gonflement ont des répercussions directes sur le comportement des infrastructures routières. Ces mouvements différentiels affectent la stabilité du système multicouche et peuvent

compromettre la durabilité de la chaussée. Les conséquences peuvent être classées en impacts techniques et impacts économiques.

III.1.1 Impact technique :

Les mouvements du sol support provoquent des déformations non uniformes sous la structure de chaussée. Ces déformations se traduisent par :

- Fissuration longitudinale en rive
- Fissuration transversale
- Décollement des couches
- Affaissements localisés

Les études menées sur les effets de la sécheresse montrent que les cycles hydriques répétés accélèrent la fatigue des matériaux de surface La fissuration facilite ensuite l'infiltration de l'eau, aggravant le phénomène et créant un cercle vicieux de dégradation. (Boussafir, 2006).

On observe ainsi une réduction significative de la durée de service prévue lors du dimensionnement.

Les contraintes supplémentaires générées par les soulèvements et tassements différentiels augmentent les sollicitations internes dans les couches bitumineuses, accélérant la fissuration par fatigue.

Les chaussées construites sur sols expansifs nécessitent des interventions d'entretien plus fréquentes : rebouchage des fissures, renforcement localisé, reprise des accotements.

III.1.2 Impact économique :

Le phénomène de retrait–gonflement des sols entraîne des pertes économiques importantes en raison de l'augmentation des coûts d'entretien et des réparations répétées des routes. Dans les cas avancés, les dégradations peuvent nécessiter le renforcement des couches, la stabilisation des sols ou la reconstruction de certaines sections de chaussée. Par ailleurs, la prévention de ce phénomène exige parfois l'adoption de solutions spécifiques telles que l'amélioration du drainage ou la stabilisation à la chaux. Ces mesures augmentent le coût initial du projet, mais permettent de réduire les dommages ainsi que les coûts futurs (GTR, 2024)

VI. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les bases théoriques relatives aux chaussées et aux sols argileux, ainsi que les mécanismes responsables des variations volumétriques. L'analyse met en évidence le rôle central des variations hydriques et de la succion dans le développement des phénomènes de retrait et de gonflement.
Les conséquences techniques et économiques soulignent l'importance d'une caractérisation géotechnique rigoureuse et d'une conception adaptée des structures routières en présence de sols expansifs.
Ces éléments constituent le cadre théorique nécessaire à l'analyse approfondie du phénomène et à l'étude des solutions techniques développées dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 :

Sols non saturés et Compactage

I. Introduction :

Les sols sont classés en sols saturés, secs et non saturés, ces derniers se caractérisant par la présence d'une pression de vide (pression négative). La structure microscopique du sol résulte de la disposition des particules et des interactions entre celles-ci, qui dépendent de leur taille, en particulier dans l'argile et le limon. Cette structure détermine les propriétés physiques et chimiques ainsi que le comportement hydromécanique du sol. La compréhension de son évolution au cours des cycles de contrainte est également indispensable pour expliquer les phénomènes de retrait, de gonflement et de glissement (Idris A., 2018).

II. Définition des sols non saturés :

Le sol non saturé constitue un système triphasique composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. La phase gazeuse occupe les vides poreux non remplis par le liquide et peut être constituée de gaz, de vapeur ou d'un mélange des deux. (Abou-bekr et al,2024)

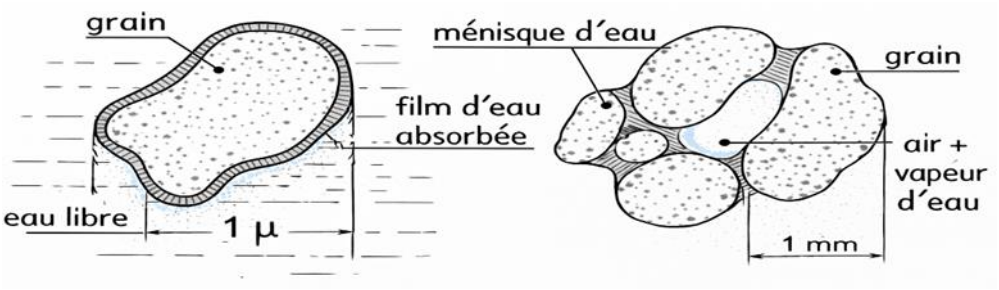


Figure II.1_sol humide et sol non saturé (M.Callaud 2004)

Le domaine des sols non saturés comprend à la fois les sols issus d'ouvrages compactés, tels que les remblais, les digues, les barrages en terre et les barrières géologiques d'étanchéité pour les centres de stockage des déchets, ainsi que les sols naturels situés dans les régions arides à semi-arides, voire même dans les régions tempérées, où les couches superficielles sont souvent non saturées. (idris.s. 2018)

II.1 Comportement des sols non saturés :

Dans la nature, les sols non saturés contiennent à la fois une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse, mais dans des proportions variables. (Moucer.O ,2020)

- **La phase solide :** ou squelette solide est constitué par les grains minéraux de l'agrégat.
- **La phase liquide :** Elle est constituée d'eau qui remplit les interstices présents dans les débris. On dit que le sol est saturé si tous les interstices sont remplis d'eau ; sinon, il est partiellement saturé.
- **La phase gazeuse :** Dans un sol partiellement non saturé, l'air occupe une partie essentielle des vides présents dans la structure du sol

II.2 L'eau dans le sol :

L'eau joue un rôle essentiel en géotechnique, car de nombreux accidents surviennent lorsqu'elle n'est pas prise en compte ou lorsqu'elle est mal évaluée (affaissement important des bâtiments, effondrement total ou partiel, glissements de terrain dus à de fortes précipitations).

En général, tous les types de sols contiennent plus au moins de vides dans lesquels l'eau s'infiltre, s'écoule et parfois s'accumule.

La figure II.2 nous montre les différents états de l'eau dans un sol ou on distingue :

- L'eau de constitution : qui entre dans la composition chimique des particules constituant les particules de sol (en particulier l'argile)
- L'eau liée ou adsorbée : une fine couche d'eau qui adhère aux particules solides (argile, minéraux et matériaux poreux) sous l'effet des forces d'attraction moléculaire. Elle se divise en deux types principaux :
  - **L'eau hygroscopique (directement absorbée) :** il adhère directement aux grains de sol et ne peut être extraite que par un séchage thermique intensif (>105 °C 300 °C) ou sous vide poussé
  - **L'eau membranaire (superficielle) :** il adhère à la couche hygroscopique et présente un mouvement limité à la surface des particules , elle est extraite par centrifugation
- L'eau interstitielle : il est classée selon deux catégories :
  - **Sol saturée :** eau interstitielle libre (sous la nappe) soumise à la gravité et aux écoulements hydrostatique
  - **Sol non saturée :** eau interstitielle capillaire (au-dessus de la nappe) en équilibre entre gravité et tension superficielle

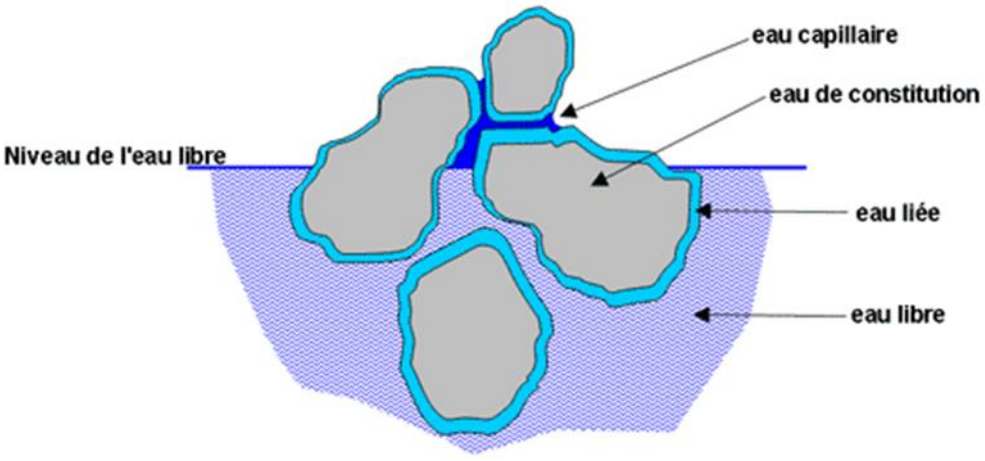


Figure II.2_Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique. (INPL Nancy, 2016)

II.3 Sol non saturé et phénomène de capillarité :

Un sol non saturé présente généralement des vides partiellement remplis, c'est-à-dire que les pores contiennent à la fois de l'eau et des gaz (air et vapeur d'eau), et sont soumis à des forces

de succion. Ce phénomène de succion peut être mis en évidence en immergeant un tube fin dans un réservoir d'eau. On observe alors une montée de l'eau dans le tube jusqu'à une hauteur h. Cette hauteur peut être déterminée en établissant les conditions d'équilibre entre les forces de tension superficielle et le poids de la colonne d'eau.

$$T\ .cos\alpha\ .\pi.d = \pi\ .d\text{^}2/4.h.\gamma_W$$

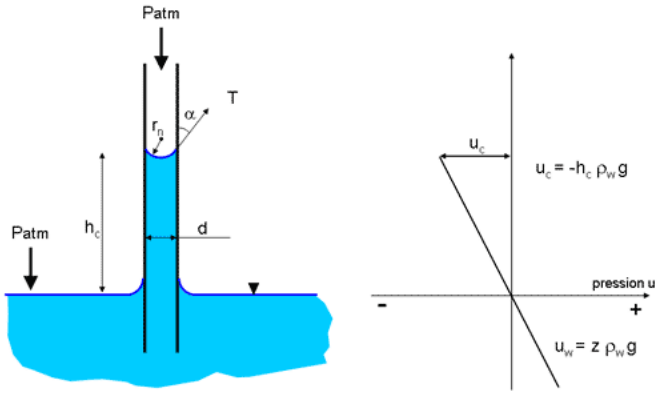


Figure II.3_Tube capillaire et pressions correspondantes (rpn.univ-lorraine)

$$h.c.\pi\ d\text{^}2\ \rho w\ g/4 = \pi.d.T.cos\ \alpha$$

$$UC = hC.\rho w$$

Cette relation peut être exprimer sous la forme suivante :

$$h = \frac{4Tcos\alpha}{d\ *\gamma w} \quad (4)$$

Elle est connue sous le nom de loi de Jurin (4), qui relie la hauteur de l'eau aux propriétés de tension superficielle du liquide.

T : représente la tension superficielle, qui est une force par unité de longueur, et vaut environ (0,07275N/m) pour l'eau à (20 °C). Cette tension s'exerce sur la périphérie du tube capillaire, c'est-à-dire sur la circonférence donnée par πd

α: Est l'angle de contact entre deux fluides (ici l'air et l'eau) au contact d'un solide.

Dans le sol, les espaces entre les grains forment un réseau de petits capillaires de formes et dimensions variées. Lorsqu'un sol initialement sec est mis en contact avec une nappe phréatique, l'eau monte par capillarité jusqu'à une certaine hauteur au-dessus du niveau de la surface libre, entraînant une saturation progressive du sol. Ce phénomène constitue un processus d'humectation du sol par capillarité.

Le processus inverse, correspondant à la perte progressive d'eau d'un sol initialement saturé, s'effectue sous l'action de la gravité et/ou de l'évaporation. Lors du séchage, une partie de l'eau reste retenue dans le sol par les forces de tension superficielle.

Dans un sol non saturé, la pression de l'eau est inférieure à la pression atmosphérique. En prenant la pression atmosphérique comme référence (souvent considérée comme zéro), la pression dans la zone non saturée est négative et peut s'exprimer par :

$$Uw = -\gamma wh$$

La valeur absolue de cette pression négative est appelée succion.

La succion dépend du degré de saturation, de la nature du sol et de son historique hydraulique. Ainsi, pour un même contenu en eau, la succion diffère selon que le sol se trouve en phase d'humidification ou de dessiccation, phénomène connu sous le nom d'hystérésis hydraulique.

III. La Succion dans les sols :

En mécanique des sols, la notion de succion est un élément essentiel pour l'étude des sols non saturés, car elle régit le mouvement et l'équilibre de l'eau à l'intérieur de ceux-ci et influence directement leur comportement mécanique ; il est donc nécessaire de la mesurer dans des conditions de non-saturation. Le contrôle de la succion revêt également une grande importance dans les essais géotechniques, notamment pour déterminer la courbe de rétention d'eau. Cette courbe est un outil essentiel pour caractériser les sols, car elle permet de déterminer leurs propriétés telles que la conductivité hydraulique, la capacité de rétention d'eau et la résistance au cisaillement. (MOUCER OUAFIA 2020)

La succion dans le sol a été définie en géotechnique en 1965. Dans les sols non saturés, elle correspond à une pression négative exercée par le sol sur l'eau présente dans les pores, reflétant la force d'attraction du sol sur l'eau.

III.1 Différents Types De Succion :

III.1.1 Succion capillaire :

Les phénomènes de capillarité apparaissent au niveau de la zone de séparation entre deux fluides, où les molécules sont soumises à des forces d'interaction non équilibrées, contrairement aux molécules situées à l'intérieur du fluide qui subissent des forces similaires et équilibrées. À l'intérieur d'une masse d'eau, une molécule est soumise à des actions de même nature dans toutes les directions (figureII 4b), tandis qu'au niveau de l'interface eau-air, par exemple, elle est influencée par deux types d'actions différentes provenant respectivement de l'eau et de l'air (figure II 4a).

Par conséquent, les molécules d'eau situées à l'interface sont attirées vers l'intérieur de la masse liquide, ce qui soumet la surface de l'eau à une force perpendiculaire à la surface libre. Cette interaction est à l'origine de ce que l'on appelle la tension superficielle "σ_s" comme illustré à la figure 1 dans le cas d'une interface plane.

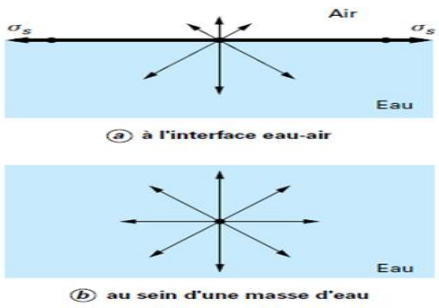


Figure II.4_Actions de forces sur une molécule d'eau(L'eau dans les sols non saturés)

Les phénomènes de capillarité peuvent généralement être expliqués à l'aide du schéma de la (figure II.5), qui illustre la remontée capillaire de l'eau à une hauteur (h) dans un tube fin de rayon (r) plongé dans un récipient rempli d'eau. Le rayon de courbure du ménisque séparant l'eau et l'air à l'intérieur du tube est lié à la différence de pression entre les deux phases conformément à la loi de Laplace. En supposant des pores de forme cylindrique, la relation mathématique est simplifiée et s'exprime sous la forme de la loi de Jurin:

$$Ua - Uw = \frac{2\sigma s\, cos\theta}{r}$$

$Ua\ et\ Uw$: respectivement les pressions d'air et d'eau

σs: la tension de surface eau-air

θ: L'angle de raccordement entre le ménisque et le solide

On a pour l'eau :σs = 0 ,07275 N/m et $cos\theta$= 1.

Cette relation montre qu'au niveau du ménisque, la pression de l'eau est inférieure à celle de l'air, et que cette différence augmente lorsque le rayon du tube $r$diminue. En prenant la pression atmosphérique comme référence nulle, la pression de l'eau à l'intérieur du tube devient négative en raison de l'effet de la gravité sur la colonne d'eau.

Si l'on considère ensuite la charge hydraulique h du fluide en équilibre hydrostatique, en choisissant comme origine la surface plane du liquide, on obtient :

$$h = \frac{Uw}{\gamma w + z}$$

Et donc, dans le fluide :$Uw = \gamma w * z$

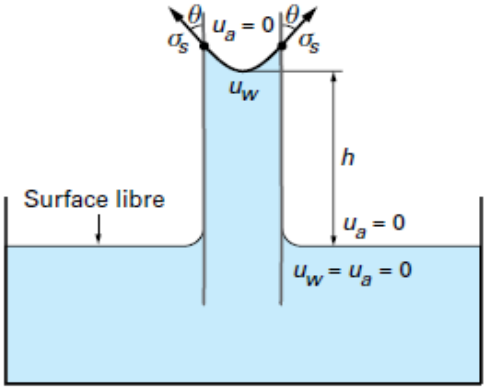


Figure II.5_ Remontée capillaire dans un tube d'eau dans les sols non saturés)

La loi de Jurin peut être déduite de manière directe à partir de la figure 5, qui illustre la tension superficielle (σs) et l'angle de contact (θ) entre l'eau et une surface solide. La tension superficielle s'exerce le long du pourtour du ménisque, inclinée d'un angle (θ) par rapport à la paroi du tube. L'équilibre du ménisque sphérique s'exprime alors comme suit :

- Les actions dirigées vers le haut sont estimées en intégrant les tensions sur la circonférence, en projetant sur l'axe vertical, ce qui donne une valeur :

$$(2\ \pi r\ cos\ \theta)\sigma s$$

- Les actions dirigées vers le bas correspondent au poids de la colonne d'eau de hauteur h, qui vaut :

$$\gamma w\ \pi\ r\text{^}2\ h$$

Lorsque ces deux valeurs sont égales, l'équilibre des forces est atteint, ce qui conduit à l'équation suivante :

$$h = \frac{2\sigma s\ \cos\theta}{r\ \gamma w}$$

Équivalent à la loi de Jurin, si l'on utilise l'équation :

$$Uw = -\gamma w * z$$

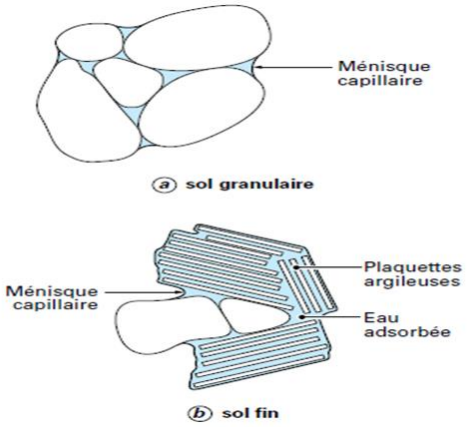


Figure II.6_Représentation schématique d'un sol non saturé (L'eau dans les sols non saturés)

Le schéma de la figure 6a illustre un sol granulaire non saturé, où les ménisques se situent dans les plus petits pores au niveau des contacts entre les grains. Plus le sol se désature, plus le rayon des ménisques diminue et plus la succion augmente, atteignant un maximum lorsque le sol est presque complètement sec. L'air commence à pénétrer par les plus gros pores en surface, et à mesure que le séchage se poursuit, les ménisques s'insinuent dans des pores de plus en plus petits, chaque niveau étant associé à une valeur de succion et à un rayon spécifique selon la loi de Jurin.

La figure 6b représente le cas d'un sol argileux fin, où des plaquettes argileuses s'agrègent autour de grains de limon. La succion dépend ici du rayon du ménisque proche du grain, et l'agrégat reste saturé en raison de la petite taille des pores et des forces d'attraction exercées par l'argile sur l'eau.

III.1.2 Succion d'adsorption :

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols granulaires, l'attraction de l'eau par le sol ne se limite pas à la capillarité, mais inclut également les forces d'adsorption physico–chimiques, car les particules d'argile sont chargées négativement et tendent donc à adsorber l'eau à leur surface (GHANEM.F.2011)

III.1.3 Succion osmotique :

La succion osmotique représente la capacité du sol à retenir l'eau en raison des sels dissous dans celle-ci. Ce type de succion apparaît lorsque l'eau est une solution saline, et si la concentration en sels dans la solution du sol est faible, elle peut être négligée. La succion osmotique dépend également du degré de saturation du sol plus ce degré augmente, plus la succion osmotique diminue (olivier cuisinier 2002)

III.1.4 Succion totale :

La succion totale est définie comme la somme de deux composantes principales la succion matricielle et la succion osmotique

$$s = sm + s(osm) = (sc + sad) + s(osm)$$

III.2 Effets De La Succion Sur Les Particules Solides :

Dans un sol non saturé, on peut considérer que les pores agissent comme de petits tubes capillaires. Les tensions superficielles associées aux ménisques exercent un effet direct sur les particules solides (FigureII.7), générant ainsi des contraintes supplémentaires dans le squelette du sol. Ces effets modifient à leur tour la répartition des déformations et influencent le comportement mécanique global du sol (GHANEM.F.2011.)

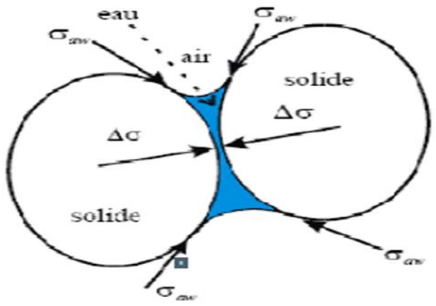


Figure II.7_Effets de la succion sur les grains du sol (GHANEM.F.2011.)

IV. Mécanisme du retrait–gonflement

IV.1 Retrait et gonflement comme réponse à la variation de la Succion :

Le retrait et le gonflement constituent deux réponses opposées d'un même système hydromécanique gouverné par la succion. En phase de dessiccation, la teneur en eau diminue, la succion augmente et le squelette du sol se contracte. En phase d'humidification, la succion diminue, l'eau pénètre dans les pores et autour des particules, ce qui favorise l'expansion du matériau. Cette évolution peut être résumée par :

$$\Delta\psi \Rightarrow \Delta w \Rightarrow \Delta e \Rightarrow \Delta V$$

où ψ est la succion, w la teneur en eau, e l'indice des vides et V le volume. Le retrait–gonflement ne résulte donc pas d'une simple variation d'eau, mais d'une modification de l'état hydrique et des interactions internes dans le réseau poreux. -- (Belabbaci, 2014 ; Bellatrache, 2012) –

IV.2 Rôle de l'état initial, de la microstructure et du chemin hydrique

L'intensité du phénomène dépend fortement de l'état initial du matériau. La teneur en eau initiale, la densité sèche, la succion initiale, l'indice des vides et la structure poreuse conditionnent l'amplitude du gonflement et du retrait. Un matériau plus sec présente généralement un potentiel de gonflement plus élevé, tandis qu'un matériau plus dense oppose une résistance plus forte aux réarrangements internes. De plus, le chemin hydrique suivi reste déterminant : un chemin de séchage n'est pas équivalent à un chemin d'humidification, même pour un état final voisin, en raison de l'hystérésis et de l'évolution microstructurale. Cette dépendance peut être exprimée par :

$$RG = f(wi, \gamma d, e0, \psi i, microstructure, chemin\ hydrique)$$

Où RG désigne la réponse retrait–gonflement. -- (Benchouk, 2005 ; Mekaideche, 2021) –

IV.3 Retrait des sols gonflant :

Le retrait désigne la diminution du volume d'un sol sous l'effet de l'évaporation de l'eau contenue dans son réseau poreux. L'assèchement progressif du matériau induit le développement de tensions capillaires ainsi que la formation de ménisques à l'interface entre les particules solides et l'eau interstitielle. Ces tensions capillaires génèrent des contraintes internes, notamment des contraintes de cisaillement. À mesure que l'évaporation se poursuit, les tensions capillaires augmentent tandis que le rayon des pores diminue, conformément à l'équation de Jurin-Laplace. Simultanément, la résistance à la traction du sol s'accroît. Lorsque cette résistance devient égale aux contraintes engendrées par les tensions capillaires, le retrait cesse et le volume du sol ne diminue plus. La teneur en eau correspondant à cet état est appelée limite de retrait.

Au cours du drainage d'un sol, trois phases successives peuvent être mises en évidence (Schubert, 1982). Dans une première phase, l'ensemble des macropores demeure totalement saturé en eau (Figure II.8-a). La deuxième phase, dite transitionnelle, débute au point d'entrée d'air, sous l'effet de l'évaporation de l'eau présente à la surface des macropores. Le sol commence alors à se désaturer et l'air pénètre progressivement dans le milieu poreux. Toutefois, une partie de l'air peut rester piégée dans certains pores, tandis que d'autres demeurent encore saturés (Figure II.8-b). Enfin, dans la dernière phase, le sol ne peut plus subir de réduction volumique ; l'air occupe alors l'ensemble de l'espace des macropores et un état de volume constant est atteint (Figure II.8-c).

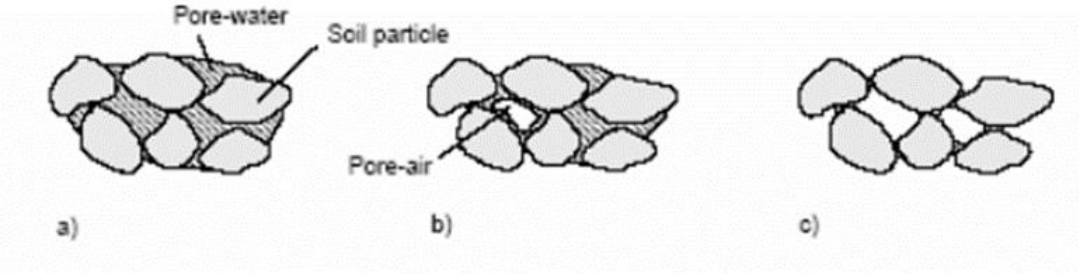


Figure II.8 Différentes phase du retrait (Schubert, 1982)

Le phénomène de retrait peut également être décrit à partir de l'évolution simultanée du volume d'eau et du volume du sol. À cet égard, trois phases principales sont généralement distinguées sur la courbe de retrait (Figure II.9) : le retrait normal, le retrait résiduel et l'absence de retrait (Haines, 1923 ; Sposito, 1973 ; McGarry et Daniells, 1987 ; Coughlan et al., 1991 ; Kim et al., 1992 ; Tripathy et al., 2002). Durant la phase de retrait normal, la diminution du volume du sol est égale au volume d'eau perdu ; le sol demeure saturé et l'air ne pénètre pas dans les pores. La phase de retrait résiduel intervient après l'atteinte de la limite de retrait, lorsque l'air commence à pénétrer dans les vides du sol au point d'entrée d'air ; dès lors, la réduction du volume du sol devient nettement inférieure au volume d'eau évaporé. Enfin, dans la phase d'absence de retrait, le volume du sol reste constant en raison de l'agencement interne des particules, bien que l'eau continue de s'évaporer.

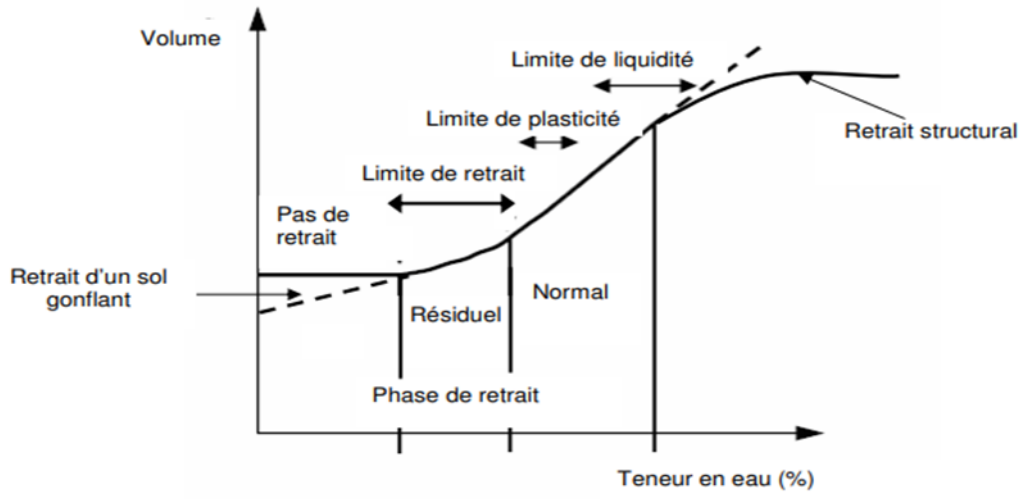


Figure II.9_courbe de retrait classique (Schubert, 1982)

De manière générale, le retrait évolue linéairement jusqu'à une teneur en eau caractéristique définie comme la limite de retrait (wR). Au-delà de cette valeur, le sol continue à perdre de l'eau sans variation volumique notable. Cette limite est généralement déterminée par l'intersection de deux segments représentant respectivement la phase de retrait normal et celle d'absence de retrait. Le coefficient de retrait (RI) correspond, quant à lui, à la pente de la droite représentant la variation relative de la hauteur en fonction de la teneur en eau (Figure II.9).

Dans les sols naturellement structurés, une quatrième phase, appelée retrait structural, peut également être observée (Figure II.9). Au cours de cette phase, le volume d'eau perdu devient supérieur à la diminution du volume du sol (Yule et Richie, 1990). En revanche, cette étape n'apparaît pas dans les sols restructurés (Bronswijk, 1988). Par ailleurs, dans le cas des sols gonflants, les variations de volume peuvent se poursuivre même pour des teneurs en eau inférieures à la limite de retrait (Figure II.9).

Afin de caractériser la déformation ou le retrait des sols argileux, différents essais de dessiccation ont été développés (Philipponnat, 1991 ; Biarez et al., 1988 ; AFNOR XP P94-060, parties 1 et 2). Toutefois, ces essais ne conduisent pas systématiquement aux mêmes paramètres caractéristiques. En outre, certaines méthodes tendent aujourd'hui à être abandonnées en raison des difficultés pratiques liées à leur mise en

IV.5 Déformations différentielles et effets sur les pathologies de chaussée

Sous chaussée, le problème principal n'est pas seulement l'amplitude du retrait ou du gonflement, mais leur caractère différentiel. Les variations hydriques ne sont ni instantanées ni homogènes ; elles dépendent des accotements, de la fissuration du revêtement, de l'évaporation, des pluies et du drainage. Le déplacement vertical total peut être représenté par :

$$\Delta z = \int_0^{ha} \varepsilon z(z) dz$$

où εz varie avec la profondeur et la position. La sécheresse provoque souvent un retrait à partir des bords vers le centre de la chaussée, puis la réhumidification saisonnière entraîne un regonflement et un ramollissement du sol support. Il en résulte des fissures, des tassements différentiels et une dégradation progressive de la structure routière. (Magnan, 2013)

IV.5 Transferts hydriques sous chaussée :

IV.5.1 Infiltration verticale (pluie, fissures, surface) :

Sous chaussée, l'eau ne reste pas uniquement en surface ; elle peut pénétrer verticalement à travers les fissures, les joints, les défauts du revêtement et les zones dégradées. Cette infiltration modifie localement la teneur en eau du sol support, abaisse la succion et favorise ainsi le gonflement des zones réhumidifiées. Dans une approche simplifiée, le flux d'eau liquide en milieu non saturé peut être décrit par la loi de Darcy généralisée :

$$q = -k(\theta)\, \nabla h$$

où q est le flux volumique, k(θ) la conductivité hydraulique non saturée dépendant de la teneur en eau, et h la charge hydraulique totale. Comme k(θ) augmente lorsque le sol se réhumidifie, l'infiltration tend à s'accélérer dans les zones déjà humides ou fissurées, ce qui renforce l'hétérogénéité hydrique sous la chaussée. l'eau pénètre en pratique par les fissures et interfaces, même lorsque le revêtement est supposé protecteur. [TH.M.GC.FR.2022.17 ; Magnan, 2013]

IV.5.2 Drainage latéral (accotements, fossés, écoulements) :

Le drainage latéral joue un rôle majeur dans l'évolution hydrique d'une chaussée construite sur sol argileux. En période sèche, l'évaporation est plus intense au niveau des accotements, ce qui provoque un retrait progressif du sol à partir des bords vers le centre. En période pluvieuse, ces mêmes zones servent de voies préférentielles de réhumidification. Ce mécanisme crée des gradients latéraux de succion et de déformation, qui sont à l'origine de tassements et de fissurations différentielles. Du point de vue physique, l'importance de ce phénomène vient du fait que le gradient hydraulique n'est pas seulement vertical, mais aussi horizontal :

$$q \vec{\nabla} h = -k(\theta)$$

Avec ∇h comportant ici une composante latérale non négligeable. Le schéma classique d'évolution d'une route sur sol gonflant montre explicitement que le retrait commence depuis les accotements, que la chaussée se fissure, puis que la réhumidification saisonnière réactive le gonflement et la dégradation de surface. (Magnan, 2013)

IV.5.3 Remontée capillaire (nappe proche) :

Lorsque la nappe phréatique ou une zone humide est relativement proche de la plateforme, l'eau peut remonter par capillarité dans les pores fins du sol. La hauteur de remontée capillaire est d'autant plus importante que le rayon des pores est faible. Dans une représentation simplifiée, elle peut être estimée par la loi de Jurin :

$$hc = (2\sigma\ cos\ \theta)/(\gamma\omega\ r)$$

où hc est la hauteur de remontée capillaire, σ la tension superficielle eau–air, θ l'angle de contact, γω le poids volumique de l'eau et r le rayon capillaire équivalent. Ce mécanisme est d'autant plus marqué que les pores sont fins ; il contribue donc à l'alimentation hydrique des sols argileux et des matériaux fins placés sous chaussée.

IV.6 Zone active : définition, profondeur et rôle dans le retrait-gonflement :

La zone active correspond à l'épaisseur du sol effectivement soumise aux variations saisonnières de teneur en eau et de succion. C'est dans cette zone que se développent les cycles de retrait–gonflement à l'origine des mouvements différentiels sous chaussée. Son extension dépend notamment du climat, de la perméabilité du sol, de la fissuration, de la végétation, du drainage, ainsi que de la nature du revêtement et des échanges hydriques latéraux au niveau des accotements. Plus cette zone est profonde et hétérogène, plus le risque de déformations différentielles et de désordres de chaussée augmente.

En première approximation, le déplacement vertical total induit par le retrait ou le gonflement peut s'écrire :

$$\int_0^{ha} \epsilon z(z)dz$$

où Ha représente l'épaisseur de la zone active et εz la déformation verticale locale. Cette expression montre que le risque n'est pas seulement lié à l'amplitude locale des déformations, mais aussi à la profondeur affectée et à la distribution des déformations dans le massif. La zone active constitue ainsi le volume de sol qui pilote la localisation des fissures, l'intensité des tassements différentiels et l'évolution pathologique de la chaussée au cours des cycles hydriques

V.Le compactage des sols :

Le compactage est défini comme l'ensemble des opérations mécaniques appliquées directement sur le sol en place afin d'en augmenter la densité. Cette opération est réalisée en réduisant les pores et les vides remplis d'air au sein du sol, ce qui permet de diminuer la probabilité de déformations sous les charges et d'améliorer sa capacité portante.

Le compactage des sols, et en particulier des sols fins, dépend de plusieurs facteurs fondamentaux, notamment : la teneur en eau ou la teneur en humidité du sol, la nature et la constitution du sol, ainsi que l'énergie de compactage appliquée au cours de l'opération.

V.1 Application du compactage :

Le compactage du sol constitue une opération essentielle présente dans de nombreux domaines des travaux de construction et de l'ingénierie géotechnique variée.

- Les chaussées
- Les barrages en terre
- Remblai routier



Figure II.10_ Compactage de surface d'une chaussée routière (hesus.com)

V.2 Les facteurs d'influence :

V.2.1 Influence de la teneur en eau :

Lors de l'étude d'un sol non saturé, en utilisant une méthode donnée et en appliquant la même énergie de compactage, on obtient une courbe montrant la variation de la densité sèche (γd) en fonction de la teneur en eau du sol(ω). La forme de cette courbe peut être expliquée comme suit :

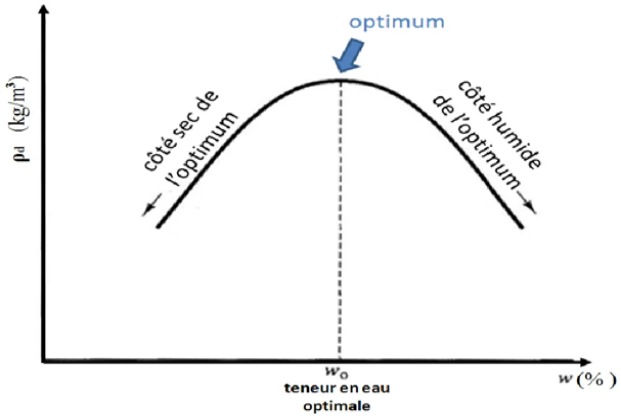


Figure II.11_ Courbe Proctor typique d'un sol(researchgate.net)

Lorsque la teneur en eau augmente, une part importante de l'énergie de compactage est utilisée pour déplacer l'eau au lieu de rapprocher les particules solides entre elles. De plus, l'eau occupe un volume qui pourrait être rempli par des grains solides plus denses. En revanche, si le sol est trop sec, le compactage devient peu efficace, car l'absence d'eau limite le glissement et le réarrangement des particules. Ainsi, l'eau joue un rôle essentiel de lubrifiant facilitant le rapprochement des grains et permettant d'obtenir un compactage efficace du sol.

V.2.2 Influence de la nature du sol :

La figure II.12 suivant présent les courbes de compactage correspondant à différents types de sols. On constate que le sommet de la courbe devient plus prononcé lorsque l'influence de la teneur en eau augmente, cet effet étant plus marqué pour les sols à grains fins. Par ailleurs, plus la courbe est aiguë, plus le compactage du sol devient difficile, ce qui rend ce type de sol moins approprié, notamment pour les travaux de remblais.

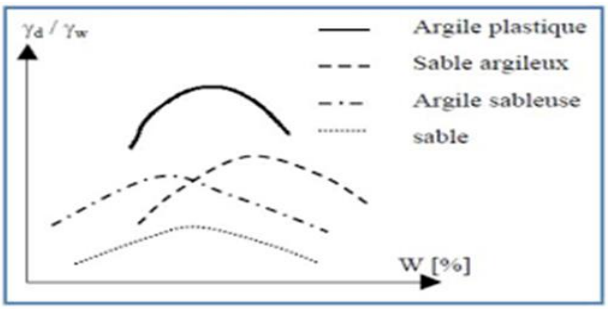


Figure II.12_ Influence de la nature du sol sur l'optimum Proctor (archive.univ-biskra.dz)

V.2.3 L'énergie de compactage :

L'énergie de compactage représente la quantité d'énergie mécanique transmise au sol afin d'améliorer l'arrangement de ses particules et de réduire le volume des vides internes. Sur le terrain, ce compactage est obtenu par différentes techniques telles que la pression statique, la vibration, le pétrissage ou les actions d'impact, selon le type d'équipement de compactage utilisé.

La quantité d'énergie appliquée au sol dépend principalement du nombre de passes du compacteur ainsi que de sa masse. En effet, une augmentation du nombre de passages ou du poids de l'équipement permet de transmettre une énergie plus importante, ce qui améliore le degré de compactage du sol.

En laboratoire, le compactage des échantillons de sol est généralement réalisé par des impacts répétés, avec la possibilité d'utiliser également la pression statique ou la vibration afin de reproduire différentes conditions de compactage.

L'influence de l'énergie de compactage sur la valeur du poids volumique sec maximal est considérable et comparable à celle de la teneur en eau. Les résultats des essais de compactage réalisés avec des niveaux d'énergie différents montrent qu'une augmentation de l'énergie de compactage entraîne une augmentation de la densité sèche maximale, accompagnée d'une diminution de la teneur en eau optimale nécessaire pour atteindre le compactage optimal.

Par ailleurs, le déplacement du point optimum de la courbe de Proctor suit une trajectoire appelée ligne des optima de Proctor, qui est approximativement parallèle à la courbe de saturation. Figure 14

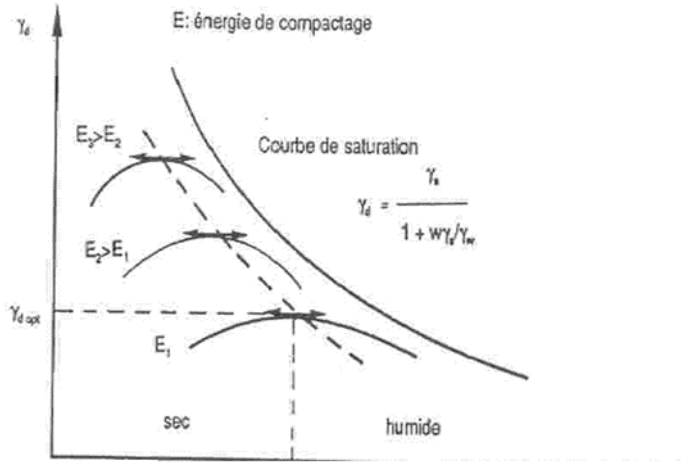


Figure II.13_influence de l'énergie de compactage(genie-civile.blogspot.com)

V.3 Enveloppe des courbes de compactage : Courbe de saturation

Les courbes de compactage sont délimitées par une courbe de référence appelée courbe de saturation, qui représente l'état dans lequel le sol est entièrement saturé en eau. L'équation de cette courbe s'écrit comme suit :

$$\gamma d/\gamma w = s/(\gamma s\, w + \gamma w)$$

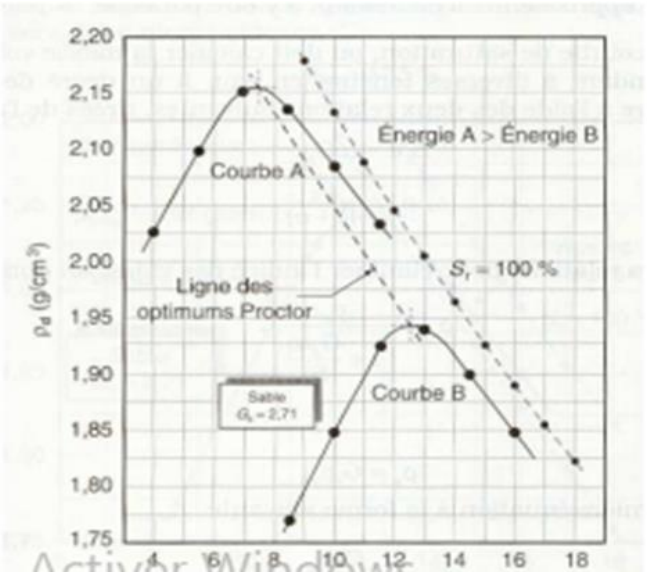


Figure II.14_Courbe de compactage pour une énergie de compactage donnée(staff.univ-batna2.dz)

V.4 Microstructure des sols fins compactés :

Depuis les recherches réalisées par Proctor en 1933, les études sur le compactage des sols se sont concentrées sur le rôle de l'eau dans la facilitation du mouvement des particules pendant le processus de compactage, ainsi que sur l'application des principes de la théorie de la double couche diffuse proposée par Lambe en 1958. Selon cette théorie, lorsque l'énergie appliquée reste constante, une augmentation de la teneur en eau favorise un meilleur alignement des particules à l'intérieur du sol. Dans les zones sèches de l'optimum de compactage, les particules ont tendance à se regrouper en petits flocs, tandis que dans les zones humides, elles deviennent plus ordonnées ou plus dispersées. Par exemple, la figure 6 montre que l'organisation des particules est plus nette au point C qu'au point A. De plus, l'augmentation de l'énergie de compactage rend le sol plus structuré même du côté sec, de sorte que l'échantillon au point E est mieux organisé que celui au point A. Du côté humide, l'échantillon au point D est plus aligné que celui au point B, bien que l'effet soit moins prononcé que du côté sec. Cette description constitue l'un des premiers modèles visant à expliquer la structure interne des sols compactés.

Les études antérieures sur l'influence de la structure floculée ou dispersée sur les propriétés mécaniques des sols se concentraient principalement sur des échantillons compactés et préalablement saturés.

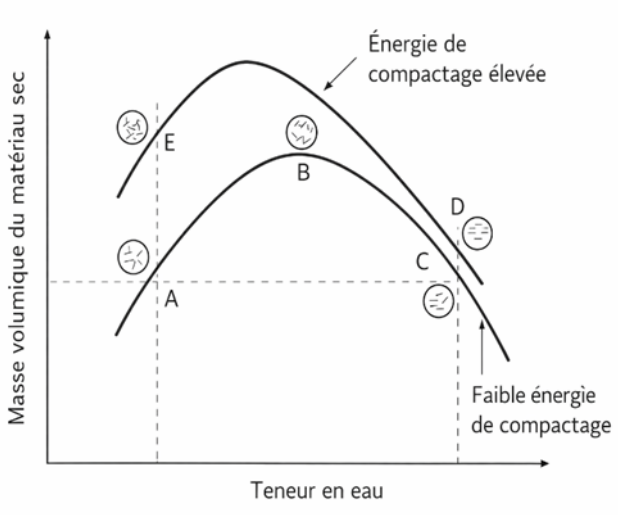


Figure II.15_Effet du compactage sur la structure d'un sol(rpn.univ-lorraine.fr)

V.5 Effets du compactage sur certaines propriétés du sol :

Le compactage améliore la cohésion du sol et augmente sa capacité portante. Toutefois, il entraîne également des modifications importantes de plusieurs propriétés physiques et mécaniques, notamment la structure interne du sol, la perméabilité, le gonflement et le retrait, la compressibilité ainsi que la résistance au cisaillement.

V.5.1 Structure du sol :

Le compactage provoque une diminution du volume des vides entre les particules, ce qui rend le sol plus dense, en particulier dans les sols pulvérulents où les grains deviennent plus rapprochés et mieux imbriqués.

Dans les sols cohérents, notamment argileux, le compactage entraîne une réorganisation des feuillets argileux qui tendent à s'orienter parallèlement, conduisant à une structure plus dispersée. L'augmentation de l'énergie de compactage ou une teneur en eau supérieure à la teneur optimale accentuent davantage cette dispersion structurale.

V.5.2 Perméabilité :

La réduction des vides sous l'effet du compactage limite la circulation de l'eau à l'intérieur du sol, ce qui diminue sa perméabilité. Une énergie de compactage plus élevée réduit davantage la porosité et entraîne ainsi une baisse supplémentaire de la perméabilité.

Dans les sols argileux, la perméabilité minimale est généralement obtenue lorsque la teneur en eau est égale ou légèrement supérieure à la teneur en eau optimale lors du compactage.

V.5.3 Gonflement et retrait :

La diminution de l'indice des vides et de la perméabilité réduit la quantité d'eau que le sol peut absorber ou perdre, ce qui limite les variations volumétriques liées au gonflement et au retrait.

Néanmoins, le comportement des sols argileux dépend des conditions de compactage :

- Un compactage réalisé à une teneur en eau supérieure à l'optimum favorise le retrait
- Un compactage effectué à une teneur en eau inférieure à l'optimum augmente la sensibilité au gonflement.

V.5.4 Compressibilité :

La compressibilité d'un sol est étroitement liée à son volume de vides : plus celui-ci est important, plus les tassements potentiels sont élevés. En réduisant les vides par compactage, le sol devient moins compressible et les risques de tassement diminuent.

V.5.5 Résistance au cisaillement :

Dans les sols pulvérulents, le rapprochement des grains dû au compactage accroît le frottement et l'emboîtement entre particules, ce qui améliore la résistance au cisaillement. Dans les sols cohérents, la résistance dépend principalement des forces de cohésion, lesquelles augmentent lorsque la distance entre particules diminue. Ainsi, le compactage renforce également la résistance au cisaillement.

De manière générale, la résistance au cisaillement des sols argileux est plus élevée lorsque le compactage est réalisé à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Cette amélioration s'accompagne d'une augmentation de l'angle de frottement interne (φ), ce qui se traduit par une capacité portante plus importante du sol.

V.6 Le compactage dynamique :

Lors de la réalisation de projets d'infrastructure tels que les routes, les voies ferrées, les remblais et les barrages, le compactage des sols constitue une opération essentielle pour assurer la stabilité des ouvrages et améliorer leur comportement mécanique sous l'effet des charges. Pour déterminer les conditions de compactage appropriées sur le terrain, plusieurs essais de laboratoire ont été développés, reposant sur l'application d'une énergie mécanique contrôlée sur des échantillons de sol afin de reproduire les conditions d'exécution in situ.Le principe du compactage consiste à réduire le volume des vides dans le sol par l'action d'efforts mécaniques répétés, ce qui permet d'augmenter sa densité et d'améliorer ses propriétés géotechniques.

V.6.1 Essai Proctor :

Le principe de ces essais repose sur l'ajout d'eau à un matériau pour différentes valeurs de teneur en eau, puis sur son compactage pour chaque valeur selon une méthode et une énergie de compactage normalisées. Ensuite, la masse volumique sèche de l'échantillon est déterminée pour chaque teneur en eau, puis la variation de cette masse volumique est représentée graphiquement en fonction de la teneur en eau. Cette représentation est appelée courbe de Proctor

On distingue deux courbes issues de l'essai Proctor, correspondant à deux niveaux d'énergie différents, comme le montre la figure II.16 :

la courbe du « Proctor Normal », associée à une énergie de 5 N.cm/cm³, utilisée comme référence pour caractériser le comportement des matériaux de remblai lors du compactage ;la courbe du « Proctor Modifié », correspondant à une énergie plus élevée de 25 N.cm/cm³, servant de référence pour l'évaluation du compactage des matériaux utilisés dans les couches de chaussées (Goual I., 2012)

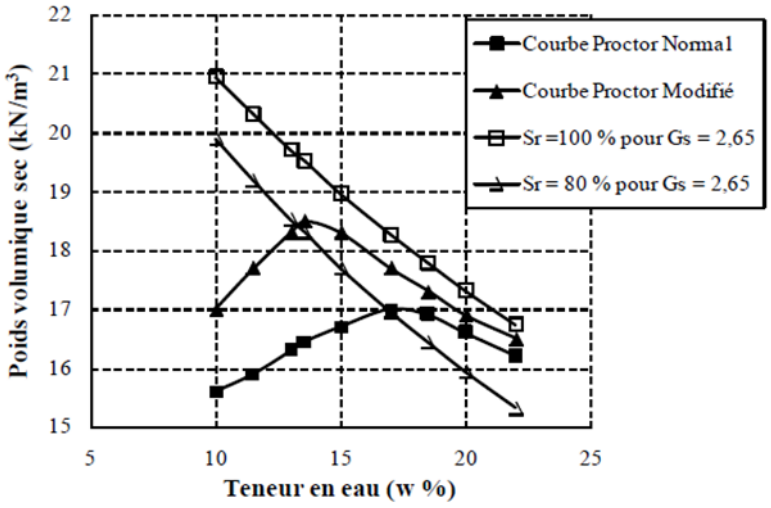


Figure II.16_Courbes de compactage Proctor normal et modifié(omran ,2002)

V.7 COMPACTAGE STATIQUE :

Le compactage constitue une opération fondamentale préalable à l'utilisation des sols argileux en géotechnique. Il suscite l'intérêt des chercheurs depuis les travaux pionniers de Proctor en

1933. Cependant, les échantillons obtenus par cet essai sont souvent hétérogènes, ce qui limite leur utilisation pour des études de laboratoire précises. C'est pourquoi d'autres méthodes ont été développées, telles que le compactage quasi-statique (ou statique), où une contrainte de compression axiale ou une vitesse de déplacement imposée est appliquée, contrairement au compactage dynamique de l'essai Proctor.

Ce type de compactage consiste à introduire le sol, après ajustement de sa teneur en eau, dans un moule œnométrique, puis à le placer entre deux pistons (tous deux mobiles, ou l'un fixe et l'autre mobile). Une contrainte est ensuite appliquée ou un déplacement contrôlé est imposé, permettant de compacter progressivement le sol de haut en bas pour obtenir une meilleure densité. L'intérêt principal de cette méthode réside dans sa capacité à produire des échantillons plus homogènes et représentatifs des propriétés réelles du sol.



Figure II.17_Appareil de compactage statique d'un échantillon de sol en laboratoire

V.8 Comparaison du compactage statique et du Proctor en laboratoire :

Des essais ont été réalisés sur des matériaux dont la teneur en eau est supérieure à w_OPN + 2, afin de comparer les performances du compactage statique et du compactage Proctor (normal et modifié). Les résultats montrent que le coefficient B est en moyenne inférieur d'environ 0,05 pour le compactage statique, tandis que les autres paramètres restent identiques (même matériau, même w même s_r même σ).

Bien que le nombre d'essais soit limité, la différence semble la plus marquée entre le compactage statique et le Proctor modifié pour le module sécant à 1% de déformation, qui est plus élevé pour le compactage statique que pour le Proctor.

En comparaison avec l'étude de Kouassi (1998), il apparaît que le module décroît selon l'ordre suivant des méthodes de compactage :

statique, Proctor, pétrissage.(Compactage et comportement. (.E. ALONSO 2006)

V.9 Influence du mode de compactage sur les caractéristiques mécaniques :

Les performances hydrauliques et mécaniques d'un sol ne sont pas constantes lorsqu'il est compacté par différentes méthodes. Cette variation est principalement liée au fait que chaque procédé impose au matériau un niveau et un type de déformation de cisaillement différent. Ainsi, le comportement obtenu après compactage dépend non seulement de la technique utilisée, mais aussi de la structure interne initiale du sol.

Certains sols, caractérisés soit par une organisation floculée dominée par les forces d'attraction, soit par une structure plus dispersée contrôlée par les forces de répulsion, présentent une réponse relativement peu sensible au mode de compactage. Toutefois, cette sensibilité peut augmenter ou diminuer selon l'énergie appliquée ainsi que la teneur en eau.

D'après les travaux de Seed et al. (1960), l'effet du mode de compactage devient réellement perceptible lorsque le sol est compacté à une teneur en eau supérieure à la valeur optimale. Ce phénomène est généralement associé aux modifications de l'organisation des particules au niveau de la double couche diffuse.

Par ailleurs, l'eau contenue dans le sol peut modifier les interactions entre grains en jouant un rôle de lubrifiant, ou parfois l'effet inverse, ce qui influence directement le frottement inter granulaire. La disposition finale des particules dépend alors de l'importance des déformations de cisaillement, elles-mêmes contrôlées par la teneur en eau, l'énergie de compactage et la méthode employée.

Selon Seed et al. (1960), la formation d'une structure dispersée augmente progressivement en fonction du type de compactage, selon l'ordre suivant : compactage statique, compactage vibratoire, puis compactage de type "kneading" (malaxage).

Ce dernier procédé, de nature dynamique, conduit à une organisation du sol similaire à celle obtenue avec l'essai Proctor.

Les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature montrent également que le mode de compactage, combiné à la teneur en eau, influence fortement plusieurs propriétés telles que la résistance mécanique, le retrait et la perméabilité à l'état saturé.

De manière générale, l'impact du procédé de compactage devient donc fortement dépendant de l'état hydrique du sol.

Enfin, Seed et Chan (1959) ont montré que la sensibilité de la résistance mécanique au mode de compactage varie selon la nature du sol et le niveau de déformation. À des niveaux de déformation élevés, les différences entre les méthodes de compactage tendent à disparaître, car la structure interne du sol évolue vers un état similaire quel que soit le procédé utilisé.

V.10 Problèmes liés au compactage :

- **Phénomène de matelassage :** il se produit lorsque le sol est fortement saturé en eau pendant le compactage. Le sol perd alors sa cohésion et des gonflements de surface apparaissent. L'engin de compactage devient instable, ce qui rend l'opération difficile voire impossible.

- **Phénomène de feuilletage :** il correspond à une séparation de la masse du sol en fines couches parallèles, entraînant un affaiblissement de la structure interne du sol et sa désagrégation progressive.
- **Orniérage :** il s'agit d'une déformation de la surface de la chaussée sous forme de sillons suivant le passage des roues. Il traduit généralement une insuffisance de la capacité portante ou un défaut de la structure de la chaussée

VI. Chemins de drainage-humidification

Les chemins de drainage-humidification, appelés également chemins de séchage-imbibition, décrivent l'évolution hydrique du sol sous l'effet des variations de succion.

Le drainage En appliquant une série de valeurs croissantes de succion, l'échantillon est progressivement drainé jusqu'à atteindre un état de séchage complet. Dans le cas d'un chemin de drainage dit « normalement consolidé », considéré comme un état de référence par rapport aux sols naturels généralement sur consolidés, le matériau est initialement saturé et préparé à une teneur en eau comprise entre 1.2 et 1.5 fois la limite de liquidité (w = 1.2 à 1.5 wL).

L'humidification En appliquant une série de valeurs décroissantes de succion, l'échantillon est progressivement réhumidifié jusqu'à saturation. L'état initial du matériau est sec, préparé au préalable sous forme de pâte, puis séché à l'air libre ou dans une étuve à une température inférieure à 50 °C afin de préserver la composition microstructurale du sol.

VI.1 Chemin de drainage–humidification sur une pâte argileuse

La figure (*II.18*) illustre le premier cycle de drainage–humidification de l'argile de Vieux Pré et met en évidence l'évolution des paramètres hydromécaniques du matériau en fonction de la succion. Les différentes courbes montrent les variations de l'indice des vides, du degré de saturation et de la teneur en eau au cours des phases de drainage et d'humidification.

Durant le chemin de drainage, le sol passe progressivement d'un état saturé à un état non saturé. Entre les points a et b, correspondant au domaine saturé, l'indice des vides diminue de manière presque linéaire avec l'augmentation de la succion, traduisant une importante compressibilité du matériau. À partir du point d'entrée d'air b, la désaturation débute progressivement tout en conservant un comportement proche de celui d'un sol saturé. Entre les points c et d, les déformations deviennent très faibles tandis que le degré de saturation chute rapidement, ce qui caractérise le domaine non saturé.

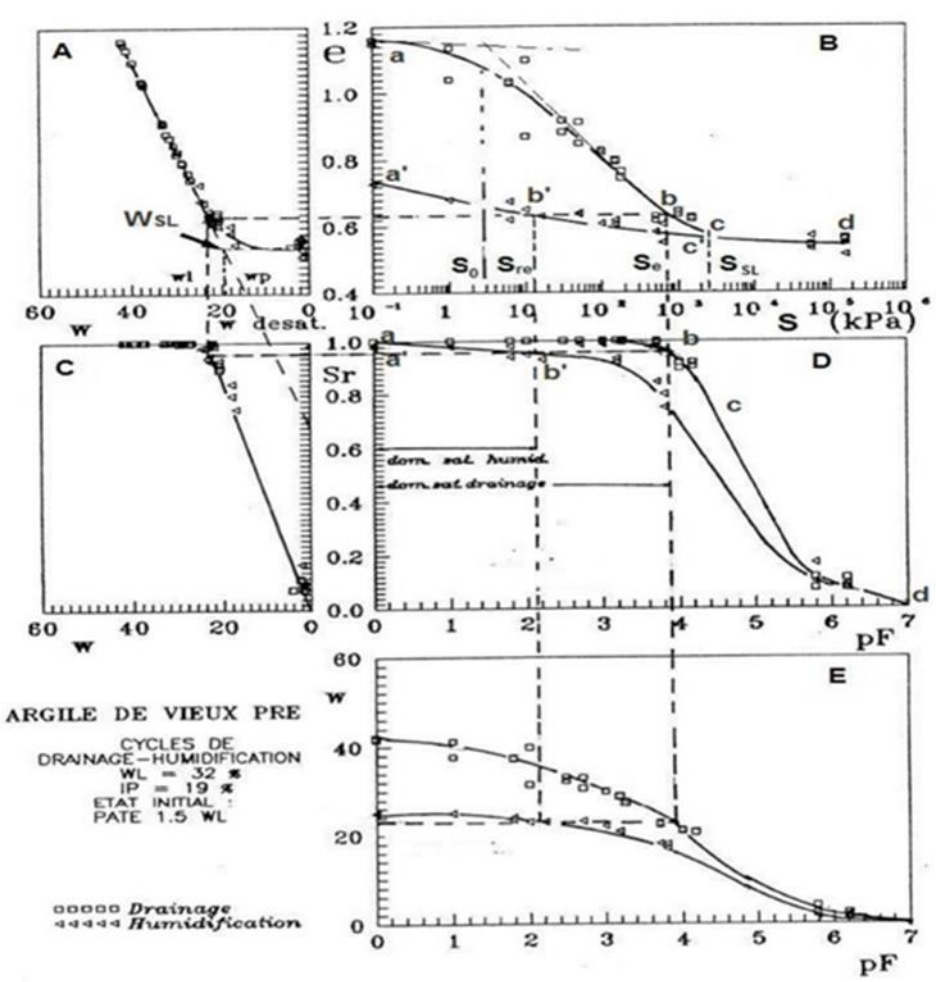


Figure II.18 : premier cycle de drainage humidification sur l'argile vieux pré initiale sous forme de pate a wi=1,5 WL (indarto,1991) par (derfouf,2014)

Lors du chemin d'humidification, les courbes mettent en évidence un phénomène d'hystérésis entre le drainage et la réhumidification. Le matériau retrouve progressivement son état saturé, mais la resaturation se produit pour des valeurs de succion plus faibles que celles observées lors du drainage. Les résultats montrent également que les variations volumétriques deviennent partiellement réversibles pendant cette phase.

L'analyse des courbes permet ainsi de distinguer trois domaines de comportement : un domaine saturé caractérisé par des déformations plastiques importantes, un domaine intermédiaire quasi saturé où le matériau conserve un comportement voisin de celui d'un sol saturé, et un domaine non saturé où les déformations deviennent faibles et essentiellement élastiques. Ces observations traduisent le comportement général des argiles soumises aux cycles de séchage et d'humidification

VI.2 Chemins de séchage-humidification d'un tuf compacté

L'étude suit le comportement d'un tuf de Béni-Saf compacté selon trois états initiaux : OPM, OPN et à 4 MPa. Les chemins de séchage et d'humidification ont été tracés à partir de mesures de succion (technique osmotique + papier filtre) et des corrélations de (Fleureau et al. 2002).

Pour l'OPM, la succion mesurée (98 kPa) est anormalement basse par rapport à la valeur corrélée (641 kPa). Les auteurs expliquent cela par une mauvaise isolation ayant provoqué une humidification avant mesure. Ils retiennent donc la valeur corrélée. Pour l'OPN, les deux valeurs sont proches (117 et 150 kPa).

Dans les plans (e, w) et (e, ψ), on observe un palier de retrait rapide : indice des vides minimal ≈ 0,43–0,45, succion de retrait ≈ 10^4 kPa. Au-delà, les variations volumiques sont faibles (≤ 3,3 % au séchage) alors que le degré de saturation chute beaucoup (63–70 %). À l'humidification, le gonflement est plus marqué (7–12 %) avec des variations de saturation plus faibles (19–23 %). L'échantillon compacté à 4 MPa est le plus actif $\frac{\Delta e}{(1+e_0)}$ = 12 % à l'humidification).

Enfin, la teneur en eau normalisée $\frac{W}{D_{ms}}$ (avec D_{ms}donné par les équations et se superpose à celle d'autres sols de la littérature (figure *II.19*), ce qui confirme l'unicité du chemin de drainage-humidification pour ce matériau.

$$[OPN]\ \ D_{ms} = \left(\frac{-\Delta w}{[\Delta\, log\ (\psi)]}\right) = -0{,}54 - 0{,}030W_L + 3{,}3 * 10\text{^}(-6)\ W_L^2 \qquad R^2 = 0{,}85$$

$$[OPM]\ D_{ms} = \left(\frac{-\Delta w}{[\Delta \log(\psi)]}\right) = -1{,}46 - 0{,}051W_L \qquad R^2 = 0{,}40$$

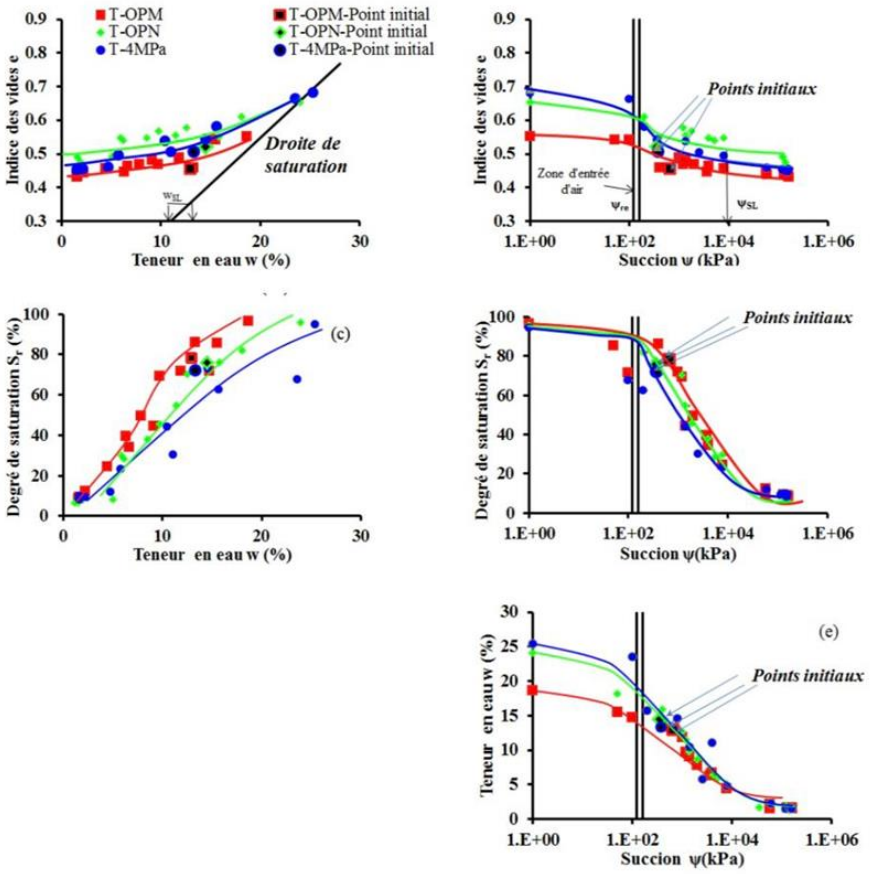


Figure II.19 : Chemin séchage-humidification (T-OPM et T-OPN et T-4MPa). (Mekaideche,2021)

VII Conclusion

L’analyse développée dans ce chapitre montre que le retrait–gonflement des sols fins sous chaussée est gouverné par l’interaction entre la succion, la microstructure du matériau et les transferts d’eau dans la zone active. L’argile de Boughrara représente la phase sensible de référence, alors que le tuf de Béni-Saf constitue une phase susceptible de modifier la texture, la porosité et les chemins de transfert lorsqu’il est mélangé à l’argile

Chapitre 3 :

Comportement Hydrique

I. Introduction :

Pour pouvoir étudier le comportement hydromécanique des sols non saturés, il faut disposer de dispositifs expérimentaux qui permettent d'imposer la succion sur une large gamme de valeurs.

Cette étude a pour but d'étudier le comportement hydromécanique de deux mélange, sur un chemin drainage humidification afin d'évaluer leur comportement en présence d'eau pour voir la faisabilité d'utiliser ces deux matériaux dans le domaine routier.

II. Choix du sol :

Dans le cadre de cette étude, deux types de sols présentant des caractéristiques géotechniques différentes ont été sélectionnés, à savoir le tuf brun (A) (wilaya d'Aïn Témouchent) et l'argile de Boughrara (B) (wilaya de Tlemcen). Ces deux types de sols ont été choisis en raison de leur disponibilité locale et de leur utilisation dans le domaine des ouvrages routiers. Le tuf est largement utilisé comme couche de base dans les infrastructures routières ; l'étude de ses propriétés géotechniques et mécaniques est donc nécessaire pour évaluer ses performances et son aptitude à l'emploi, notamment sous l'effet des variations hydriques et des différentes conditions climatiques.

Cette étude vise également à évaluer le comportement du tuf utilisé seul, ainsi qu'à étudier l'effet du mélange du tuf avec de l'argile sur les propriétés physiques et mécaniques du sol. Ces échantillons ont été utilisés comme matériaux de base pour réaliser les différentes analyses et essais en laboratoire menés dans le cadre de cette étude.



Figure III-1_Échantillons de tuf (A)et d'argile(B) utilisés dans l'étude

Afin de localiser précisément la zone d'étude, le site de prélèvement des échantillons a été présenté à l'aide de Google Maps. Ce site est situé dans la région de Boughrara, wilaya de Tlemcen.

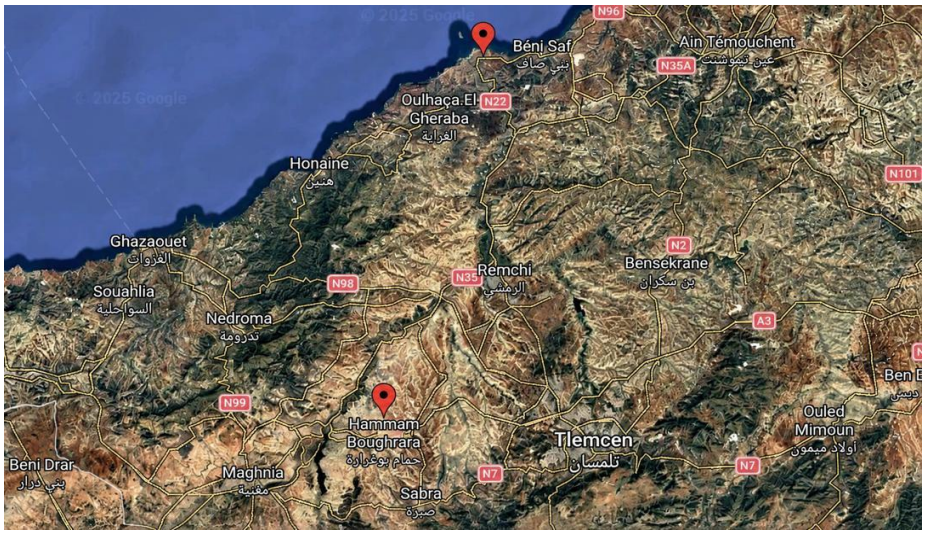


Figure III.2_ présente la localisation géographique du site de prélèvement des échantillons étudiés, situé dans la région de Boughrara à Tlemcen

III. Essais d'identification des sols étudiés :

Les sols ont subi différents essais de laboratoire afin de déterminer leurs caractéristiques, les résultats sont issus des travaux de recherches effectués précédemment par l'équipe Sols Non Saturés et Couplages du laboratoire Eole.

III.1 Caractérisation physico-chimique du sol :

III.1.1 Composition minéralogique des différents matériaux :

La diffraction des rayons X (DRX) constitue une méthode employée pour identifier la composition minérale des échantillons en exposant un échantillon pulvérulent aux rayons X et en examinant le diagramme de diffraction résultant, lequel reflète les phases cristallines présentes dans le matériau. Les données ont été ultérieurement traitées au moyen du logiciel PDXL2 dans le but d'identifier et d'interpréter les phases minérales présentes dans les échantillons de tuf de Béni-Saf (figure III.2) ainsi que dans ceux d'argile de Boughrara (figure III.3). Cette méthode se révèle particulièrement efficiente pour différencier les diverses espèces minérales et phases minérales, notamment les minéraux argileux. (Ait Salem, 2024)

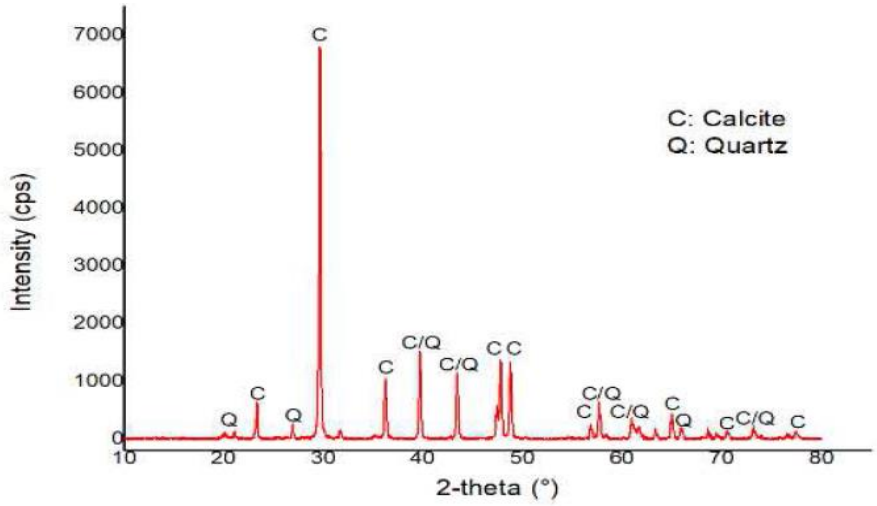


Figure III.3_DRX du tuf de Béni-Saf (Ait Salem.2024)

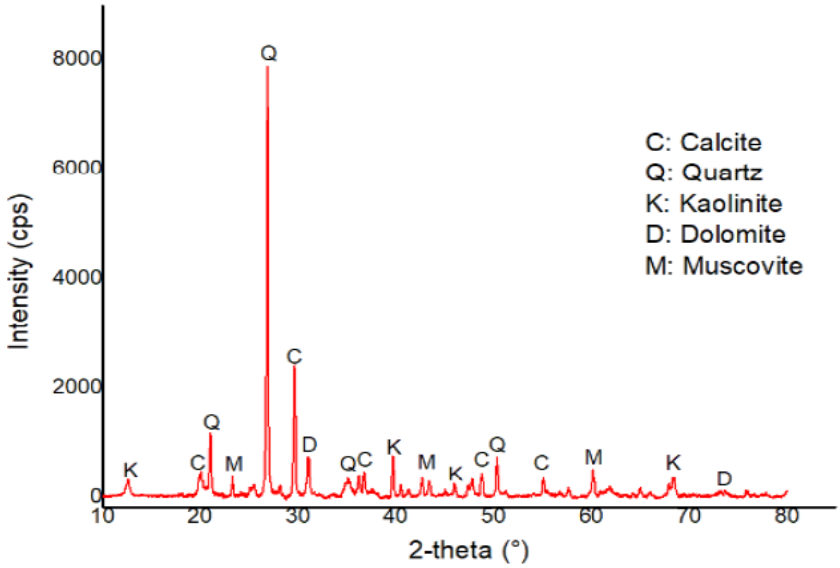


Figure III.4_DRX de l'argile de Boughrara (Ait Salem ,2024)

On remarque, d'après les courbes présentées ci-dessus, que le tuf de Béni-Saf contient essentiellement du quartz et de la calcite, avec des proportions assez proches. De son côté, l'argile de Boughrara est composée de plusieurs minéraux, à savoir le quartz, la calcite, la kaolinite, la muscovite ainsi que la dolomite.

III.2 Caractéristiques géotechniques :

III.2.1 Analyse granulométrique :

La figure III.5 illustre les courbes granulométrique des deux sols étudiés, ainsi que le mélange 70% TUF et 30% ARGILE.

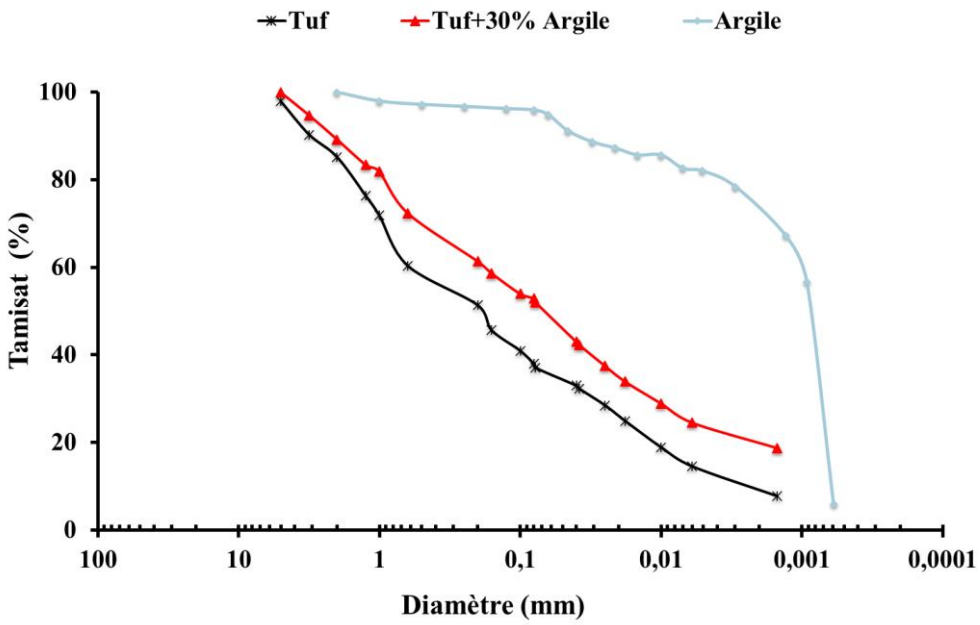


Figure III.5_Courbes granulométriques du tuf, de l'argile et du mélange de tuf renforcé par 30 % d'argile.

III.2.2 Les limites d'Atterberg :

D'après les résultats des essais de laboratoire effectués sur le sol analysé, le tuf de Béni Saf a une limite de liquidité W_L de 37 % et un indice de plasticité Ip de 17,5 %, alors que l'argile présente une limite de liquidité W_L de 54 % et un indice de plasticité Ip de 28 %. D'après la figure III.6, le tuf de Béni Saf est classé parmi les matériaux à plasticité moyenne, tandis que l'argile exhibe une forte plasticité, comme le montrent les valeurs élevées de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité.

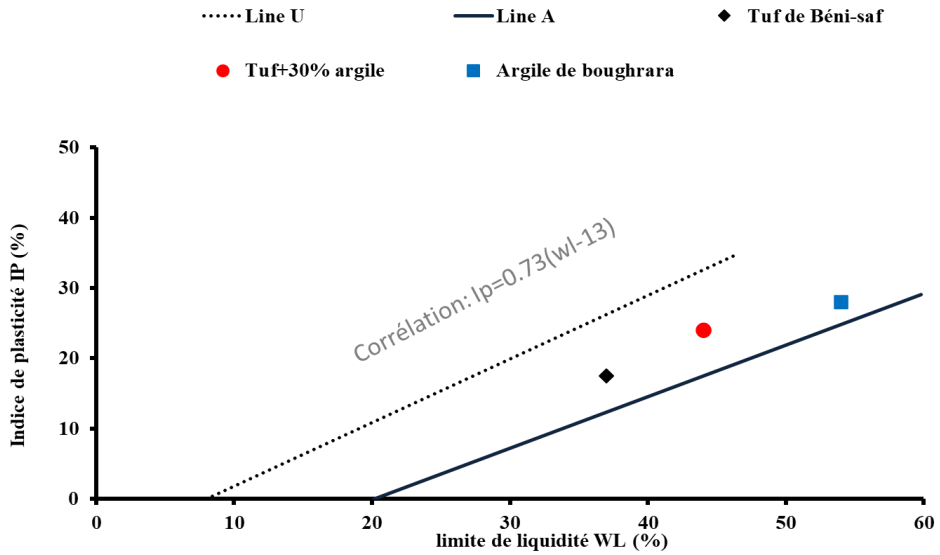


Figure III.6_La relation entre la limite de liquidité, l'indice de plasticité et le domaine d'acceptation.

III.3 Classification du Tuf de Béni-Saf :

Les caractéristiques géotechniques du tuf confirment ce classement. Sa valeur au bleu de méthylène (VBS = 1,4) indique une activité argileuse modérée. Par ailleurs, les valeurs de l'équivalent de sable (ESV = 73 et ESP = 63 %) traduisent la présence d'une fraction sableuse non négligeable ; toutefois, la proportion élevée des fines confère au matériau un comportement globalement dominé par les éléments argileux.

Ainsi, le tuf de Béni-Saf apparaît comme un sol fin à composante granulaire, dont la fraction argileuse est susceptible d'influencer la rétention d'eau, la capillarité ainsi que les transferts hydriques.

Ce classement est également corroboré par les résultats des essais Proctor. Selon Aït Salem, l'optimum Proctor normal est atteint pour une teneur en eau $Wopt = 15\,\%$ et une masse volumique sèche maximale $\gamma dmax = 17{,}93\ kN/m^3$, tandis que l'optimum Proctor modifié correspond à $Wopt = 13\,\%$ et $\gamma dmax = 19{,}87\ kN/m^3$. Ces résultats traduisent un comportement de compactage bien défini, caractéristique des sols fins à plasticité moyenne.

Le classement GTR du tuf de Béni-Saf dans la classe A4 met en évidence un sol fin argileux à plasticité moyenne, présentant une sensibilité à l'eau et une capacité à influencer le comportement hydrique et volumique des mélanges tuf-argile, notamment à travers la porosité, la capillarité et la circulation de l'eau.

III.4 Classification GTR de l'argile de Boughrara :

La classification des matériaux selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR) repose sur plusieurs paramètres géotechniques essentiels, notamment la granularité, la proportion de fines, les limites d'Atterberg ainsi que l'activité argileuse du matériau. Dans ce cadre, l'argile de Boughrara présente des caractéristiques typiques d'un sol fin fortement argileux, influençant directement son comportement mécanique et son aptitude à l'utilisation dans les travaux de terrassement. Les analyses granulométriques montrent une proportion très élevée de particules fines, avec 97 % des éléments inférieurs à 80 µm et 72 % de fraction argileuse inférieure à 2 µm, traduisant une texture très fine et homogène. Les diamètres caractéristiques obtenus sont d(60) = 1 µm, d(30) = 0,7 µm et d(10) = 0,6 µm, ce qui confirme la dominance de la fraction argileuse et une granulométrie peu étalée.

Les propriétés de plasticité révèlent également un comportement argileux marqué, avec une limite de liquidité W_L = 54 %, une limite de plasticité W_P = 26 % et un indice de plasticité IP = 28 %, indiquant une plasticité élevée et une forte sensibilité aux variations de teneur en eau. La valeur de bleu de méthylène VBS = 10,11 confirme par ailleurs la présence importante d'argiles actives. Selon la classification du GTR 2024 ces caractéristiques permettent de classer ce matériau dans la catégorie des sols fins argileux plastiques de type F3.

Cette classe regroupe des matériaux très argileux présentant une forte sensibilité à l'eau ainsi qu'une tendance importante au gonflement et au retrait, ce qui peut affecter la stabilité et la capacité portante des infrastructures routières.

La récapitulation des différents résultats de caractérisation des deux sols étudier est illustré dans le tableau III.1

Tableau III.1_Résultats de l'analyse granulométrique des deux matériaux étudiés

Caractéristiques	Tuf de Béni-saf	Argile de Boughrara
Gravier (% > 2mm)	12	1
Sable (% 0,063-2mm)	23	3
Limon (%2 - 63µm)	33	25
Argile (< 2µm)	32	72
Limite de Liquidité (%)	37	54
Limite de plasticité (%)	19,5	26
Indice de Plasticité (%)	17.5	28
Teneur en $CaCo_3$ (%)	84.8	6
Matière organique (%)	1.8	/
G_s	2.74	2,72
VBS	1,4	10,11

III.5 Essai Proctor :

Les courbes de compactage Proctor normal et modifier pour les deux sols etudier dans ce travail sont illustré dans les figure III.7 et III.8

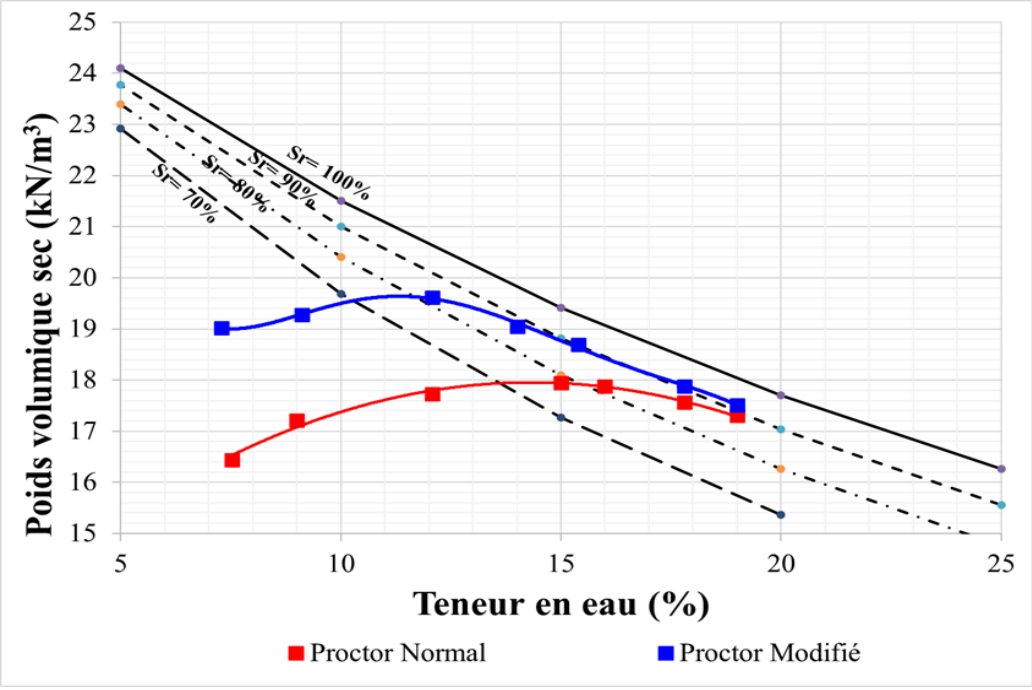


Figure III.7_Compactage dynamique OPN , OPM pour le tuf de Béni-saf

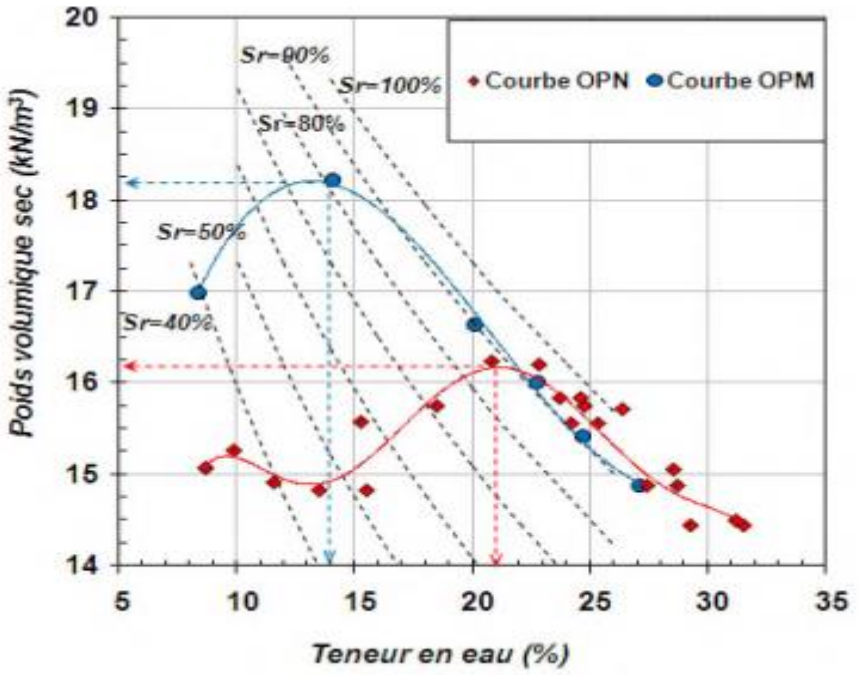


Figure. III.8_Courbe de compactage dynamique de l'argile de Boughrara (DERFOUF 2014)

Le tableau suivant regroupe les résultats de l'essai Proctor (normal et modifié) du tuf de Béni Saf et de l'argile de Boughrara ou en remarque que la densité sèche optimal du tuf est plus

Sol	Proctor	$\omega_{opt}(\%)$	$\gamma_d{}^{max}(\mathrm{KN/m^3})$	$s_r(\%)$
Tuf de béni-saf	OPN	15	17,93	79
	OPM	13	19,87	83
Argile de boughrara	OPN	21	16,2	90
	OPM	14	18,2	80

importante que celle de l'argile de Boughrara, en parallèle le degré de saturation a l'optimum est plus important dans le cas de l'argile de Boughrara.

Tableau III.2_Résultats de l'essai Proctor (normal et modifié)

IV. Préparation des échantillons :

Les sols étudiés sont prélevés à deux sites différents, à savoir l'argile de Boughrara (wilaya de Tlemcen) et le tuf de Béni Saf (wilaya d'Aïn Témouchent). La composition des différents mélanges est présentée dans le tableauIII .3 ci-dessous :

Tableau III.3_Composition des mélanges étudiés

Mélange	Tuf (%)	Argile (%)	Teneur en eau (%)
Tuf+Argile	70%	30%	13%
Tuf	100%	0%	13%

La préparation des échantillons pour le chemin drainage humidification est résumé dans ce qui suit :

Séchage

- Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures

Préparation du sol

- Pour l'argile, un tamisage à 80 µm a été réalisé, tandis que le tuf a été broyé
- manuellement afin de réduire les agglomérats et d'assurer l'homogénéité du matériau

Définition de l'état initial

- Une teneur en eau initiale ω_0 = 13,5 % a été adoptée comme valeur de référence, déterminée à partir des essais de Proctor.

Humidification et malaxage

- Une quantité d'eau calculée, correspondant à une teneur en eau de 13,5%, a été ajoutée au sol sec, suivie d'un malaxage mécanique afin d'assurer l'homogénéité.
- Les échantillons ont été conservés dans des sacs plastiques hermétiquement fermés pendant une durée de repos d'au moins 24 heures.

Compactage des échantillons

- Le compactage statique a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique à commande pneumatique, où deux types de moules ont été utilisés selon la nature des essais.

Caractéristiques des échantillons

- Concernant les essais en solutions salines ainsi que les essais osmotiques, des moules cylindriques de petite taille ont été utilisés, avec un diamètre de 1 cm et une hauteur de 2 cm. Le nombre total d'échantillons préparés est de 60, dont 32 pour les essais en solutions salines et 28 pour les essais osmotiques.(4 échantillons sont placés 2 pour le mélange tuf et 2 pour le mélange tuf + argile)
- En ce qui concerne la méthode du papier filtre des moules cylindriques de plus grandes dimensions ont été utilisés, avec un diamètre de 5 cm. 4 échantillons ont été préparés, dont deux pour le tuf et deux pour le mélange tuf + argile.



Figure III.9_Mélange de tuf et d'argile humidifié

V. Chemin drainage humidification :

Afin d'étudier le comportement des sols non saturés sur une large gamme de valeurs de succion, deux méthodes expérimentales principales sont mises en œuvre pour l'imposition et le contrôle de la succion au sein des échantillons, à savoir la technique de contrôle osmotique et la méthode des solutions salines saturées.

Ces techniques permettent de générer des niveaux de succion variés et précisément contrôlés, facilitant ainsi la reproduction des conditions hydromécaniques auxquelles les sols non saturés sont soumis in situ. Elles offrent par conséquent un cadre expérimental adapté à l'analyse du comportement hydrique et mécanique de ces sols en fonction des variations de leur degré de saturation.

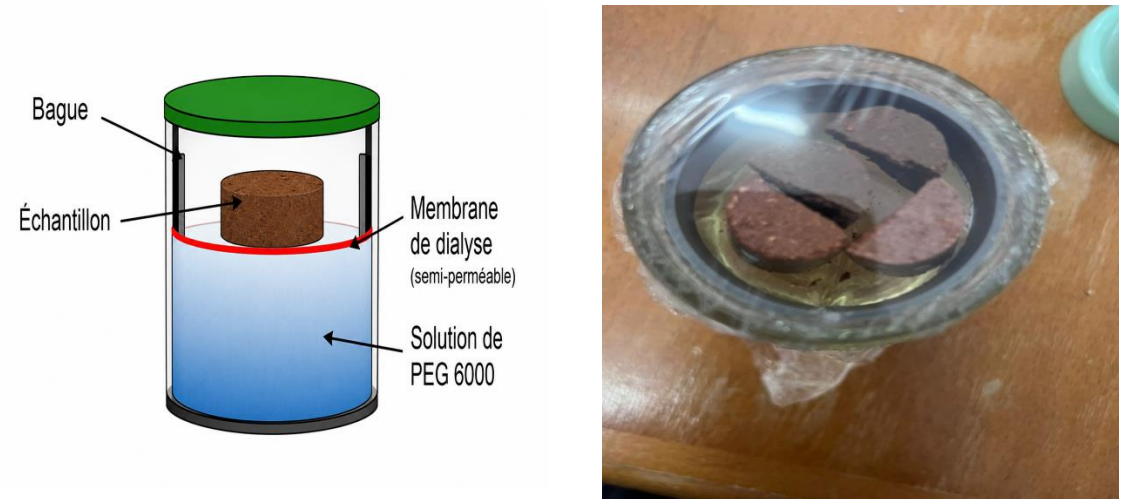
V.1 Techniques d'imposition de la Succion :

V.1.1 Méthode osmotique :

a) Principe de la méthode osmotique :

La méthode osmotique est une technique issue de la biologie, utilisée notamment en dialyse. Elle repose sur l'utilisation de membranes semi-perméables et d'une solution aqueuse de polyéthylène glycol (PEG) de forte masse molaire. Ces molécules, de grande taille, ne peuvent pas traverser la membrane, contrairement à l'eau. Ainsi, l'échantillon soumis à ce dispositif est exposé à une succion osmotique, dont l'intensité dépend de la concentration en PEG.

La mise en œuvre de la méthode osmotique pour la détermination de la rétention d'eau repose sur le principe illustré à la figureIII.9, qui décrit le fonctionnement du dispositif expérimental utilisé dans cette technique. (BENCHOUK,2005)



FigureIII.10_Dispositif expérimental de la technique osmotique (BENCHOUK,2005)

b) Préparation du dispositif expérimental :

Une solution de polyéthylène glycol (PEG 6000) est utilisée afin de couvrir une gamme de succion comprise entre 50 kPa et 2 MPa. Pour cette solution de PEG, une membrane semi-perméable appropriée est sélectionnée (cf. tableau III.4), définie par son seuil de coupure en masse molaire (MolecularWeight Cut-Off, MWCO), assurant la séparation entre l'eau et les molécules de PEG**.**

Tableau III.4_Références des membranes semi-perméables utilisées(BENCHOUK,2005)

Solution de Polyéthylène Glycol	Membrane correspondante	MWCO	Succion maximale atteinte (MPa) (dans la littérature)
PEG 6000	SPECTRA/POR n°3	3 500	9

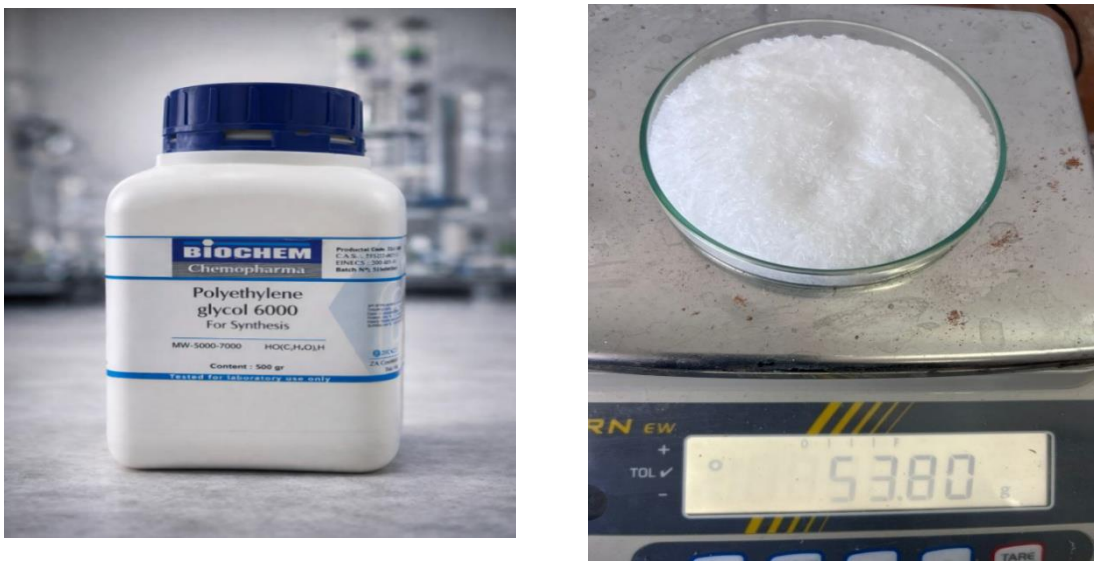


Figure III.11_type de PEG utilisée

La concentration, indépendante de la masse molaire du PEG, est déterminée à partir de la relation linéaire suivante : $\psi = 11c^2$ avec c=m PEG/m d'eau

Base de calcul :200 g d'eau

c) Méthode de calcul :

Pour une valeur de succion connue ψ et une masse d'eau fixée à m eau =200g

On détermine d'abord la concentration c à partir de la relation :

$$\Psi=11C^2 \Rightarrow C = \sqrt{\frac{\Psi}{11}}$$

À titre d'exemple on a : Ψ=50 KPa Ainsi $C = \sqrt{\frac{50}{11}}$ = 0,067

La masse de PEG est ensuite calculée par : $c = \frac{mPEG}{m_{eau}} \Rightarrow m_{PEG} = c \times m_{eau}$

Avec : m_{eau}=200g

$$m_{PEG} = 0{,}067 \times 200 = 13{,}4\text{g}$$

Les concentrations utilisées ont été déterminées à partir de la relation précédente, et les valeurs calculées sont regroupées dans le tableau III.5

Tableau III.5_préparation des solutions PEG en fonction de la succion appliquée

Succion Ψ(KPa)	Concentration c (g PEG/ g eau)	Eau (g)	PEG(g)	Masse totale solution (g)
50	0,067	200	13,4	213,4
100	0,095	200	19	219
200	0,134	200	26,8	226,8
400	0,190	200	38	238
800	0,269	200	53,8	253,8
1200	0,330	200	66	266
2000	0,426	200	85,2	285,2

d) Protocole expérimental :

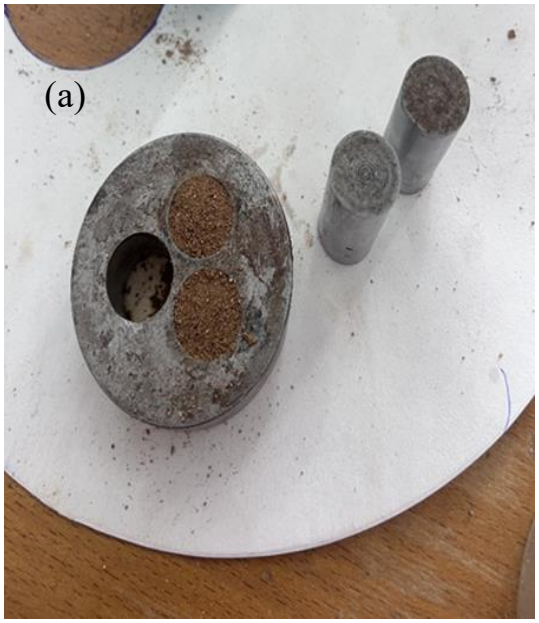
Le protocole expérimental adopté pour la technique de contrôle osmotique comprend une série d'étapes organisées visant à mettre en place le dispositif expérimental et à réaliser des essais de succion dans des conditions maîtrisées et reproductibles. Ces étapes peuvent être reformulées comme suit :

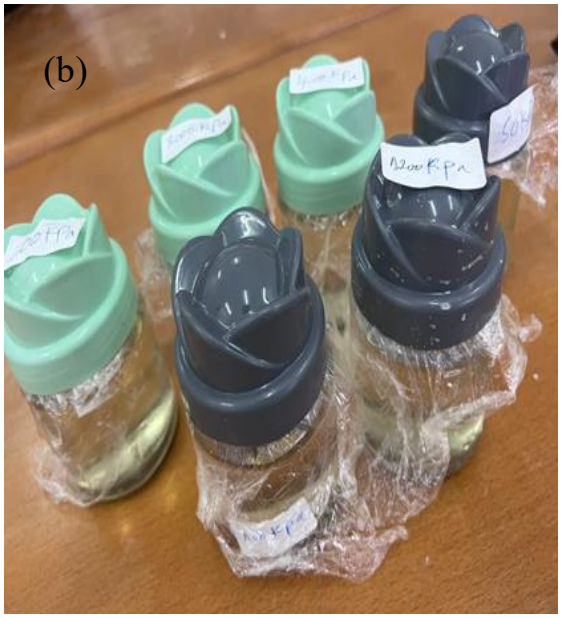
- Les échantillons de sol ont été humidifiés à une teneur en eau de 13,5 %, puis mélangés de manière homogène et compactés statiquement dans des moules cylindriques spécifiques à l'essai (cf figure 12.a)
- Des solutions de PEG 6000 à différentes concentrations sont préparées avec 200 g d'eau distillée, puis homogénéisées par agitation mécanique jusqu'à dissolution complète et laissées au repos pendant 48 heures afin d'assurer leur stabilité avant l'essai.
- La membrane semi-perméable est préparée et fixée dans un récipient en verre, en veillant à assurer un contact efficace avec la solution, puis les échantillons de sol sont introduits dans le dispositif avec une fermeture hermétique afin d'éviter toute infiltration de la solution de PEG à l'intérieur de la membrane.
- L'ensemble du dispositif est placé dans un bécher en verre contenant la solution, en s'assurant d'un bon contact entre la membrane et celle-ci, puis les béchers sont recouverts d'un film plastique afin de limiter l'évaporation et de maintenir la stabilité des conditions expérimentales. (cf figure 12.b)
- Les échantillons sont maintenus pendant une durée d'un mois, jusqu'à l'atteinte de l'équilibre hydrique entre le sol et la solution.

Pour la réalisation de cette méthode, il faut tenir compte de certains points :

(i) Si l'augmentation de volume de la solution osmotique, provoquée par un essai de drainage, ou sa diminution suite à une humidification n'est pas négligeable, la concentration de la solution de référence peut varier entre le début et la fin des essais. Il suffit, pour annuler cet effet, d'utiliser un volume de solution suffisamment important.

(ii) L'instabilité chimique de la membrane cellulosique se traduit par sa décomposition en milieu acide ou sous l'effet des bactéries présentes dans le sol.









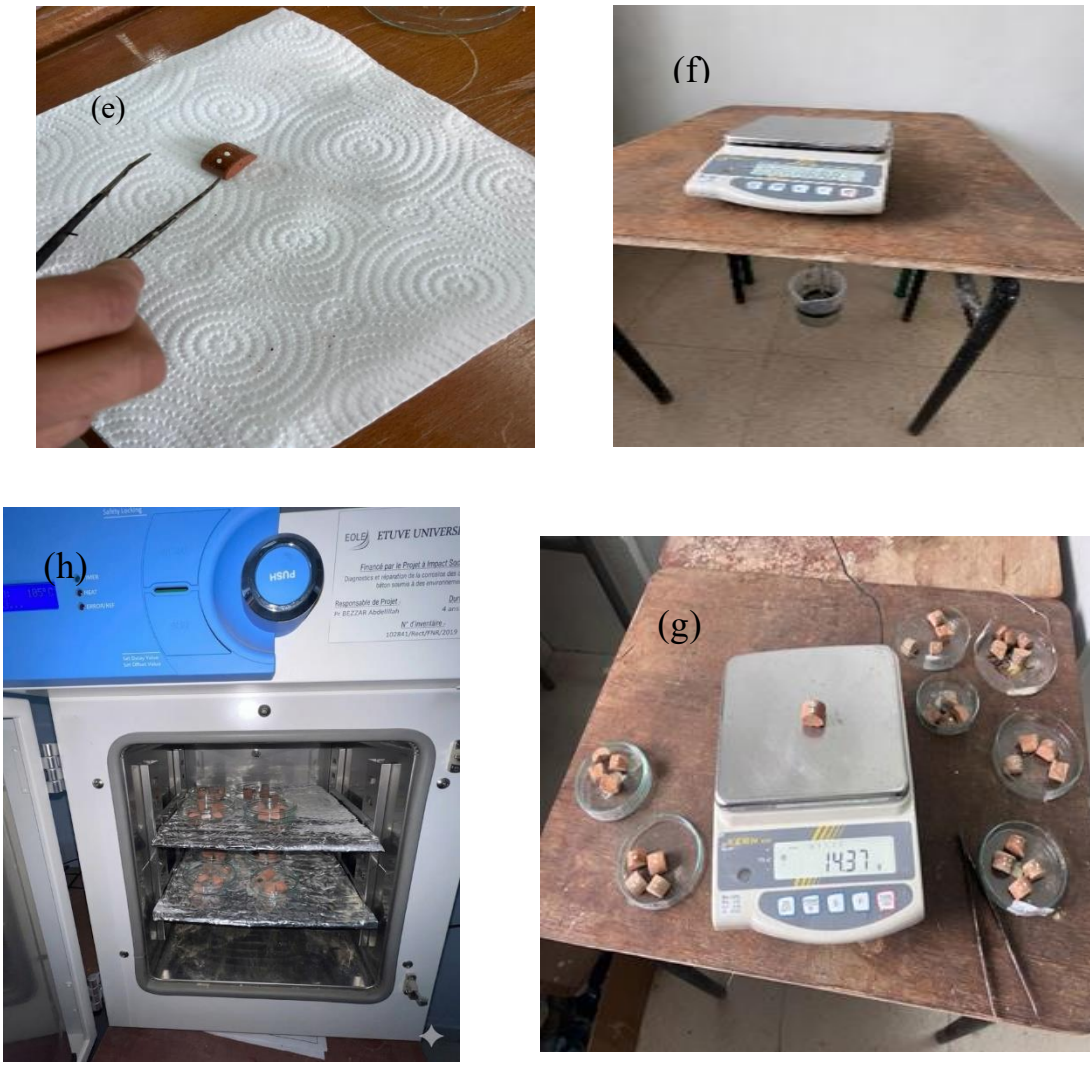


Figure III.12_ Les équipements et étapes de laboratoire pour le contrôle osmotique et le traitement des échantillons

V.1.2 Méthode des solutions salines :

a) Principe de la méthode :

La technique de contrôle de la succion par phase vapeur repose sur la loi de Kelvin, qui relie la valeur de la succion totale imposée à l'humidité relative. Cette méthode consiste à placer des échantillons de sol dans une enceinte fermée où l'humidité relative est contrôlée à l'aide de solutions salines saturées. Grâce à ce dispositif, différents niveaux de succion peuvent être imposés, allant de quelques mégapascals à plusieurs centaines de mégapascals, en fonction du type et de la concentration du sel utilisé.

Les transferts d'eau entre l'échantillon et le milieu environnant s'effectuent par phase vapeur jusqu'à l'atteinte de l'équilibre hydrique, processus relativement long en raison de la lenteur des échanges. Par ailleurs, la valeur de succion obtenue est influencée par la température, ce qui rend le contrôle de ce paramètre essentiel afin d'assurer la précision des résultats. (DERFOUF, S. TAÏBI et al)

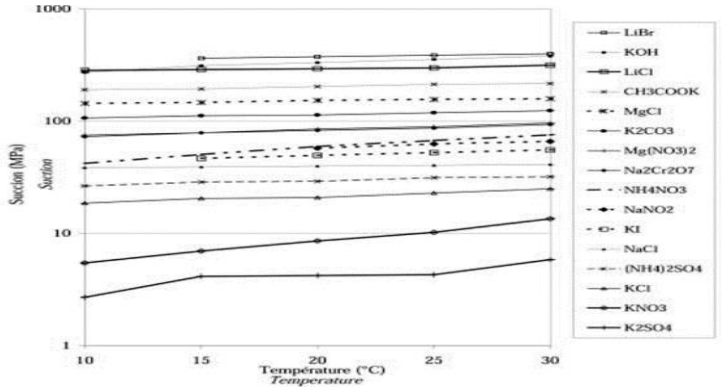


Figure III .13_ Succion imposée par un sel donné en fonction de la température (Benchouk,2005)

Ce graphique présente l'évolution de la succion (exprimée en MPa) en fonction de la température pour différentes solutions salines. On observe globalement que la succion augmente avec l'élévation de la température pour la plupart des sels étudiés ; toutefois, cette augmentation n'est pas uniforme, car elle dépend fortement de la nature du sel.

La figure met également en évidence la nécessité de contrôler rigoureusement la température lors des essais expérimentaux, en raison de son influence directe sur la valeur de la succion imposée par ces solutions. Huit de ces solutions ont été utilisées dans notre étude, comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau III .6_Concentrations des solutions salines utilisées

Solution	Succion (MPa)	Hr (%)	MASSE (g\500g)	300g
k_2SO_4	4,09	97	55,5	33+10
kcl	21,1	86	172	105+10
N_aCl	39,5	75	178,5	110+10
$M_g(NO_3)_26H_2O$	96,7	52	625	375+10
k_2CO_3	119,1	43	560	336+10
M_gCl_2	151,7	33	271	168
kOH	284,3	8,23+0 ,72	605	363+10
H_2SO_4	630	1	/	300

b) Préparation du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental de la méthode de la phase vapeur est constitué d'une enceinte hermétique (dessiccateur ou récipients en verre hermétiquement fermés) permettant de contrôler l'humidité relative de l'air. À l'intérieur de cette enceinte, une solution saline saturée est placée au fond afin d'imposer une humidité relative donnée.

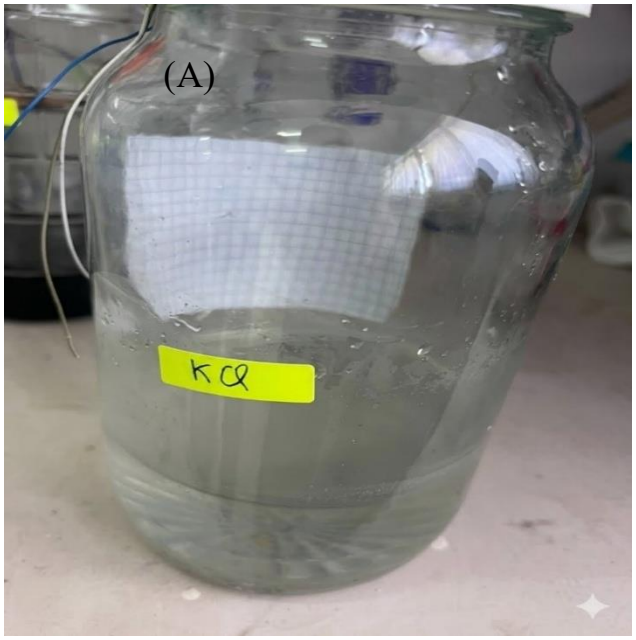
Les échantillons de sol sont disposés sur un support (grille ou plaque perforée) au-dessus de la solution, sans contact direct avec celle-ci, afin de permettre les échanges uniquement par la phase vapeur.

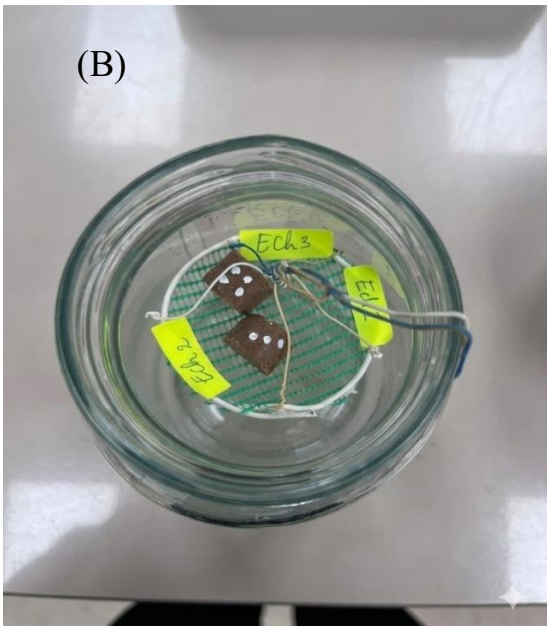
L'ensemble est soigneusement fermé pour éviter toute perturbation des conditions hygrométriques. Un thermomètre peut être utilisé pour contrôler la température, celle-ci ayant une influence sur l'humidité relative et donc sur la succion imposée.

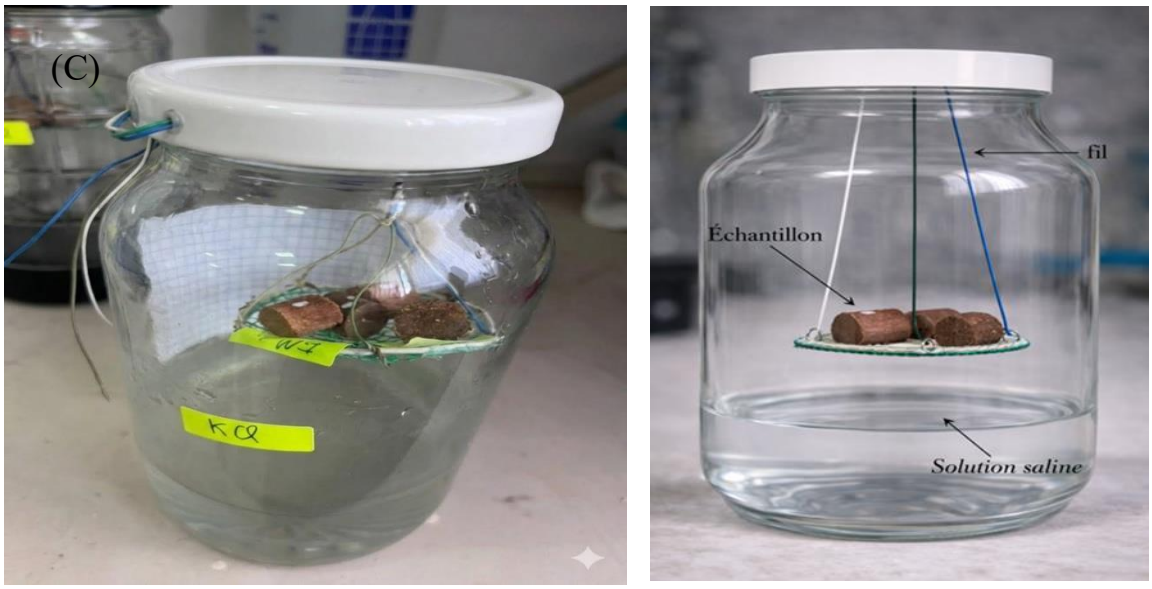
c) Protocole expérimental

Le protocole expérimental de la méthode des solutions salines consiste en une série d'étapes structurées permettant de préparer le dispositif et de réaliser les essais de succion dans des conditions contrôlées et reproductibles. Il assure la mise en équilibre hydrique des échantillons à différentes succions imposées par les solutions salines:

- Des échantillons de deux mélanges (tuf et tuf + argile) ont été préparés selon les proportions définies, puis compactés dans des moules cylindriques (2× 1cm) par compactage statique afin d'obtenir des échantillons denses et homogènes.
- Préparation des solutions salines dans des récipients en verre hermétiques.(cf figure 14.A)
- Utilisation de 8 solutions salines de concentrations variées pour simuler différents états d'humidité et niveaux d'absorption.
- Placement des échantillons sur une grille à l'intérieur des récipients, sans contact direct avec la solution (l'humidité s'échange uniquement par la vapeur). (cf figure 14.B)
- Fermeture hermétique des récipients pour maintenir l'équilibre hygrométrique et empêcher l'air extérieur d'entrer. (cf figure 14.C)
- Conditionnement des échantillons pendant 1 mois et demi pour atteindre l'équilibre hygrométrique et stabiliser l'état final.







FigureIII.14_Dispositif expérimental de la technique solution saline

V.1.3 Mesure des paramètres d'état :

Tant la méthode osmotique que la méthode des solutions salines reposent sur un protocole de mesure unifié, basé sur les mêmes étapes expérimentales présentées ci-après :

- Après cette période d'équilibre, les échantillons sont retirés du dispositif et pesés à l'air afin d'obtenir le poids humide M_h(cf figure 12.c)
- Les échantillons sont ensuite immergés dans une solution de kérosène pendant une heure afin d'éliminer l'air présent dans les pores.(cf figure 12.d)
- Ils sont essuyés à l'aide de papier absorbant pour éliminer l'excès de liquide.(cf figure 12.e)
- les échantillons sont pesés à l'air, puis pesés de nouveau dans la solution de kérosène $M_{Kérosene}$afin d'obtenir les masses nécessaires au calcul des propriétés hydriques (cf figure 12.f)
- Les échantillons sont placés dans l'étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures afin d'assurer un séchage complet (cf figure 12.h)
- les échantillons sont pesés à l'état sec afin d'obtenir la masse sèche finale M_S.(cf figure 12.g)

a) Méthode de calcul :

Les méthodes de calcul des paramètres d'état sont illustrées dans l'exemple suivant, en prenant en considération une succion Ψ égale à 2000 kPa.

❖ **Calcul de la teneur en eau :**

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} X\ 100$$

m_h = 6,04g

m_s =5,07g

$$w = \frac{6{,}04 - 5{,}07}{5{,}07} X\ 100 = 19{,}13\%$$

- **Calcul du volume :**

$$V = \frac{m_{air} - m_{kérozène}}{\rho_{kérozène}}$$

m_{air} = La masse de l'échantillon dans l'air

$m_{kérozène}$ = La masse apparente de l'échantillon immergé dans le kérozène

$\rho_{kérozène}$ = la masse volumique du kérozène (0,8 g/cm^3)

$$V = \frac{6{,}06 - 3{,}76}{0{,}8} = 2{,}875\ cm^3$$

- **Calcul de la masse volumique sèche :**

$$\rho_d = \frac{m_s}{V}$$

m_s = La masse sèche de l'échantillon

V= Le volume de l'échantillon

$$\rho_d = \frac{5{,}07}{2{,}875} = 1{,}76\ g/cm^3$$

- **Calcul du poids volumique sec :**

$$\gamma_d = \rho_d . g$$

g : 9,81 m/s²

$$\gamma_d = 17{,}26\ KN/m^3$$

- **Calcul de l'indice des vides :**

$$e = \frac{G_s . \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

G_s = Densité des grains solides 2,74 KN/m^3

γ_w = Poid volumique de l'eau =10 KN/m^3

γ_d = Poid volumique sec = 17,26 KN/m^3

$$e = \frac{2{,}74.10}{17{,}26} - 1 = 0{,}587$$

- **Calcul du degré de saturation :**

$$S_R = \frac{w . G_S}{e}$$

W= teneur en eau 19,13%

G_S = Densité des grains solides 2,74

e = Indice des vides 0,587

$$S_R = \frac{19{,}13\ .\ 2{,}74}{0{,}587} = 89{,}3\%$$

Tableau III.7_Résultats des paramètres d'état pour une succion de 2000 kPa

	M_h(g)	$M_{kirosene}(g)$	M_S(g)	w(%)	V(m^3)	$\rho_d(\frac{g}{m^3})$	$\gamma_d(\frac{KN}{m^3})$	e	s_R(%)
2000 KPa	6,04	3,76	5,07	19,13	2,875	1,76	17,26	0,587	83, 3

V.2 Techniques De mesure De La Succion :

V.2.1 Méthode du papier filtre :

a) Principe de la méthode :

La méthode du papier-filtre est une technique indirecte utilisée pour mesurer la succion des sols non saturés. Elle repose sur la mise en équilibre hydrique entre un papier-filtre, dont la courbe de rétention d'eau est connue, et l'échantillon de sol étudié. Après une période d'équilibrage suffisante, la teneur en eau du papier-filtre est déterminée par pesée précise, puis la valeur de la succion est obtenue à partir de la courbe d'étalonnage correspondante. Cette méthode permet de mesurer une large gamme de succions et présente l'avantage d'être simple, économique et facilement applicable en laboratoire**.**

b) Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental de la méthode du papier-filtre se caractérise par sa simplicité et repose sur un système assurant un contact étroit entre le sol et le papier-filtre, tout en empêchant toute évaporation. Il est constitué d'échantillons de sol préparés comme suit :

- Il comprend également des papiers-filtres calibrés, placés à l'intérieur des échantillons de sol dans une éprouvette cylindrique de 5 cm de diamètre, où l'échantillon est compacté par compactage statique.
- Le dispositif comporte en outre des papiers de protection utilisés pour isoler le papier-filtre et éviter sa contamination au cours de l'essai, ainsi que des matériaux isolants tels que la cire, le papier aluminium et la cellophane, afin de maintenir l'humidité des échantillons et de limiter les échanges avec l'air extérieur.
- Enfin, une balance de haute précision est utilisée pour mesurer la masse du papier-filtre avant l'essai et après la période d'équilibre, afin de déterminer avec précision la teneur en eau..

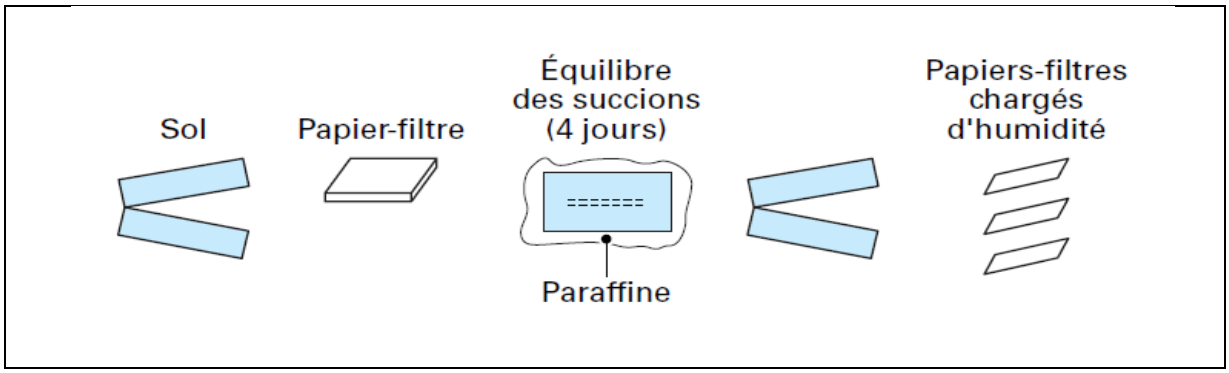


Figure III.15_Principe de la méthode de mesure de la succion par papier filtre.



Figure III.16_Types de papiers filtres utilisés

c) Protocole expérimental :

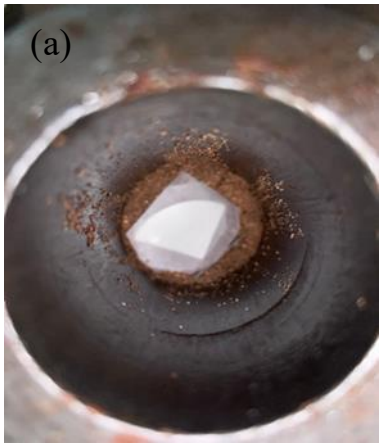
Le protocole de la méthode du papier filtre repose sur des étapes bien définies visant à préparer les échantillons et à mesurer la succion dans des conditions contrôlées. Il permet d'assurer un équilibre hydrique entre le sol et le papier filtre et de déterminer avec précision la teneur en eau ainsi que la succion des échantillons

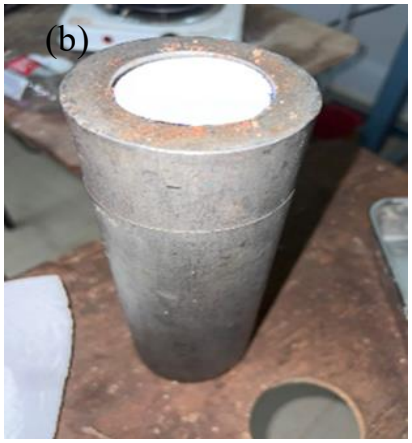
- Les deux mélanges de sol (tuf et argile + tuf) ont été humidifiés selon une teneur en eau de 13,5 %. le mélange a été réalisé de manière dynamique jusqu'à obtention d'échantillons homogènes.
- Dans un premier temps, une quantité d'échantillon est placée dans un moule cylindrique de 5 cm de diamètre, puis un papier de protection est déposé, suivi du papier de filtration préalablement pesé avant utilisation (cf figure 17.a)
- ensuite, un deuxième papier de protection est ajouté afin de protéger le papier de filtration et d'empêcher tout contact direct avec le sol.
- Une fois les papiers en place, le reste de l'échantillon est ajouté dans le moule, puis l'échantillon est soumis à un compactage statique afin d'assurer une densité homogène. (cf. figure 17.c)
- quatre échantillons ont été réalisés, dont deux à base de tuf et deux constitués d'un mélange de tuf et d'argile

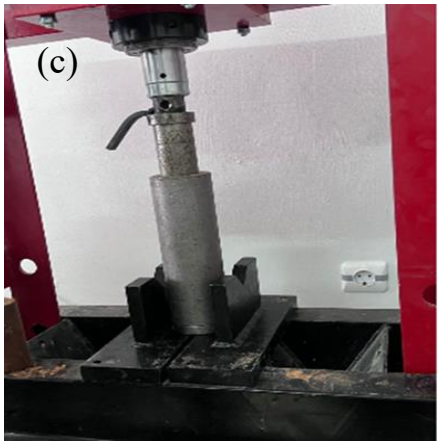
- Les échantillons sont ensuite enveloppés dans du papier d'aluminium puis dans un film de cellophane, avant d'être soigneusement scellés afin d'éviter toute perte d'humidité du sol et de préserver les conditions internes de l'échantillon. (cf figure 16.e et f)
- Les échantillons sont laissés au repos pendant un mois entier jusqu'à ce que l'équilibre hydrique entre le sol et le papier filtre soit atteint.

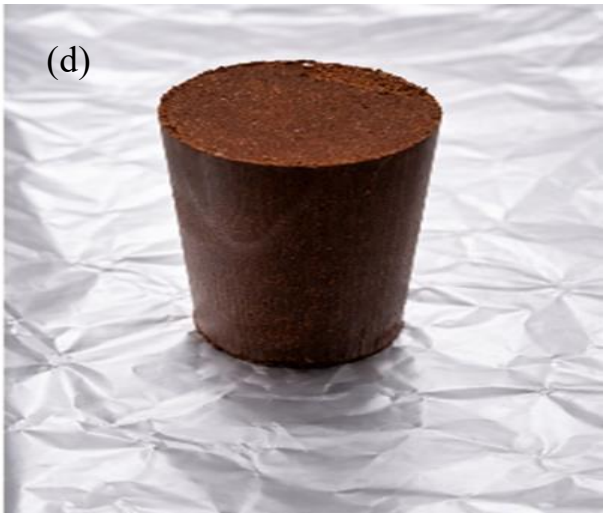
d) Protocole de mesure :

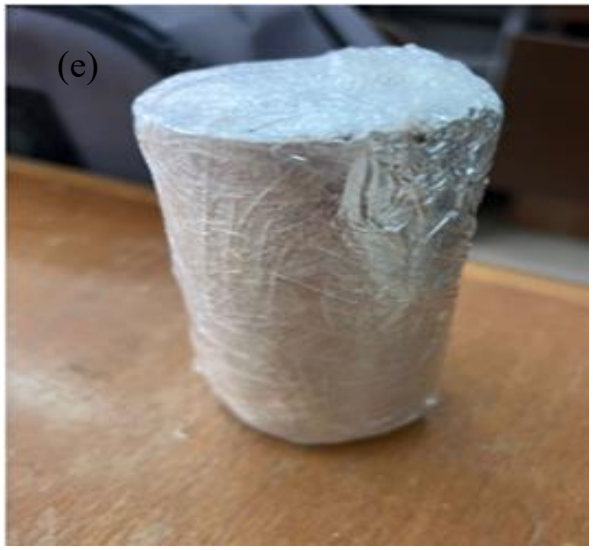
- Une fois la période d'équilibre terminée, les échantillons sont retirés et le papier de filtration est enlevé, puis pesé immédiatement à l'aide d'une balance de précision pour obtenir la masse humide M_h(cf figure 16.g)
- les feuilles de papier de filtration sont placées dans un four de séchage pendant 24 heures à une température de 105 °afin d'obtenir la masse sèche M_S du papier de filtration. (cf figure 16.h)











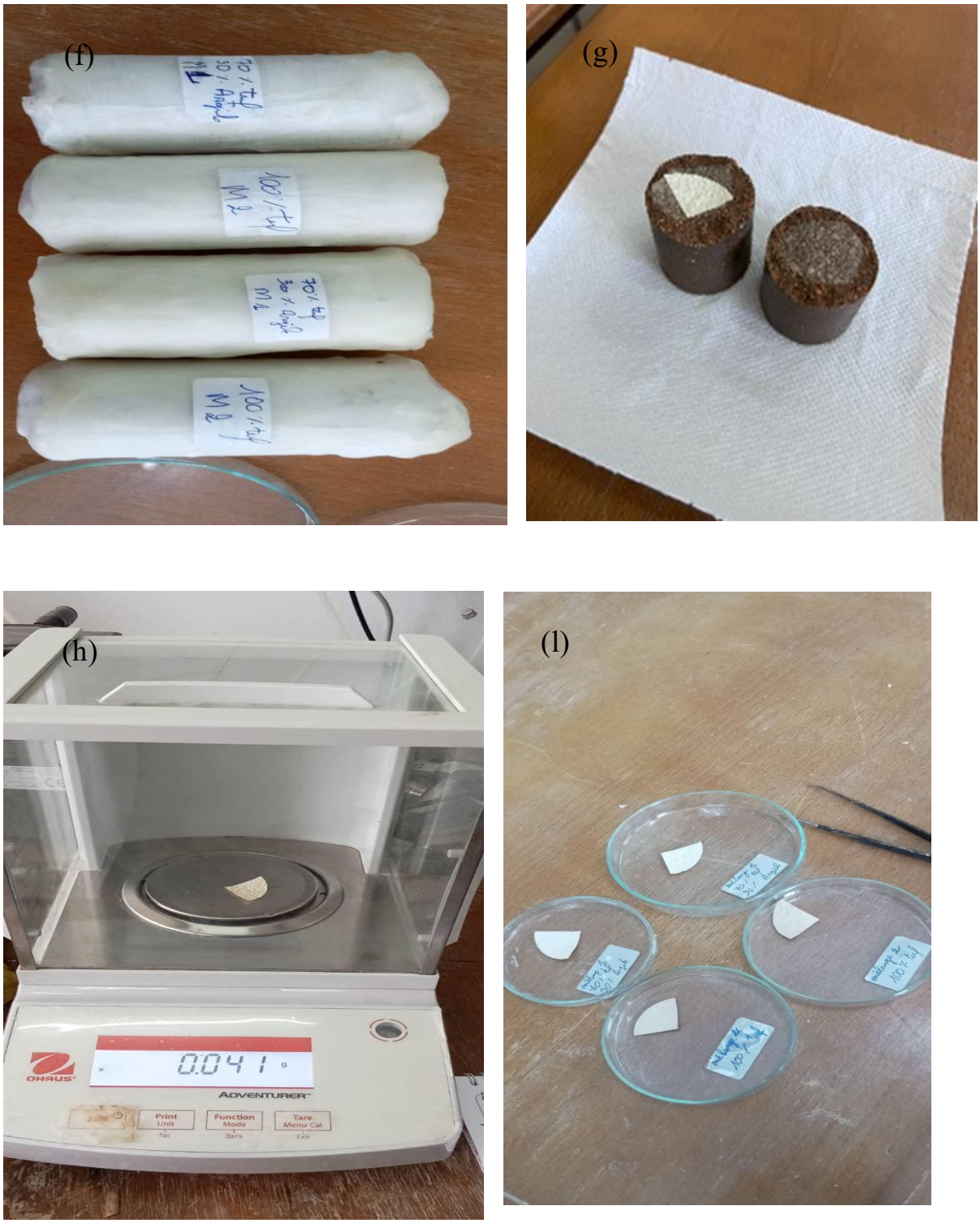


Figure III.17_Dispositif expérimental de la technique du papier filtre

V.3 Résultats et interprétation :

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats expérimentaux obtenus à partir des essais de mesure de la succion des sols par la méthode du papier filtre. L'interprétation des résultats permet d'analyser l'influence de la teneur en eau et de la composition des échantillons sur le comportement hydrique du sol, notamment l'évolution de la succion

V.3.1 Mesure de la succion par la méthode du papier filtre :

La teneur en eau du papier filtre a été déterminée à l'aide d'une méthode gravimétrique. Après la période d'équilibrage entre l'échantillon de sol et le papier filtre, ce dernier est soigneusement retiré puis immédiatement pesé afin d'obtenir sa masse humide M_hEnsuite, le papier filtre est placé dans une étuve à une température de 105°C pendant 24 heures afin d'éliminer toute trace d'humidité. Après séchage, il est retiré de l'étuve puis pesé à nouveau afin de déterminer sa masse sèche M_s

La teneur en eau du papier filtre est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\omega = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

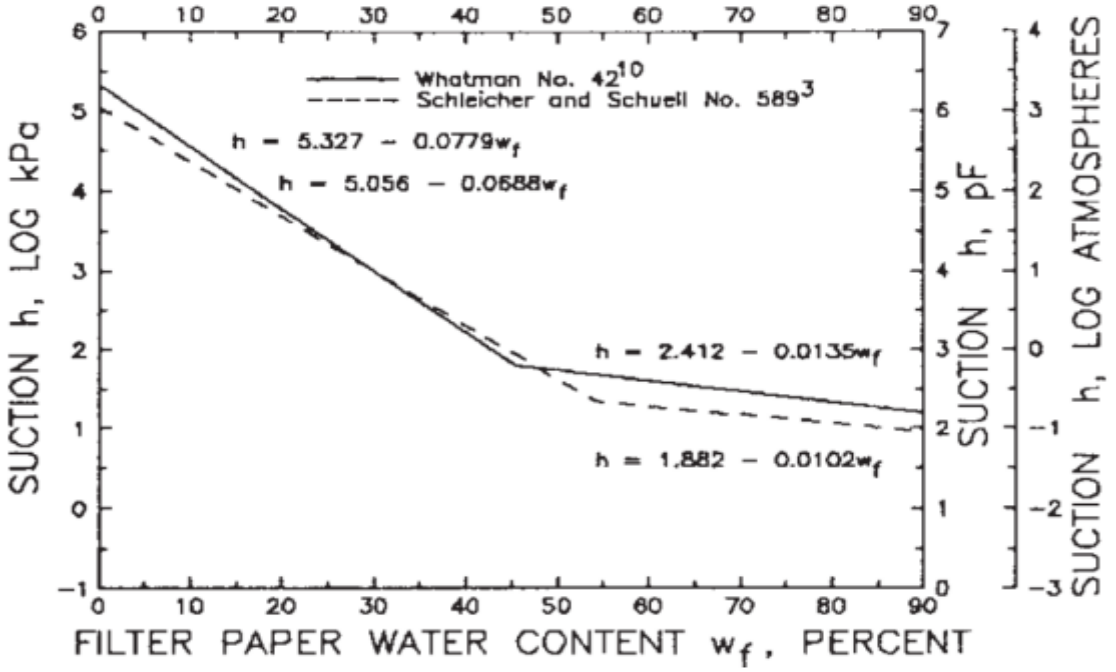


Figure III.18_Courbe d'étalonnage pour la détermination de la succion par la méthode du papier filtre. (ASTM, D. 5298-03)

a) exemple de calcul :

Cas de l'échantillon 100 % tuf :

Masse humide : M_h=0,058g

Masse sèche :M_s=0,043g

Application de la formule :$w = \frac{0,058-0,043}{0,043} = \frac{0,015}{0,043}$ =0,34883721

$$w = 34,883\%$$

Après avoir déterminé la teneur en eau, on utilise la relation d'équilibre du papier filtre adoptée dans cette expérience, comme indiqué ci-après:

$$h = 5{,}327 - 0{,}0779 w_f$$

Le résultat est ensuite reporté sur la courbe représentée dans la figure III.18, ce qui permet d'obtenir la valeur de succion indiquée dans le tableau suivant :

Tableau III .8_ Résultats de la teneur en eau du papier filtre et de la succion des différents échantillons étudiés

type d'échantillon	Masse humide M_h	Masse sèche M_S	h (Log KPa)	Teneur en eau papier filtre ω(%)	Succion ψ(MPa)
100% tuf	0,058	0,043	2,609558	34,883721	406,966011
70%Tuf +30%argile	0 ,056	0,046	3,6335217	21,73913	4300,5276

Les résultats présentés dans le tableau III.8 mettent en évidence une relation inverse entre la teneur en eau du sol et la valeur de succion. En effet, l'échantillon constitué entièrement de tuf présente une teneur en eau relativement élevée (34,88 %), accompagnée d'une diminution de la valeur de succion (406,97 MPa), ce qui traduit une capacité moyenne de rétention hydrique.

En revanche, l'échantillon composé de 70 % de tuf et de 30 % d'argile affiche une teneur en eau plus faible (21,73 %), accompagnée d'une augmentation significative de la valeur de succion (4300,53 MPa). Cette variation montre que l'ajout d'argile modifie la structure du sol et accroît les forces de rétention d'eau dues aux phénomènes capillaires ainsi qu'aux forces d'adsorption au sein des pores fins.

Par conséquent, ces résultats confirment que la force de succion augmente avec la diminution de la teneur en eau et que la granulométrie du sol exerce une influence notable sur ce phénomène.

V.3.2 Courbes des chemin de drainage / humidification :

La détermination des chemins de séchage et d'humidification a été effectuée à l'aide de trois techniques complémentaires : la technique osmotique, les solutions salines et la méthode du papier filtre. La technique osmotique a été employée pour imposer des succions inférieures à 2 MPa, tandis que la méthode des solutions salines nous permet d'aller jusqu'au succion de 600MPa, enfin la méthode du papier filtre a servi à mesurer la succion initiale des échantillons séchés.

Les résultats des essais de séchage-humidification des échantillons compactés TUF et TUF+ARGILE sont représentés dans les cinq plans (figure. III.19 e) :

(a) indice des vides-teneur en eau, (b) indice des vides-succion (c) degré de saturation-teneur en eau (d) degré de saturation-succion (e) teneur en eau- succion.

Les paramètres initiaux des échantillons compactés sont représentés dans le tableau III.9. Nous avons aussi rapporté les valeurs de succions initiales (Ψ TUF, Ψ TUF+ARGILE) mesuré par papier filtre et celle estimées à partir des corrélations de (Fleureau et al, 2002) données par l'équation suivante :

$$\Psi_{opt} = 0{,}018(W_L)^{1{,}98} \qquad R^2 = 0{,}88$$

Tableau. III. 9. Les caractéristiques initiales des échantillons compactés

Conditions initiales	Succion mesurée (KPa)	Succion estimée (KPa)	W_i (%)	γd (g/cm3)	e_i	Sr_i (%)
TUF	406,96	150,28	13,5	1,8	0,52	70,83
TUF+ARGILE	4300,52	211,79	13	1,75	0,56	65,38

Il apparaît que la valeur de la succion initiale obtenue par corrélation pour les échantillons TUF et TUF+ARGILE est nettement inférieure à la valeur mesurée par papier filtre. Cette différence pourrait être attribuée par la faite que la corrélation est obtenue a partir d'une base des donnée des sols moyenne et dans notre cas le sol est classé calcaire suite à sa fort teneur en CaCo3 et sa composition minéralogique dominé par la calcite. Par conséquent, la valeur mesurer par papier filtre semble plus cohérente et s'intègre mieux dans l'ensemble des points expérimentaux du chemin de séchage-humidification

A partir de la figure III.19 on peut noter les remarques suivantes :

Le mélange du tuf montre un comportement typique d'un matériau non saturé à structure relativement grossière et faiblement plastique, par contre Le mélange tuf + argile présente un comportement nettement plus influencé par les phénomènes capillaires et absorptifs en raison de la présence de particules argileuses.

Pour le plan indice des vides-teneur en eau on peut dire que pour le mélange tuf l'indice des vides augmente progressivement avec la teneur en eau, traduisant un gonflement modéré lors de l'humidification. La pente relativement faible indique que le tuf possède une faible sensibilité volumique, aussi à faibles teneurs en eau, la structure reste compacte et stable. Lorsque la teneur en eau augmente, une légère ouverture de la structure poreuse apparaît, liée à l'adsorption progressive de l'eau dans les pores, d'autre part le mélange Tuf+Argile l'indice des vides augmente davantage avec la teneur en eau comparativement au tuf seul, cette évolution traduit un gonflement plus important, une forte interaction eau–argile et une expansion de la microstructure lors de l'humidification.

Pour le plan indice des vides-succion, pour le mélange, L'augmentation de la succion entraîne une diminution de l'indice des vides, ce qui traduit le retrait du matériau lors du séchage.

Le tuf seul présente une réduction progressive mais limitée de son volume, ce qui montre

- Une faible compressibilité hydrique ;
- Une structure relativement rigide ;
- Une faible influence des phénomènes de gonflement-retrait.

Le mélange tuf–argile présente :

- Des variations volumétriques plus importantes ;
- Une compressibilité hydrique plus élevée ;
- Un comportement fortement dépendant de l'état hydrique.

Pour le plan degré de saturation-teneur en eau

Le mélange tuf montre une augmentation rapide du degré de saturation avec la teneur en eau. Cette évolution montre que les pores du tuf se remplissent progressivement d'eau lors de l'humidification.

Le matériau atteint des saturations élevées uniquement pour des teneurs en eau relativement importantes, ce qui traduit :

- Une porosité dominée par des macropores ;
- Une faible capacité de rétention capillaire.

Pour le mélange Tuf+Argile le degré de saturation augmente rapidement même pour des teneurs en eau relativement faibles.

Cela montre que :

- les micropores argileux retiennent fortement l'eau ;
- le matériau possède une importante surface spécifique ;
- la saturation est atteinte plus facilement.

Pour le plan degré de saturation-succion :

Le mélange Tuf montre une diminution forte de du degré de saturation lorsque la succion augmente.

Cette diminution rapide traduit :

- Une désaturation importante ;
- Une évacuation relativement facile de l'eau ;
- Une faible rétention hydrique.

Le mélange Tuf+Argile le degré de saturation diminue plus lentement avec la succion que dans le cas du tuf seul.

Cela traduit :

- Une forte rétention capillaire ;
- Une désaturation plus progressive ;
- Une capacité élevée à conserver l'eau à fortes succions.

Pour le plan teneur en eau-succion :

La teneur en eau diminue rapidement avec l'augmentation de la succion. La pente relativement forte montre que le tuf possède :

- Une faible capacité de rétention ;
- Une entrée d'air relativement précoce ;
- Une faible proportion de micropores capables de retenir l'eau à fortes succions.

Pour une même succion, le mélange tuf + argile conserve une teneur en eau plus élevée que le tuf seul, ce comportement confirme :

- L'importance des micropores ;
- La forte adsorption de l'eau ;
- La dominance des forces capillaires et physico-chimiques.

La comparaison des deux matériaux montre que :

- Le tuf possède un comportement plus drainant et moins sensible aux variations hydriques ;
- Le mélange tuf + argile présente une plus forte capacité de rétention d'eau ainsi qu'une sensibilité volumique plus importante ;
- L'ajout d'argile améliore la rétention hydrique mais accentue les phénomènes de retrait–gonflement ;
- Les différences observées sont directement liées à la microstructure et à la distribution des pores des deux matériaux.

↓

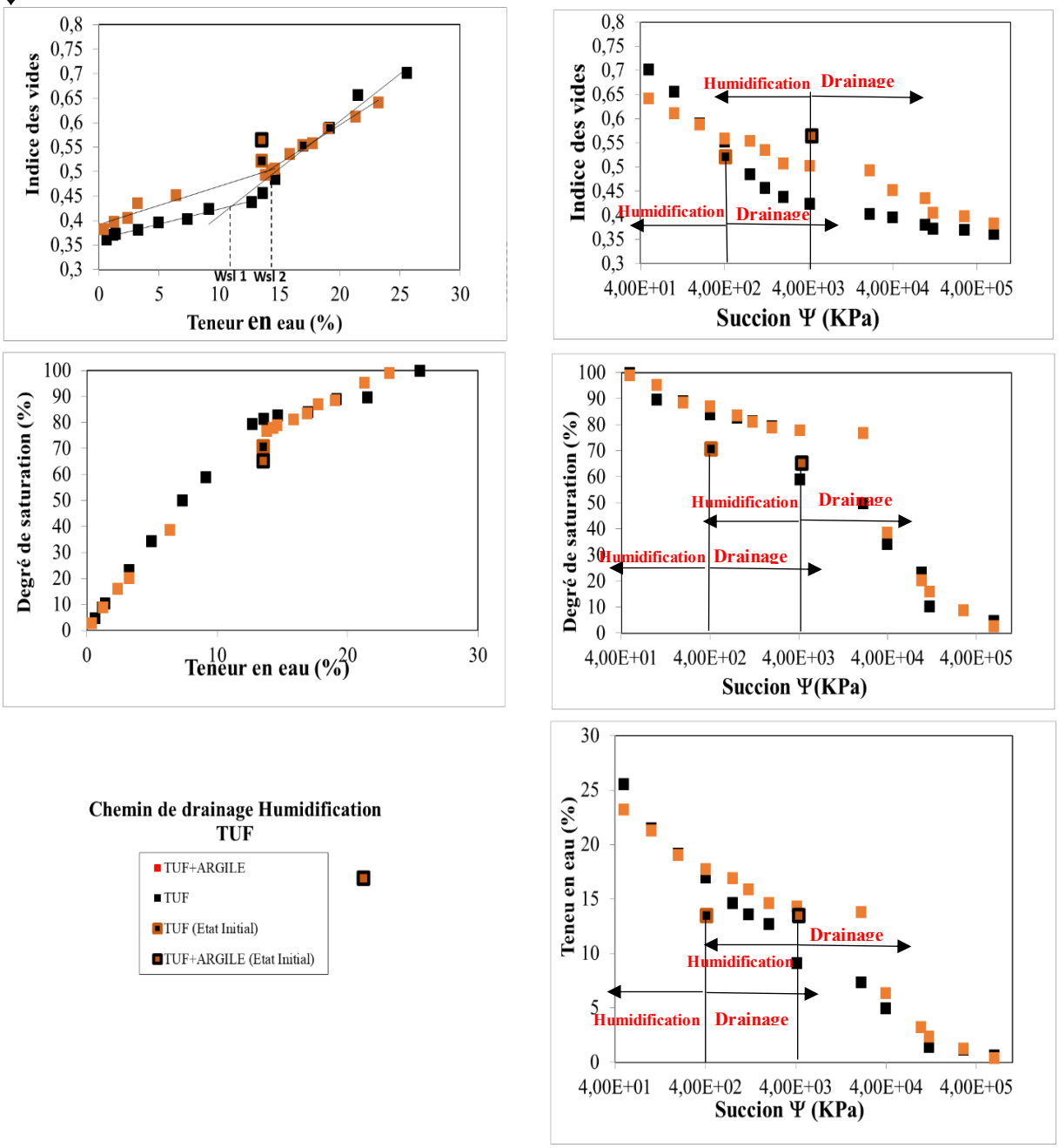


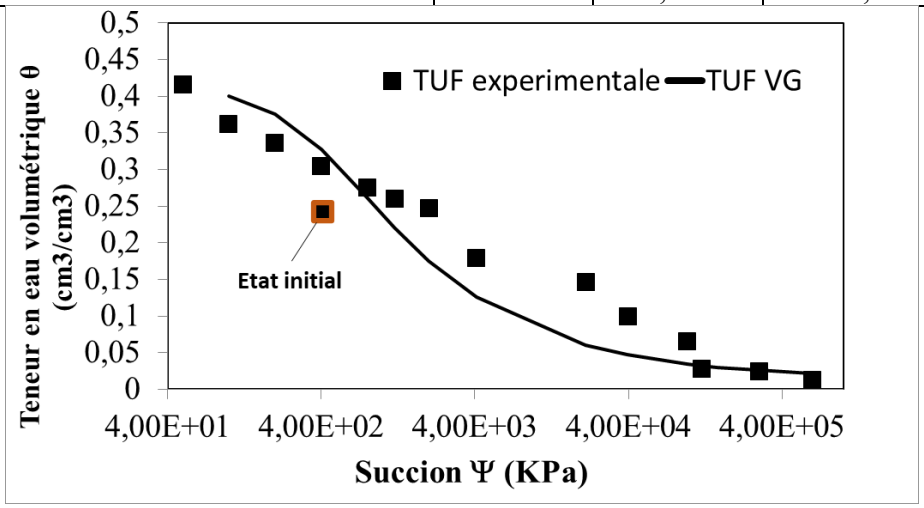
Figure III. 19_Chemin drainage humidification TUF, TUF+ARGILE

V.3.3 Ajustement de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC) par l'équation de Van-Genuchten

Plusieurs chercheurs ont utilisé l'équation de (Van Genuchten, 1980) pour l'ajustement de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC, [plan w, Ψ]), Les courbes caractéristique sol-eau (SWCC) lors du séchage-humidification des échantillons compactés TUF ET TUF+ARGILE, simulées par l'équation de Van Genuchten, 1980, sont présentées sur la figure III.20. Les paramètres (a, n, m) de Van Genuchten, 1980 ont été déterminés par la méthode des moindres carrés. L'ensemble des paramètres d'ajustement obtenus sont rassemblés dans le tableau III.10.

Tableau. III. 10. Les paramètres de l'équation de Van Genuchten (VG).

Paramètres	Symboles	TUF	TUF+ARGILE
Teneur en eau volumique	θs	0,415	0,395
Teneur en eau volumique résiduel	θr	0,015	0,02
Ajustement	n	1,55	1,38
	a	0,0025	0,0012
	m	0,354	0,275



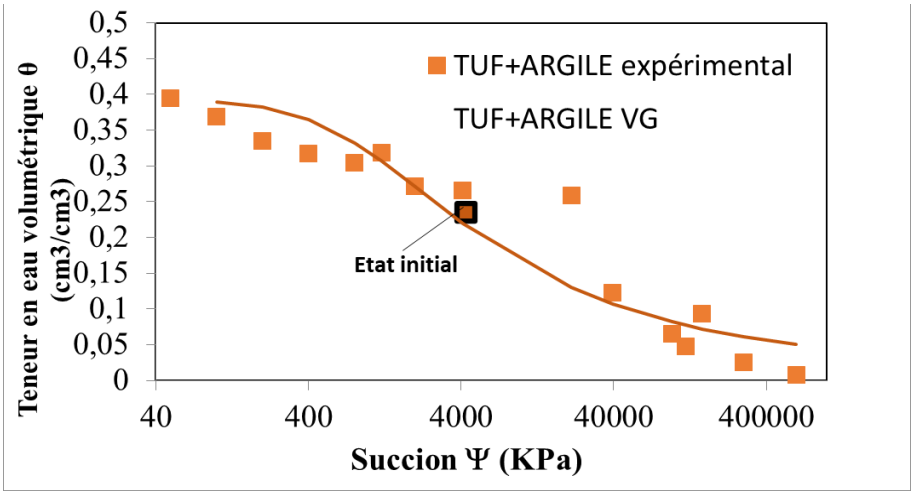


Figure III. 20_L'évolution de la teneur en eau volumétrique en fonction de la teneur en eau

Le graphe représentant l'évolution de la teneur en eau volumétrique en fonction de la succion pour le tuf met en évidence un comportement caractéristique des sols non saturés.

Au début du séchage, pour les faibles succions, la teneur en eau volumétrique reste élevée et varie lentement. Cette zone correspond à l'état quasi saturé où l'eau occupe encore la majorité des pores du matériau. Le tuf conserve alors une structure relativement stable.

À partir d'une certaine valeur de succion, située approximativement entre 10^2 et 10^4 kPa, la courbe présente une diminution importante de la teneur en eau. Cette zone correspond à la phase principale de désaturation et traduit l'entrée progressive de l'air dans les pores du matériau. La pente relativement marquée indique une perte rapide d'eau sous l'effet de l'augmentation de la succion.

Aux fortes succions, supérieures à environ $10^4 - 10^5$ kPa, la courbe tend progressivement vers une asymptote correspondant à la teneur en eau résiduelle. Dans cette zone, l'eau restante est fortement adsorbée par les particules solides et devient difficilement mobilisable.

La courbe issue du modèle de Van Genuchten reproduit globalement l'allure expérimentale, bien qu'un léger écart apparaisse dans la zone intermédiaire de désaturation. Cela peut être lié :

- à l'hétérogénéité de la structure poreuse du tuf ;
- à la dispersion expérimentale ; ou à la présence simultanée de macropores et micropores.

L'état initial se situe dans la zone de transition hydrique, ce qui indique que le matériau n'était ni totalement saturé ni complètement sec au début des essais.

Le mélange tuf + argile présente une évolution similaire mais avec un comportement hydrique nettement influencé par la présence d'argile.

Pour les faibles succions, la teneur en eau volumétrique demeure élevée, ce qui traduit une importante capacité de rétention d'eau. La présence des particules argileuses et des micropores favorise l'adsorption et la conservation de l'eau dans le matériau.

La phase de désaturation apparaît plus progressive que dans le tuf seul. La diminution de la teneur en eau avec la succion est moins brutale, indiquant :

- Une structure plus fine ;
- Une distribution poreuse plus étendue ;
- Une plus forte action des forces capillaires et physico-chimiques.

Le mélange tuf + argile conserve ainsi davantage d'eau pour des niveaux de succion élevés, ce qui confirme sa plus grande capacité de rétention hydrique.

Aux très fortes succions, la courbe tend également vers une teneur en eau résiduelle faible, mais cette valeur reste légèrement supérieure à celle du tuf seul. Cela montre que même à l'état très sec, les particules argileuses retiennent encore une certaine quantité d'eau adsorbée.

Le modèle de Van Genuchten ajuste correctement l'évolution générale de la courbe expérimentale. La bonne concordance entre les points expérimentaux et la courbe théorique confirme l'adéquation du modèle pour représenter le comportement hydrique du mélange.

L'état initial du matériau se situe également dans la zone de transition, indiquant un état partiellement saturé au début de l'essai.

V.3.4 Analyse de la limite de retrait et comportement hydro-mécanique des matériaux :

Les résultats concernant la limite de retrait montrent clairement une différence de Comportement hydro-mécanique entre le TUF et le mélange TUF + argile. La limite de retrait représente la teneur en eau à partir de laquelle le matériau Cesse pratiquement de se contracter au-dessus de cette limite la perte d'eau entraîne une diminution importante du volume, le retrait est actif. Et en-dessous le volume devient presque constant, et le retrait devient résiduel. Pour le mélange TUF la limite de retrait Ws 1 et approximativement entre 9% et11%, ce qui dit que la structure devient rigide relativement tôt pendant le séchage et les variations volumétriques deviennent faibles à faible teneur en eau. Cela est due à la structure du tuf qui est plus stable vis-à-vis du séchage avec un potentiel de retrait limité. Pour le deuxième mélange TUF+ARGILE la limite de retrait Ws 2 remonte entre 13% et 14%, cette augmentation est importante, cela montre que le matériau continue à se contracter pour des teneurs en eau plus faibles et le retrait persiste plus longtemps pendant le séchage, ce qui rond la structure sensible aux variations hydriques.

V.3.5 Évaluation de l'aptitude des matériaux TUF et TUF + argile en construction routière :

Si l'on envisage d'utiliser ces matériaux pour construire des routes, nos résultats permettent de tirer des conclusions claires sur leur comportement face à l'eau et leur aptitude à servir de couches de chaussée.

- **Pour le tuf seul :**

Le tuf retient mal l'eau et sèche donc assez vite. Ses variations de volume sont limitées et il est peu sensible au phénomène de retrait-gonflement.

Ces caractéristiques en font un matériau assez stable face aux variations d'humidité. Pour la construction routière, c'est un atout majeur, car cela limite les risques de déformation, de fissuration et de tassement.

Cependant, cette faible rétention d'eau peut aussi causer un assèchement rapide et une plus grande rigidité par temps sec. Il reste néanmoins un bon candidat comme couche de forme, couche de fondation ou remblai, à condition bien sûr de valider sa portance, sa résistance mécanique et sa durabilité face au trafic et aux changement climatiques.

- **Pour le mélange tuf + argile :**

L'ajout d'argile change le comportement hydrique du matériau. Le mélange retient beaucoup mieux l'eau, reste saturé plus longtemps et ses variations de volume sont bien plus importantes.

Pour une route, cette forte rétention d'eau est plutôt un handicap : elle favorise le gonflement par temps humide et le retrait par temps sec, ce qui peut provoquer une perte de portance et l'apparition de fissures et de déformations.

Nos résultats montrent aussi que ce mélange est plus sensible aux conditions climatiques et donc, globalement, moins stable. Son utilisation dans une structure routière exige donc des précautions particulières, notamment :

- Un contrôle strict de sa teneur en eau,
- Une bonne compaction,
- Un drainage efficace.

V.3.6 Comparaison des deux matériaux pour un usage routier

Les résultats montrent que :

- Le tuf seul présente un comportement plus stable et plus favorable pour les infrastructures routières ;
- Le mélange tuf + argile possède une meilleure rétention d'eau mais une sensibilité accrue au retrait–gonflement ;
- La présence d'argile améliore la cohésion mais peut dégrader la stabilité volumique et la portance en présence d'eau.

VI. Conclusion

L'analyse des résultats de ce chapitre, qui s'appuie sur les chemins de drainage et d'humidification, la courbe caractéristique sol–eau (SWCC) par l'équation de Van-Genuchten et la limite de retrait, permet de mieux comprendre le comportement hydrique et hydro-mécanique du tuf et du mélange tuf + argile.

En général, le tuf reste assez peu sensible aux variations hydriques. Il se caractérise par une faible capacité de rétention en eau, une évolution volumétrique limitée et une faible sensibilité aux phénomènes de retrait-gonflement. Cette stabilité est due à sa structure poreuse assez grossière et à la faible influence des forces capillaires, ce qui lui confère un comportement favorable face aux variations de teneur en eau.

À l'inverse, l'addition d'argile modifie profondément le comportement du matériau. Le mélange tuf + argile présente une capacité de rétention en eau plus élevée, une succion plus forte et une sensibilité accrue aux variations hydriques. Des phénomènes se traduisent par une déformation volumétrique plus importante et une augmentation du retrait-gonflement, liée à la présence de fines particules et de micropores actifs.

L'étude de la limite de retrait montre également que le mélange tuf + argile reste dans un domaine de retrait actif sur une plage de teneur en eau plus large que le tuf seul, accentuant ainsi sa sensibilité aux cycles humidification–séchage.

En termes comparatifs, le tuf se révèle être le matériau le plus stable et le mieux adapté aux applications géotechniques et routières, alors que le mélange tuf + argile, bien qu'il offre une

meilleure cohésion, exige un contrôle strict de son état hydrique pour éviter toute dégradation de ses performances mécaniques.

Ainsi, l'ensemble des résultats met en évidence que le comportement des matériaux étudiés est fortement gouverné par leur structure poreuse et leur interaction avec l'eau, paramètres déterminants pour leur utilisation en ingénierie routière.

Conclusion Générale

Aborder le risque de retrait et de gonflement des argiles dans les chaussées ne peut se réduire à une simple mise en garde. Ce phénomène, bien connu en géotechnique, n'est ni une fatalité géologique, ni la conséquence d'une seule erreur de conception. Il résulte plutôt d'un enchaînement de mécanismes qui prennent naissance bien en profondeur, dans le sol support, et qui remontent peu à peu vers la surface jusqu'à fragiliser l'ensemble de la structure.

Dans ce mémoire, nous avons tenté de reconstituer cet enchaînement. Nous avons d'abord rappelé que les sols argileux, en raison de leur microstructure et de leur forte sensibilité aux variations d'eau, réagissent de manière parfois violente aux cycles de sécheresse et de réhumidification. Nous avons ensuite montré, à travers une analyse des pathologies les plus courantes, que les fissures longitudinales, les affaissements de rive ou encore l'orniérage ne sont presque jamais des accidents isolés : ils traduisent presque toujours un mouvement différentiel du sol sous-jacent.

La partie expérimentale, menée sur le tuf de Béni-Saf et l'argile de Boughrara, nous a permis de confronter la théorie à des matériaux réels. Le tuf seul, malgré une fraction fine non négligeable, a montré un comportement relativement stable. Il ne retient pas excessivement l'eau, sa limite de retrait est atteinte assez rapidement et ses variations volumiques restent limitées. Ce constat le désigne comme un matériau potentiellement intéressant pour les couches de forme ou de fondation dans les infrastructures routières.

Le mélange contenant 30 % d'argile raconte une autre histoire. L'ajout d'argile modifie profondément la porosité, la capacité de rétention d'eau et la réponse à la succion. Les chemins de drainage et d'humidification montrent clairement un retard à la désaturation, un gonflement plus marqué à l'humidification et une limite de retrait qui se décale vers des teneurs en eau plus élevées. Autrement dit, le matériau devient plus cohérent, mais aussi beaucoup plus sensible aux aléas hydriques. Pour une route, cela signifie un risque accru de déformation et une maintenance plus lourde.

Ce travail a également mis en lumière l'importance des techniques de compactage et du contrôle rigoureux de la teneur en eau. Un même matériau peut donner des résultats très différents selon qu'il est compacté à sec ou à une teneur en eau légèrement supérieure à l'optimum. De même, un drainage mal conçu ou des accotements qui retiennent l'eau suffisent à réactiver localement le gonflement.

Bien entendu, cette étude n'épuise pas le sujet. Nous n'avons exploré qu'un nombre limité de cycles hydriques, et les conditions de laboratoire ne reproduisent jamais parfaitement la complexité du terrain. Il serait utile, à l'avenir, d'envisager des essais sur une plus longue durée, avec des cycles alternés plus nombreux, et si possible des essais in situ sur des sections expérimentales.

Malgré ces limites, nous estimons que ce mémoire apporte une contribution utile. D'une part, il confirme que le tuf de Béni-Saf seul est un matériau robuste pour les infrastructures

routières. D’autre part, il met en garde contre l’ajout d’argile sans une étude hydromécanique approfondie. En définitive, construire une route sur un sol argileux ou avec des matériaux contenant de l’argile n’est pas impossible, mais cela impose une discipline rigoureuse : bien caractériser, bien compacter, bien drainer, et accepter que la marge d’erreur est étroite.

C’est probablement là le principal enseignement de ce travail.

Références :

Abou-Bekr, N., Benchouk, A., Bouchemella, S., Bourokba, S. A., Derfouf, F-E. M., Kebaili, M., Moulay Omar, H., & Taibi, S. (2024). *Mécanique des sols non saturés. Concepts de base et exercices corrigés (1ère éd.). Réseau de chercheurs en géotechnique appliquée aux sols non saturés. DOI: 10.13140/RG.2.2.28533.38888*

AFNOR. (2001). *NF XP P13-901 : Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons – Définitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de réception.*

Agus, S. S., & Schanz, T. (2005). *Effect of shrinking and swelling on microstructures and fabric of a compacted bentonite-sand mixture. In Proceedings of International Conference on Problematic Soils GEOPROB 2005 (Vol. 2, pp. 543-550). Eastern Mediterranean University Press.*

Ait Salem, A. A. (2024). *Etude des comportements mécaniques et de durabilité : Valorisation du tuf en brique de terre compressée stabilisée (BTCs) (Thèse de doctorat). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Alshihabi, O. (2002). *Etude en laboratoire du comportement d'un sol compacté non saturé – Influence des cycles de séchage-humidification (Thèse de doctorat). Université des Sciences et Technologies, Lille.*

ASTM. (2003). *D5298-03: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM International.*

Belabbaci, Z. (2014). *Stabilisation des sols gonflants (Thèse de doctorat). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Bellatrache, Y. (2012). *Comportement des argiles naturelles et traitées d'Ain Amenas en fonction de la teneur en eau (Mémoire de Magister). Université Kasdi Merbah – Ouargla.*

Benchouk, A. (2005). *Comportement des argiles des barrages Sikkak et Boughrara soumis à une pression interstitielle négative (Mémoire de Magister). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Boumehraz, N., & Chakour, F. (2017). *[Étude d'un tronçon de route – figures de structure de chaussée] (Mémoire de master non publié).*

Boussafir, Y. (2006). *[Rapport technique – Effets de la sécheresse sur les chaussées et gonflement des sols argileux] (Non publié).*

Callaud, M. J. (2004). *Cours de mécanique des sols. Tome I : Propriétés des sols.*

Coussy, O., & Dangla, P. (2002). *Approche énergétique du comportement des sols non saturés. In O. Coussy & J. M. Fleureau (dir.), Mécanique des sols non saturés (pp. 137-174). Hermès..*

Cuisinier, O. (2002). *Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés (Thèse de doctorat). INPL Nancy.*

Cui, Y. J., Yahia-Aissa, M., & Delage, P. (2002). *A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling soils. Engineering Geology, 64, 233-250.*

Day, R. W. (1994). *Swell-shrink behavior of compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering, 120(3), 618-623.*

Delage, P., Howat, M. D., & Cui, Y. J. (1998). *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Engineering Geology, 50(1-2), 31-48.*

Derfouf, F-E. M. (2014). *Contribution à l'étude des sols fins non saturés : Aspects du comportement volumique (Thèse de doctorat). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Fleureau, J. M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R., & Taibi, S. (1993)*. Behavior of clayey soils on drying-wetting paths. Canadian Geotechnical Journal, 30, 287-296.*

Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Gomes Correia, A., & Kheirbek-Saoud, S. (2002). *Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. Canadian Geotechnical Journal, 39(6), 1341-1357.*

Ghanem, F. (2011). *Étude de la corrélation entre la perméabilité et la succion (Mémoire de master). Université Mouloud Mammeri.*

Ghomari, F. (1989). *Matériau en terre crue compactée : amélioration de sa durabilité à l'eau (Thèse de doctorat). INSA Lyon*

GTR (Guide des Terrassements Routiers). (2024). *Recommandations pour le dimensionnement des chaussées sur sols expansifs. (Rapport technique – CEREMA / IDRRIM).*

Hachichi, A., & Fleureau, J.-M. (1999). *Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. Revue Française de Géotechnique, 86, 37-51.*

Kouassi, P. (1998). *Comportement des sols fins compactés : application aux remblais et aux ouvrages en terre (Thèse de doctorat). Université Bordeaux 1.*

Li, Z. S., Derfouf, F. E. M., Benchouk, A., Abou-Bekr, N., Taibi, S., & Fleureau, J. M. (2018). *Volume change behavior of two compacted clayey soils under hydraulic and mechanical loadings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(4), 04018013.*

Lloret, A., & Alonso, E. E. (1985). *State surfaces for partially saturated soils. Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., San Francisco, Vol. 2, pp. 557-562*

Magnan, J.-P. (2013). *Routes exposées à la sécheresse et au phénomène de retrait-gonflement des argiles (Rapport techniquQe, IFSTTAR).*

Mekaideche, K. (2021). *Comportement hygrothermique de la terre crue partiellement saturée (Thèse de doctorat). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Mesbah, A., Morel, J. C., & Olivier, M. (1999). *Compactage statique et dynamique pour la fabrication de briques de terre comprimée. Matériaux et Constructions, 32(6), 429-435.*

Nowamooz, H. (2007). *Retrait-gonflement des sols argileux compactés et naturels (Thèse de doctorat). INPL Nancy.*

Philipponnat, G. (1991). *Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. Revue Française de Géotechnique, 57, 5-22. DOI: 10.1051/geotech/1991057005*

Proctor, R. R. (1933). *Fundamental principles of soil compaction. Engineering News-Record, 111(9,10,12,13).*

Sebaa, K. (2021). *Influence du compactage sur le comportement mécanique de la terre crue naturelle et traitée (Thèse de doctorat). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons*

Taïbi, S. (1994). *Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative – Étude expérimentale et modélisation (Thèse de doctorat). École Centrale Paris.*

Sebaa, K. (2021). *Influence du compactage sur le comportement mécanique de la terre crue naturelle et traitée (Thèse de doctorat). Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen.*

Van Genuchten, M. Th. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898.*