



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar – El OUED

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option: Conception et Diagnostic des systèmes d'AEP et d'assainissement

THEME

Etude de la capillarité de l'eau dans des colonnes de sable

Dirigé par :

Dr. OUAKOUAK Abdelkader

Pr. KHECHANA Salim

Présenté par :

ABDESSETTAR Sara

KASMI Malika

Promotion : Juin 2024

إهداء

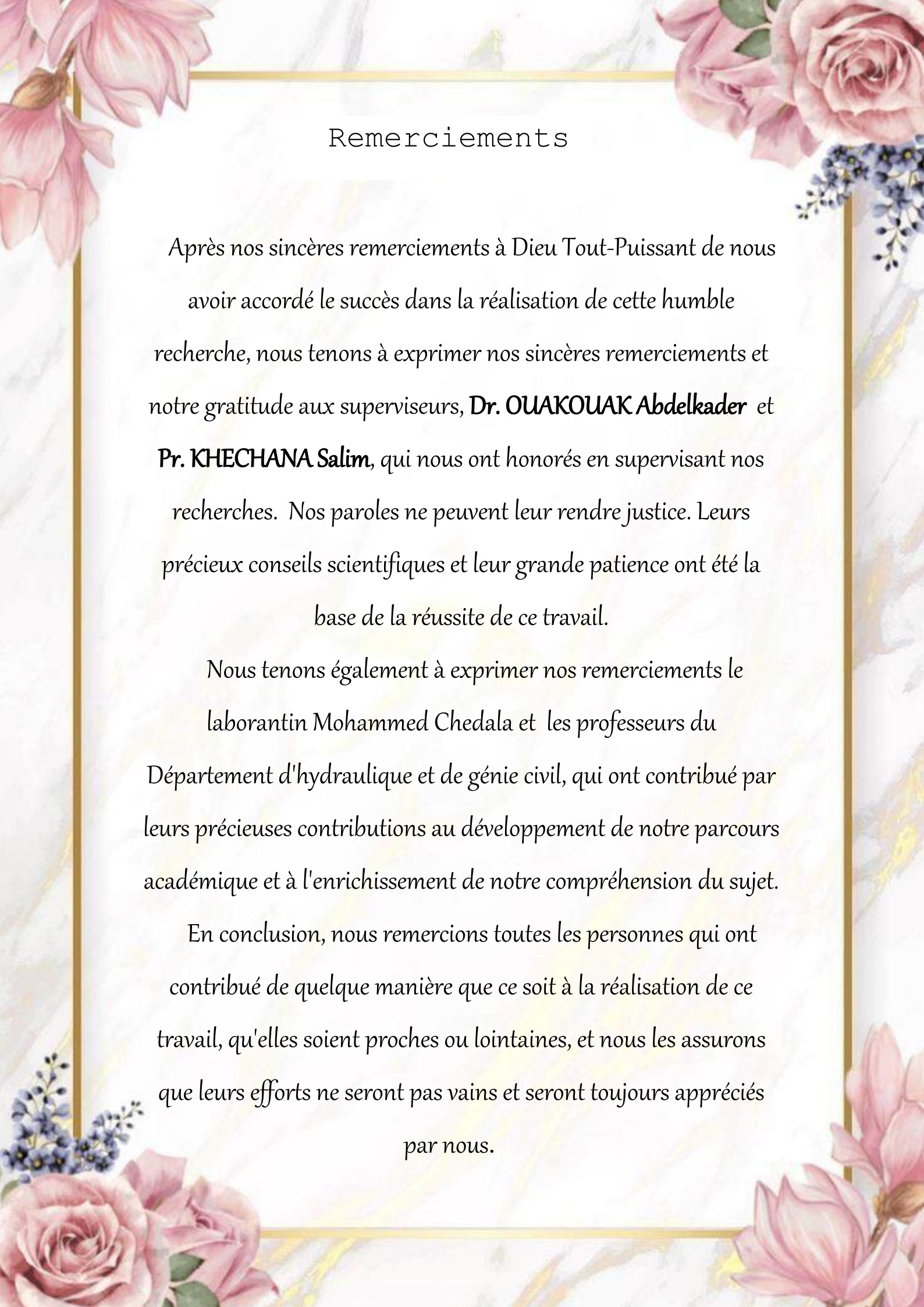
بعد مسيرة دراسية حملت في طياتها التعب والفرح، ها أنا اليوم أقف على عتبة
تخرجي فالحمد لله على فرصة البدايات وبلوغ النهايات .
أهدي نجاحي الي من ساندتني وألهمتني لمواصلة مسيرتي ،
وسهلت لي الشدائد بدعائها ، الي قرعة عيني وحببية روحي أمي
الي من أحمل اسمه بكل فخر ، الي من سعى طوال حياته لتكون أفضل
منه ، الي من دعمني وأعطانني بلامقابل أبي الغالي
الي خيرة أيامي وصفوتها الي من كانوا لي سنداً ودعماً الي من
غمروني بالحب الي الذين لطالما كانوا الظل لهذا النجاح إخوتي طارق ، وليد
وأخواتي صبرينة ، خولة
الي نفسي التي تحملت كل الصعاب ولا زالت تكافح لتصل الي الحلم
الي صديقاتي سارة ورابعة اللتان شاركانني لحظات التعب والفرح طيلة
مشوار هذا العمل
الي كل الاصدقاء القريبين من القلب
الي كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل لكم مني جزيل
الشكر والعرفان

"مليكَة قاسمي"

إهداء

. أهدي تخرجي وأشارك فرحتي إلى قدوتي الأولى إلى
شجرتي التي لا تذبل إلى الظل الذي آوى إليه في كل حين
أمي الغالية نزيهة فائزي
إلى من أحمل اسمه بكل فخر إلى من أعطاني ولم يزل يعطيني بلا
حدود إلى من رفعت وأرفع به رأسي عالياً افتخاراً به الذي لم يكن يوماً
رجلاً عادياً معلّمي الأول
والدي عبد اللطيف عبد الستار
ولإخوتي أكرم أسامة، الصديق وأخواتي وداد، عفاف، نجوى وعائلي و
أصدقائي ورفيقتي دربي مليكة رابعة الذين هم
سند لي في الحياة
وفي الختام ها هي اللحظات الأخيرة قد طوت صفحة من حياتنا تكلمت بالنجاح
وتحقق ما كان بالأمس حلماً فالحمد لله
رب العالمين والشكر له

"سارة عبد الستار"



Remerciements

Après nos sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé le succès dans la réalisation de cette humble recherche, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude aux superviseurs, **Dr. OUAKOUAK Abdelkader** et **Pr. KHECHANA Salim**, qui nous ont honorés en supervisant nos recherches. Nos paroles ne peuvent leur rendre justice. Leurs précieux conseils scientifiques et leur grande patience ont été la base de la réussite de ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements le laborantin Mohammed Chedala et les professeurs du Département d'hydraulique et de génie civil, qui ont contribué par leurs précieuses contributions au développement de notre parcours académique et à l'enrichissement de notre compréhension du sujet.

En conclusion, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce travail, qu'elles soient proches ou lointaines, et nous les assurons que leurs efforts ne seront pas vains et seront toujours appréciés par nous.

Résumé

L'étude du phénomène de la capillarité dans les sols sableux est essentielle en agriculture, géotechnique et gestion des ressources en eau. L'objectif de ce travail est d'étudier le phénomène de la capillarité dans des colonnes de sable et sable modifié. La vitesse de l'élévation de l'eau dans les colonnes émergées dans l'eau a été suivie en fonction du temps. Les résultats obtenus ont que la vitesse de l'élévation d'eau est influencée par le temps et par le type de substrat. Le matériau introduit sous forme d'une couche a contribué au blocage de la remontée de l'eau. De plus, l'ajoute d'Excréments de chameaux en mélange avec le sable engendre un ralentissement de la vitesse de capillarité. L'introduction d'une quantité élevée de l'argile peut colmater la colonne, par contre elle peut augmenter la vitesse de capillarité à de faibles concentrations.

Les mots clés : capillarité, colonnes, l'eau, les sols, l'argile, Excréments de chameaux.

Abstract

The study of the capillarity phenomenon in sandy soils is essential in agriculture, geotechnics, and water resource management. The objective of this work is to study the capillarity phenomenon in columns of sand and modified sand. The rate of water rise in columns submerged in water was monitored over time. The results obtained show that the rate of water rise is influenced by time and by the type of substrate. The material introduced in the form of a layer contributed to blocking the rise of water. Moreover, the addition of camel dung mixed with the sand slows down the capillarity rate. The introduction of a high quantity of clay can clog the column; however, it can increase the capillarity rate at low concentrations.

Key words: capillarity, columns, water, soils, clay, camel dung.

ملخص:

دراسة ظاهرة الشعرية في التربة الرملية ضرورية في الزراعة والجيوتقنية وإدارة الموارد المائية. الهدف من هذا العمل هو دراسة ظاهرة الشعرية في أعمدة من الرمل والرمل المعدل. تم متابعة سرعة ارتفاع الماء في الأعمدة المغمورة في الماء بمرور الوقت. أظهرت النتائج أن سرعة ارتفاع الماء تتأثر بالوقت ونوع الركيزة. المادة التي تم إدخالها على شكل طبقة ساهمت في منع ارتفاع الماء. علاوة على ذلك، فإن إضافة براز الجمل ممزوجة بالرمل تؤدي إلى تباطؤ سرعة الشعرية. يمكن أن تؤدي إضافة كمية كبيرة من الطين إلى انسداد العمود، ولكنها يمكن أن تزيد من سرعة الشعرية عند تركيزات منخفضة. الكلمات المفتاحية: ظاهرة الشعرية، الأعمدة، الماء، التربة، الطين، براز الجمل.

Liste d'abréviation

Liste d'abréviation:

EC: Excréments de chameaux.

Tableau de matière:

Résumé	V
Abstract	V
ملخص	V
Liste des abréviations	VI
Tableau de matière	VII
Liste des Figures	VIII
Liste des photos	XI
Liste des Tableaux	XIII
Introduction générale	02
Chapitre I : Concept de capillarite et ses applications	
I.1. INTRODUCTION:	05
I.2. CONCEPT DE LA CAPILLARITE:	05
I.2.1. Processus de montée de l'eau à travers les tubes capillaires:	05
I.2.2. Phénomène influencé par les forces intermoléculaires et la structure des matériaux:	06
I.3. FORCES CAPILLAIRES:	07
I.3.1. Forces d'attraction entre les molécules d'eau:	07
I.3.2. Effets sur l'ascension de l'eau dans des espaces restreints	07
I.4. PRINCIPES DE LA CAPILLARITE:	08
I.4.1. Interactions entre les molécules d'eau ou cohésion de l'eau :	08
I.4.2. Effets sur la formation de ménisques capillaires:	09
I.4.3. Tension superficielle:	09
I.5. CONSEQUENCES DE LA CAPILLARITE ET SES APPLICATIONS:	11
I.5.1. Conséquences:	11
I.5.2. Applications pratiques de la capillarité:	11
I.6. FACTEURS INFLUENÇANT LA CAPILLARITE:	13

Tableau de matière

I.6.1. Effets de la granulométrie sur la capillarité:	13
I.6.2. Relations entre la taille des particules et l'ascension capillaire:	14
I.6.3. La porosité du sol :	15
I.7. CONSEQUENCES DE LA CAPILLARITE:	17
I.7.1. Effets sur la rétention d'eau et la disponibilité en eau pour les plantes:	17
I.7.2. Impacts sur la perméabilité du sol et drainage:	17
I.7.3. Conséquences pour la stabilité du sol	18
I.8. CONCLUSION	19
Chapitre II : Capillarité et types de sol	
II.1. INTRODUCTION	21
II.2. SOL ET CAPILLARITE	21
II.2.1. Définition du sol	21
II.2.2. Composants du sol	21
II.2.3. Classification des sols	22
II.2.4. Propriétés physiques du sol	24
II.3 IMPORTANCE DE LA CAPILLARITE POUR LES PLANTES	26
II.4. MECANISMES DE LA CAPILLARITE EN DIFFERENTES SOLS	26
II.4.1. Sol argileux	26
II.4.2. Les granulats	28
II.4.3. Le sables	29
II.5. CONCLUSION	31
Chapitre III : Matériel et méthode	
I. 1. Introduction	33
I. 2. Matériaux et outils utilisés	33
I. 3. Protocole expérimentale	35
1.3.1. Première expérience	36

Tableau de matière

1.3.2. Deuxième expérience	38
Conclusion	41
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. Introduction	42
IV.2. Les propriétés physiques des matériaux utilisés	42
IV.3. Cinétique de capillarité	43
IV.3.1. Colonne de sable + EC	43
IV.3.2. Colonne de sable + argile	46
IV.3.3. Comparaisons	50
IV.3.4. Teneur en eau	53
IV.4. Conclusion	54
Conclusion générale	56
Liste des Références	58
Annexe	/

Liste des figures:

Numéro	Titre	Page
Figure.I.1	Schéma illustrant l'ascension capillaire (google)	05
Figure.I.2	Les forces de dispersion résultent de la formation de dipôles temporaires, comme illustré ici pour deux molécules diatomiques non polaires. (google)	08
Figure.I.3	Représentation schématique de la liaison hydrogène (google)	08
Figure.I.4	Discontinuité de pression ménisque liquide-air (Cours Mécanique des Fluides - Pr. H. Broch)	09
Figure.I.5	La tension superficielle (pdf La tension superficielle)	10
Figure.I.6	La porosité (google)	16
Figure.I.7	Remontées capillaires (google)	18
Figure.II.1	Constituants du sol	22
Figure II.2	Forces capillaires	25
Figure.II.3	Triangle de texture du sol	25
Figure IV.1	Courbe de l'analyse granulométrique du sable de dunes.	42
Figure IV.2	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	44
Figure IV.3	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	44
Figure IV.4	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	45
Figure IV.5	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	45
FigureIV.6	Variations de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	46
Figure IV.7	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	47
Figure IV.8	Variations de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	47
Figure IV.9	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	48
Figure IV.10	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	49
Figure IV.11	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	49

Liste des figures

Figure IV.12	Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.	50
Figure IV.13	Comparaison de l'élévation de l'eau dans les différentes colonnes en fonction du temps.	51
Figure IV.14	Comparaison de l'élévation de l'eau dans les trois colonnes en fonction du temps.	51
Figure IV.15	Comparaison de l'élévation de l'eau dans des colonnes contenant des couches d'EC et d'argile.	52
Figure IV.16	Comparaison de l'élévation de l'eau dans des colonnes contenant des pourcentages d'argile.	52

Liste des photos:

Numéro	Titre	Page
Photo II.1	Sol sableux	23
Photo II.2	Sol argileux	24
PhotoIII.2	Balance et série de tamis normalisés.	34
PhotoIII.3	Lavage et séchage du sable grossier.	35
Photo III.4	Lavage et séchage du sable de dune.	35
Photo III.5	Broyage des excréments de chameaux.	36
PhotoIII.6	Sable grossie, mélange sable + EC, sable sec.	36
PhotoIII.7	Suivi de la cinétique de capillarité dans les deux tubes (expérience du cas N° :01).	37
Photo III.8	Protocole expérimentale de l'expérience cas N° :03.	38
Photo III.9	Protocole expérimentale de l'expérience cas N° :05.	38
PhotoIII.10	Protocole expérimentale du deuxième expérience.	39
PhotoIII.11	Protocole expérimentale de cas N° : 06	40

Liste des tableaux:

Numéro	Titre	Page
Tableau II.1	La répartition concerne toutes les premières particules	23
Tableau III.1	Matériaux utilisés dans les expériences.	33
Tableau III.2	Propriétés de l'eau utilisé	33
Tableau IV.1	Résultats de la masse volumique apparente et absolue	43
Tableau IV.2	Porosité, teneur en eau et taux saturation.	43
Tableau IV.3	Teneur en eau des échantillons de sable(100%)et Mélange(5 % argile)	53

Introduction générale

Introduction générale:

L'étude de la capillarité dans les sols revêt une grande importance pour la compréhension des processus hydrologiques souterrains et leurs implications sur divers domaines tels que l'agriculture, la géotechnique et la gestion des ressources hydriques. La capillarité, phénomène par lequel l'eau se déplace à travers les pores du sol en raison des forces de cohésion et d'adhésion, joue un rôle crucial dans le maintien de l'humidité du sol, la distribution des nutriments et la stabilité des structures bâties.

La capillarité influence directement le mouvement de l'eau dans les sols, affectant ainsi la recharge des nappes phréatiques et le transport des contaminants des eaux. L'étude approfondie de ces phénomènes est essentielle pour comprendre les mécanismes et les facteurs qui affectent les processus mis en jeu dans les différents types de sols.

Dans le domaine d'agriculture, la capillarité influe sur l'humidité et la salinité des sols, et par conséquent sur la productivité des sols. En géotechnique, elle détermine la capacité portante des sols et la stabilité des fondations et des infrastructures. Ainsi, l'étude de la capillarité est indispensable pour optimiser les pratiques agricoles et assurer la durabilité des constructions.

Les sols sableux, avec leurs pores plus larges et leur faible capacité de rétention d'eau, présentent des dynamiques capillaires distinctes par rapport aux autres types de sols. Ces sols sont largement présents dans de nombreuses régions (cas de la région d'El oued), influençant la dynamique hydrologique locale et régionale. Une compréhension détaillée des interactions eau-sol dans ces sols peut améliorer la gestion des ressources en eau et prévenir des problèmes tels que l'érosion, la désertification, et la gestion des ressources hydriques.

Malgré l'importance reconnue de la capillarité, des lacunes subsistent dans la compréhension des mécanismes spécifiques aux sols sableux, notamment dans des conditions variables de saturation et de salinité. Il est crucial de combler ces lacunes pour optimiser les pratiques de gestion des sols et de l'eau surtout dans les zones sahariennes. Pour cela, une étude approfondie de la capillarité dans des sols sableux est nécessaire pour développer des modèles prédictifs et des solutions pratiques adaptées aux conditions réelles rencontrées dans l'agriculture, la construction et la gestion des ressources en eau.

D'autre part, les défis posés par le changement climatique et la croissance démographique nécessite une gestion efficace et durable de l'eau et de l'énergie surtout dans les zones arides.

Ce travail vise à étudier le phénomène de capillarité dans le sable de dunes en utilisant des colonnes transparentes émergées dans l'eau. Le suivi de la vitesse de remontée de l'eau dans ces colonnes permettra de mieux comprendre les paramètres qui affectent ce processus. Le sable de dunes sera dopé par d'autres matériaux tels que des biomatériaux et des argiles pour examiner l'effet du type de sol sur les interactions eau-sol dans le système étudié.

Ce mémoire est devisé en deux parties comme suit : la première partie sera consacrée à la revue bibliographique. Regroupée en deux chapitres. La seconde partie est dédiée aux essais expérimentaux et la discussion des résultats obtenus, elle sera présentée également en deux chapitres.

Chapitre 1 :
CONCEPT DE
CAPILLARITE ET SES
APPLICATIONS

I.1. INTRODUCTION:

Au fil des siècles, la capacité de l'eau à monter dans les tubes capillaires, phénomène connu sous le nom de capillarité, a été utilisée dans de nombreuses applications importantes. Comprendre le processus d'ascension de l'eau à travers les tubes fins est essentiel dans les domaines de la physique, de l'ingénierie et de nombreuses applications pratiques. Ce processus est influencé par une gamme complexe de facteurs, notamment les forces intermoléculaires et la structure moléculaire des matériaux utilisés.

Ce chapitre vise à explorer le processus d'ascension de l'eau dans les tubes capillaires, ainsi que les différents effets qui y influent, depuis les forces moléculaires microscopiques jusqu'à ses applications pratiques en irrigation et en stabilisation du sol.

I.2. CONCEPT DE LA CAPILLARITE:

En hydrologie, la capillarité est le phénomène qui peut permettre à l'eau de vaincre les forces de pesanteur et de se déplacer du bas vers le haut, par exemple dans un sol ou dans une mèche. Ce phénomène est en particulier utilisé pour réalimenter en eau des substrats végétalisés à partir d'un réservoir placé sous le substrat, ceci sans utiliser d'énergie externe.

L'action capillaire ou la capillarité est la propriété physique que les fluides doivent monter ou descendre dans des tubes extrêmement minces. Cette action peut faire couler des liquides même contre la force de gravité ou l'induction d'un champ magnétique. La capillarité désigne aussi ce qui est ténu comme un cheveu, comme un capillaire.

I.2.1. Processus de montée de l'eau à travers les tubes capillaires:

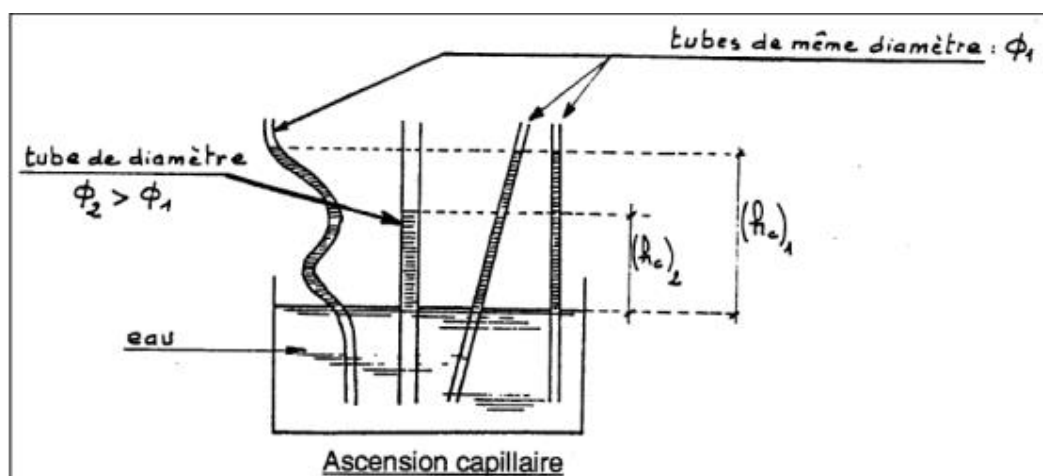


Figure.I.1: Schéma illustrant l'ascension capillaire (google)

L'action capillaire se produit en raison des forces attractives entre les molécules d'un liquide et d'un solide. Cette combinaison de forces adhésives entre le liquide et le solide, ainsi que la tension superficielle du liquide causée par les forces cohésives au sein de celui-ci, fait monter le liquide dans les espaces étroits comme les tubes capillaires.

La hauteur à laquelle le liquide monte, connue sous le nom de montée capillaire, dépend de facteurs tels que la tension superficielle du liquide, l'angle de contact entre le liquide et le solide, le périmètre de mouillage disponible, la densité du liquide et la gravité.

Un exemple d'action capillaire est observé chez les plantes, où l'eau est aspirée des racines pour remplacer l'eau perdue par évaporation des feuilles. Un autre exemple est la capacité des serviettes en papier sèches à absorber les liquides en les attirant dans les espaces étroits entre leurs fibres. (SZU-YIN C, 2015)

I.2.2. Phénomène influencé par les forces intermoléculaires et la structure des matériaux:

Le phénomène influencé par les forces intermoléculaires et la structure des matériaux concerne les propriétés uniques des liquides telles que la tension superficielle, l'action capillaire et la viscosité. Ces propriétés dépendent de la nature des interactions intermoléculaires . (Chapter 14,2020)

Les forces intermoléculaires jouent un rôle important dans divers phénomènes et propriétés des matériaux. Ces forces sont responsables du maintien des molécules ensemble, influençant leur structure, leur stabilité et leur réactivité. Un phénomène clé influencé par les forces intermoléculaires est la tension superficielle, qui est une propriété unique des liquides qui résulte des forces de cohésion entre les molécules liquides à la surface, créant une couche « semblable à une peau ».

Un autre phénomène influencé par les forces intermoléculaires est la viscosité, qui est une mesure de la résistance d'un liquide à l'écoulement et est déterminée par la force des interactions intermoléculaires. De plus, l'action capillaire est un autre phénomène influencé par les forces intermoléculaires, dans lequel les liquides se déplacent contre la gravité dans des espaces étroits en raison des forces d'adhésion et de cohésion entre le liquide et la surface.

De plus, la structure des matériaux est fortement influencée par les forces intermoléculaires. Par exemple, le Pikbonding, un type de force intermoléculaire, joue un rôle essentiel dans les systèmes biologiques en influençant la reconnaissance moléculaire, le repliement des protéines, la stabilisation de la structure de l'ADN et les réactions enzymatiques. Dans les matériaux comme les polymères, les interactions Pikbonding entre les chaînes polymères contribuent à leur résistance, leur élasticité et leur stabilité thermique. De plus, dans les structures cristallines, le Pikbonding détermine la disposition et l'emballage des molécules, affectant des propriétés telles que le point de fusion et la solubilité.

Ces exemples mettent en évidence comment les forces intermoléculaires influencent des phénomènes tels que la tension superficielle, la viscosité et l'action capillaire dans les

liquides, tout en façonnant la structure et les propriétés des matériaux grâce à des interactions telles que le Pikkbonding. **(Forces Intermoléculaires,2024) (Ashenhurst J,2022)**

I.3. FORCES CAPILLAIRES:

I.3.1. Forces d'attraction entre les molécules d'eau:

Les forces d'attraction entre les molécules d'eau sont appelées forces intermoléculaires. Ces forces comprennent la cohésion, l'adhésion, la liaison hydrogène, les attractions dipôle-dipôle et les forces de dispersion de Londres. La cohésion fait référence à l'attraction des molécules d'eau les unes vers les autres, tandis que l'adhésion est l'attraction des molécules d'eau vers d'autres substances. La liaison hydrogène est un type fort d'interaction dipôle-dipôle spécifique à l'eau en raison de ses liaisons polaires. De plus, les forces dipolaires induites par les dipôles et les forces de dispersion de Londres sont présentes dans les molécules d'eau. Ces diverses forces intermoléculaires jouent un rôle crucial dans les propriétés uniques de l'eau, telles que la tension superficielle, l'action capillaire et l'adhésion à d'autres substances. **(Hill J et al. 2013)**

I.3.2. Effets sur l'ascension de l'eau dans des espaces restreints

Lorsque l'eau est confinée dans de petits espaces, tels que des pores de taille nanométrique, elle présente des comportements uniques en raison de l'effet de confinement à l'échelle nanométrique. La recherche indique que l'eau confinée dans les pores fond à des températures plus basses, entraînant des modifications de ses propriétés physico-chimiques telles que le point de fusion/congélation, la densité et la tension superficielle. Le réseau de liaisons hydrogène de l'eau est considérablement influencé par le confinement, ce qui entraîne des modifications des modes d'étirement O-H et une augmentation de la population de molécules d'eau en réseau dans l'espace confiné. Ces écarts dans les propriétés de l'eau sous confinement à l'échelle nanométrique ont des implications dans divers domaines tels que les sciences géochimiques et biologiques, la catalyse, la science de la séparation membranaire et la nano-fluidique. Comprendre ces effets est crucial pour les applications dans différents domaines scientifiques et techniques, soulignant l'importance de comprendre comment l'eau se comporte dans des espaces confinés à l'échelle nanométrique. **(Andrew W et al, 2019)**

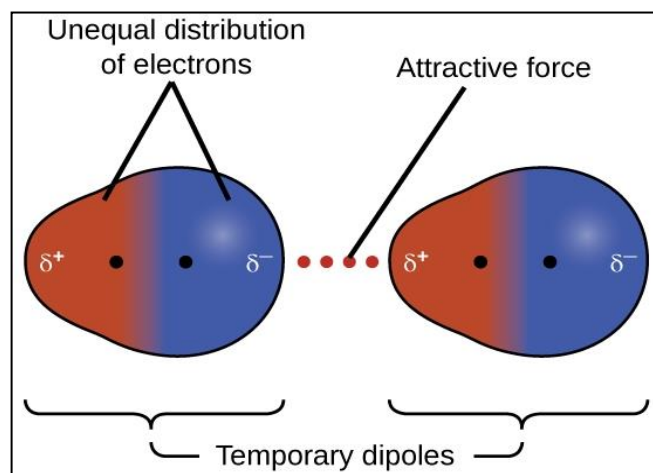


Figure.I.2: Les forces de dispersion résultent de la formation de dipôles temporaires, comme illustré ici pour deux molécules diatomiques non polaires. (google)

I.4. PRINCIPES DE LA CAPILLARITE:

I.4.1. Interactions entre les molécules d'eau ou cohésion de l'eau :

Les interactions entre les molécules d'eau sont essentiellement basées sur les liaisons hydrogène. Ces liaisons sont des liaisons intermoléculaires très intenses qui se forment entre les molécules d'eau en raison de la polarité de la molécule. Les molécules d'eau, étant polaires, peuvent créer des liaisons dipôle-dipôle fortes, notamment des liaisons hydrogène, qui sont les liaisons intermoléculaires les plus intenses. Ces liaisons hydrogène se forment entre un atome d'hydrogène chargé positivement d'une molécule d'eau et un atome d'oxygène, d'azote ou de fluor chargé négativement d'une autre molécule d'eau. Cela crée un réseau de liaisons hydrogène qui contribue à maintenir la cohésion entre les molécules d'eau, favorisant ainsi des propriétés physiques et chimiques spécifiques à l'eau . (Loretta J , Peter W ,1998).

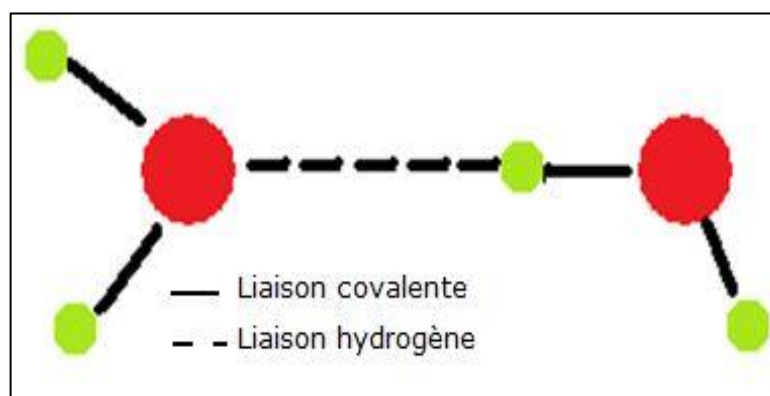


Figure.I.3 :Représentation schématique de la liaison hydrogène

(<http://doc.lerm.fr/molecule-deau/>)

I.4.2. Effets sur la formation de ménisques capillaires:

La formation des ménisques capillaires est influencée par divers facteurs liés à l'interaction entre le liquide, la surface solide et les conditions environnantes. Le ménisque forme un angle, appelé angle de contact, avec la paroi interne d'un tube capillaire. Cet angle est déterminé par la capacité du liquide à mouiller la surface interne du tube (**Ulf H et Jan C ,2004**). La forme du ménisque, qu'il soit concave ou convexe, et son comportement à la congélation sont des aspects cruciaux affectant l'action capillaire.

Lorsque le gel se produit, le ménisque capillaire disparaît et l'eau entre en contact direct avec les lentilles de glace gelées, modifiant ainsi la dynamique de remontée capillaire (**JUMIKIS A R ,1957**). De plus, l'approche thermodynamique de la remontée capillaire met en évidence l'importance d'établir un équilibre physico-chimique dans toute la colonne liquide, ce qui se traduit par un ménisque incurvé avec une courbure croissante du centre du tube vers la paroi (**Ulf H et Jan C ,2004**). La compétition entre les énergies de surface des différentes phases fluides et la phase solide joue un rôle important dans la détermination de la profondeur et de la forme du ménisque capillaire (**Eslami F et Elliott J AW . 2019**). Ces études mettent en lumière l'interaction complexe des forces et des phénomènes impliqués dans l'action capillaire et la formation des ménisques.

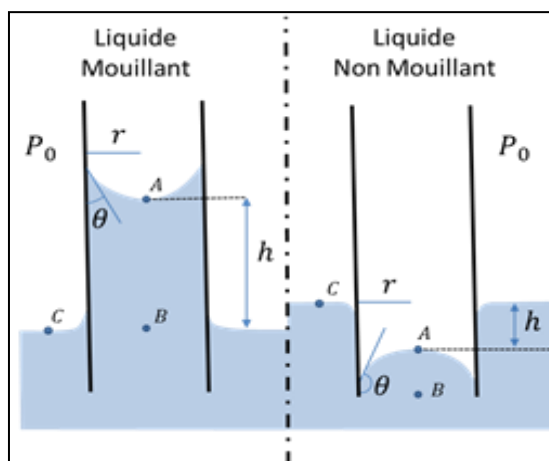


Figure.I.4: Discontinuité de pression ménisque liquide-air (Cours Mécanique des Fluides
- Pr. H. Broch)

I.4.3. Tension superficielle:

La tension superficielle est la force agissant verticalement sur une unité de longueur le long de la surface du liquide, qui est responsable de la tension superficielle du liquide. Cette force est appelée force de flottabilité et a été découverte par l'ancien scientifique grec Archimède, qui a formulé le principe de flottabilité, selon lequel « lorsqu'un corps est partiellement ou complètement immergé dans un liquide, il perd un poids égal au poids du

liquide déplacé par celui-ci". La force de flottabilité est également liée à la pression du liquide, comme l'énonce le principe du scientifique français Blaise Pascal, qui stipule que « si une pression externe est appliquée à une partie quelconque d'un liquide confiné, cette pression est transmise de manière égale à toutes les parties du liquide ». (**Phénomènes de surfaces** ,2017)

La tension superficielle est également liée aux forces de cohésion et d'adhésion entre les molécules du liquide et le récipient. La force de cohésion est la force d'attraction entre les molécules d'un même liquide, tandis que la force d'adhésion est la force d'attraction entre les molécules du liquide et le récipient. La tension superficielle est le résultat de la compétition entre ces deux forces, car la force de cohésion tend à minimiser la surface du liquide, tandis que la force d'adhésion tend à l'augmenter . (AL-Zubun I,2017)

La tension superficielle peut être mesurée par diverses méthodes, telles que la méthode de remontée capillaire, la méthode de l'anneau du Nouy et la méthode du stalagmomètre (**Unité 2, 2011**) . Ces méthodes sont basées sur le fait que la tension superficielle affecte la forme et le mouvement des liquides, notamment lorsqu'ils sont en contact avec des solides ou d'autres liquides. Par exemple, la tension superficielle est responsable de la capacité de certains insectes à marcher sur l'eau, de la formation de gouttelettes d'eau sur les surfaces et de la capacité de certains objets à flotter sur des liquides. (AL-Zubun I,2017)

En conclusion, la tension superficielle est une propriété physique importante des liquides qui a de nombreuses applications dans divers domaines, tels que la chimie, la physique, l'ingénierie et la biologie. Comprendre la tension superficielle peut aider à expliquer et à prédire le comportement des liquides dans différentes situations et conditions.

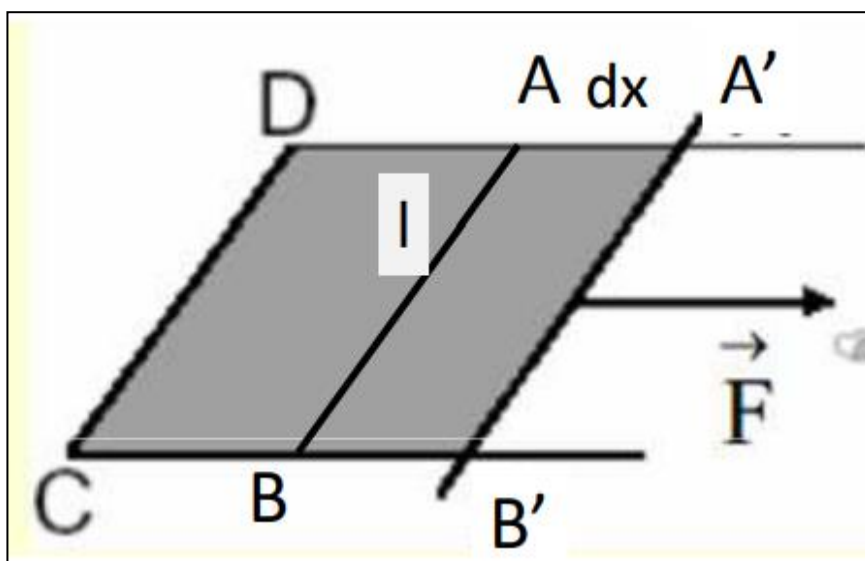


Figure.I.5: La tension superficielle (pdf La tension superficielle)

I.5. CONSEQUENCES DE LA CAPILLARITE ET SES APPLICATIONS:

I.5.1. Conséquences:

La capillarité est une manifestation de la cohésion de la matière due à des forces fortes et à courte portée entre particules adjacentes (**Yves P et Emmanuel V,2006**). Il est responsable de la forme sphérique des gouttes isolées et du ménisque courbé des tubes à essai, ainsi que de l'absorption des liquides par une éponge. La capillarité a présenté de nombreux défis à la compréhension quantitative et ses conséquences peuvent être importantes.

Dans le contexte des matériaux à l'échelle nanométrique, la capillarité peut avoir un impact significatif sur la résistance. La relaxation élastique induite par la surface peut entraîner une réduction de l'énergie des régions de la surface, ce qui affecte à son tour la résistance du matériau (**Nadiia M et al,2017**). La contrainte de surface peut varier linéairement à proximité d'un point critique, entraînant des modifications dans les propriétés du matériau.

Dans la construction, la capillarité peut entraîner des remontées d'humidité, qui se produisent lorsque l'humidité et l'eau présentes dans le sol d'une maison sont absorbées par les structures et atteignent des hauteurs allant jusqu'à 1,5 mètre. Cela peut entraîner une faiblesse des murs et des fondations de la maison, ainsi que des problèmes respiratoires et d'autres affections. La capillarité peut être évitée pendant la construction en utilisant une feuille d'étanchéité ou en drainant le sol avant la construction. Cependant, si le bâtiment a déjà été construit, des feuilles imperméables, l'injection de résines ou l'électroosmose peuvent être utilisées pour éliminer le problème . (**Humidité capillaire ,2024**)

Dans le contexte de la mécanique des fluides, la capillarité peut affecter la pression et la forme des liquides. Par exemple, un ménisque se produit lorsque la surface d'un liquide touche une paroi solide, provoquant la remontée du liquide dans le tube en raison de la tension superficielle. La hauteur de la colonne d'eau peut être déterminée en additionnant toutes les forces agissant sur la colonne d'eau sous la forme d'un diagramme de corps libre. La tension superficielle est également importante à l'interface entre un liquide, un gaz et un solide et peut affecter la pression et le point d'ébullition d'un liquide (**AL – Saadi A K ,2024**).

I.5.2. Applications pratiques de la capillarité:

L'industrie ne manque pas d'exemples de capillarités :

- a. **Remplisseur** : Un exemple d'application est le stylo ou le stylo ou son stylo. Il a généralement une demi-longueur, un petit trou rond dans lequel l'encre s'accumule pour être transportée de là par l'action capillaire à travers une fente très fine vers le haut.

- b. **Papier** : Il n'est pas possible d'écrire sur une surface non mouillante avec de l'encre liquide. Par conséquent, écrire avec une charge sur verre n'est guère possible car l'encre ne mouille pas la surface du verre et n'adhère donc pas à celle-ci. Les médias mouillants, tels que le papier, peuvent adhérer à l'encre. Le papier absorbe également l'encre par capillarité, il est même possible d'écrire en tête.
- c. **Chimie** : Dans la chromatographie sur papier, l'effet capillaire est utilisé en déposant une solution sur un papier spécial et en la soulevant, ce qui permet de transporter les composants de la solution. En raison de la distance de course différente, les tissus peuvent être séparés.
- d. **Médecine** : Pour prélever de petites quantités de sang, on peut faire une petite piqûre dans les vaisseaux des doigts ou sur le lobe de l'oreille et maintenir un mince tube collecteur vers le sang sortant, dans lequel le sang monte en raison de l'effet capillaire.
- e. **Textiles** : Un effet d'aspiration similaire à celui du papier peut également être observé avec des chiffons de nettoyage ou des tissus. La même chose s'applique aux éponges. Le papier, les chiffons et les éponges sont les suivants : Plus la surface intérieure (par volume) est grande, plus l'effet d'aspiration est important.
- f. **Soudure** : L'effet intervient également pendant le soudage : La brasure liquide traverse l'action capillaire, par exemple dans l'interstice des raccords de tuyauterie en cuivre. Pour le dessoudage des composants électroniques des cartes de circuits imprimés, un treillis métallique est souvent utilisé. La qualité du résultat du brasage est immédiatement reconnaissable à la forme du cône à souder. Si ce n'est pas concave et plat sur la carte, il s'agit probablement d'un joint de soudure à froid. En raison de la capillarité, la soudure est possible "en tête".
- g. **Construction** : Dans la construction, la capillarité joue un rôle important. La plupart des efforts d'étanchéité structurels sont dirigés contre l'humidité ascendante en raison de l'effet capillaire dans la dalle de plancher et les murs. D'autre part, au-dessus des composants en contact avec la terre, la capillarité aide à éviter les accumulations critiques d'humidité, qui conduisent à des dommages au bâtiment et à la croissance des moisissures. En hiver, le point de rosée de l'air intérieur est généralement inférieur aux points froids de la paroi extérieure, de sorte qu'il se forme du condensat qui s'évapore lors de la ventilation et est rejeté dans l'air extérieur. S'il y a trop de condensat ou si l'air s'échappe trop peu, l'humidité de la paroi s'accumule. Les murs et les plafonds faits entièrement de matériaux de construction capillaires sont capables d'absorber des quantités importantes d'humidité

et de les transférer vers l'extérieur du mur ou vers des pièces moins humides où il s'évapore.

Les briques traditionnelles, le béton cellulaire et les briques silico-calcaires sont très absorbantes par un effet de capillarité mais est beaucoup plus faible dans les briques durcies et le béton. Afin d'interrompre la capillarité dans les bâtiments, des couches de séparation imperméables à l'eau tels des dérivés de bitume sont installées.

En résumé, la capillarité a des conséquences importantes sur un large éventail de phénomènes, depuis la résistance des matériaux nanométriques jusqu'à la pression et la forme des liquides en mécanique des fluides. Comprendre la capillarité est essentiel pour comprendre et prédire ces phénomènes.

I.6. FACTEURS INFLUENÇANT LA CAPILLARITE:

I.6.1. Effets de la granulométrie sur la capillarité:

Les effets de la granulométrie sur la capillarité sont significatifs, notamment dans le cadre de la cohésion et du comportement mécanique des matériaux granulaires. La présence d'eau à l'échelle des grains a de multiples effets, dont l'impact de la capillarité dans les milieux granulaires. L'étude du pont capillaire, qui est le pont liquide formé entre deux grains, est cruciale pour comprendre le comportement des matériaux granulaires. Le pont capillaire est étudié dans une configuration quasi-statique, les effets de viscosité étant négligés en raison des faibles vitesses et viscosité du liquide. **(Fabien S, 2005)**

La force exercée par le pont capillaire entre deux grains peut être calculée à l'aide de la formule $F_{\text{capillaire}} = 2 \pi R \sigma$, où σ est la tension superficielle du liquide (pour l'eau, $\sigma = 73.10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$).

La force exercée par le pont capillaire est comparée à d'autres forces, telles que les forces de Van der Waals, les forces électrostatiques et les ciments, qui sont toutes importantes dans le comportement des matériaux granulaires. **(Fabien S, 2005)**

L'effet de la taille des grains sur la capillarité est particulièrement important pour les particules plus grosses, telles que celles dont le diamètre est supérieur à 0,1 mm, qui sont courantes dans les milieux granulaires. L'étude de la cohésion par capillarité est particulièrement pertinente dans ce contexte, car il s'agit d'un mécanisme qui dépend uniquement de la présence de fluides (en l'occurrence l'eau et l'air) au sein du milieu granulaire **(Fabien S, 2005)**.

Le comportement des matériaux granulaires dépend fortement de la quantité d'eau présente dans l'espace interstitiel. Dans le cas de matériaux granulaires à faible teneur en eau, la phase liquide est discontinue et localisée sous forme de ponts liquides entre les grains,

généralisant des forces de cohésion de nature capillaire entre les grains. Ces petites quantités d'eau sont suffisantes pour assurer la tenue mécanique des structures éphémères comme les châteaux de sable. **(Fabien S, 2006)**

En résumé, les effets de la taille des grains sur la capillarité sont significatifs dans le cadre de la cohésion et du comportement mécanique des matériaux granulaires. La présence d'eau à l'échelle des grains a de multiples effets, dont l'impact de la capillarité dans les milieux granulaires. L'étude du pont capillaire, qui est le pont liquide formé entre deux grains, est cruciale pour comprendre le comportement des matériaux granulaires. La force exercée par le pont capillaire est comparée à d'autres forces, telles que les forces de Van der Waals, les forces électrostatiques et les ciments, qui sont toutes importantes dans le comportement des matériaux granulaires. L'effet de la taille des grains sur la capillarité est particulièrement important pour les particules plus grosses, telles que celles dont le diamètre est supérieur à 0,1 mm, qui sont courantes dans les milieux granulaires. L'étude de la cohésion par capillarité est particulièrement pertinente dans ce contexte, car il s'agit d'un mécanisme qui dépend uniquement de la présence de fluides (en l'occurrence l'eau et l'air) au sein du milieu granulaire.

I.6.2. Relations entre la taille des particules et l'ascension capillaire:

La relation entre la taille des particules et la remontée capillaire est une considération importante dans divers domaines, tels que la mécanique des sols, l'ingénierie géotechnique et la science des matériaux. La remontée capillaire fait référence à la capacité de l'eau à s'élever contre la gravité dans des espaces étroits, tels que les pores entre les particules du sol ou les vides d'un matériau poreux. La hauteur de remontée capillaire est influencée par plusieurs facteurs, notamment la taille des particules, la distribution de la taille des pores et la tension superficielle de l'eau.

Dans le contexte de la mécanique des sols, la hauteur maximale de remontée capillaire est un paramètre critique qui affecte la stabilité et les performances des fondations, talus et autres ouvrages géotechniques. Les sols à grains fins, comme les argiles et les limons, ont généralement un potentiel de remontée capillaire plus élevé que les sols à grains grossiers, comme les sables et les graviers. En effet, les sols à grains fins ont des pores plus petits et une surface spécifique plus élevée, ce qui renforce les forces capillaires et permet à l'eau de monter à de plus grandes hauteurs.

La relation entre la taille des particules et la remontée capillaire est souvent décrite par des équations empiriques qui relient la hauteur de la remontée capillaire à la taille effective des grains, à l'indice de vide et à la distribution de la taille des pores. Par exemple, l'équation

de Terzaghi, basée sur des essais en tube ouvert sur des sols sans cohésion, suggère que la hauteur maximale de remontée capillaire est une fonction linéaire du logarithme naturel de la taille effective des grains, D_{10} . Cette équation indique que la hauteur maximale de montée capillaire augmente avec la diminution de la taille effective des grains, comme le montre l'équation. (1) dans les résultats de recherche .(**Qiang L et al,2014**)

De même, Peck et al. proposé une relation empirique qui relie la hauteur de remontée capillaire au produit de l'indice de vide, e , et de la taille effective des grains, D_{10} , comme le montre l'équation. (2) dans les résultats de recherche(**Qiang L et al,2014**). Cette équation suggère que la hauteur maximale de remontée capillaire est plus élevée pour les sols plus denses et pour les sols à grains plus fins.

En plus de ces équations empiriques, les techniques modernes d'analyse granulométrique, telles que la diffractométrie laser, peuvent fournir des informations détaillées sur la distribution de la taille des pores et la distribution différentielle des éléments granulométriques, qui peuvent être utilisées pour prédire le comportement de remontée capillaire d'un sol ou d'un sol donné. matériel. Par exemple, les résultats de la recherche (**Smagin A V et Sadovnikova N B ,2021**) décrire un modèle qui prédit la hauteur de remontée capillaire dans des milieux poreux polydispersés sur la base de la distribution granulométrique discrète et du diamètre effectif des particules. Ce modèle peut être utilisé pour prédire le comportement de remontée capillaire de sols réels présentant des distributions complexes de tailles de particules et de tailles de pores.

En conclusion, la relation entre la taille des particules et la remontée capillaire est un sujet complexe et multiforme qui implique divers facteurs, tels que la distribution de la taille des pores, la tension superficielle de l'eau et les relations empiriques entre la taille des particules et le potentiel de remontée capillaire. Comprendre cette relation est crucial pour la conception et l'analyse de structures géotechniques, telles que les fondations, les talus et les remblais, ainsi que pour le développement de matériaux poreux dotés de propriétés capillaires spécifiques.

I.6.3. La porosité du sol :

a. Définition de la porosité

La porosité des granulats, exprimée en pourcentage, correspond au rapport entre le volume des vides contenus dans les grains et le volume total des grains. En règle générale, la porosité des granulats ordinaires est très faible, mais elle peut être significative dans le cas des granulats légers. La norme (NF P 18 554 et 18 555) spécifie la méthode de mesure de la porosité. (**REMADNIA A ,1986**)

$$P\% = \left(1 - \frac{P_{app}}{P_{abs}}\right) * 100 \dots\dots\dots (1.1)$$

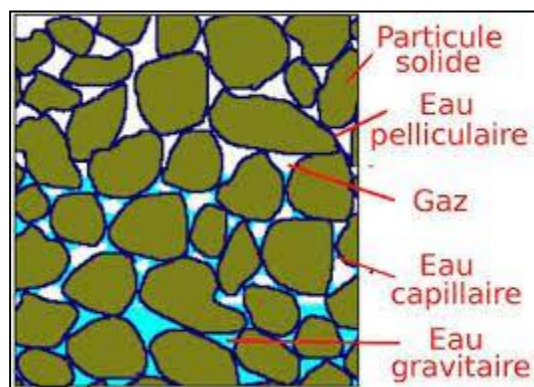


Figure.I.6: La porosité (google)

b. Influence de la porosité sur la capillarité:

Sur la base des résultats de la recherche, les principales conclusions concernant l'influence de la porosité sur la capillarité sont :

La porosité a un effet significatif sur la montée capillaire et la pression capillaire dans les matériaux poreux comme les échafaudages d'hydroxyapatite et les films mésoporeux :

- Pour les échafaudages d'hydroxyapatite, une porosité plus élevée (50 % contre 60 %) a entraîné des hauteurs de montée capillaire d'équilibre et des pressions capillaires plus faibles. **(SZU-YIN C ,2015)** Les échantillons avec des pores de plus petite taille (5 μm contre 12 μm , 20 μm , 50 μm) présentaient une élévation et une pression capillaires plus élevées, quelle que soit la porosité. **(SZU-YIN C ,2015)**
- Dans les films mésoporeux, ceux ayant des pores de plus grande taille (4,6 nm-27,5 nm) avaient des vitesses de remplissage capillaire plus lentes, malgré une taille de constriction des pores similaire (2 nm-4,8 nm). **(Ceratti D R et al , 2015)** Cela a été attribué à des effets accrus d'évaporation/condensation dans les pores plus grands.
- La modélisation informatique de la dynamique des fluides a montré que la hauteur de montée capillaire diminuait avec l'augmentation de la porosité (50 à 80 %) pour les modèles de pores carrés et circulaires, le motif carré ayant la montée capillaire la plus élevée. **(Ab Aziz bin Mohd Yusof et al, 2022)**
- Des études expérimentales sur des colonnes de sable ont montré que la remontée capillaire diminuait avec l'augmentation de la taille des grains (et donc de la taille des pores), en raison des effets de la taille de l'ouverture et de la morphologie de la phase. **(Min L et al,2020)**

En résumé, une porosité plus élevée entraîne généralement une ascension capillaire et une pression capillaire plus faibles dans les matériaux poreux, tandis que des pores plus petits

ont tendance à améliorer la capillarité, quelle que soit la porosité globale. L'interaction complexe entre la taille des pores, la structure des pores et les effets d'évaporation/condensation peut influencer le comportement capillaire de manière inattendue. **(Ceratti D R et al , 2015)**

I.7. CONSEQUENCES DE LA CAPILLARITE:

I.7.1. Effets sur la rétention d'eau et la disponibilité en eau pour les plantes:

La capillarité joue un rôle crucial dans la disponibilité en eau pour les plantes. Elle est responsable du mouvement de l'eau à travers les sols, permettant aux racines des plantes d'accéder à l'eau nécessaire à leur croissance. La capillarité est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, mesurée par la loi de Darcy. Les sols sableux ont une perméabilité plus élevée que les sols limoneux, ce qui influence la disponibilité en eau pour les plantes. L'eau retenue par capillarité dans le sol est essentielle pour les plantes, car elle peut être utilisée par les racines même en l'absence de pluie. Ainsi, la capillarité contribue à maintenir une réserve d'eau accessible aux plantes, favorisant leur croissance et leur développement. **(Chikh H A , 2013) (Jacques B ,2006)**

I.7.2. Impacts sur la perméabilité du sol et drainage:

La relation entre capillarité et drainage est cruciale pour comprendre le mouvement des fluides dans divers systèmes. La capillarité, influencée par des facteurs tels que la taille des pores et la mouillabilité, détermine la hauteur et la vitesse de montée des fluides dans les milieux poreux comme le sol ou les roches. En revanche, le drainage fait référence au mouvement des fluides à travers un milieu poreux. La capillarité d'un système affecte ses caractéristiques de drainage, les forces capillaires influençant la façon dont les fluides se déplacent dans le milieu. Plus les espaces entre les particules sont petits, plus l'eau monte en raison de la capillarité, ce qui a un impact sur les taux de drainage. Comprendre la capillarité est essentiel pour prédire le comportement des fluides dans les systèmes géologiques et environnementaux, influençant des facteurs tels que la saturation et la perméabilité. **(Physical properties ,2024) (Germann P ,2020) (Al-Menhali A et al , 2015)**

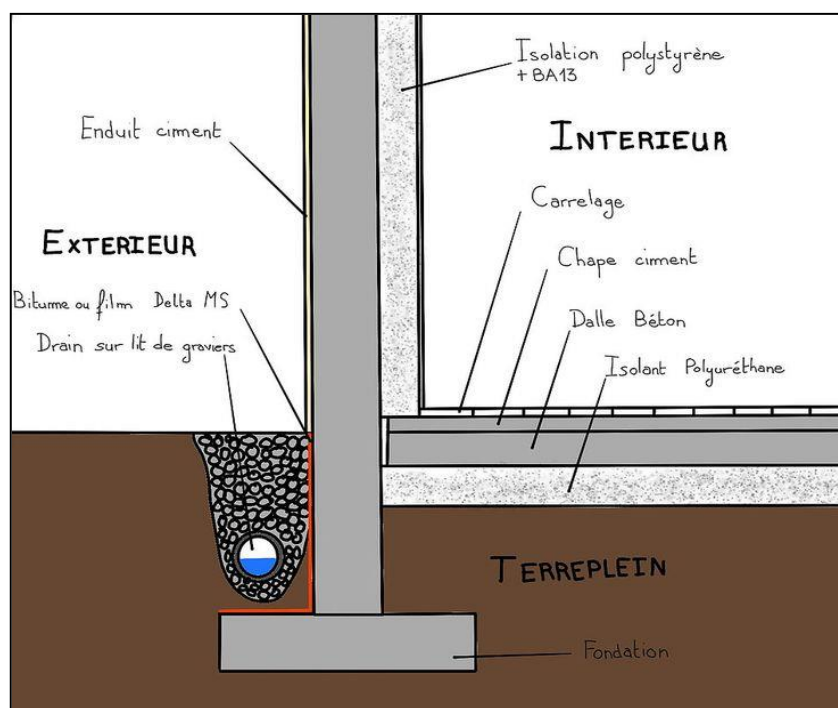


Figure.I.7: Remontées capillaires (google)

I.7.3. Conséquences pour la stabilité du sol:

La stabilité structurale des sols a des conséquences importantes sur leurs propriétés physiques et leur productivité :

- Le taux d'humidité pour un pF (potentiel de l'eau) donné tend à diminuer lorsque la stabilité structurale augmente. **(COMBEAU A et MONNIER C)**
- La stabilité structurale est liée à la porosité utile et à l'eau utilisable par les plantes. Des indices de structure permettent d'évaluer la qualité structurale relative de différents sols. **(COMBEAU A et MONNIER C)**
- Il existe des relations entre les indices de structure et la productivité des sols en culture irriguée. **(COMBEAU A et MONNIER C)**
- La stabilité structurale influe sur la résistance au colmatage et à l'érosion des sols. **(Gérard M et al Jean B ,2024)**
- La diminution de la stabilité structurale avec la mise en culture entraîne une baisse importante des teneurs en matière organique des horizons de surface. **(Ernest K , 1998)**
- La stabilité des agrégats du sol est un paramètre clé qui détermine la résistance à l'érosion, la compaction, la circulation de l'eau et de l'air dans le sol. **(Ernest K , 1998)**
- En résumé, la stabilité structurale des sols a des conséquences majeures sur leurs propriétés physiques, leur fertilité et leur productivité agricole. **(COMBEAU A et MONNIER C)** **(Gérard M et al Jean B ,2024)** **(Ernest K , 1998)**

I.8. CONCLUSION:

En conclusion, il apparaît que le processus d'ascension de l'eau dans les tubes capillaires présente une interaction complexe entre les forces intermoléculaires et les propriétés physiques des matériaux utilisés. Comprendre ce phénomène revêt une grande importance dans plusieurs domaines, notamment l'agriculture, l'ingénierie et les sciences des matériaux. En exploitant cette compréhension, nous pouvons développer des applications plus efficaces de la capacité de l'eau à monter dans les tubes capillaires dans une variété de contextes pratiques, tels que l'irrigation et l'amélioration de la stabilité du sol, contribuant ainsi au développement de solutions durables et efficaces pour les défis environnementaux et agricoles auxquels nous sommes confrontés.

Chapitre 2 :
Capillarité et types
de sol

II.1. INTRODUCTION:

Le sol montre son importance significative à travers la diversité de ses rôles vitaux. Il constitue un environnement idéal pour la croissance des plantes et des cultures agricoles, offrant de l'eau, des sels minéraux et des matières organiques nécessaires à leur développement. De plus, le sol agit comme un réservoir d'eau, fournit un habitat à de nombreux organismes vivants et sert de base pour la construction d'infrastructures et d'édifices. (Hlais Y. 2007)

Grace à la capillarité du sol, l'eau à transporter à travers les pores par des forces capillaires. Ce phénomène est crucial pour la disponibilité de l'eau aux plantes, surtout dans les zones arides où l'irrigation est essentielle. Dans ce chapitre, on va donner un aperçu détaillée de la relation entre le sol et la capillarité, accompagnée par des illustrations.

II.2. SOL ET CAPILLARITE:

II.2.1. Définition du sol :

Le sol est la couche superficielle de la terre qui s'est formée à la suite de processus mécaniques et de réactions chimiques et biologiques au fil du temps. Le sol est composé de petites particules résultant de la désintégration des roches mères sur des millions d'années sous l'effet des précipitations et des variations de température. Ces particules se mélangent avec des matières organiques décomposées par de petits organismes vivants tels que les bactéries. Cette interaction contribue à la formation de la couche superficielle du sol agricole, qui fournit l'environnement approprié pour la croissance et la culture des plantes. (Abu Samour H,2009)

II.2.2. Composants du sol :

Le sol est composé de trois états de la matière :

a. Le composant solide du sol :

Il se compose de deux parties, l'une minérale et l'autre organique. La partie minérale provient de l'altération des roches d'origine, tandis que la partie organique est constituée de résidus de plantes, de leurs racines et de restes d'organismes vivants. La partie solide représente plus de la moitié du volume du sol et plus de 75 % de son poids. (Abdel-Aal S .et al, 2004)

b. Le composant liquide du sol :

Il s'agit de l'eau et des substances dissoutes qu'elle contient, l'eau est l'un des éléments essentiels pour la croissance des plantes, car elle contient des substances dissoutes qui font partie du sol. L'eau dans le sol est sous forme de solution avec une concentration de substances dissoutes variant de 0,05 % à 0,2 %. La pression osmotique de la solution du sol

varie entre 0,2 et 1, ce qui est comparable à la pression du jus cellulaire des racines des plantes. La concentration et le type de substances dissoutes dans la solution du sol varient en fonction de la concentration de dioxyde de carbone dans l'eau et de la nature des colloïdes du sol. (Kadhaleq M. 2001)

c. Le composant gazeux du sol :

Il s'agit d'un ensemble de gaz présents dans les espaces interstitiels du sol, appelé air du sol. L'air remplit les grands espaces vides du sol après que l'eau s'est infiltrée à travers les pores. Les organismes du sol vivent mieux dans un sol qui contient toujours des quantités à peu près égales d'eau et d'air . (Abdel-Aal S et al. 2004)

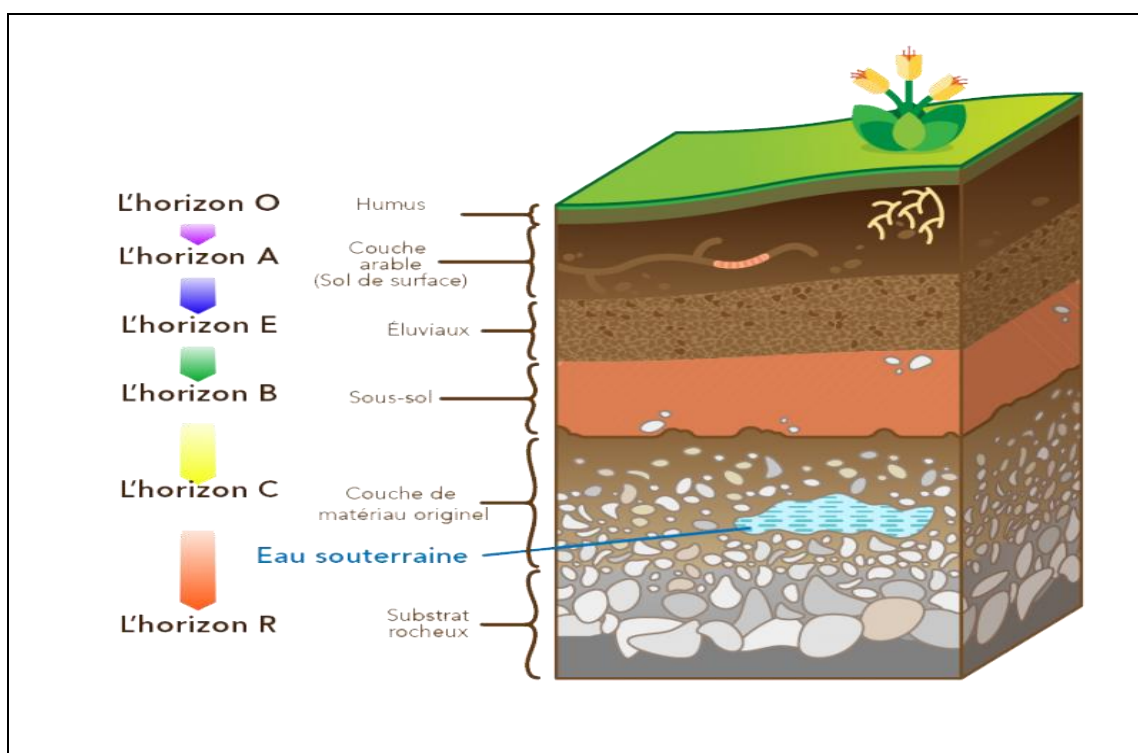


Figure.II.1: Constituants du sol

II.2.3. Classification des sols :

À travers le tableau ci-dessous, nous notons la classification spécifique des sols selon les systèmes différents pour classer les particules du sol selon la classification américaine (Département de l'agriculture des États-Unis) et la classification internationale (Association internationale des sciences du sol). Le tableau illustre la division des agrégats primaires du sol. (Propriétés du sol et tests de sol . 2005), (Hajaoui S. 2003)

Tableau II.1: La répartition concerne toutes les premières particules

Classification internationale (International Union of Soil Sciences)		Classification américaine USDA (United States Department of Agriculture)		Les granules primaires
Taille des grains (mm)	La catégorie	Taille des grains (mm)	La catégorie	
0.2-2	Sable grossier	1-2	Sable très grossier	Le sable
		0.5-1	Sable grossier	
		0.25-0.5	Sable moyen	
0.02-0.2	Sable fin	0.1-0.25	Sable fin	
		0.063-0.1	Sable très fin	
		0.02-0.063	Limon battue	
0.02-0.002	Limon	0.002-0.02	Limon Doux	Limon
Moins que 0.002	Argile	Moins que 0.002	argile	Argile

a. Le sol sableux:

Le sol sableux est commun dans le monde arabe, reconnaissable par sa couleur brun clair et ses grains larges et dispersés. Il est caractérisé par sa faible capacité à retenir l'eau en raison de la grande taille et de la désagrégation de ses grains. Ces conditions particulières se trouvent dans les régions au climat chaud et sec pendant de longues périodes de l'année, et les vents violents contribuent à sa dispersion et à sa présence, La capacité de rétention d'eau du sol, qui dépend de facteurs tels que sa texture, sa structure et sa teneur en matière organique, influence directement sa capillarité. Un sol plus sableux a une capacité de rétention d'eau plus faible mais une meilleure capillarité. (**Ashour M. 2006**)

**Photo II.1:** Sol sableux

b. Le sol argileux:

Le sol argileux a une structure très complexe, caractérisée par ses grains qui adhèrent les uns aux autres grâce à une substance colloïdale. Il apparaît de couleur brun foncé. Ses grains sont petits et cohésifs, et en raison de cette petite taille, les espaces interstitiels sont extrêmement réduits, rendant difficile le mouvement de l'eau ou de l'air à travers le sol. Cela signifie que le sol argileux est marqué par une faible perméabilité à l'eau et une difficulté de circulation de l'air, qu'un sol argileux retient mieux l'eau mais a une capillarité plus faible. (Nassim M. 2006)



Photo II.2: Sol argileux

c. Le sol calcaire:

Le sol calcaire se trouve dans les régions au climat sec et riches en calcium, où les matériaux dominants sont le calcaire et la chaux. En raison de la rareté des précipitations dans ces zones, les faibles quantités de pluie ne sont pas suffisantes pour lessiver les sels du sol, ce qui conduit à leur accumulation au fil du temps. (Abdel-Aal S et al. 2004)

d. Le sol limoneux-sableux

Le sol limoneux-sableux se caractérise par sa couleur jaune et ses particules de taille moyenne. Il est moins compact que le sol argileux pur, mais il a une bonne capacité de rétention d'eau. (Nassim M. 2006)

II.2.4. Propriétés physiques du sol :**a. Forces capillaires :**

La capillarité est le résultat des forces d'adhésion entre les molécules d'eau et les particules du sol, et des forces de cohésion entre les molécules d'eau elles-mêmes.

Ces forces permettent à l'eau de se déplacer vers le haut contre la gravité à travers les pores du sol.

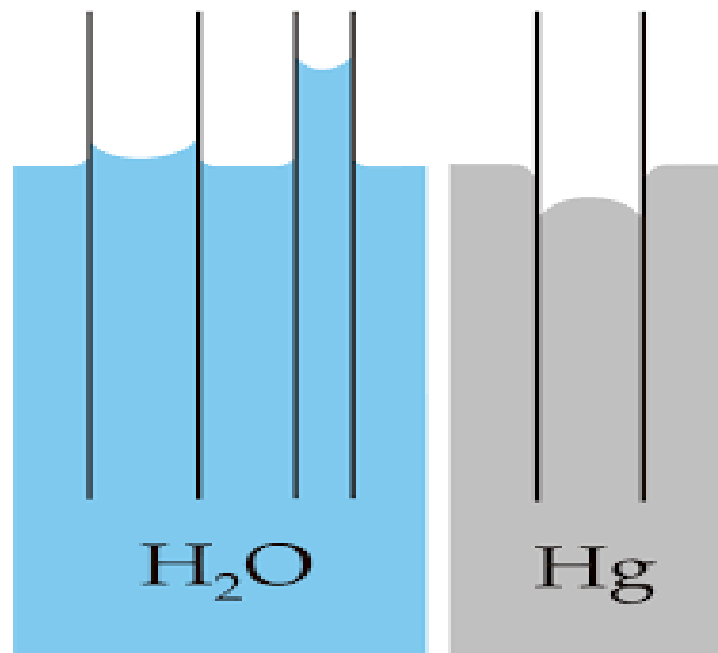


Figure II.2 : Forces capillaires

b. Texture du Sol :

Les sols à texture fine, comme les argiles, ont de petits pores qui augmentent les forces capillaires et favorisent une meilleure montée capillaire de l'eau. En revanche, les sols sableux, avec leurs gros pores, ont une moindre capacité capillaire car les forces d'adhésion et de cohésion y sont moins efficaces.

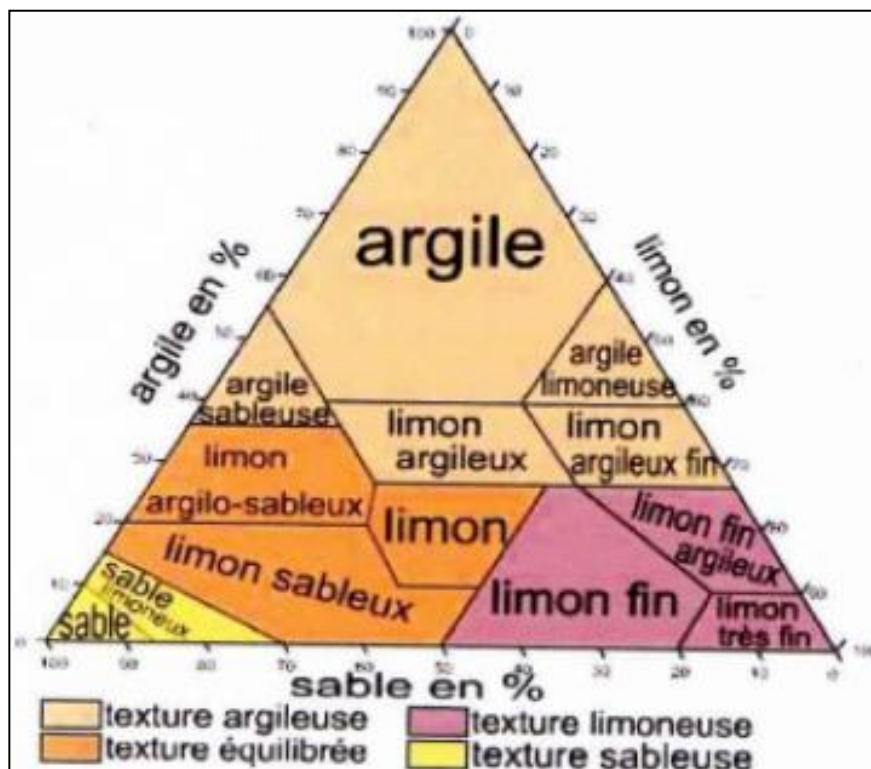


Figure.II.3 : Triangle de texture du sol

c. Structure du Sol :

La structure du sol influence également la capillarité. Un sol bien structuré avec des agrégats stables permet une meilleure distribution de l'eau par capillarité. Les sols compactés ou mal structurés limitent la montée capillaire en réduisant la taille et la continuité des pores.

II.3 IMPORTANCE DE LA CAPILLARITE POUR LES PLANTES :

Au propos de l'approvisionnement en eau, la capillarité permet aux plantes d'accéder à l'eau située dans les horizons plus profonds du sol, en particulier pendant les périodes de sécheresse. Comprendre la capillarité est essentiel pour concevoir des systèmes d'irrigation efficaces qui optimisent l'absorption de l'eau par les plantes. (**William A. Jury et Robert H. 2004**)

En agriculture, comprendre la capillarité dans les sols argileux est crucial pour optimiser les pratiques d'irrigation. L'eau appliquée en surface peut être efficacement redistribuée par capillarité vers les racines des plantes. Une irrigation excessive peut cependant entraîner une saturation du sol, empêchant l'air de circuler et affectant négativement la croissance des plantes. La connaissance de la granulométrie d'un sol peut nous donner une idée de sa perméabilité, ce qui permet de l'utiliser efficacement pour le drainage et l'agriculture.

L'ajout de matières organiques au sol, peut améliorer la structure des sols argileux en créant des agrégats plus stables et en augmentant la porosité, ce qui améliore la capillarité tout en facilitant le drainage. (**William A. Jury et Robert H. 2004**).

Dans le domaine de construction - génie civil, comprendre les différentes applications des agrégats tels que le gravier et le sable, dans toutes leurs variétés : fines, moyennes et grossière est très utile ainsi que la connaissance de la granulométrie des agrégats et les proportions volumétriques importantes des différents éléments est indispensable.

II.4. MECANISMES DE LA CAPILLARITE EN DIFFERENTES SOLS :**II.4.1. Sol argileux :**

L'argile joue un rôle crucial dans la capillarité du sol en raison de ses caractéristiques physiques et chimiques distinctes. Voici une explication détaillée de la relation entre l'argile et la capillarité, avec quelques références pour une étude plus approfondie.

a. Caractéristiques de l'argile :**- Taille des particules :**

Les particules d'argile sont très fines (moins de 2 micromètres de diamètre), ce qui permet de créer de petits pores dans le sol.

Ces petits pores augmentent les forces capillaires, car l'eau peut adhérer plus facilement aux surfaces des particules d'argile et se déplacer à travers les pores fins.

- Structure du sol argileux:

Les sols argileux peuvent former une structure compacte mais également présenter une bonne capacité de rétention d'eau grâce à leur surface spécifique élevée. L'organisation en feuillets des particules d'argile permet une forte adhésion de l'eau.

- Forces capillaires élevées:

Les forces d'adhésion entre l'eau et les surfaces des particules d'argile sont très fortes en raison de la surface spécifique élevée et de la nature hydrophile des argiles.

Ces forces d'adhésion, combinées aux forces de cohésion entre les molécules d'eau, permettent une montée capillaire efficace.

- Rétention et mouvement de l'eau:

Les sols argileux retiennent bien l'eau grâce à la forte capillarité, ce qui est bénéfique pour l'approvisionnement en eau des plantes pendant les périodes de sécheresse. Cependant, en raison de la taille fine des pores, le mouvement de l'eau à travers le sol argileux peut être lent, ce qui peut entraîner des problèmes de drainage et de saturation en eau.

b. Essais pour les propriétés physiques : Essai granulométrique (Houba A et Dahim M. 2016)

L'expérience de tamisage, définie par la norme (NFP 18-560), est une méthode permettant de séparer les différentes tailles des particules du sol. Elle permet de déterminer la distribution granulométrique en utilisant une série de tamis de tailles d'ouverture définies. Ces tamis sont empilés les uns sur les autres, les ouvertures augmentant de haut en bas.

Cette expérience permet de calculer les pourcentages des différentes tailles de particules dans l'échantillon étudié, conformément aux spécifications françaises et européennes. La norme stipule que le poids de l'échantillon utilisé doit être conforme à la relation suivante :

$$600 D_{\max} \geq M \geq 200 D_{\max}$$

Où

M : poids de l'échantillon en kg

$D_{\max}$: diamètre maximal des particules en mm

- Objectif de l'expérience

L'objectif de cette expérience est de distribuer et de classer les particules de sol selon leurs dimensions, en utilisant des tamis ou des cribles ayant un diamètre de maille supérieur à 0,08 mm. De plus, l'expérience vise à illustrer la granulométrie du sol de manière graphique et à la comparer aux spécifications et normes standard.

- Étapes de l'expérience

- Préparer une série de tamis empilés les uns sur les autres, avec le tamis de plus petit diamètre en bas et le tamis de plus grand diamètre en haut.
- Placer un récipient de collecte en bas pour récupérer les particules fines de moins de 0,08 mm, et couvrir le dessus pour éviter la dispersion de la poussière.
- Verser l'échantillon pesé sur le tamis supérieur.
- Mettre en marche l'appareil (le tamiseur électrique) pendant un certain temps.
- Après l'arrêt de l'appareil, examiner chaque tamis individuellement et s'assurer qu'aucun tamis n'a retenu que les particules de plus grand diamètre.
- Peser la quantité retenue dans chaque tamis.
- Peser la quantité passant à travers le récipient inférieur, dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm..

- Calculs et résultats

Calcul de la rétention : (Résiduel - Total) en pourcentage

$$Mc(\%) = (Mn/M) * 100 \dots \dots \dots (II.1)$$

Mn : Somme des rétentions partielles dans chaque tamis $Mn + \dots + M3 + M2 + M1$

M : Masse totale de l'échantillon

Pourcentage du passant2-

$$P = 100\% - Mc\% \dots \dots \dots (II.2)$$

Après avoir effectué le calcul et l'avoir consigné dans un tableau, nous traçons la courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon de sol.

L'axe des ordonnées représente le pourcentage de passant, tandis que l'axe des abscisses représente le logarithme des diamètres des tamis.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (Mf).

II.4.2. Les granulats

Les granulats sont définis comme étant constitués de grains inertes dont la taille varie de 0 mm à 40 mm, comprenant du sable, des graviers et des cailloux, pouvant être d'origine naturelle ou artificielle selon la norme NF P 15-010. Ces granulats désignent des matériaux pierreux de petite taille, issus de processus tels que l'érosion naturelle ou le concassage mécanique des roches. (TAYEB H et BOUYAHIA C .2018)

II.4.3. Le sables

Les sables sont définis comme la portion des granulats pierreux dont les grains mesurent entre 80 µm et 05 mm ; cette définition est générale et ses limites varient d'une classification à l'autre. Ce sont également des matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3 mm et dont le taux de passage à travers un tamis de 80 microns ne dépasse pas 30%.

Dans son sens le plus courant, le terme "sable" désigne une roche sédimentaire meuble composée de petites particules résultant de la désagrégation d'autres roches, dont les dimensions se situent entre 0 et 5 mm, à l'exclusion des charges. Cette définition englobe également les sables issus du concassage ; cependant, lorsqu'on parle de sable, on pense surtout aux sables naturels abondants dans de nombreuses régions et dont les réserves sont pratiquement inépuisables.

En réalité, la définition granulométrique du sable est plus complexe ; elle varie selon les époques, diffère d'un pays à l'autre et selon l'usage prévu. (TAYEB H et BOUYAHIA C .2018)

- La masse volumique apparente (Saker A et Zidi Y . 2016)

Est le rapport entre le poids total de l'échantillon et son volume total, et elle est donnée par l'équation:

$$\gamma_{app} = \frac{M_T}{V_T} \dots\dots\dots 1 \quad , (II.3)$$

Où :

γ_{app} : Masse volumique apparente

M_T : Poids total de l'échantillon

V_T : Volume total de l'échantillon

- La masse volumique absolue:

Est le rapport entre la masse des particules solides (M_s) et leur volume (V_s), exprimé par l'équation :

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{V_s} \dots\dots\dots 2 \quad , (II.4)$$

Où :

γ_{ab} : masse volumique absolue

M_s : masse des particules solides

V_s : volume des particules solides

- Étapes de l'expérience :

1. Masse volumique apparente :

Prenez un échantillon de sol et remplissez un récipient de volume connu V et de masse M_0 , puis pesez l'échantillon avec le récipient M_1 .

Calculez la masse de l'échantillon $M = M_1 - M_0$ en connaissant son volume V et sa masse M .

Vous pouvez calculer la masse volumique apparente selon l'équation (1).

2. Masse volumique absolue :

Prenez un échantillon de sol et pesez-le, puis versez l'échantillon dans un tube gradué contenant une quantité d'eau de volume V_0 , puis lisez le nouveau volume V_1 .

Calculez le volume de l'échantillon $V = V_1 - V_0$ en connaissant son volume V et sa masse M .

Vous pouvez calculer la masse volumique apparente selon l'équation (2).

- La teneur en eau (Magnan J P . 2024)

rapport de la masse d'eau à la masse du sol sec (sans unité ou %)

$$W = \frac{M_W}{M_S} * 100 \dots \dots \dots (II.5)$$

- Le degré de saturation :

Rapport du volume d'eau au volume des vides (sans unité ou %)

$$S_r = \frac{W}{\gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_s} - \frac{1}{\gamma_w} \right)} \dots \dots \dots (II.6)$$

II.5. CONCLUSION:

La compréhension de mécanisme de la capillarité de l'eau dans le sol est indispensable pour une meilleur gestion de l'espace souterraine, ainsi que le fonctionnement hydrodynamique du sol et les mécanismes de rétention d'eau intéressent plusieurs disciplines des sciences de l'environnement de tels sorte que :

- En hydrogéologie, pour la pollution ou l'alimentation et la recharge des nappes;
- En hydrologie, pour l'estimation de l'infiltration et du ruissellement au niveau des bassins versants;
- En agronomie, pour la détermination du besoin en eau des cultures ou pour la gestion des réseaux d'irrigation;
- En domaine de génie civil, pour la stabilité des ouvrages;

Chapitre 3 :
Matériels et
méthodes

III. 1. Introduction

Nous allons donner dans le présent chapitre le protocole expérimental suivi au cours de nos essais expérimentaux. Tous le Materials utilisé dans la partie expérimentale sera également exposé. Toutes les expériences ont été menée au niveau de département d'hydraulique et de génie civil à l'université de Echahid Hama Lakhdar d'El Oued (laboratoires 6, 7 et 8).

III. 2. Matériaux et outils utilisés

Le matériel utilisé de nos expériences est regroupé dans le tableau suivant.

Tableau III.1: Matériaux utilisés dans les expériences.

Dispositifs	Matériaux	Solutions
- Tamis. - balance. - Mortier et pilon - Chronomètre	- Sable de dune - Excréments de chameaux - argile - Sable grossier - Béchers - Bassin d'eau - Règle - gants - 02 Tubes transparents en PVC	- Eau de robinet - Eau distillée - Eau minérale (Ayriss)

Tableau III.2: Propriétés de l'eau utilisé (eau minérale ayriss)

Composition	Mg /Litre
Calcium	65.6
Magnesium	6.8
Bicarbonates	234.24
Potassium	1.9
Sodium	28.5
Sulfates	75
Chlorures	37
Nitrates	2.7
Nitrites	0.01
Résidus secs à 180° C	276
pH	7.78

L'eau utilisée dans les essais de la capillarité est une eau douce dont les caractéristiques sont les suivantes.

Les outils utilisés au cours de la réalisation de la partie expérimentale sont présentés dans les photos suivantes.



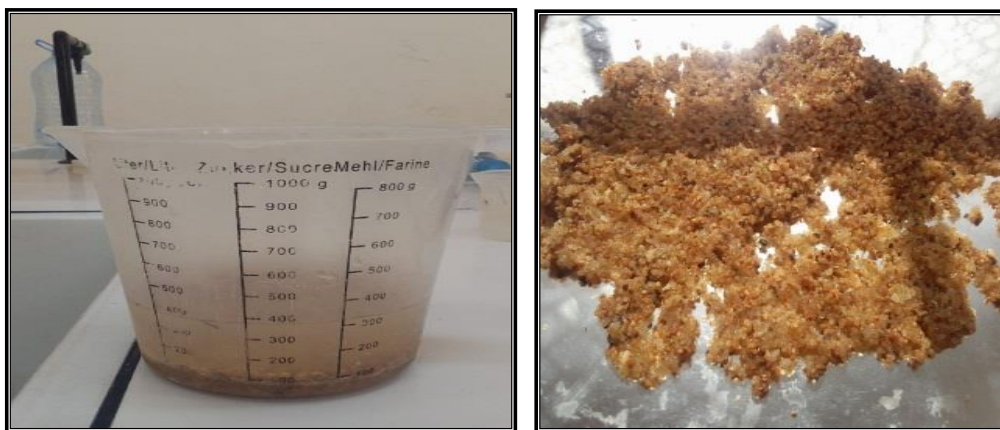
PhotoIII.1: Outils et matériaux



PhotoIII.2: Balance et série de tamis normalisés.

III. 3. Protocole expérimentale

Après avoir tamisé le sable grossier avec des tamis de diamètres 800 micron, 1,25 mm et 2,5 mm (PhotoIII.3). Il a été lavé plusieurs fois avec de l'eau minérale dans un bécher de 1L pour éliminer toutes les impuretés. Ensuite, le sable lavé a été exposé au soleil afin de le sécher à l'air libre pendant plusieurs jours.



PhotoIII.3: Lavage et séchage du sable grossier.

La sable de dune a été collecté de la région de Debila (El Oued), il a été lavé plusieurs fois par l'eau minérale puis laissé sécher à l'air libre sous la température ambiante.



Photo III.4: Lavage et séchage du sable de dune.

Les excréments de chameaux (comme biomatériau) sont collectés et broyés au laboratoire à l'aide d'un mortier et pilon.



Photo III.5: Broyage des excréments de chameaux.

Pour la réalisation de nos expériences, nous avons utilisé deux tubes en PVC gradués de 40 cm de longueur et de 6,5 cm de diamètre. Nous avons mis des petits trous (environ 1 mm) dans la partie basse des deux tubes pour permettre la pénétration de l'eau à l'intérieur de tube et empêcher, en même temps, la perte du sable grossier.

1.3.1. Première expérience

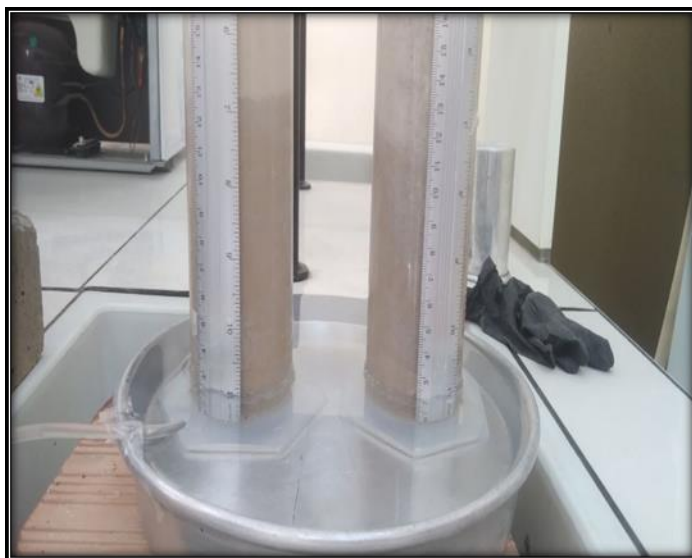
Cas N° :01

En premier lieu, nous avons rempli la partie inférieure des deux tubes par une quantité de sable grossier (hauteur de 2 cm). Ensuite, nous avons complété le remplissage du premier tube (témoin) par le sable sec et le deuxième tube par le mélange sable + excréments de chameaux (S+EC). La quantité de EC représente 20 % (en volume) du tube (**PhotoIII.6**) et le reste c'est du sable (soit 80 %).



PhotoIII.6: Sable grossier, mélange sable + EC, sable sec.

Après le remplissage des deux tubes, ils ont été placés directement dans un récipient (de 3 cm de hauteur) remplis par l'eau minérale (l'eau de Ayriss). Le niveau d'eau est maintenu constant à l'aide d'un système de goutte à goutte. Après mettre les deux tubes dans le récipient d'eau, nous avons commencé directement le suivi de la remontée de l'eau par capillarité en fonction de temps. Les mesures de la hauteur d'eau ascendante ont été enregistrés dans des laps de temps bien déterminés.



PhotoIII.7: suivi de la cinétique de capillarité dans les deux tubes (expérience du cas N° :01).

Cas N° :02

Pour le deuxième test, nous avons répété le même protocole avec variation (réduction) du taux de biomatériaux (EC) à 10% en ajoutant 90 % du sable (en volume). Le biomatériau a été bien mélangé avec le sable avant de remplir le tube. Le tube (EC10%+ Sable 90%) a été comparé par un tube rempli par le sable sec (témoin). Ensuite nous avons suivi la cinétique de la remontée d'eau dans les deux tubes à l'aide d'un chronomètre.

Cas N° :03

Pour ce test, le tube étudié est rempli par le sable avec introduction d'une couche de biomatériau (d'une épaisseur de 1,5 cm) sur une hauteur de 18,5 (la couche entre 18,5 et 20 cm). Ce tube a été comparé avec le témoin comme les cas précédents.



Photo III.8: Protocole expérimentale de l'expérience cas N° :03.

Cas N° :04

De même pour l'expérience N° 03 avec emplacement de la couche EC (épaisseur de 1 cm) a une hauteur de 10 (la couche entre 10 et 11 cm). Le tube étudié a été comparé avec un témoin rempli du sable.

Cas N° :05

De même pour l'expérience précédente (N° 04) avec introduction de deux couches EC (épaisseur de 1 cm) a une hauteur de 5 cm et 10 cm, respectivement. Le tube testé a été comparé avec le témoin rempli du sable de dunes.

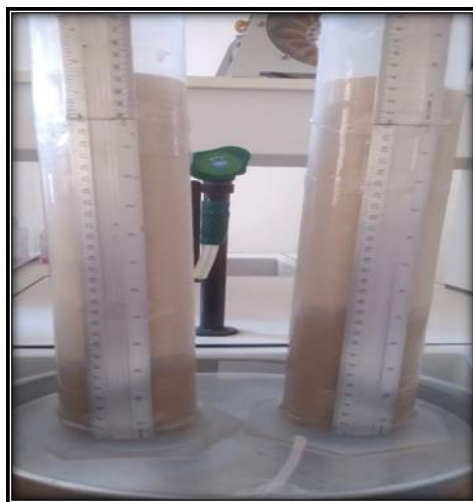
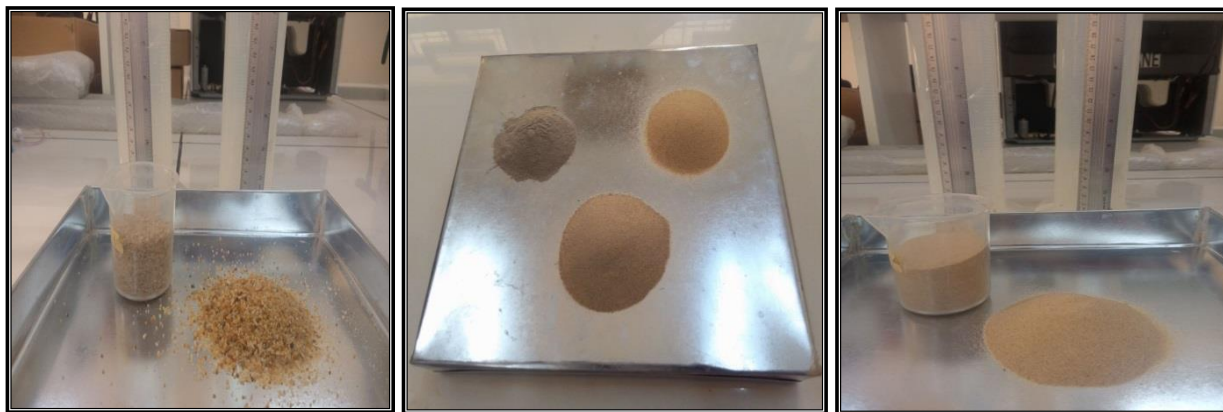


Photo III.9: Protocole expérimentale de l'expérience cas N° :05.

III.3.2. Deuxième expérience

Comme le cas précédent, nous avons rempli la partie inférieure des deux tubes par une quantité de sable grossier (hauteur de 2 cm). Ensuite nous avons remplis le tube étudié avec mélange sable + argile (en étudiant plusieurs cas), comme indiqué dans la PhotoIII.10.



PhotoIII.10: Protocole expérimentale du deuxième expérience.

Cas N° :01

Dans le premier cas, le taux de l'argile a été fixé à 20 % en volume (le reste est du sable). Le tube étudié a été comparé avec un témoin rempli du sable.

Cas N° :02

Dans ce cas, le pourcentage de l'argile a été fixé à 10 % en volume, le reste est du sable (90 %). La remontée de l'eau dans ce tube a été comparé avec un témoin rempli du sable.

Cas N° :03

Dans ce cas N°03, le volume de l'argile a représenté 5 % (en volume) du volume total de tube. Le suivi de la cinétique de capillarité dans ce tube a été comparé avec celle du témoin rempli du sable.

Cas N° :04

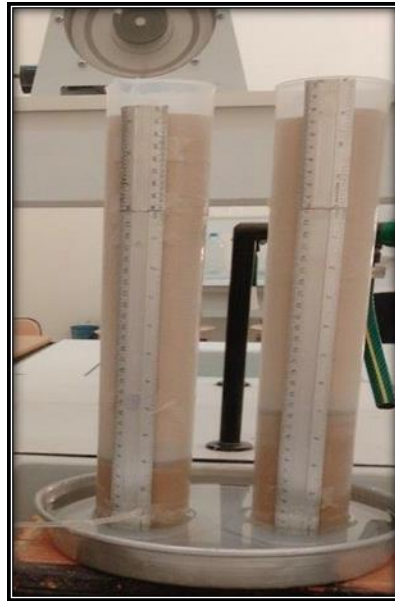
Dans ce test, l'argile a été introduite sous forme d'une couche de 1,5 cm d'épaisseur à partir d'une hauteur de 18,5 cm (à partir du fond). La couche d'argile sera entre 18,5 et 20 cm. Les résultats de ce tube ont été comparé avec ceux obtenus par le témoin (remplis par le sable de dunes sec).

Cas N° :05

Dans ce cas, la couche d'argile (1 cm d'épaisseur) a été mis à une hauteur de 10 cm à partir du fond (entre 10 et 11 cm). La cinétique de la capillarité a été suivi dans ce tube et dans le témoin en même temps.

Cas N° :06

Dans ce cas, l'argile a été introduite sous forme de deux couches à une hauteur de 5 cm et 10 cm, respectivement. Le tube testé a été comparé avec le témoin rempli du sable (**PhotoIII.11**).



PhotoIII.11: Protocole expérimentale de cas N° : 06

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'exposer les caractéristiques des matériaux étudiés et le matériel utilisées lors de la réalisation de toutes les expériences. Le protocole expérimental des essais de capillarité en laboratoire a été bien décrit avec détail de la manière de toutes les mesures prélevées.

Chapitre 4 :

Résultats et discussion

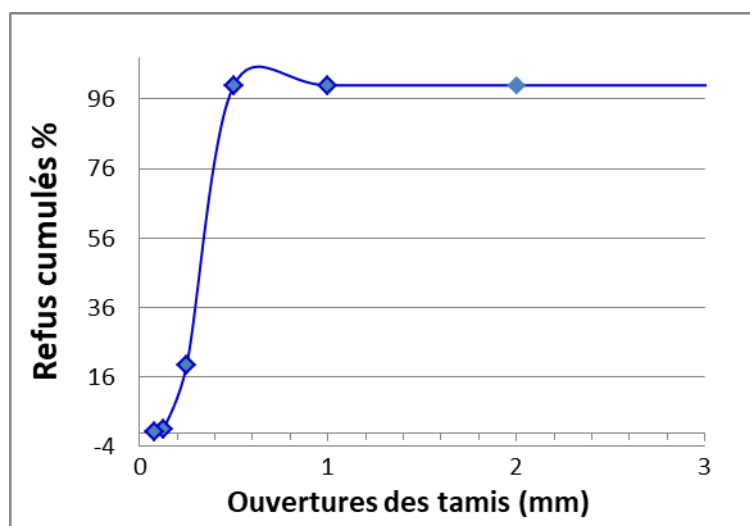
IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons donner les résultats obtenus concernant l'étude de la cinétique de la capillarité en utilisant des tubes de sables de dunes et des tubes de sable modifiés. Les données expérimentales seront présentées sous formes de courbes et analysés par la suite pour comprendre l'effet de la nature de substrat sur la vitesse de remontée de l'eau dans la colonne étudiée.

IV.2. Les propriétés physiques des matériaux utilisés

a. Analyse granulométrique

Le sable étudié est le sable de dunes, les caractéristiques du sable sont étudiées par plusieurs auteurs. Nous citons à titre d'exemple l'étude de Mamoun C et Debbab A, (2017) ont indiqué que le sable de dunes est caractérisé par la granulométrie présentée dans laFigureIV.1.



FigureIV.1:Courbe de l'analyse granulométrique du sable de dunes.

b. Masse volumique

Pour déterminer la masse volumique des échantillons de sable et d'argile, nous avons utilisé la méthode du récipient standard (de volume connu). La pesée des deux échantillons nous a donné les valeurs suivantes :

Sable :1514 g

Argile :1005 g

Les résultats de calcul pour la masse volumique apparente et celle absolue sont récapitulés dans le tableauIV.1.

Tableau IV.1: Résultats de la masse volumique apparente et absolue

Matériaux	Masse volumique apparente (g / L)	Masse volumique absolue (g / L)
Sable de dunes	1,514	2,61
Argile	1,005	2,7

Autres propriétés du sable et de l'argile utilisée comme la porosité, la teneur en eau et le taux de saturation sont regroupés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Porosité, teneur en eau et taux saturation.

Type de sol	Porosité (%)	Teneur en eau (%)	Taux de saturation (%)
Sable de dunes	42	1	3
Argile	62	5	8

IV.3. Cinétique de capillarité

IV.3.1. Colonne de sable + EC

Cas N° 01

Les résultats de la variation de l'élévation de l'eau dans les colonnes 1 et 2 en fonction du temps (en minutes) sont données dans la figure IV.2 (cas N° 01). Nous avons pu constater que l'eau remonte dans les deux colonnes au cours du temps et que la valeur maximale atteinte est de 21 cm après dans le témoin et 18 cm dans la colonne 2 (après 120 minutes). L'élévation de l'eau était plus rapide dans les premières minutes, puis un ralentissement a été observé pour la hauteur d'eau ascendante.

La remontée de l'eau dans la colonne 2 est plus lente par rapport au témoin cela est dû au fait que la poudre d'excréments de chameau a la capacité d'absorber et de stocker l'eau en quantités importantes.

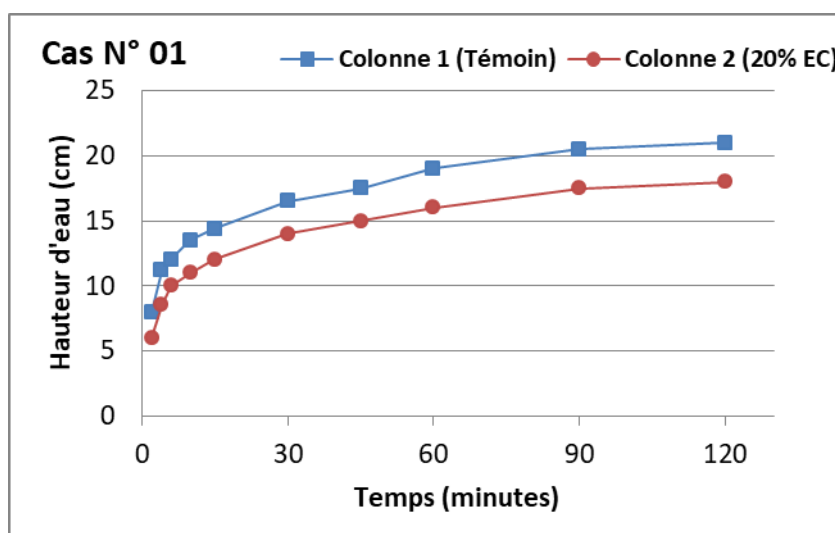


Figure IV.2: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 02

Dans ce cas (cas N° 02), le pourcentage de EC a été fixé seulement à 10 % (rapport volumique). La figure IV.3 représente l'élévation de l'eau dans les deux colonnes (témoin et colonne modifiée). Comme indiqué dans le cas suivant, l'élévation de l'eau dans le témoin est plus rapide que dans le cas de la colonne modifiée. Nous pouvons remarquer également que la différence des hauteurs n'est pas trop significative comme le premier cas. Cette diminution de la différence entre les deux colonnes est due à la diminution du pourcentage du EC qui est riche en matière organique et peut absorber l'eau via différents processus.

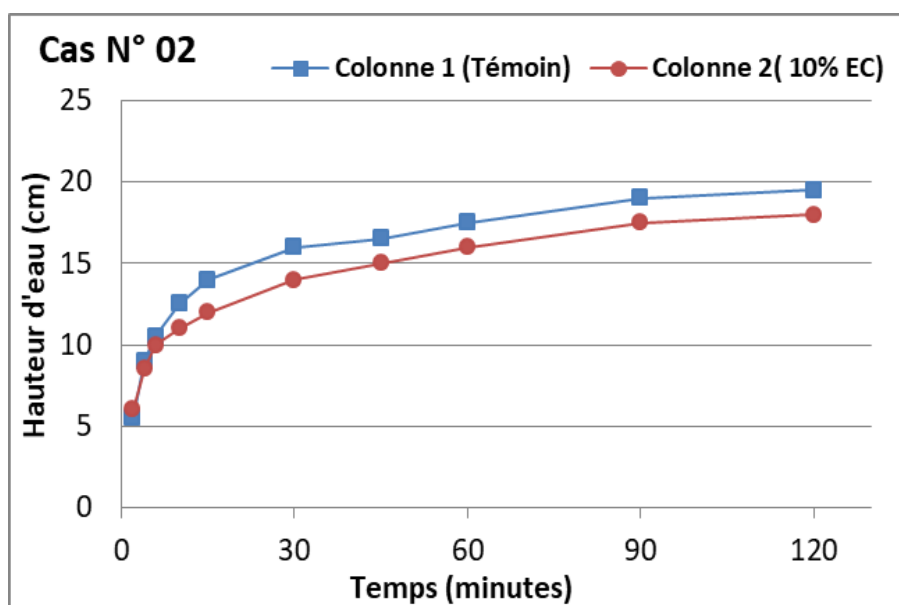
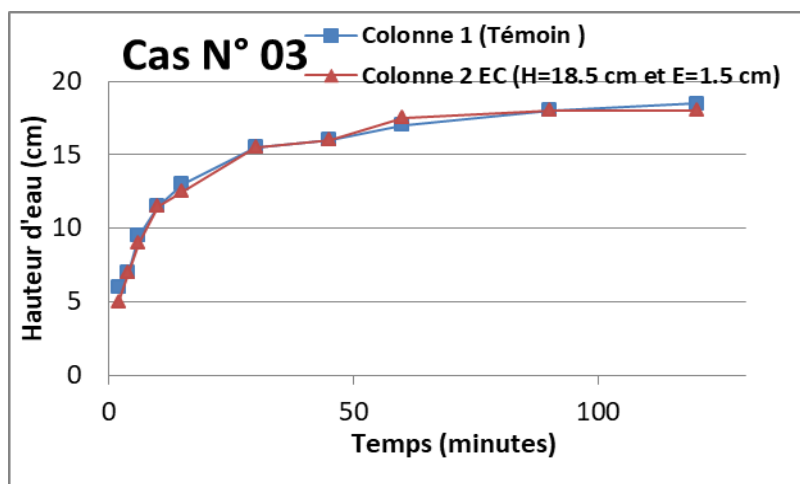


Figure IV.3: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 03

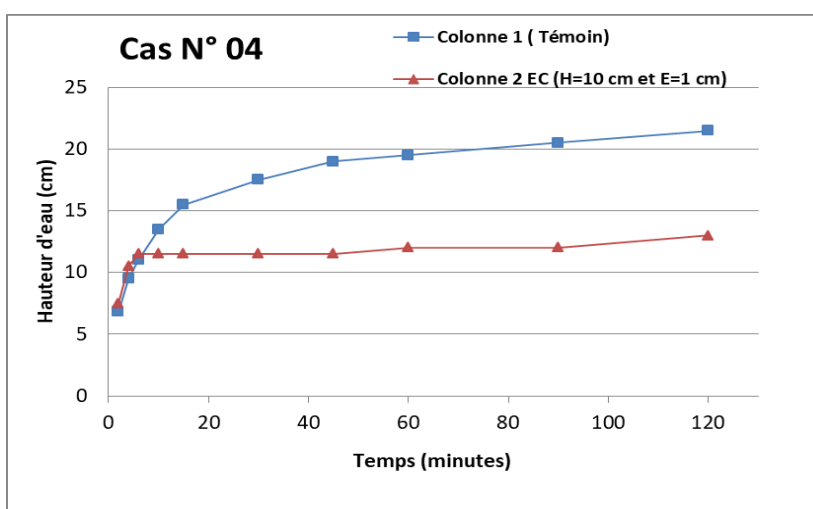
Dans ce cas (cas N° 03), l'EC a été introduit sous forme d'une couche (épaisseur de 1,5 cm) sur une hauteur de 18,5. Les résultats ont montré que la circulation de l'eau est presque identique dans les deux colonnes depuis 0 jusqu'à 18 cm (FigureIV.4). Le niveau d'eau atteint 25,5 cm dans la colonne témoin après 24 heures, par contre l'élévation de l'eau est se stabilisé au niveau de la couche de EC (même après 24heures).



FigureIV.4: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 04

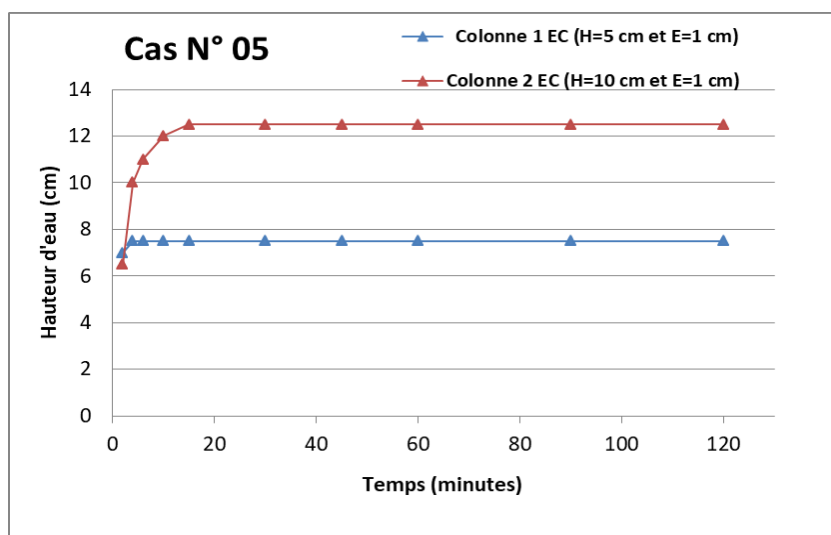
Dans le quatrième cas (cas N° 4), l'EC a été introduit comme une couche de 1cm à une hauteur de 10 cm (la couche entre 10 et 11 cm). Les valeurs des hauteurs enregistrées sont récapitulées dans la FigureIV.5. Nous avons constaté que la hauteur maximale atteinte est de 22,5 cm dans le témoin (après 180 minutes). Par contre, la hauteur maximale était 13 cm (après 180 minutes). La couche de EC a empêché l'élévation de l'eau à cause de l'absorption et le stockage d'une quantité importante de l'eau.



FigureIV.5: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 05

Dans le cas suivant, nous avons varié l'emplacement de la couche de EC (à 5 cm et à 10 cm) et comparé les deux colonnes (FigureIV.6). Nous constatons que le niveau d'eau est stabilisé à une hauteur de 7,5 cm après 170 minutes dans la colonne 1. Pour la colonne 2, la valeur minimale est de 12,5 cm après 170 minutes. Ceci confirme bien l'effet de la couche de EC sur l'élévation de l'eau et le phénomène d'absorption et de stockage de l'eau lorsque l'EC est introduit comme une couche.



FigureIV.6: Variations de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

IV.3.2. Colonne de sable + argile

Dans cette partie du travail, les essais ont porté sur le substrat du mélange sable de dunes et argile en étudiant plusieurs cas pour bien comprendre l'influence de l'argile sur l'élévation de l'eau dans les colonnes verticales. Plusieurs expériences ont été réalisées en étudiant plusieurs cas.

Cas N° 01

Dans le premier cas, l'argile a été introduite par 20 % de volume dans la colonne 2 en comparant les résultats avec ceux obtenus par le témoin. La FigureIV.7représente l'enregistrement des valeurs de l'élévation d'eau dans les deux colonnes en fonction du temps. Ces résultats ont indiqué clairement que la remontée de l'eau par capillarité est plus lente dans le cas du sable mélangé par l'argile (20 % d'argile) par rapport la colonne témoin. Ceci peut être expliqué par colmatage des pores de substrat par l'argile, ce qui a empêché la percolation de l'eau à travers le sable. De plus, le caractère hydrophile de l'argile smectite lui permet d'emmagasiner l'eau dans l'interfeuille (gonflement).

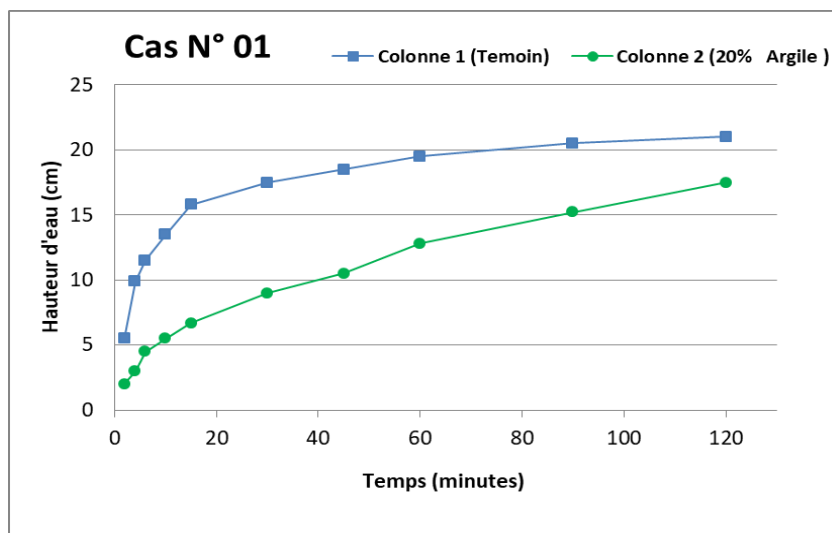


Figure IV.7: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 02

Dans le deuxième cas, le pourcentage d'argile dans le mélange a été fixé à 10 %. Les résultats de cette expérience ont été regroupés dans la Figure IV.8. Nous pouvons constater qu'au cours de la première demi-heure, l'élévation de l'eau était identique dans les deux colonnes. Après cela, l'élévation de l'eau est devenue plus rapide dans la colonne de mélange par rapport au témoin contrairement au cas N°1. La hauteur maximale atteint 26,5 cm et 38 cm (après 24 heures) dans les colonnes 1 et 2, respectivement.

En effet, lorsque la proportion d'argile diminue dans le mélange, cela peut entraîner une augmentation des forces de capillarité et réduire le colmatage de substrat, ce qui accélère la circulation verticale de l'eau.

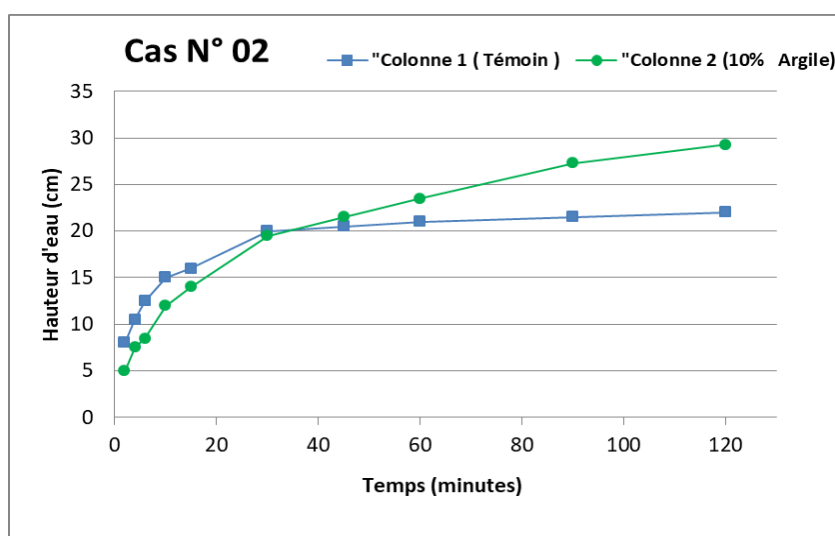
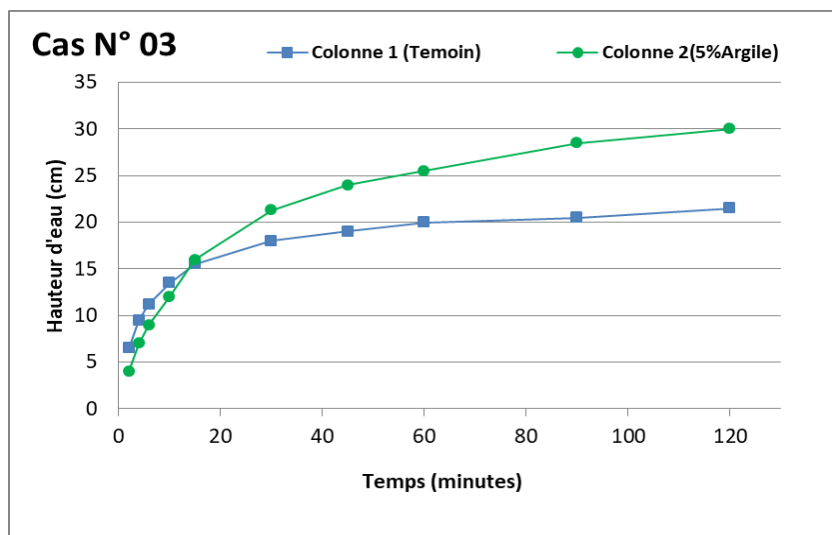


Figure IV.8: Variations de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 03

Pour confirmer les remarques précédentes (cas 1 et 2), nous avons diminuer encore le taux de l'argile dans le mélange à 5 % (cas N° 03). Cette fois-ci les données de la FigureIV.9montrent clairement la différence significative de la vitesse de remontée de l'eau dans les deux colonnes. Ceci confirme bien que les particules d'argile contribuent au phénomène de capillarité par les interactions (forces de rétention) qui se produite à l'interface entre les grains d'argile et molécules d'eau.



FigureIV.9: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 04

Dans ce cas (cas N° 4), l'argile a été introduite sous forme d'une couche (épaisseur de 1,5 cm) à une hauteur de 18,5 cm (entre 18,5 et 20 cm). Les résultats de la FigureIV.10ont indiqué que la couche d'argile a empêché la remontée de l'eau par capillarité. Ceci peut être expliqué par l'absorption de l'eau par l'argile en grandes quantités. La valeur maximale atteinte est de 26 cm et 17,4 cm dans les colonnes 1 et 2 (après 24 heures), respectivement.

En outre, l'argile joue le rôle d'une barrière imperméable contre l'élévation de l'eau. Cela est dû à sa structure fine et compacte qui rend difficile la pénétration de l'eau à travers et par son caractère hydrophile. En conséquence, lorsque l'eau atteint la couche d'argile, elle a tendance à être bloquée.

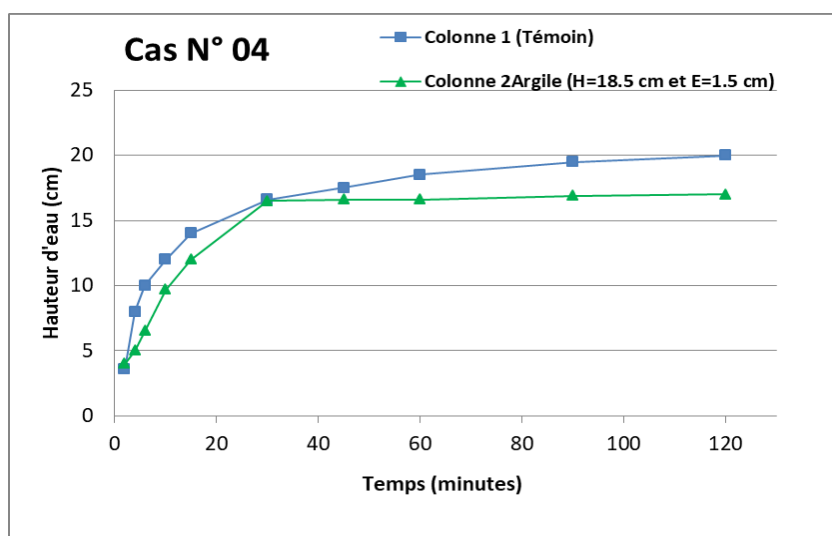


Figure IV.10: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

D'autre part, lorsque l'argile est exposée à l'eau, un échange d'ions se produit où les cations dans l'espace inter-foliaire de l'argile peuvent être échanger par les cations présents dans l'eau. Cette réaction permet à l'argile d'absorber l'eau, augmentant ainsi son poids et son volume (gonflement de l'argile).

Cas N° 05

Pour confirmer les remarques prises dans le cas N°4, nous avons déplacé l'emplacement de la couche d'argile à une hauteur de 10 cm dans le cas suivant (cas N° 5). Les données obtenues (Figure IV.11) au cours de cette expérience ont montré que la couche d'argile a bloqué la remontée de l'eau même si a été remplacé à 10 cm d'hauteur. Cette fois-ci, la hauteur d'eau a été stabilisé à 12,6 cm, ce qui a été enregistré après 15 minutes sur la colonne 2.

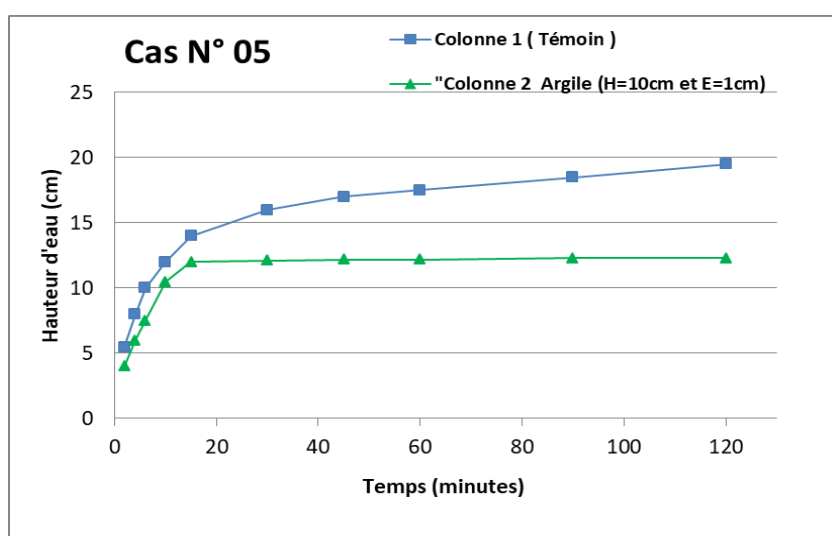


Figure IV.11: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

Cas N° 06

Dans ce cas nous avons étudié deux colonnes contenant une couche d'argile à une hauteur de 5 cm et 10 cm dans la colonne 1 et 2, respectivement. Les données enregistrées sur la Figure IV.12 ont mis en évidence la stabilité de l'élévation d'eau au niveau de la couche d'argile dans les deux colonnes. Le niveau d'eau maximal atteint environ 7,2 cm et 12,2 cm dans les colonnes 1 et 2, respectivement. Après 24 heures, la ligne d'eau était 12,5 cm et 18 cm, dans les colonnes 1 et 2, respectivement.

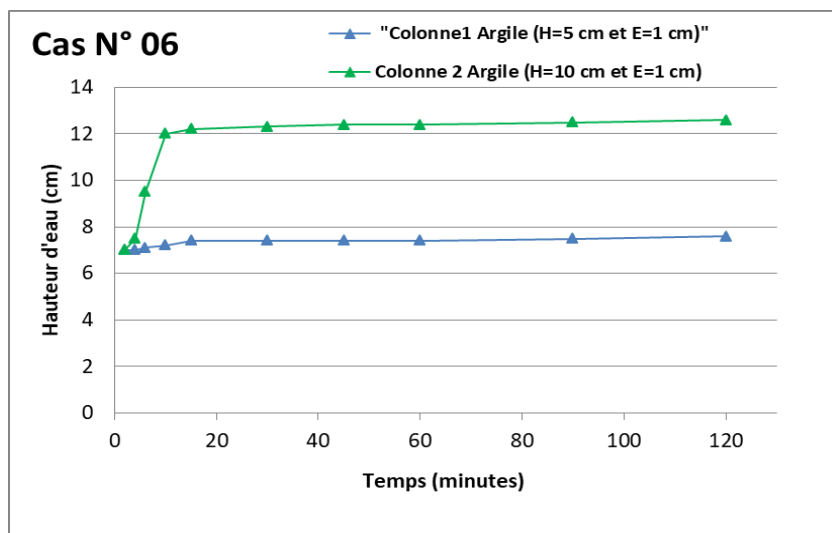


Figure IV.12: Variation de l'élévation de l'eau dans les deux colonnes en fonction du temps.

IV.3.3. Comparaisons

Dans cette partie du travail, nous avons comparé les résultats obtenus en utilisant l'EC avec ceux obtenus avec utilisation de l'argile.

Cas N° I

Les résultats de la Figure IV.13 ont présenté la comparaison entre le témoin, la colonne dopée par EC (20 %) et celle par l'argile (20 %). Ces données ont indiqué que la vitesse de la remontée de l'eau suit l'ordre suivant : colonne dopée par argile < colonne dopée par EC < témoin.

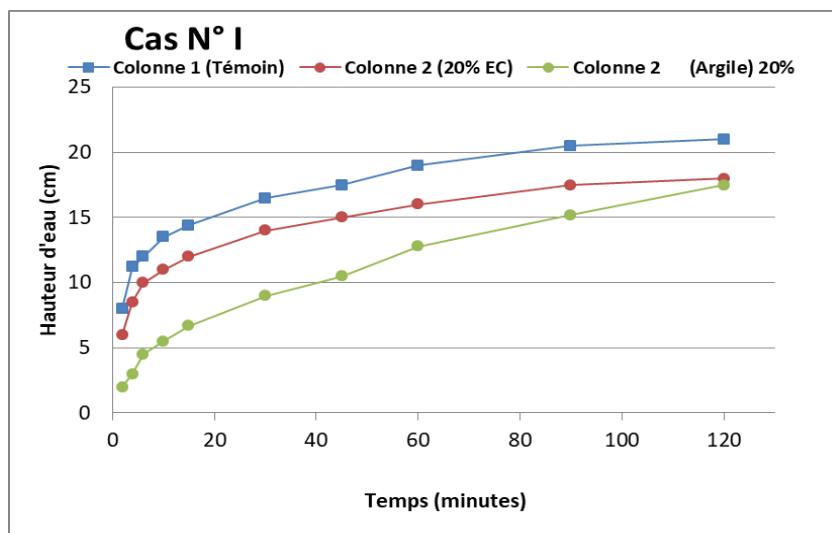


Figure IV.13: Comparaison de l'élévation de l'eau dans les différents colonnes en fonction du temps.

Cas N° II

Ce cas est similaire au cas précédent sauf que le pourcentage du matériau ajouté était 10 %. Les résultats de la Figure IV.14 ont mis en exergue un comportement très différent au précédent. La diminution du taux d'argile a induit une augmentation de la vitesse de remontée de l'eau. Par contre ce phénomène n'est pas observé dans le cas du EC.

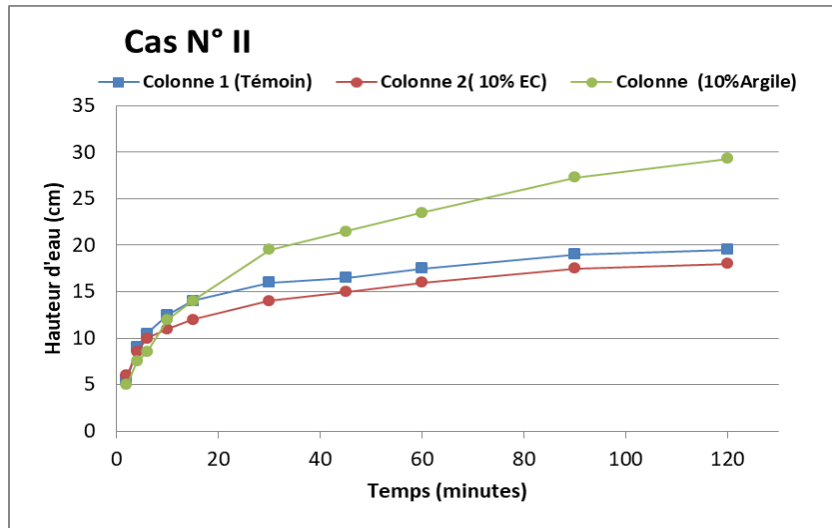


Figure IV.14: Comparaison de l'élévation de l'eau dans les trois colonnes en fonction du temps.

Cas N° III

Dans ce cas, nous avons comparé les résultats obtenus en introduisant des couches de EC et d'argile à une hauteur de 5 et 10 cm. La Figure IV.15 montre que quelque soit l'emplacement de la couche, elle va engendrer un ralentissement de la vitesse de remontée de l'eau à travers la colonne.

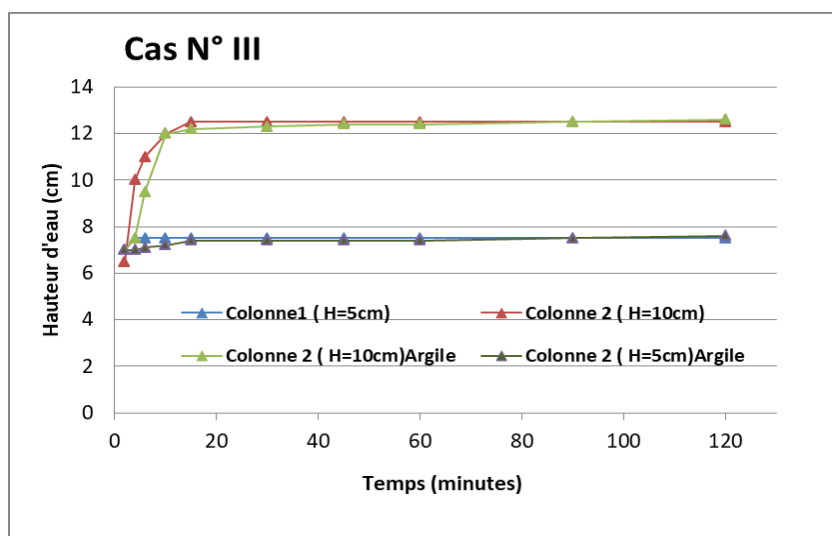


Figure IV.15: Comparaison de l'élévation de l'eau dans des colonnes contenant des couches d'EC et d'argile.

Cas N° IV

Dans la présente comparaison, nous avons présenté les données des expériences de l'ajoute d'argile en différents pourcentages (Figure IV.16). Nous pouvons conclure que lorsque le taux d'argile diminue on aura une augmentation de vitesse de la remontée de l'eau. La plus rapide cinétique d'élévation d'eau a été obtenue dans le cas d'un mélange contenant 5% d'argile.

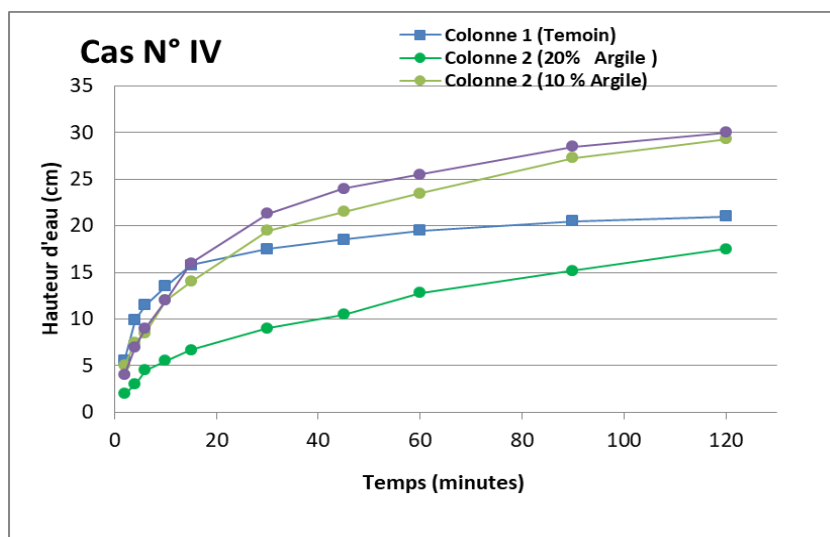


Figure IV.16: Comparaison de l'élévation de l'eau dans des colonnes contenant des pourcentages d'argile.

IV.3.4. Teneur en eau

Pour calculer le taux de saturation, des échantillons prélevés de la colonne étudiée (sable + argile) après 48 heures et laissés à l'air libre pendant 24 heures, puis placés dans l'étuve à une température de 80°C pendant 24 heures, la pesée de chaque échantillon est de 100 g avant le séchage. Après son séchage, l'échantillon a été pesé pour déterminer le taux de saturation. Cette opération est répétée plusieurs fois.

Tableau IV.3: Teneur en eau des échantillons de sable(100%)et Mélange(5 % argile)

Date	Sable (100%)	Mélange (5 % argile et 95% sable)
14 /05/2024	10%	11%
15 /05/2024	9%	9%
16 /05/2024	8%	11%

Nous avons marqué que le taux de saturation est diminué au cours du temps dans la colonne du témoin, par contre il est resté pratiquement le même dans la colonne dopée par l'argile pendant 3 jours.

IV.4. Conclusion

Plusieurs expériences ont été réalisées afin de comprendre le phénomène de capillarité dans des colonnes de sable et l'effet de l'introduction d'autres matériaux sur la cinétique de l'élévation de l'eau. Les résultats obtenus ont montré que quel que soit le matériau ajouté, la vitesse de la capillarité est influencée. L'introduction de biomatériau (EC) et d'argile a bloqué la remontée de l'eau pendant une durée assez importante. De plus, l'introduction de l'argile par de faibles proportions (en mélange avec le sable) peut améliorer la vitesse de l'élévation de l'eau.

*Conclusión
générale*

Conclusion Générale :

Cette étude se concentre sur la compréhension globale du phénomène de la capillarité dans les sols, en mettant particulièrement l'accent sur les sols sableux. Ce phénomène revêt une importance cruciale dans divers domaines tels que l'agriculture, la géotechnique et la gestion des ressources en eau, où il joue un rôle clé dans le maintien de l'humidité du sol, la distribution des nutriments et la stabilité des structures bâties.

L'objectif du travail était d'analyser le phénomène de la capillarité dans des colonnes de sable, et à comprendre les mécanismes fondamentaux et les facteurs déterminants, afin de fournir des données qui contribuent à la compréhension de l'interaction eau-sol.

Les résultats de ce travail ont montré que quel que soit le substrat de la colonne, la vitesse de l'élévation de l'eau était importante dans les premières minutes puis elle subit un ralentissement. L'introduction de biomatériaux (poudre de EC), sous forme de mélange ou sous forme d'une couche, affecte considérablement la cinétique de la remontée de l'eau.

Quel que soit le matériau ajouté sous forme d'une couche, il contribue au blocage de la remontée de l'eau dans la colonne. L'ajout d'EC en mélange avec le sable engendre un ralentissement de la vitesse de capillarité.

Dans le cas du sable dopé par l'argile, deux différents comportements ont été distincts. En effet, une quantité élevée de l'argile peut colmater la colonne, par contre l'argile peut augmenter la vitesse de capillarité à de faibles concentrations.

Les résultats obtenus au cours de ce travail peuvent être considérés comme une démarche aidant à la compréhension du phénomène de capillarité et les paramètres qui influent sur le processus. Ce travail peut être soutenu par d'autres recherches visant à optimiser la teneur en argile permettant une bonne utilisation du substrat en agriculture en vue de leur application dans notre région aride.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques:

1. Ab Aziz bin Mohd Yusof et al (2022). The Effect of Porosity and Contact Angle on the Fluid Capillary Rise for Bone Scaffold Wettability and Absorption. Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences. ISSN 2636-9346. PP 6-11.
2. AL – Saadi A K.(2024). Fluid mechanics. College of Engineering. University of Babylon. Département de l'environnement. PP1-14
3. Al-Menhali A et al . (2015). Capillarity and wetting of carbon dioxide and brine during drainage in Berea sandstone at reservoir conditions. Water Resources Research. Issue10.PP7895–7914,
4. Andrew W K et al. (2019). Water properties under nano-scale confinement . Scientific Reports Journal ISSN8246, PP. 1-12
5. Ceratti D R et al .(2015). Critical effect of pore characteristics on capillary infiltration in mesoporous films. Cite this: Nanoscale N°7, PP 5371-5382.
6. Chapitre 3 : Phénomènes de surfaces.(2017).Université Frères Mentouri .PP30-41
7. Chikh H A .(2013). Etude De Possibilité De Création D'un Périmètre D'irrigation A Ain El Houtz. Thèse Master en Hydraulique. Université Abou Bekr Belkaid. PP 141.
8. Combeau A et Monnier C . Méthode & Etude de la Stabilité Structurale Application aux Sols Tropicaux . Reprinted from: SOLS AFRICAINS, N° 8 , PP 5-32 .
9. Ernest K (1998). La Matière Organique , Et La Stabilité Structurale D'horizons De Surface De Sols Ferrallitiques Argileux. Effet du mode de gestion des terres . Document Orstom Montpellier. N° 5.
10. Eslami F et Elliott J AW .(2019). Gibbsian Thermodynamic Study of Capillary Meniscus Depth. Scientific Reports Journal. N° 657,PP17.
11. Fabien S (2005). Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires. Thèse de Doctorat Université Montpellier II. PP140
12. Fabien S (2006). Etude micromécanique de la cohésion par capillarité dans les milieux granulaires humides. XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil Université Montpellier II.PP08
13. Gérard M et al Jean B.(2024). La stabilité de la structure du sol Originalité et actualité de l'approche de Stéphane Hénin. PP 61-73.
14. Germann P (2020). Viscosity Controls Rapid Infiltration and Drainage, Not the Macropores. Faculty of Science, Institute of Geography, University of Bern.PP16

15. Henriksson U et Eriksson JC (2004). Thermodynamics of Capillary Rise. Journal of chemical education.
16. Hill J, et al. (2013). Chemistry for Changing Times. Edition Pearson Higher. PP760
17. Jumikis A R (1957). The Effect of Freezing on a Capillar Meniscus. Highway Research Board Bulletin. No 168, PP 116-122.
18. Loretta J et Peter W (1998), Chimie : Molécules, matière, métamorphoses. Edition De Boeck.
19. Magnan J P ,(2024), Description, identification et classification des sols .PP 17
20. Min L , et al .(2020). Prediction of capillary suction in porous media based on micro-CT technology and B–C model. Journal Open Physics .ISSUE 18 .PP915–906
21. Nadiia M et al .(2017). Sur l’impact de la capillarité sur la résistance à l’échelle nanométriques, N°1976 .PP.1-9
22. Qiang L, et al . (2014) . On the impact of capillarity for strength at the nanoscale . Journal of Nature Communications, N°8, PP. 1241-1245.
23. Remadnia A .(1986). Etude de l’influence de la qualité des granulats locaux sur les propriétés des mélanges de béton et des bétons durcis dans les conditions des entreprises de préfabrication de la région de Annaba. Thèse de magistère université de Annaba. PP 180.
24. Smagin A V et Sadovnikova N B (2021). Capillary rise in polydisperse porous media and its modeling. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.PP 1755-1315,1
25. SZU-YIN C (2015). The Effect Of Pore Size And Porosi Oncapillary Pressure In Microporous Hydroxyapatite Samples. THESIS Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.
26. William A. Jury et Robert H (2004). Book Soil Physics. PP384 .
27. Yves P et Emmanuel V (2006). Two hundred years of capillarity research. Journal of Physics today. N°59 V 3, PP.39-44.

المراجع العربية:

1. أبو سمور، ح. 2009. الجغرافية الحيوية والتربة. دار المسيرة ،القاهرة.
2. عبد العال ش، ضيف م،شاهين ر، 2004-كيمياء الأراضي. دار الفكر العربي ،القاهرة.
3. حوبه أحمد، داهم محمد البشير، تحليل كيفية تأثيرالمياه الصاعدة على منشآت الري المنجزة بخرسانة رمل الكتبان، مذكرة ماستر ، جامعة الوادي، الجزائر، 2016.

4. ساكر عبد الرزاق، زيدي يحي، تحليل كيفية تأثير المياه الصاعدة على منشآت الري الخرساني ، مذكرة ماستر، جامعة الوادي، الجزائر.
5. حليس ي ،2007-الموسوعة العلمية لنباتات المنطقة الصحروية .مكتبة الوليد ،كونين ،الوادي، الجزائر.
6. نسيم م ،2006-استصلاح و تحسين الارضي الصحراوية . منشأة المعارف ، الإسكندرية.
7. عاشور م ،2006-ميكانيكا التربة ،دار العلوم للنشر و التوزيع. القاهرة.
8. كذلك م ،2001،مقدمة في زراعة الخضروات ، (التقسيم ، احتياجات النمو ،الحصاد والتخزين).منشأة المعارف ، الإسكندرية.
9. الادارة العامة لتصنيف وتطوير المناهج (2005) خواص التربة واختبارات التربة
10. فحوصات التربة (2003) سامي أحمد حجاوي
11. مأمون ش،دباب ع،(2017). دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية للتربة في ولاية الوادي ،مذكرة ماستر ،الجزائر

Site web :

1. Chapter 14: Forces Intermoléculaires et Changements de Phase .(2020). LINKE: Surface Tension, Viscosity, & Melting Point (youtube.com)
2. Forces Intermoléculaires : L'Influence de la Pi-connexion dans les Composés.(2024).LINKE:
Intermolecular Forces: The Influence of Pi-bonding in Compounds - FasterCapital
3. Ashenhurst J.(2022).Les quatre forces intermoléculaires et leur effet sur les points d'ébullition.LINKE:
The Four Intermolecular Forces and How They Affect Boiling Points (masterorganicchemistry.com)
4. AL-Zubun I.(2017).Explication du phénomène de tension superficielle. LINKE:
(mawdoo3.com) تفسير ظاهرة التوتر السطحي - موضوع
5. Unité 2: Propriétés des fluides, Physique du secondaire general (2011).LINKE:
(uobabylon.edu.iq) الفصل الرابع _خواص الموائع الساكنة 1
6. Humidité capillaire: qu'est-ce que c'est, symptômes et comment la combattre.(2024). linke: What is capillary dampness and how is it treated? Find out! (humilogic.com)
7. Physical properties.(2024). LINKE:
eLimu | Soil (e-limu.org)
8. Jacques B (2006). L'eau Et Le Sol. Université de Picardie Jules Verne/ Jacques Beauchamp Pédologie .
L'eau et le sol (u-picardie.fr)

Annexe

Annexe 01:

Colonne de sable + EC:

Cas N° 01

Tableau _1 _ Variation des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2 (20%)

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm)20%
2	8	6
4	11.2	8.5
6	12	10
10	13.5	11
15	14.4	12
30	16.5	14
45	17.5	15
60	19	16
90	20.5	17.5
120	21	18

Cas N° 02

Tableau _ 2 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2 (10%)

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm)10%
2	5.5	5
4	9	8
6	10.5	10
10	12.5	11.5
15	14	13
30	16	15
45	16.5	15.5
60	17.5	16
90	19	17.5
120	19.5	18

Cas N° 03

Tableau _ 3 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm)
2	6	5
4	7	7
6	9.5	9
10	11.5	11.5
15	13	12.5
30	15.5	15.5
45	16	16
60	17	17.5
90	18	18
120	18.5	18
1440	25.5	18

Cas N° 04

Tableau _ 4 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm)
2	6.8	7.5
4	9.5	10.5
6	11	11.5
10	13.5	11.5
15	15.5	11.5
30	17.5	11.5
45	19	11.5
60	19.5	12
90	20.5	12
120	21.5	13
150	22	13
180	22.5	13

Annexes

Cas N° 05

Tableau _ 5 _ : Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2

Temps (min)	Colonne 1 (Lb=5) (cm)	Colonne 2 (Lb=10) (cm)
2	7	6.5
4	7.5	10
6	7.5	11
10	7.5	12
15	7.5	12.5
30	7.5	12.5
45	7.5	12.5
60	7.5	12.5
90	7.5	12.5
120	7.5	12.5
150	7.5	12.5
170	7.5	12.5

Annexe 02:

Colonne de sable + argile :

Cas N° 01

Tableau _ 1_ Variation des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2 (20%)

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm) 20%
2	5.5	2
4	9.9	3
6	11.5	4.5
10	13.5	5.5
15	15.8	6.7
30	17.5	9
45	18.5	10.5
60	19.5	12.8
90	20.5	15.2
120	21	17.5
150	21.5	19

Cas N° 02

Tableau _ 2 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2 (10%)

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm) 10%
2	8	5
4	10.5	7.5
6	12.5	8.5
10	15	12
15	16	14
30	20	19.5
45	20.5	21.5
60	21	23.5
90	21.5	27.3
120	22	29.3
150	22.3	29.5
180	22.5	30
210	22.7	31.5
1440	26.5	38

Cas N° 03

Tableau _ 3 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2 (5%)

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 5%(cm)
2	6.5	4
4	9.5	7
6	11.2	9
10	13.5	12
15	15.5	16
30	18	21.3
45	19	24
60	20	25.5
90	20.5	28.5
120	21.5	30
150	22	31
180	23	32
210	23	33
1440	30.2	38

Cas N° 04

Tableau _ 4 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm)
2	3.6	4
4	8	5
6	10	6.5
10	12	9.7
15	14	12
30	16.6	16.5
45	17.5	16.6
60	18.5	16.6
90	19.5	16.9
120	20	17
150	20.3	17.1
180	20.6	17.1
210	21	17.4
1440	26	17.4

Cas N° 05

Tableau _5 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2

Temps (min)	Colonne 1 (Temoin) (cm)	Colonne 2 (cm)
2	5.5	4
4	8	6
6	10	7.5
10	12	10.5
15	14	12
30	16	12.1
45	17	12.2
60	17.5	12.2
90	18.5	12.3
120	19.5	12.3
150	20	12.3
180	21	12.4
210	22.9	12.6

Cas N° 06

Tableau _6 _ Changements des hauteurs d'eau dans la colonne 1 et 2

Temps (min)	Colonne 1 (Lb=5) (cm)	Colonne 2 (Lb=10) (cm)
2	7	7
4	7	7.5
6	7.1	9.5
10	7.2	12
15	7.4	12.2
30	7.4	12.3
45	7.4	12.4
60	7.4	12.4
90	7.5	12.5
120	7.6	12.6
150	7.6	12.6
180	7.7	12.7
210	7.7	12.7
1440	12.5	18