



People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Abdel Hamid Ibn Badis University of Mostaganem
Faculty of Sciences and Technology
Department of Civil Engineering



N° d'ordre: M...../GC /2024

Mémoire de Master académique

Filière: Génie Civil

Spécialité : structure

Simulation numérique du processus de désalinisation des sols par le traitement électrocinétique.

Présenté par :

BENSALAH MOHAMMED ABDELKADER

Président : Dr BELBACHIR Nasrine	Professeur	UMAB Mostaganem
Examineur : Dr BAHAR Sadek	Professeur	UMAB Mostaganem
Encadrante : LAREDJ Nadia	Professeur	UMAB Mostaganem
Co-Encadrant : Pr MALIKI Mustapha	Professeur	UMAB Mostaganem

Année Universitaire : 2023 / 2024

Remercîment

Chers tous,

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu, pour m'avoir accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire de fin d'études. Sans Sa bénédiction et Sa guidance, ce travail n'aurait pas été possible.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à Mme LAREDJ Nadia, ma professeure encadrante, pour son soutien inébranlable, ses conseils avisés et sa patience tout au long de ce projet. Sa compétence et son dévouement ont été une source d'inspiration et de motivation pour moi.

Mes remerciements vont également à monsieur MALIKI Mustapha, mon professeur co-encadrant, pour ses précieux conseils, son expertise et son engagement qui ont grandement contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je suis reconnaissant à Dr BAHAR Sadek, mon examinateur, pour avoir pris le temps d'examiner mon travail et pour ses commentaires constructifs qui ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Un grand merci à Dr BELBACHIR Nasrine, Présidente du jury, pour son rôle important dans l'évaluation de ce mémoire et pour ses remarques pertinentes.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à monsieur BELGHIT Boukhatem pour son aide précieuse et son soutien indéfectible tout au long de ce projet.

Enfin, je voudrais remercier du fond du cœur mes parents pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Sans eux, rien de tout cela n'aurait été possible. Je n'oublie pas non plus tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire. Leur soutien et leur aide ont été inestimables.

[MOHAMMED ABDELKADER BENSALAH]

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents bien-aimés, dont l'amour, le soutien et les sacrifices incessants ont été ma source de motivation et de persévérance. Leur confiance en moi et leur encouragement constant m'ont permis de surmonter tous les obstacles rencontrés sur ce chemin.

À mes sœurs et frère, pour leur affection inébranlable et leur soutien indéfectible. Vous avez toujours été là pour moi, m'apportant réconfort et encouragement dans les moments difficiles. Votre présence m'a donné la force de continuer à avancer.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leur compréhension et leur soutien précieux. Vous avez été une source constante de motivation et de positivité tout au long de cette aventure académique.

Et enfin, à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin, par leurs conseils, leur soutien moral ou matériel. Votre contribution a été essentielle à la réalisation de ce travail, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Avec toute ma reconnaissance,

[BENSALAH MOHAMMED ABDELKADER]

Résumé

Ce mémoire de fin d'études traite de la salinisation des sols, un phénomène préoccupant aux conséquences néfastes sur les constructions et l'environnement. Dans un premier temps, il aborde les propriétés des sols et leur importance dans le processus de salinisation. Ensuite, il explore en détail le phénomène de salinisation des sols, ses causes, ses effets et ses implications. Enfin, une attention particulière est portée sur le traitement électrocinétique des sols, notamment à travers une simulation numérique des écoulements électroosmotiques dans les milieux poreux. Ce mémoire vise à approfondir les connaissances sur la salinisation des sols et à proposer des solutions innovantes pour sa prévention et son traitement.

Mots-Clés : Salinisation, propriétés des sols, traitement électrocinétique, simulation numérique, écoulements électroosmotiques.

Abstract

This university dissertation focuses on soil salinization, a concerning phenomenon with detrimental impacts on constructions and the environment. Firstly, it discusses soil properties and their significance in the process of salinization. Subsequently, it delves into the phenomenon of soil salinization, its causes, effects, and implications. Lastly, it pays particular attention to the electrokinetic treatment of soils, including a numerical simulation of electroosmotic flows in porous media. This dissertation aims to deepen our understanding of soil salinization and propose innovative solutions for its prevention and treatment.

Keywords: Salinization, soil properties, electrokinetic treatment, numerical simulation, electroosmotic flows

ملخص

يتناول هذا البحث الجامعي موضوع تملح التربة، وهو ظاهرة مقلقة بتأثيرات ضارة على البنايات والبيئة. أولاً، يناقش البحث خصائص التربة وأهميتها في عملية تملح التربة. ثم، يستكشف بالتفصيل ظاهرة تملح التربة، أسبابها وتأثيراتها وتداعياتها. وأخيراً، يولي اهتماماً خاصاً لعلاج التربة باستخدام التيار الكهربائي، بما في ذلك محاكاة عددية لتدفقات عكارة الكهرباء في الوسط المسامي. يهدف هذا البحث إلى تعميق فهمنا لتملح التربة واقتراح حلول مبتكرة لمنعها ومعالجته

الكلمات الرئيسية: تملح التربة، خصائص التربة، العلاج الإلكتروني، المحاكاة الرقمية، تدفقات الكهرباء الساكنة في التربة

Chapitre 01 : propriétés physiques des sols

1.Introduction	3
1.1 Définition du terme Sol	3
1.2 Types des sols	4
1.2.1 Sols sableux	4
1.2.2 Sol limoneux	5
1.2.3 Sol argileux	6
1.3 Identification des sols	7
1.3.1 Observation visuelle et tactile	10
1.3.2 Analyse granulométrique	11
1.3.3 Classification grossier ou fine.....	12
1.3.4 Limite d'atterberg.....	16
1.3.5 Essai proctor.....	16
1.3.6 Analyse hydrométrique	17
1.4 Paramètres physiques des sols.....	18
1.4.1 Texture du sol	19
1.4.2 Structure d'un sol	20
1.4.3 Porosité du sol	21
1.4.4 Densité apparente	23
1.4.5 Densité de la phase solide (densité réelle)	24
1.4.6 Capacité de rétention	24
1.4.7 Ph du sol.....	25
1.4.8 Conductivite hydraulique.....	26
1.5 Perméabilité du sol	27
1.6 Capillarité	28
1.6.1 Montée capillaire	29
1.6.2 Influence sur le sol	29
1.6.3 Variation avec la texture du sol	29
1.6.4 Degré de saturation du sol	30

1.7 Loi de Darcy30

Chapitre 2 : Salinisation des sol

2.1. Introduction 34

2.1.1. Définition 34

2.2. Classification des sols salins 35

2.3. Grandeurs utilisées pour caractériser les sols sales 36

2.3.1. Conductivité électrique..... 36

2.3.2. Analyse chimique 36

2.4 Types de salinisation..... 38

2.4.1. Salinisation naturelle..... 38

2.4.2. Salinisation secondaire..... 39

2.4.3. Salinisation directe 39

2.5 Origine de la salinisation..... 39

2.5.1. Causes naturelles..... 39

2.5.2. Causes humaines..... 41

2.5.3. L'impacte de la salinisation sur les ouvrages.....42

2.5.4. Ouvrages affectés par la salinisation 44

2.6. Salinisation des sols au monde 48

2.6.1 Salinisation des sols en algerie..... 49

2.6.2 Sodisation..... 50

2.6.3. Mouvement des sels dans le sol..... 51

2.7. Construction sur un sol salin..... 54

2.7.1. Choix des matériaux 52

2.7.2. Drainage efficace..... 53

2.8. Stratégies pour les sols salins	56
2.9. Conclusion.....	61

Chapitre 03 : Traitement électrocinétique

3.1 Introduction	63
3.1.1 Définition	63
3.1.2 Principe	63
3.1.3 Avantages	64
3.1.4 Inconvénients	64
3.2 Contaminants éliminés lors de la décontamination électrocinétique	64
3.3 Travaux réalisés sur la désalinisation par le traitement électrochimique.....	65
3.4 Mécanismes de traitement électrocinétique	65
3.4.1. Electrolyse.....	66
3.4.2. Electrophorèse.....	67
3.4.3. Electromigration.....	67
3.4.5. L'électro-osmose.....	68
3.5. Transferts induits lors du traitement electrochimique	70
3.5.1. Transfert hydraulique	70
3.5.2. Transfert chimique	72
3.5.3. Transfert électrique.....	73
3.6 Conclusion	77

Chapitre 04 : Simulation numérique des écoulements électroosmotiques dans des milieux poreux

4.1. Présentation du logiciel COMSOL-Multiphysiques	79
4.2. Simulation numérique	79
4.3. Étude paramétrique	82
4.3.1. Répartition du flux	82
4.3.2. Le champ de concentration	83
4.3.3. Effet de la variation du potentiel électrique	85
4.3.4. Effet de la variation de porosité sur la concentration	86
4.4. Conclusion.....	89

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1-01 differant types des sols.....	4
figure 1-02 sol sableux.....	5
figure 1-03 sol limoneux.....	7
figure 1-04 construire sur un terrain argileux	8
figure 1-05 tamis normalise	13
figure 1-06 materiel necessaire pour realise l'essaie	18
figure 1-07 triangle de textures.....	21
figure 1-08 schema de structure du sol.....	22
figure 1-09 macropores et micropores	23
figure 1-10 methode de double anneau.....	27
figure 1-11 methode du lysimetre.....	27
figure 1-12 permeabilite d'un sol en fonction de sa granulometrie	28
figure 1-13 les remontees capillaires	30
figure 1-14 schema de l'equipement utilise par darcy	32

Chapitre 02

figure 2-1 l'accumulation de sel de l'eau chargee de sel percolant jusqu'a la surface.....	35
figure 2.2 l'analyse chimique des sols	38

figure 2.3 une cartographie exploratoire de l'offre et la demande de regulation des crues par les ecosystemes en france metropolitaine	39
figure 2.4 diagramme conceptuel de l'aquifere.....	41
figure2.5. Degradation de la couche de roulement d'une route en raison de la remontee d'eau saline.....	44
figure 2.6. Corrosion des armatures d'un poteau beton	44
figure2.7. Retrait-gonflement des argiles	45
figure2.8. L'effet de la corrosion sur les structures metalliques	47
figure 2.9 l'humidite dans la maison	48
figure 2.10. Repartition des sols salins dans le monde.....	50
figure 2.11. La repartition des sols salins en algerie (inside, 2008)	51
figure 2.12. Armature en acier inoxydable	54
figure 2.13. Étude geotechnique	56
figure 2.14. Decontamination des sols et de l'eau souterraine.....	59
figure 2.15. Schema de principe du pompage et traitement.	59
figure 2.16. Illustration de l'influence du pompage sur les ecoulements piezometriques.....	60
figure 2.17. Schema de principe de l'excavation.....	61

Chapitre 03

figure 3.1. Electrolyse de l'eau.....	68
---------------------------------------	----

figure 3.2. Comparaison entre l'écoulement electro osmotique et l'écoulement hydraulique... 70	70
(casa grande, 1951).....	70
figure 3.3. Courant électrique	76

Chapitre 04

figure 4.1 : le domaine modelise est constitue d'un electrolyte contenu dans une structure poreuse et de deux electrodes qui generent un champ électrique.....	82
figure 4.2 : distributions de vitesse dans la cellule avec un champ électrique applique (en haut) et une différence de pression appliquée (en bas). L'unité pour le trace de la surface de magnitude est le mm/s.	85
figure 4.3 : distribution des concentrations a differents instants apres injection. Les effets de diffusion, de convection et de migration deforment l'impulsion initiale en forme de cloche... 86	86
figure 4.4 : trace en coupe transversale de la concentration le long d'une ligne horizontale a $y = 2,5$ mm pour les temps $t = 0$ (solide bleu), 0,5 s, 1,0 s, 1,5 s et 2,0 s	87
figure 4.5 : effet de la variation du potentiel électrique sur la concentration a 2 secondes	88
figure 4.6. Effet de la variation de la porosite sur la concentration a 2 secondes.....	89
figure 4.7 effet de variation de la taille des pores a 2 secondes.....	90

Liste des tableaux

- Tableau 2.1 Echelle de la salinité en fonction de la conductivité électrique (aubert, 1975)
- Tableau 2.2 répartition des sols salins et sodique dans le monde (marlet et job, 2006)
- Tableau 3.1 le coefficient électroosmotique en fonction des différents types de sol (asadi et al., 2013)

Listes des symboles

U. Vitesse (m/s)

i. Vecteur densité de courant (A/m²)

ϵ_p . Porosité

a. Rayon moyen des pores (m)

μ . Viscosité dynamique du fluide (Pa·s)

τ . Tortuosité de la structure poreuse

ϵ_w . Permittivité du fluide (F/m)

p. Pression (Pa)

ζ . Potentiel zêta (V)

κ . Conductivité (S/m)

c. Concentration (mol/m³)

D. Diffusivité du traceur (m²/s)

z. Numéro de charge du traceur

F. Constante de Faraday (C/mol)

R. Constante du gaz (J/(mol·K))

T. Température (K)

c_{top} . Concentration maximale

x_m . Position du pic le long de l'axe x

p_w . Largeur de base du pic

Introduction générale

Ce mémoire explore les différents aspects de la salinisation des sols, ses causes, ses impacts et les méthodes de traitement. Le chapitre sur les propriétés physiques des sols met en évidence la corrélation entre la texture du sol, sa structure et ses paramètres physiques, comme la capacité de rétention en eau et la perméabilité. Ensuite, il aborde la salinisation des sols, en détaillant les causes naturelles et anthropiques de cette accumulation excessive de sels. Les impacts de la salinisation sur l'environnement et les structures sont également discutés, soulignant les défis posés par cette dégradation.

Le traitement électrocinétique est présenté comme une méthode innovante pour décontaminer les sols pollués par des métaux lourds. Cette technique repose sur l'application d'un courant électrique pour déplacer les contaminants vers les électrodes opposées, facilitant leur extraction du sol. Les avantages de cette méthode incluent son caractère non polluant et son efficacité pour éliminer divers contaminants.

le mémoire examine différentes techniques de remédiation des sols, comme la bioremédiation et le lessivage ex-situ. La bioremédiation utilise des micro-organismes pour décomposer les polluants en substances inoffensives, tandis que le lessivage ex-situ implique le traitement des sols contaminés en dehors de leur emplacement d'origine. Ces méthodes offrent des alternatives durables et respectueuses de l'environnement pour traiter la pollution des sols.

De plus, une simulation numérique de l'écoulement électroosmotique a été réalisée pour analyser l'influence de divers paramètres électrochimiques et structuraux sur la distribution de la concentration. Les figures montrent que des potentiels électriques variés, la porosité et la taille des pores affectent de manière significative la répartition de la concentration. Ces résultats confirment l'importance cruciale des conditions électrochimiques et des caractéristiques structurelles dans la détermination de la distribution de la concentration dans des systèmes complexes.

Ce mémoire fournit ainsi une analyse détaillée des défis posés par la salinisation des sols et propose des solutions innovantes pour leur gestion et leur remédiation, contribuant ainsi à la protection et à la durabilité des écosystèmes

Chapitre 01

Propriétés physiques des sols

1. Introduction

Dans l'univers complexe du génie civil, la compréhension des propriétés physiques du sol s'avère essentielle. Chaque construction, qu'elle soit destinée à la résidence, au commerce ou à l'industrie, repose littéralement sur les fondations permises par le sol qui l'accueille. L'objectif de cette étude est de dévoiler les mystères et la complexité du sol en tant que matériau de fondation, en mettant l'accent sur ses propriétés physiques telles que la texture, la porosité, la densité, et la capacité de charge.

Ces caractéristiques ne sont pas seulement cruciales pour la stabilité structurelle, mais elles influencent également les choix de conception et les techniques de construction adaptées. Par conséquent, une analyse détaillée des propriétés physiques du sol permettra non seulement de prévenir d'éventuels échecs structuraux, mais apportera également des données précieuses pour optimiser la durabilité et la rentabilité des projets de génie civil. (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. - An Introduction to Geotechnical Engineering).

1.1. Définition du terme sol

Le terme "sol" dans le contexte du génie civil fait référence à toute matière non consolidée ou légèrement consolidée se trouvant à la surface immédiate de la terre, et qui peut inclure des minéraux et des particules organiques, des gaz, des liquides et des organismes vivants. Dans l'ingénierie civile, le sol sert généralement de support pour les structures, telles que les fondations des bâtiments, des ponts, des routes, et il est aussi un élément critique dans la conception des remblais pour les barrages et les digues.

Du point de vue académique, on peut définir le sol comme étant une accumulation naturelle non consolidée de particules solides produites par la désagrégation chimique et physique des roches, mélangée, dans certains cas, avec de la matière organique. Les sols peuvent varier en taille, allant des particules fines, comme l'argile et le limon, aux particules grossières comme le sable et le gravier. Ils comprennent également diverses quantités d'eau et d'air entre les particules solides. Les propriétés géotechniques du sol, comme la capacité portante, la compressibilité et la perméabilité, déterminent son aptitude à soutenir des structures et sont essentielles pour la conception et la construction. (Coduto, D. P., Yeung, M. C., & Kitch, W. A. - Geotechnical Engineering: Principles and Practices)

1.2. Types des sols

Les types de sols sont classés en fonction de leur composition et de leur structure. Les principaux types de sols sont (figure 1-01)



Figure 1-01 différent types des sols

1.2.1. Sols sableux

Les sols sableux, aussi appelés sols siliceux (figure 1-02), sont bien aérés, faciles à travailler mais aussi très perméable. L'eau y passe comme dans un filtre entraînant avec elle les matières minérales fertilisantes, c'est pourquoi ils sont pauvres en éléments nutritifs. Les sols sableux, dans le domaine du génie civil, sont des sols qui se composent principalement de particules de sable. Ces sols présentent des caractéristiques spécifiques en termes de comportement mécanique et de propriétés géotechniques. En génie civil, les sols sableux sont souvent classés en fonction de leur granulométrie et de leur teneur en argile. Ils sont généralement moins sensibles aux opérations de compactage et d'excavation que les sols argileux. Les sols sableux peuvent nécessiter des techniques spécifiques pour leur amélioration et leur stabilisation lors de projets de construction ou d'infrastructures (Mitchell, J. K., & Soga, K. - Fundamentals of Soil Behavior) Les sols sableux sont faciles à reconnaître. Au toucher, une poignée de terre n'a pas de cohésion, similaire à serrer le poing sur du sable. Ce type de sol est léger et sa couleur est intermédiaire, ni sombre ni claire

Un sol sableux est un sol dont la répartition des différents composants est :

argile : 0-10%

limon : 0-15%

sable : 85-100%

Les sols sableux sont très perméables à l'eau et à l'air, se réchauffent rapidement, et sont faciles à travailler. Ces caractéristiques en font un atout précieux en hiver, permettant à de nombreuses plantes de survivre même par temps froid (Das, B. M. - Principles of Geotechnical Engineering) .



Figure 1-02 sol sableux

Le sol sableux comprend plus de 60 % de sable, c'est donc un sol sec qui ne retient pas l'eau. Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale (essentiellement des roches) ou organique (coquilles, squelettes de coraux, etc.) Dont la dimension est comprise entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires ces sols retiennent peu l'eau et les éléments nutritifs mais sont peu sensibles au tassement et permettent un bon enracinement des cultures. Un sol sableux est très facile à identifier : lorsque vous en prenez un poignée il n'y pas de cohésion entre les éléments constitutifs du sol, exactement comme lorsque vous attrapez une poignée de sable. Il a tendance à crisser sous le doigt ou craquer sous la dent. Les sols sableux sont souvent secs, pauvres en substances nutritives et très drainants. Ils sont peu (ou pas du tout) aptes à transporter l'eau jusqu'aux couches profondes par capillarités. Par conséquent, le travail des sols sableux au printemps, doit être réduit au minimum pour conserver l'humidité dans le lit de semences. La capacité des sols sableux à retenir les substances nutritives et l'eau peut être améliorée par un apport en matière organique pour améliorer un sol sableux, il faut avant tout apporter régulièrement un maximum de matière organique qui va jouer un rôle d'éponge naturelle pour retenir l'eau et les éléments nutritifs. L'arrosage sera moindre mais plus fréquent pour éviter le lessivage. Les sols sableux sont moins sensibles aux opérations de génie civil et d'excavation par rapport à d'autres types de sols. Lorsqu'ils sont compactés, les sols sableux peuvent être ameublés mécaniquement, mais cette modification est de courte durée, surtout lorsque la proportion d'argile est inférieure à 12-15%. Afin de stabiliser les sols sableux, il est recommandé de les associer à une mise en herbe. Les sols sableux présentent une stratification naturelle en sables plus grossiers ou plus fins, résultant de divers épisodes géologiques (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. - *An Introduction to Geotechnical Engineering) .

1.2.2. Sol limoneux

Un sol limoneux est un sol riche en limons (figure 1-03). Ils se caractérisent par leur capacité à laisser circuler l'air et l'eau ce sol particulier a été déposé par les alluvions constitué d'éléments issus de l'altération des roches, il présente des éléments riches mais particulièrement sensibles au tassement et susceptibles de former une croûte de battance.

Un sol limoneux est un sol dont la répartition des différents composants est :

argile : 8-28%

limon : 28-50%

sable : 22-52%

Sur le plan des propriétés géotechniques, les sols limoneux ont généralement une limite de liquidité (w_l) comprise entre 10 et 30% et un indice de plasticité (i_p) entre 5 et 15%

Le sol limoneux accumule plus de 35 % de limon et contient moins de 10 % d'argile. En géologie et en pédologie, un limon est une formation sédimentaire dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables c'est-à-dire entre 2 et 63 micromètres (les limites précises peuvent varier quelque peu suivant les laboratoires). Un dépôt majoritairement limoneux peut être qualifié de limon. En géologie, on utilise souvent l'anglicisme silt pour désigner les limons.

Le limon est l'ultime produit de l'érosion fluviale des roches du bassin versant des rivières. Les particules limoneuses sont ainsi constituées de débris très fins de quartz, de mica et de feldspath, voire de minéraux argileux.

Les limons caractérisent les dépôts éoliens de lœss, aussi nommés « limon des plateaux », et sont fréquents dans des dépôts alluviaux. Dans ce dernier cas, les particules limoneuses libèrent des éléments nutritifs qui ont un intérêt majeur pour le renouvellement de la fertilité des sols et donc pour leur exploitation agricole.

Les limons étant souvent en suspension dans l'eau, ils peuvent contribuer à sa turbidité.

Selon sa texture, on parle de « limon léger » ou de « limon moyen ». (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. - *Geotechnical Engineering: Principles and Practices) .

➤ Reconnaître un sol limoneux

L'aspect d'un sol limoneux est doux au toucher et poudreux lorsqu'il sèche. Il est léger et facile à travailler. Au toucher, le doigt y laisse une belle empreinte digitale. L'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée

de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et calcium. Des engrais verts et une couverture du sol sont bénéfiques et parfaitement adaptés à ce type de sol. Ainsi que sa rétention d'eau est moyenne. (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. - *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*)..



Figure 1-03 sol limoneux

1.2.3. Sol argileux

En géologie, on appelle "argile" les minéraux d'une roche qui mesurent moins de 2 μm (micromètres). La terre argileuse est donc composée d'un grand nombre de minuscules particules de roche. Il est le plus souvent riche en éléments fertilisants et retient l'eau mais est lourd et compact, peu drainé, et lent à se réchauffer. Il est dur à travailler.

Un sol argileux (**figure 1-04**) est un sol dont la répartition des différents composants est :

- argile : 40-100%
- limon : 0-40%
- sable : 0-45%

Le sol argileux comprend plus de 40 % d'argile. Constitués d'argiles granulométriques et minéralogiques, les sols argileux, peuvent entraîner des difficultés telle que la formation d'un horizon de sol imperméable, lourd et collant.

L'argile désigne une matière rocheuse naturelle à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths. Elle peut être une matière localement abondante, très diverse, traitée ou raffinée avant emploi, à la fois meuble ou plastique (souvent après addition d'eau) ou à pouvoir desséchant, absorbant ou dégraissant, voire à propriétés collantes ou encore réfractaires, pour servir par exemple autrefois selon des usages spécifiques, souvent anciens, au

potier et au briquetier, au maçon et au peintre, au teinturier et au drapier, au verrier et à l'ouvrier céramiste.

En réalité, le terme issu du latin (*argilla*) peut s'appliquer au choix à un minéral argileux et à un ensemble de minéraux argileux, ainsi qu'à diverses roches composées pour l'essentiel de ces minéraux.. Les argiles sont des roches sédimentaires clastiques. Lorsqu'elles renferment du calcaire, trois sous-classes sont définies entre le pôle argile et le pôle calcaire en fonction de l'augmentation de la teneur en calcaire : argile calcaire puis marne et enfin calcaire argileux.

Les argiles riches en silice gélatineuse, soluble dans les alcalis, se nomment gaizes. Le limon ou le lehm désignent des argiles renfermant des particules siliceuses et accessoirement des pigments minéraux comme la limonite ou la goethite. Le loess est un dépôt de couleur composé principalement d'argiles et de fines particules calcaires et siliceuses. Les sols argileux jouent un rôle crucial dans le domaine du génie civil en raison de leurs propriétés particulières. Ces sols présentent une faible perméabilité, jusqu'à un million de fois plus faible que celle des sables, ce qui les rend très intéressants pour diverses applications en génie civil. Les argiles sont omniprésentes dans la nature et sont utilisées dans la construction de grands ouvrages, formant souvent le sous-sol des agglomérations urbaines. Malgré les défis qu'elles posent, les techniciens du génie civil parviennent à les utiliser en mettant en œuvre des mesures spécifiques pour adapter le dimensionnement des ouvrages, renforcer les fondations ou traiter le sol. Les argiles ont également une longue histoire d'utilisation, allant de la poterie à la pharmacopée et à la cosmétique, démontrant ainsi leur polyvalence et leur importance dans de nombreux domaines de la vie quotidienne (Das, B. M. - *Principles of Geotechnical Engineering) .



Figure 1-04 construire sur un terrain argileux

Reconnaitre un sol argileux

- **Analyse de la taille des particules** : les sols argileux sont caractérisés par des particules de très petite taille, généralement inférieures à 2 microns. Cette finesse des grains est un critère clé pour les identifier.
- **Évaluation des propriétés physiques** : les sols argileux présentent des propriétés particulières comme une faible perméabilité (jusqu'à un million de fois plus faible que les sables) une forte capacité de retrait/gonflement en fonction de la teneur en eau et une plasticité élevée
- **Identification des minéraux argileux** : les argiles sont composées de minéraux argileux spécifiques comme la kaolinite, la montmorillonite ou l'illite leur identification permet de caractériser précisément la nature du sol .
- **Reconnaissance visuelle et tactile** : selon les sources, les sols argileux peuvent être identifiés par leur aspect lisse et collant au toucher, ainsi que leur couleur généralement grise ou bleutée (9) .
- **Analyse en laboratoire** : des tests en laboratoire comme des analyses granulométriques, des limites d'atterberg ou des essais odométriques permettent de confirmer la nature argileuse d'un sol de manière plus approfondie .

En résumé, l'identification des sols argileux en génie civil repose sur une combinaison d'observations physiques, d'analyses minéralogiques et d'essais en laboratoire afin de bien caractériser leurs propriétés spécifiques. (Craig, R. F. - *Craig's Soil Mechanics) .

➤ Avantages des sols argileux

- **Capacité à identifier des sols argileux**: les sols argileux peuvent être identifiés avec précision, permettant de recommander des fondations plus profondes pour assurer la stabilité des constructions .
- **Polyvalence et abondance** : les argiles sont des matériaux naturels polyvalents et abondants, utilisés dans la construction de divers ouvrages.
- **Adaptabilité des fondations** : les géotechniciens peuvent ajuster les recommandations de fondation en fonction des caractéristiques spécifiques du sol argileux, assurant ainsi une meilleure adaptation aux conditions locales.

➤ Inconvénients des sols argileux

- **Retrait et gonflement** : les sols argileux peuvent subir des variations de volume en fonction de leur teneur en eau, ce qui peut entraîner des mouvements du sol et des risques pour les constructions.
- **Complexité de gestion**: la gestion des sols argileux nécessite des mesures spécifiques et parfois des fondations plus profondes pour assurer la stabilité des structures.
- **Risque de surcoûts et sinistres**: une mauvaise évaluation des risques liés aux sols argileux peut entraîner des surcoûts ou des risques de sinistres pour les constructions.

En résumé, les sols argileux offrent une base solide pour la construction, mais leur gestion nécessite une expertise spécifique pour minimiser les risques potentiels liés à leur comportement particulier.

1.3. Identification des sols

L'identification des sols est une étape fondamentale dans les études géotechniques en génie civil. Elle permet de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des matériaux de fondation, et oriente ainsi les prises de décision en termes de conception de structures. Voici les principales méthodes utilisées pour l'identification des sols (Lambe, T. W., & Whitman, R. V. - *Soil Mechanics).

1.3.1. Observation visuelle et tactile

c'est le moyen le plus élémentaire pour commencer à classer les sols. On peut déterminer la texture du sol (sable, limon, argile, etc.) Grâce à son apparence et à la sensation au toucher. Par exemple, un sol argileux est généralement collant et malléable lorsqu'il est humide. (Lambe, T. W., & Whitman, R. V. - *Soil Mechanics).

1.3.2. Analyse granulométrique

l'analyse granulométrique est la mesure de la taille des particules solides primaires provenant du sol et des sédiments. Les différentes tailles de particules sont déterminées soit par leur capacité à passer à travers différents tamis à mailles, soit par leur taux de sédimentation dans l'eau. Les tailles sont généralement représentées par les poids relatifs des particules dans les classes indiquées. Les limites de ces classes diffèrent selon les divers systèmes de classification couramment utilisés.

La distribution de la taille des particules est l'une des caractéristiques les plus stables du sol ou des sédiments, et constitue un facteur de contrôle important pour des caractéristiques telles que

- La porosité .
- La perméabilité .
- La capacité de rétention d'eau .
- Le potentiel de lixiviation .
- Les stocks de nutriments échangeables .
- L'échange cationique .
- Le comportement de désintégration .
- La sensibilité au vent et au transport par eau .
- Le comportement mécanique et géotechnique du sol.

L'analyse granulométrique des sédiments en suspension et de fond des lacs et des cours d'eau peut être utilisée pour aider à déterminer les relations entre la qualité de l'eau, les populations de flore et de faune et les caractéristiques des sédiments de fond. Le fractionnement des sols et des sédiments en différentes classes de taille peut également être utile pour la corrélation entre la texture du sol et sa concentration en polluants. De plus, l'analyse granulométrique est une condition préalable utile et parfois nécessaire à l'installation d'une fosse septique. (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. - *Geotechnical Engineering: Principles and Practices).

- **Méthode du tamis et de la pipette** dans la méthode du tamis et de la pipette, une aliquote de 30 ml d'échantillon de sol est traitée au peroxyde d'hydrogène pour éliminer l'excès de matière organique. L'échantillon est ensuite passé dans un tamis de 63 μm et soigneusement lavé pour éliminer les particules fines. La fraction liquide qui contient des particules inférieures à 63 μm est destinée à l'analyse à la pipette. Les solides du tamis de 63 μm sont séchés et passent à travers un nid de tamis dont les ouvertures sont successivement plus petites de haut en bas pour séparer les particules les plus grossières. Les fines particules qui en résultent et qui passent à travers tous les tamis sont ajoutées à la fraction aqueuse. Cette fraction est agitée pour remettre les particules en suspension et une pipette est utilisée pour extraire les aliquotes à une profondeur constante et à des temps de décantation variés. Conformément à la loi de Stokes, cela est conçu pour représenter des particules de diamètres spécifiques en fonction du taux de décantation de chaque fraction. La méthode du tamis et de la pipette utilise le système de classification de Wentworth, qui décompose la structure du sol en niveaux de gravier, de sable, de limon, d'argile et de phi. Ce système de classification est le plus couramment utilisé en Amérique du Nord et est recommandé pour les sols et sédiments environnementaux. (Das, B. M. - *Principles of Geotechnical Engineering)

- **Méthode de l'hydromètre** la méthode de l'hydromètre utilise le système canadien de classification des sols pour le sable, le limon et l'argile. Cette méthode est moins précise que la méthode du tamis et de la pipette et est généralement utilisée pour déterminer la texture du sol sur des échantillons qui n'ont subi aucun prétraitement. Dans cette méthode, une aliquote de 40 g d'échantillon de sol est traitée avec une solution de dispersion et placée sur un agitateur à plat pour désagréger les particules de sol. L'échantillon est ensuite passé dans un tamis de 2000 μm . Les solides retenus dans le tamis sont séchés et pesés pour déterminer le pourcentage de gravier. La solution passe à travers le tamis et est recueillie dans un cylindre de sédimentation pour se stabiliser pendant la nuit. L'échantillon est mélangé dans le cylindre de sédimentation et les lectures de l'hydromètre sont prises à 40 secondes et 7 heures. La lecture de l'hydromètre décompose les niveaux de sable, de limon, d'argile et d'humidité dans l'échantillon. (Das, B. M. - *Principles of Geotechnical Engineering)

1.3.3. Classification grossier ou fine

Les organismes de réglementation (dont le ccme, le piri de l'atlantique, le mecc de l'ontario, l'aenv et le mescc de la colombie-britannique) ont élaboré des critères de référence distincts pour la qualité des sols et des eaux souterraines sur la base de la texture du sol (c'est-à-dire les sols grossiers et fins). Le sol ou les sédiments peuvent être classés comme grossiers ou fins grâce à une simple analyse basée sur le tamisage humide avec un seul tamis

Cette méthode repose sur le passage de l'échantillon de sol à travers une série de tamis avec des ouvertures de différentes tailles (*figure 1-05*) elle sert à déterminer la distribution de la taille des particules du sol et à classer le sol en fonction de sa texture.

Système unifié de classification des sols (USC)	
Cailloux	3 in. (76,2)
Gravier grossier	3/4 in. (19,0)
Gravier fin	N° 4 (4,76)
Sable grossier	N° 10 (2,0)
Sable moyen	N° 40 (0,425)
Sable fin	N° 200 (0,075)
Fins ¹	

Tamis normalisés des Etats-Unis
(diamètre minimal des particules arrêtées sur le tamis en millimètres)

¹ Limon (silt) et argile

Figure 1-05 tamis normalisé

1.3.3.1. Classes de sols

Le guide des terrassements routiers (gtr) propose de classer les sols en différentes familles. Cette classification est adaptée à l'utilisation des sols dans la construction de remblais et de couches de forme.

➤ Classe a

La classe a regroupe les sols fins.

Un sol est en classe a si :

- Le diamètre des plus gros éléments est inférieur ou égal à 50 mm
- Le passant à 80 µm est compris entre 35 % et 100 %
- La connaissance complémentaire de l'ipi, ou de la vbs, permet dans le tableau ci-dessous de déterminer si on se trouve en sous-classe a1, a2, a3 ou a4

1 Sol avec $D_{max} \leq 50$ mm

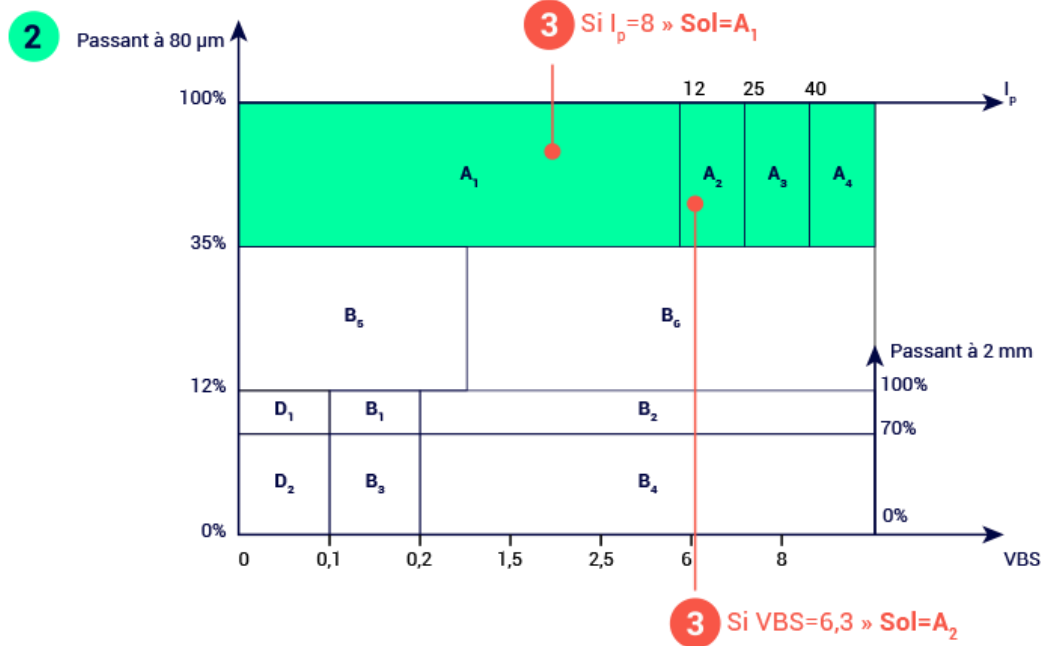


Diagramme de classification des sols avec $D_{max} \leq 50$ mm

➤ **Classe b**

La classe b regroupe les sols sableux et graveleux avec fines.

Un sol est en classe b si :

- Le diamètre des plus gros éléments est inférieur ou égal à 50 mm
- Le passant à 80 μ m est inférieur à 35 % pour les sous classes
- La connaissance combinée de l'ipi, ou de la vbs, et du passant à 2 mm, dans le tableau ci-dessous, permet de déterminer si on se trouve en sous classe b1, b2, b3, b4, b5 ou b6

1 Sol avec $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$

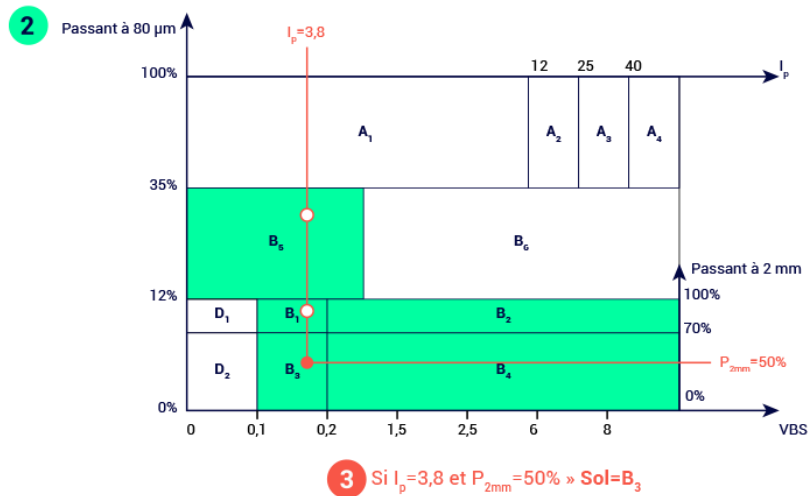


Diagramme de classification des sols

➤ La classe c

La classe c regroupe les comportant des fines et des gros éléments.

Un sol est en classe c si :

- Le diamètre des plus gros éléments est supérieur à 50 mm
- Le passant à 80 μm est supérieur à 12 % ou le vbs supérieur à 0,1
- L'analyse de la fraction granulométrique 0/50 et l'observation des granulats de composition (roulés et anguleux) permettent ensuite de conclure à l'aide du tableau ci-dessous quant à la catégorie c1 ou c2

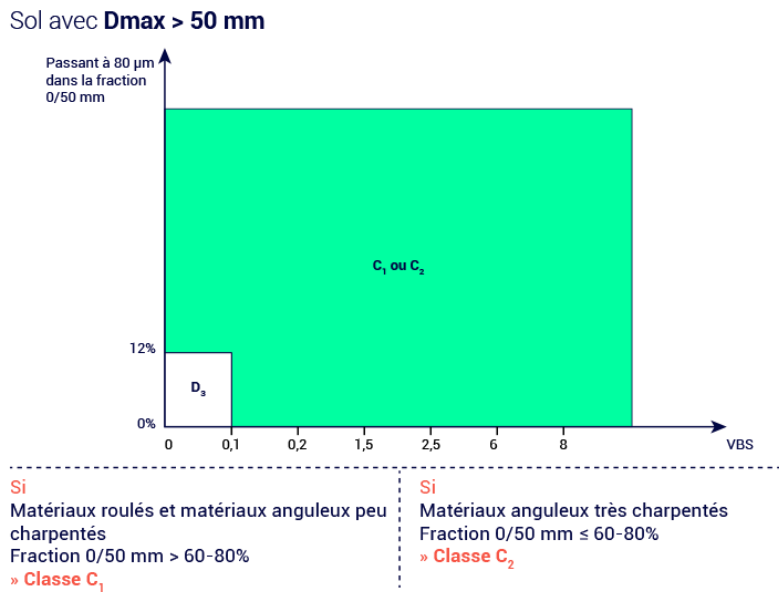


Diagramme de classification des sols avec $D_{max} > 50 \text{ mm}$

➤ Classe d

La classe d réunit les sols insensibles à l'eau.

Pour savoir si un sol est à ranger en classe d, il faut :

- Regarder le diamètre des plus gros éléments pour choisir le tableau à consulter
- Disposer de la vbs (entre 0 et 0,1) et éventuellement de la valeur du passant à $80 \mu\text{m}$ (entre 0 et 12 %) pour lire sur le tableau ci-dessous la catégorie recherchée d1, d2 ou d3

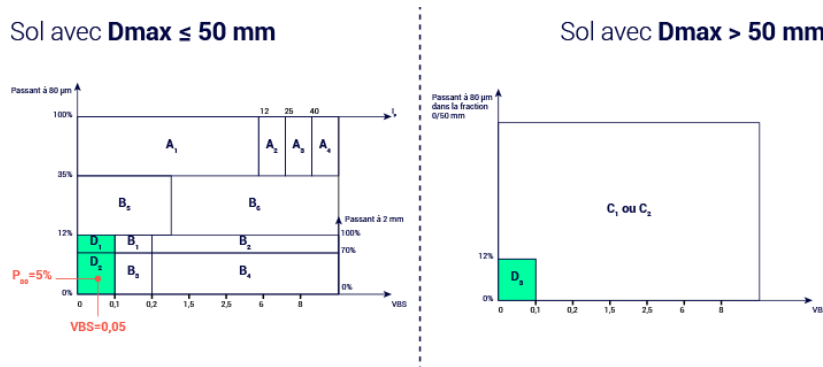


Diagramme de classification des sols

➤ Classe r

La classe r regroupe les roches.

Elles se décomposent en 2 grandes catégories :

- Les roches sédimentaires, elles-mêmes subdivisées en sous catégories r1 à r5
- Les roches magmatiques et métamorphiques regroupées en catégorie r6

1.3.4. Limite d'atterberg

la limite d'atterberg, également connue sous le nom d'atterberg limits en anglais, est une mesure fondamentale des teneurs en eau critiques d'un sol à grains fins. Ces limites comprennent la limite de retrait, la limite de plasticité et la limite de liquidité. Elles permettent de distinguer entre les différents états du sol en fonction de sa teneur en eau : solide, semi-solide, plastique et liquide. Ces limites sont utilisées pour caractériser le comportement des sols fins et sont essentielles dans l'ingénierie des sols pour évaluer leurs propriétés techniques et leur comportement en fonction de l'humidité. Albert atterberg, un chimiste et agronome suédois, a créé ces limites en 1911, et elles ont été affinées par arthur casagrande, un ingénieur géotechnicien américain d'origine autrichienne. Les limites d'atterberg sont utilisées pour différencier les limons et les argiles, ainsi que pour évaluer les propriétés des sols en vue de la construction de structures. (Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. - *Physical and Chemical Hydrogeology).

Limite de liquidité (Il) est déterminée à l'aide de l'appareil de casagrande. Elle correspond à la teneur en eau pour laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique, lorsque le nombre de coups nécessaires pour refermer une rainure de 13 mm est de 25

Limite de plasticité (Ip) plasticité est la teneur en eau pour laquelle le sol commence à se fissurer l'indice de plasticité (ip) est calculé comme la différence entre la limite de liquidité (Il) et la limite de plasticité (Ip) :

$$Ip=Il-Ip$$

Cet indice permet de caractériser la plasticité du sol

Indice de consistance (ic) est calculé à partir de l'indice de plasticité (ip) et de l'indice de liquidité (il)

$$Ic=ip-il$$

Cet indice permet d'évaluer l'état hydrique du sol

Ces formules sont essentielles pour caractériser les propriétés des sols fins en géotechnique

1.3.5. Essai Proctor

L'essai Proctor, développé par l'ingénieur Ralph r. Proctor en 1933, est un essai géotechnique fondamental. Son objectif principal est de déterminer la teneur en eau optimale nécessaire pour obtenir la meilleure compaction d'un sol. Cet essai permet de définir la quantité d'eau idéale pour

garantir une compaction optimale du sol, essentielle dans les travaux de génie civil pour assurer la solidité des ouvrages

Il existe deux variantes de l'essai Proctor : le Proctor normal, avec un compactage léger, utilisé pour les remblais et les sous-fondation et le Proctor modifié, avec un compactage plus intense, utilisé pour les fondations les résultats de l'essai sont représentés sous forme d'une courbe "densité sèche - teneur en eau", dont le sommet correspond à la densité sèche maximale et à la teneur en eau optimale ces valeurs de référence servent ensuite à vérifier la qualité du compactage sur chantier (Rengasamy, P. - *World salinization with emphasis on Australia)

La figure (1-06) ci-dessous nous montre les outils nécessaires pour réaliser l'essai

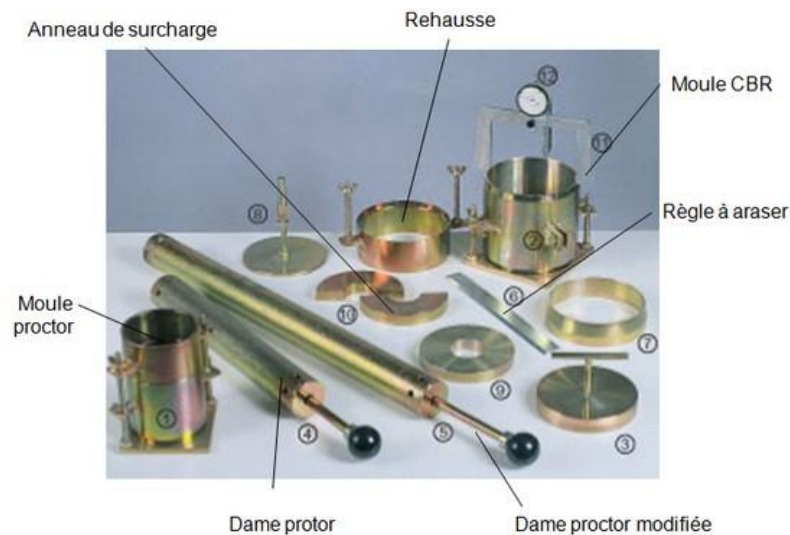


Figure 1-06 matériel nécessaire pour réaliser l'essai

Voici les principales formules liées à l'essai Proctor :

- **Densité sèche maximale (de max)**

La densité sèche maximale, également appelée optimum Proctor, est la valeur maximale de la densité sèche obtenue lors de l'essai Proctor. Elle correspond au point le plus haut de la courbe Proctor.

- **Teneur en eau optimale (wopt)**

La teneur en eau optimale est la valeur de la teneur en eau pour laquelle on obtient la densité sèche maximale lors de l'essai Proctor. Elle correspond à l'abscisse du point le plus haut de la courbe Proctor.

- **Indice des vides (e)**

L'indice des vides est calculé à partir de la densité sèche maximale ($\rho_d \text{ max}$) et de la densité des grains solides (ρ_s) :

$$E = (\rho_s / \rho_d \text{ max}) - 1$$

- **Degré de saturation (sr)**

Le degré de saturation est calculé à partir de l'indice des vides (e), de la teneur en eau (w) et de la densité des grains solides (ρ_s)

$$Sr = (e \cdot \rho_w / w \cdot \rho_s) * 100$$

Où ρ_w est la masse volumique de l'eau

Ces formules permettent de caractériser les propriétés du sol à l'optimum Proctor, qui est une référence essentielle en géotechnique

En résumé, l'essai Proctor est une méthode essentielle pour caractériser les propriétés de compactage des sols en génie civil et s'assurer de leur mise en œuvre optimale.

1.3.6. Analyse hydrométrique

Cette technique est appliquée aux particules fines (argiles et limons).

L'analyse hydrométrique d'un sol consiste à déterminer la distribution granulométrique des particules fines du sol en utilisant des méthodes telles que l'essai de sédimentation. Elle est essentielle pour comprendre le comportement des sols fins, en particulier pour la conception et la construction d'infrastructures, elle permet de caractériser les propriétés des sols, telles que la teneur en eau, la densité et la perméabilité, ce qui est crucial pour la stabilité et la durabilité des ouvrages

Il est important de noter que l'analyse hydrométrique est une méthode indirecte qui peut être influencée par les conditions d'essai et les paramètres de l'échantillon. Il est donc recommandé de répéter l'essai plusieurs fois et de prendre des mesures supplémentaires pour valider les résultats. (Lambe, T. W., & Whitman, R. V. - *Soil Mechanics)

1.3.7. Tests chimiques

Ils permettent d'identifier la composition chimique et les minéraux présents dans l'échantillon de sol, ce qui peut influencer son comportement comme la réactivité avec l'eau.

Chacune de ces méthodes fournit des résultats uniques qui, lorsqu'ils sont intégrés, donnent une évaluation complète du sol. Le choix de la méthode dépend souvent du type de sol, de la profondeur d'intérêt, des conditions du site, et de la nature du projet de construction envisagé.

1.4. Paramètres physiques des sols

Les paramètres physiques du sol sont des indicateurs permettant de caractériser l'état et les propriétés du sol en termes de structure, texture, et comportement face aux sollicitations. Ces paramètres sont cruciaux dans le domaine du génie civil et bien d'autres domaines tels que l'agronomie, la géotechnique et d'une façon générale tous les domaines qui étudient ou utilisent les sols. Voici quelques paramètres clés

1.4.1. Texture du sol

La texture d'un sol est la répartition granulométrique de ses constituants. C'est la proportion entre les petites particules, les argiles, les particules de taille moyenne, les limons, et particules de grande taille, les sables (dont le diamètre reste tout de même inférieur à 2 mm). Les textures sont regroupées en classes : sol argileux, limono-sableux...en fonction de ces proportions. On ne considère que les particules minérales (on exclut la matière organique et les carbonates) et inférieures à 2 mm

La texture apporte des informations utiles à la gestion de l'eau et de la fertilisation. Par exemple, un sol sableux draine beaucoup plus vite qu'un sol argileux. Quelques caractéristiques majeures des différentes textures seront présentées plus loin.

Elle est mesurable en laboratoire grâce à des techniques de sédimentation ou à un granulomètre laser. Mais elle est facilement estimable sur le terrain en suivant la méthode ci-dessous

- **Méthode** évaluation empirique (au doigté) lorsque le sol est plastique (humide à frais)

Les sables (> 0,050 mm, > 50 µm)

- A l'état humide (humecter la terre), le toucher est rugueux grossier (pour les sables grossiers) ou fin (pour les sables fins).
- Aucune rugosité entre les doigts : moins de 15 % de sable.
- Forte rugosité, grains de sable visibles à l'œil nu, effritement rapide de l'échantillon entre les doigts : plus de 50 % de sable.

Les limons (entre 2 et 50 μm)

- Toucher doux, soyeux, comme du talc.

Les argiles (inférieures à 2 μm [0,002 mm])

- Toucher collant.
- Plus de 17-20 % d'argile : il est possible de faire un boudin.
- Plus de 30 % d'argile : il est possible de faire un anneau avec le boudin. La terre colle fortement aux doigts. Le sol forme une plaquette, souvent brillante, à la surface de l'un des doigts sur lequel il colle.

La teneur en matière organique est assez aléatoire à estimer le toucher de la matière organique est « gras », la teneur en matière organique est surtout estimée correctement en connaissant les chiffres de matière organique analysés dans la région en fonction des principales rotations. En général, la teneur en matière organique des sols cultivés est de l'ordre de 2 à 3%, les plus fortes valeurs étant atteintes avec des itinéraires types tcs ou semis direct.

Complément

En reportant les pourcentages respectifs en limons, argiles et sables (donnés par une analyse d'un échantillon en laboratoire) dans le triangle textural, on détermine la texture exacte du sol.

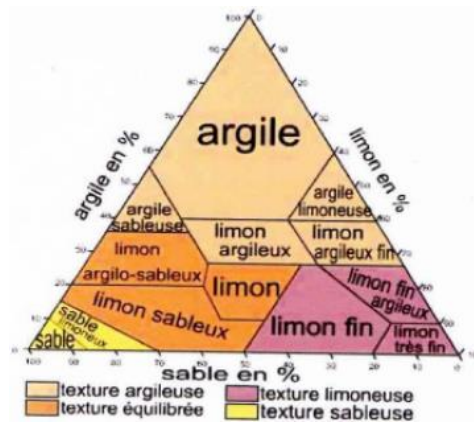


Figure 1-07 triangle de textures

1.4.2. Structure d'un sol.

La structure d'un sol fait référence à la façon dont les particules de sable, de limon et d'argile sont disposées les unes par rapport aux autres.

Dans un sol bien structuré, les particules de sable et de limon sont liées en agrégats (petites mottes) par l'argile, l'humus et le calcium. Les grands espaces vides entre les agrégats

(macropores) permettent à l'eau et à l'air de circuler et aux racines de s'enfoncer dans le sol. Les petits espaces vides (micropores) retiennent quant à eux l'eau. Cette structure « idéale » est appelée structure grumeleuse (**figure 1-08**)

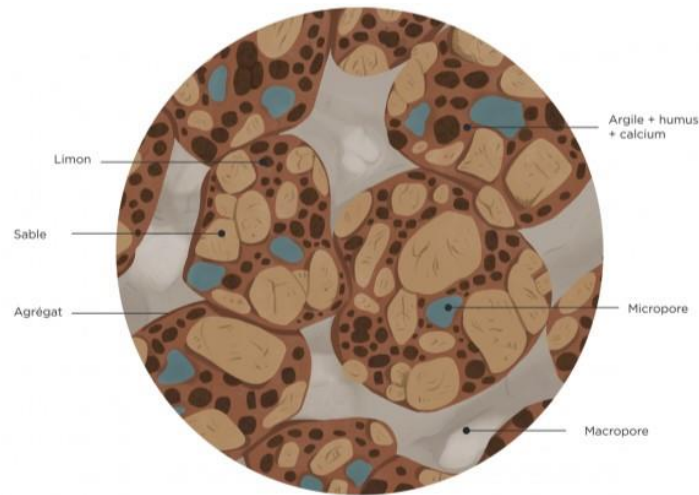


Figure 1-08 schéma de structure du sol

Les sols argileux, sableux et limoneux présentent rarement une structure idéale. On peut toutefois les améliorer en incorporant des amendements.

1.4.3. Porosité du sol

La porosité se définit comme le volume des vides ou bien l'espace entre les particules. Le sol est tout d'abord constitué de solide, de gaz et de liquide et ce sont ses constituants qui déterminent la porosité. Une bonne porosité se caractérise par un équilibre de ses trois éléments.

➤ **Macropores et micropores** la porosité se divise en deux formes précises qui se nomment les macropores et les micropores. Les macropores sont les plus gros espaces entre les particules. Voici quelques caractéristiques des macropores :

- Les macropores sont essentiels pour la rétention de l'eau et de l'air. Par contre l'eau est retenue sur période plus court-terme.
- Contrairement aux micropores dû à leurs différences de volume ils permettent à l'eau de s'écouler vers les nappes phréatiques par l'effet de la gravité.
- La porosité et l'aération d'un sol est généralement déterminée par le ratio de macropores dans le sol.

Les micropores, quant à eux, font tout à l'inverse des macropores. Ils gardent les éléments sur une période long terme, car ils ne sont pas affectés par la gravité. On peut donc en déduire qu'un déséquilibre du ratio macro et microporosité affecte directement la qualité du sol et ce qui le colonise. (Réf. 18)

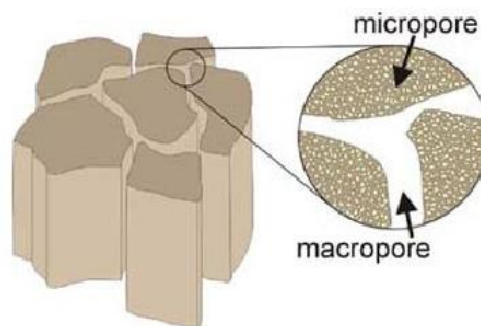


Figure 1-09 macropores et micropores

S'il y a trop de macropores, le sol sera très sensible au drainage. On peut alors parler de lessivage ou de lixiviation dans des cas de déséquilibre important. À l'inverse, s'il y a trop de micropores, le résultat sera d'une trop grande rétention de l'eau. Dans tous les cas, un mauvais équilibre dans le sol peut amener jusqu'à la destruction des complexes argilo-humiques avec le temps, ce qui diminuera la fertilité du sol significativement.

➤ Types de sols et leurs porosités

- **Limoneux** : moyennement poreux, retient beaucoup l'eau et se compacte facilement. Ce type de sol est très riche en éléments nutritifs.
- **Sableux** : très poreux, peu ou pas fertile et une faible rétention de l'eau.
- **Argileux** : faible porosité, très compacte, mauvaise perméabilité, sensible au gel mais riche en nutriments. Les racines des végétaux ont beaucoup de difficultés à se développer dans ce type de sol.
- **Loameux** : le sol loameux a une très bonne porosité. Il possède un équilibre entre le limon, le sable, l'argile et la matière organique. Ce mélange, avec un bon ratio, donne un sol hautement fertile avec un bon drainage. Il est rempli de nutriments et il est idéal pour le développement des végétaux. (FAO - *The Salt of the Earth: Hazardous for Food Production)

1.4.4. Densités apparente

La densité apparente du sol est une mesure de la compaction du sol qui résulte de la masse sèche de l'échantillon de sol divisé par son volume. Elle est exprimée en grammes par centimètre cube (g/cm^3). La densité du sol est un paramètre important qui détermine la difficulté ou la facilité avec laquelle les racines pénètrent le sol, influence la structure du sol et donc, indirectement, le parcours de l'eau dans le sol. La densité des particules, quant à elle, est un indicateur plus "théorique" qui décrit la densité des particules solides lorsque tous les pores (air, eau) ont été enlevés¹. La densité des particules est généralement plus élevée que la densité apparente du sol. Pour mesurer la densité apparente des sols, les mesures suivantes peuvent être prises : préparer un échantillon de sol avec un volume connu. Cela peut se faire à l'aide d'un cylindre ou d'un cadre pour délimiter le volume du sol.

- Sécher l'échantillon de sol dans un four à une température de 105 pendant 24 heures pour éliminer toute l'eau
- Peser l'échantillon de sol sec pour obtenir la masse du sol.
- Calculer la densité apparente à l'aide de la formule suivante : densité apparente = masse de sol/volume du sol

La masse du sol est obtenue à l'étape 3, et le volume du sol est connu à partir de la préparation de l'échantillon à l'étape 1. Alternativement, la densité apparente du sol peut être mesurée à l'aide de la méthode d'immersion dans le kérosène, cette méthode consiste à immerger l'échantillon de sol dans le kérosène et à mesurer la force exercée par le kérosène sur l'échantillon à l'aide d'un dispositif. La masse du kérosène déplacé par l'échantillon est alors utilisée pour calculer la densité apparente du sol. Il est important de noter que la densité apparente du sol peut varier en fonction de la méthode utilisée pour le mesurer, comme le montre l'étude sur les méthodes de mesure de la densité apparente du sol. Il est donc recommandé d'utiliser la même méthode pour toutes les mesures afin d'assurer la comparabilité des résultats

La densité apparente du sol peut être mesurée en prélevant un volume connu de sol non remanié et en le pesant après séchage. Pour les sols organiques, il est recommandé de prélever des échantillons à l'intérieur d'un cadre, tandis que pour les sols minéraux, la technique la plus courante consiste à insérer un cylindre d'échantillonnage dans le sol. Le cylindre peut être utilisé à la surface du sol (après avoir retiré les horizons organiques) ou horizontalement dans chaque

horizon. Pour les sols où prédominent les galets et les pierres, une petite fosse peut être creusée et le volume de l'excavation est déterminé en recouvrant la fosse d'un film plastique et en enregistrant la quantité d'eau nécessaire pour la remplir (Ashraf, M., Ozturk, M., & Ahmad, M. S. A. - *Salinity: Environment - Plants - Molecules)

1.4.5. Densités de la phase solide (densité réelle)

La densité de la phase solide du sol, également appelée densité des particules, est une mesure de la densité de la partie solide du sol lorsque tous les pores (air, eau) ont été enlevés¹. Elle est généralement plus élevée que la densité apparente du sol¹. La densité des particules est un indicateur "théorique" qui décrit la densité des particules solides lorsque tous les pores ont été enlevés¹. Elle est exprimée en grammes par centimètre cube (g/cm^3)¹. La densité des particules peut être mesurée en utilisant la méthode du pycnomètre au gaz, qui consiste à mesurer la quantité de gaz nécessaire pour remplir un échantillon de sol. Cette méthode est considérée comme la plus précise pour mesurer la densité des particules

Il est important de noter que la densité des particules peut varier dans le sol, en fonction de la composition et de la structure du sol¹. Par exemple, les sols argileux ont généralement une densité des particules plus élevée que les sols sableux

1.4.6. Capacité de rétention

La capacité de rétention en eau d'un sol est la quantité d'eau qu'il peut retenir contre la force de gravité. Elle est mesurée en millimètres par centimètre de profondeur de sol et varie en fonction de la texture du sol. Les sols sableux ont une capacité de rétention en eau plus faible que les sols argileux, par exemple. La capacité de rétention en eau est importante pour la croissance des plantes, car elle influence la quantité d'eau disponible pour les racines. Lorsque la capacité de rétention en eau d'un sol est dépassée, l'eau s'écoule sous l'effet de la gravité et humidifie les couches inférieures. Si l'humidification est trop importante, elle peut entraîner une saturation du sol, ce qui peut être préjudiciable à la croissance des plantes. La capacité de rétention en eau d'un sol est influencée par la texture du sol, la structure du sol, la teneur en matière organique du sol, et la présence de matériaux tels que les cailloux et les graviers. Une structure de sol compacte peut réduire la capacité de rétention en eau, tandis qu'une structure de sol poreuse peut l'augmenter. La capacité de rétention en eau d'un sol est également influencée par la température et l'humidité de l'air, ainsi que par la présence d'espèces végétales. Les plantes peuvent extraire l'eau du sol par transpiration, ce qui peut entraîner une baisse de la capacité de rétention en eau.

1.4.7. Ph du sol

Le ph du sol est une mesure de son acidité ou de son alcalinité, avec un ph inférieur à 7 indiquant une acidité et un ph supérieur à 7 indiquant l'alcalinité. La gamme optimale de ph pour la plupart des plantes est comprise entre 5,5 et 7,5. Le ph du sol affecte la disponibilité des nutriments aux plantes, ainsi que leur capacité à les assimiler. Le ph du sol peut être estimé en observant la flore présente, ou en utilisant un kit ou une analyse de laboratoire. Le ph du sol peut également être ajusté pour mieux répondre aux besoins de plantes spécifiques. Il est important de noter que le ph du sol peut varier en fonction de l'emplacement et de la période de l'année (FAO - *The Salt of the Earth: Hazardous for Food Production)



1.4.8. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique du sol, souvent notée k , est une mesure de la capacité d'un sol à transmettre l'eau. Elle est essentielle pour comprendre le mouvement de l'eau dans le sol et est utilisée dans divers domaines tels que l'agriculture, l'ingénierie environnementale et l'hydrogéologie. Voici quelques méthodes courantes pour mesurer la conductivité hydraulique du sol :

- **Méthode du sablier ou du double anneau** : cet essai permet la détermination in-situ du coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique k) d'un sol et donc sa capacité d'infiltration, par application d'une charge hydraulique constante ou variable (selon modèle) sur une zone circulaire en surface, après faible saturation (30 min minimum). le principe consiste à suivre la variation du niveau de l'eau dans l'anneau central après son remplissage. cette variation permet de calculer le coefficient de perméabilité (k) en suivant la différence de charge dans l'anneau durant l'essai.

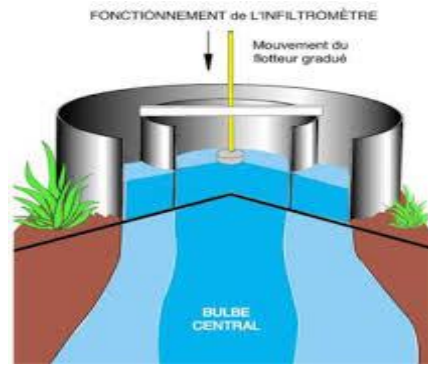


Figure 1-10 méthode de double anneau

- **Méthode du lysimètre** un lysimètre est un instrument utilisé pour mesurer le mouvement vertical de l'eau dans le sol. Chaque lysimètre est placé dans une partie de la parcelle qui ne doit normalement pas faire l'objet de 'redoublage' d'apport d'azote et est connecté gravitairement via un tuyau en polyéthylène haute densité à un réservoir de collecte placé dans une chambre de visite installée en bordure de parcelle (comme le montre la figure 11)

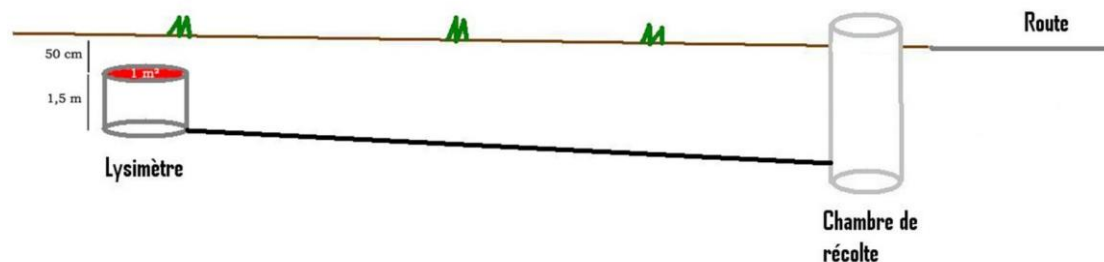


Figure 1-11 méthode du lysimètre

En appliquant une charge d'eau connue au-dessus du sol et en mesurant la quantité d'eau qui s'écoule à travers le sol, la conductivité hydraulique peut être déterminée.

- **Méthode des tuyaux capillaires** cette méthode repose sur l'utilisation de tuyaux capillaires insérés dans le sol. En mesurant la montée de l'eau dans ces tuyaux capillaires sous l'effet de la gravité et de la capillarité, la conductivité hydraulique peut être estimée.
- **Méthode du percolateur à charge constante** cette méthode consiste à appliquer une charge d'eau constante sur une colonne de sol et à mesurer le taux de percolation de l'eau à travers le sol.
- **Méthode des tranchées d'infiltration** dans cette méthode, des tranchées sont creusées dans le sol et remplies d'eau. En mesurant la baisse du niveau d'eau dans les tranchées sur une période de temps, la conductivité hydraulique peut être calculée.

Chaque méthode a ses propres avantages et limitations en fonction des conditions du site, de la précision requise et des ressources disponibles. Il est souvent recommandé de combiner plusieurs méthodes pour obtenir une estimation plus précise de la conductivité hydraulique du sol. (FAO - *The Salt of the Earth: Hazardous for Food Production)

1.5. Perméabilité du sol

La perméabilité du sol est la capacité du sol à laisser passer l'eau. Elle est essentielle pour l'infiltration de l'eau dans le sol et peut avoir un impact significatif en milieu urbain, influençant le risque d'inondation, le climat local, la biodiversité et la santé publique. La perméabilité des sols peut être mesurée par le coefficient de perméabilité (k), qui est la donnée de base pour dimensionner les ouvrages d'infiltration et est exprimé en m/s ou mm/h. Des sols perméables favorisent la biodiversité locale en permettant la croissance de plantes et d'arbres. Cependant, l'imperméabilisation des sols en milieu urbain, due à des pratiques telles que l'asphaltage et le bétonnage, peut entraîner un ruissellement rapide des eaux de pluie, des inondations, et des conséquences néfastes sur les infrastructures et la sécurité des habitants le niveau de la perméabilité du sol dépend de plusieurs facteurs

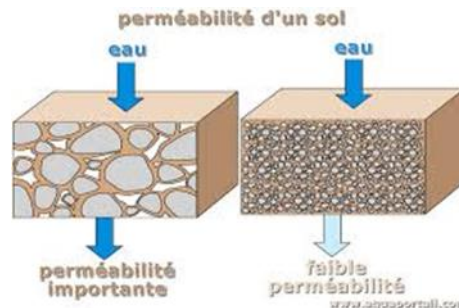


Figure 1-12 perméabilité d'un sol en fonction de sa granulométrie

- **Texture du sol** les sols sont composés de différentes tailles de particules comme le sable (grossier), le limon (fin) et l'argile (très fin). Les sols sableux ont tendance à être très perméables, tandis que les sols argileux ont une faible perméabilité.
- **Structure du sol** la façon dont les particules de sol sont agencées affecte le mouvement de l'eau. Une bonne structure granulaire avec des agrégats bien formés favorise l'infiltration.
- **Teneur en matière organique** la matière organique peut améliorer la structure du sol et donc sa perméabilité.

- **Profondeur du sol** les sols profonds permettent une meilleure infiltration que les sols peu profonds qui peuvent avoir une couche imperméable en dessous.
- **Tassement du sol** les sols compactés ont leurs pores réduits, limitant le mouvement de l'eau.
- **Présence de racines et d'organismes vivants** ces éléments peuvent créer des canaux dans le sol qui améliorent l'infiltration.
- **Teneur en eau** un sol saturé ne permettra pas une infiltration supplémentaire jusqu'à ce que l'eau déjà présente soit drainée.

En milieu urbain, la perméabilité des sols est un enjeu environnemental important qui peut avoir des répercussions sur le risque d'inondation, le climat local, la biodiversité et la santé publique. Il est donc crucial de préserver et de restaurer la perméabilité des sols en milieu urbain en utilisant des techniques d'aménagement adaptées. Les sols perméables peuvent accueillir des plantes et des arbres qui contribuent à la biodiversité locale. La perméabilité du sol peut être réduite par l'asphaltage, le bétonnage, l'aménagement de surfaces imperméables comme les parkings, les routes et les toits, et la densification du tissu urbain. Cela peut entraîner un ruissellement rapide des eaux de pluie, des inondations, et des conséquences néfastes sur les infrastructures et la sécurité des habitants. L'imperméabilisation des sols signifie moins d'infiltration des eaux de pluie, donc l'augmentation des volumes ruisselés, et accélération des écoulements. Ceci mène souvent à des inondations qui ont des conséquences sur l'infrastructure et les habitations, qui peuvent menacer la sécurité des habitants et compromettre leur déplacement. Les centres-villes inondés et les mesures prises pour y remédier peuvent également avoir des conséquences sur la circulation et la qualité de vie des habitants (FAO - *The Salt of the Earth: Hazardous for Food Production)

1.6. Capillarité

La capillarité dans un sol décrit le phénomène par lequel l'eau se déplace à travers les pores du sol en raison de la tension superficielle et des forces d'adhésion entre l'eau et les particules solides, qui surmontent la force de gravité. Ce mouvement ascendant de l'eau est le même phénomène que l'on observe lorsque l'extrémité inférieure d'une bande de papier ou d'une mèche de bougie est immergée dans l'eau

Les aspects importants de la capillarité dans les sols :

1.6.1. Montée capillaire

C'est la hauteur à laquelle l'eau monte dans les pores interconnectés du sol en raison de la capillarité (comme le montre la figure 13) cette hauteur est inversement proportionnelle à la taille des pores plus les pores sont fins, plus l'eau peut monter haut.

Les remontées capillaires

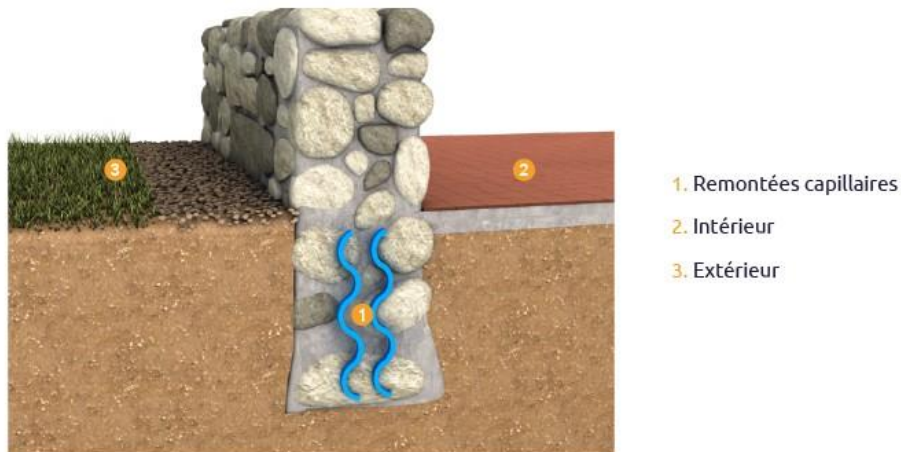


Figure 1-13 les remontées capillaires

1.6.2. Influence sur le sol

Un sol avec une forte capillarité peut transporter l'eau d'une zone de haute humidité vers une zone sèche, ce qui affecte l'humidité du sol sur une certaine hauteur au-dessus de la nappe phréatique. Cela peut avoir des implications significatives dans le domaine de l'agriculture, de la construction de bâtiments et de la gestion des ressources en eau.

1.6.3. Variation avec la texture du sol

Les sols sableux, qui ont généralement de plus gros pores, présentent moins de capillarité que les sols argileux ou limoneux, qui ont des pores beaucoup plus fins.

La compréhension de la capillarité est très importante quand il s'agit de la gestion de l'irrigation, de la stabilisation des pentes, de la construction des fondations et du drainage, car la présence d'eau influencée par la capillarité peut affecter les propriétés mécaniques et la stabilité du sol.

1.6.4. Degré de saturation du sol

Le degré de saturation d'un sol est un paramètre qui décrit la proportion du volume des vides dans un sol qui est remplie d'eau. Il est exprimé en pourcentage et est souvent noté avec le symbole s_r . Voici comment il est formellement défini : degré de saturation (s_r) :

Le rapport de volume d'eau (VW) présent dans le volume total de vides (v_s) d'un échantillon de sol.

$$S_r = VW / v_s$$

Ce paramètre est essentiel dans le domaine de la mécanique des sols car il a une influence significative sur le comportement du sol, notamment sa compacité, sa résistance au cisaillement, sa compressibilité, et sa perméabilité. Un sol complètement sec aurait un degré de saturation de 0%, tandis qu'un sol entièrement saturé aurait un degré de saturation de 100%.

Le degré de saturation peut varier en fonction de l'humidité et de la présence d'eau dans les vides du sol ; par exemple, lors de la montée ou de la baisse du niveau de la nappe phréatique, ou en raison des variations saisonnières de l'humidité. Ainsi, il est essentiel de comprendre et de mesurer cette propriété lors de l'évaluation des conditions du site et de la planification de la construction

1.7. Loi de darcy

La loi de darcy est une loi empirique qui établit une relation de proportionnalité entre le débit d'un liquide à travers un milieu poreux et le gradient hydraulique, en écoulement laminaire. Elle a été formulée par henry darcy en 1856 à partir de ses expériences sur l'écoulement de l'eau à travers des lits filtrants à sable. La loi de darcy est une loi fondamentale en hydraulique et en hydrogéologie pour décrire l'écoulement des eaux souterraines. Elle est exprimée par la formule

$$Q = -Ki$$

Où q est le débit total en m^3/s , k est la perméabilité du sol en m^3/s , i est la différence de pente sans dimension. La loi de darcy est valable si le flux est laminaire, mais elle ne peut plus être utilisée si les vitesses d'écoulement deviennent élevées et que l'écoulement devient turbulent.

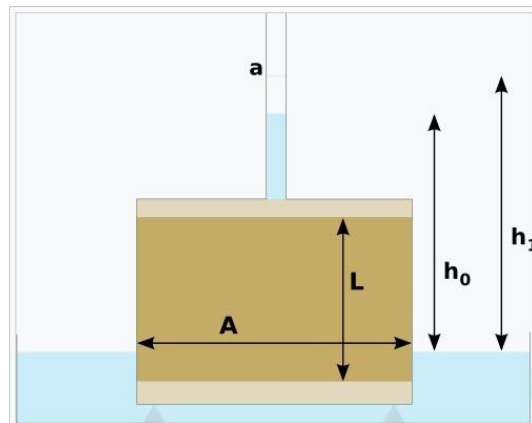


Figure 1-14 schéma de l'équipement utilisé par darcy

La loi de darcy est largement appliquée dans l'industrie pour comprendre et gérer les écoulements de fluides à travers des milieux poreux. Voici comment elle est utilisée dans l'industrie :

Gestion des eaux souterraines : en hydrogéologie, la loi de darcy est utilisée pour modéliser et prédire les écoulements d'eaux souterraines. Cela est crucial pour la gestion des ressources en eau, la prévention de l'intrusion d'eau salée, et la protection des aquifères.

- **Conception de systèmes de filtration** dans l'industrie chimique et pétrolière, la loi de darcy est appliquée pour concevoir des systèmes de filtration efficaces. Elle permet de prédire le débit des fluides à travers des filtres et des milieux poreux, ce qui est essentiel pour maintenir la qualité des produits et des procédés.
- **Géotechnique et génie civil** en génie civil, la loi de darcy est utilisée pour étudier les écoulements d'eau dans les sols et les fondations. Cela aide à concevoir des systèmes de drainage efficaces, à prévenir les problèmes d'infiltration d'eau, et à assurer la stabilité des structures.
- **Gestion des nappes phréatiques** dans l'industrie de l'exploitation minière et de l'agriculture, la loi de darcy est appliquée pour gérer les nappes phréatiques. Elle permet de prédire les mouvements d'eau dans le sol, d'optimiser l'irrigation des cultures, et de minimiser les impacts environnementaux liés à l'extraction des ressources.

En résumé, la loi de darcy est un outil essentiel dans l'industrie pour comprendre et contrôler les écoulements de fluides dans les milieux poreux. Elle est utilisée dans divers domaines tels que la gestion des eaux souterraines, la conception de systèmes de filtration, la géotechnique, et la gestion des nappes phréatiques. (Ashraf, M., Ozturk, M., & Ahmad, M. S. A. - *Salinity: Environment - Plants - Molecules)

1.8. Conclusion

Le chapitre fournit une analyse détaillée des propriétés physiques des sols, mettant en lumière l'importance de comprendre la texture, la structure, la porosité, la densité, la perméabilité et d'autres paramètres clés pour diverses applications, notamment dans le domaine du génie civil. Il décrit en détail les différentes méthodes de mesure de ces propriétés, telles que l'analyse granulométrique, l'essai Proctor, l'analyse hydrométrique, les tests chimiques, la détermination de la capacité de rétention en eau, le pH du sol, la conductivité hydraulique et la perméabilité du sol. Le document met également en évidence la corrélation entre la texture du sol, sa structure et ses paramètres physiques, il est clairement démontré que la texture du sol, déterminée par la répartition granulométrique de ses constituants (sable, limon, argile), influe sur sa capacité de rétention en eau, sa perméabilité et sa structure. Les sols sableux, avec leur texture grossière, présentent une capacité de rétention en eau plus faible, une perméabilité élevée et sont généralement bien aérés, tandis que les sols argileux, avec leur texture fine, ont une capacité de rétention en eau élevée, une perméabilité réduite et sont sujets à la compaction. La structure du sol, influencée par la texture, la matière organique, la profondeur et d'autres facteurs, joue un rôle crucial dans sa perméabilité et sa capacité.

En résumé, le chapitre offre une vision approfondie des propriétés physiques des sols, mettant en évidence leur interdépendance et leur impact sur divers aspects de l'environnement et de l'ingénierie. Il fournit également une compréhension détaillée des méthodes de mesure et des facteurs influençant ces propriétés, offrant ainsi des informations précieuses pour une utilisation efficace et durable des sols dans divers contextes.

Chapitre 2

Salinisation des sol

2.1. Introduction

Les sols requièrent la présence de sels pour maintenir leur structure et favoriser leur exploitation par les plantes et les micro-organismes. Toutefois, divers facteurs d'origine naturelle et anthropique peuvent entraîner une accumulation excessive de sels. Lorsque cette accumulation atteint un seuil critique, elle peut engendrer la salinisation du sol, nuisible à l'équilibre de l'écosystème terrestre, notamment lorsque les concentrations de sels dans la couche arable deviennent excessives. Pour approfondir la compréhension des origines de la salinisation du sol et des stratégies adaptatives mises en œuvre par les acteurs humains dans le domaine de l'agriculture pour atténuer ce problème. (. Flowers, T. J., & Colmer, T. D. - *Salinity tolerance in halophytes)



Figure 2-1 l'accumulation de sel de l'eau chargée de sel percolant jusqu'à la surface

2.1.1. Définition

Tous les sols contiennent des sels, mais une concentration excessive de sels peut perturber les équilibres ioniques dans le sol et avoir des effets négatifs sur la structure du sol. La salinisation du sol est l'accumulation de sels solubles dans l'eau dans le sol. C'est un type majeur de dégradation du sol qui peut se produire à la fois naturellement ou en raison d'une mauvaise gestion des ressources en eau et en sol.

La formule chimique du sel de table, ou NaCl (chlorure de sodium). Ce sel et tous les autres sels sont des molécules formées par une liaison ionique entre un ion chargé positivement et un ion

chargé négativement. La plupart des sels se dissolvent facilement dans l'eau grâce à leurs liaisons ioniques. (Flowers, T. J., & Colmer, T. D. - *Salinity tolerance in halophytes)

Lorsqu'ils sont dissous dans l'eau, les ions NaCl se divisent pour se mobiliser sous forme de Na^+ et de Cl^- . Les plantes peuvent alors absorber l'atome de chlore libéré, qui est un micronutriment essentiel à leur croissance. La salinisation du sol se produit lorsque les sels et l'eau sont en déséquilibre, ce qui a pour effet de bloquer les nutriments contenus dans les sels

Le sol salin est un problème majeur en pédologie, occupant une grande superficie en Algérie et dans le monde. Les sols salins posent des défis pour la construction d'infrastructures telles que les fondations profondes. La salinité des sols est un sujet d'étude important, notamment en termes de processus et de gestion pour contrer les effets négatifs de la salinité sur les sols

La salinité des sols peut impacter divers ouvrages de génie civil, nécessitant une attention particulière lors de la conception et de la construction pour assurer la durabilité des structures

2.2. Classification des sols salins

La classification des sols salins comprend plusieurs catégories en fonction de leurs caractéristiques. Voici un aperçu des informations pertinentes extraites des sources fournies :

- **Sols salins** sont caractérisés par une haute concentration en sels solubles dans le sol, qui peuvent cristalliser en surface, formant parfois une croûte blanche. Ces sols présentent une humidité persistante plusieurs jours après les pluies et peuvent entraîner un mauvais développement des plantes, affectant les rendements des cultures et parfois rendant l'agriculture impossible
- **Sols sodiques** sont dominés par le sodium parmi les sels présents. En conséquence, ces sols sont alcalins, avec un pH compris entre 8 et 10. La présence de sodium entraîne la déstructuration des argiles et de la matière organique, parfois créant une couche brune en surface et rendant les sols asphyxiants. Comme les sols salins, les sols sodiques présentent une humidité persistante après les pluies et une toxicité du sodium
- **Sols salins-sodiques** se caractérisent par une forte concentration de sels solubles, où le sodium est prédominant. Ces sols peuvent présenter des efflorescences salines en surface et une humidité persistante après les pluies. Ils peuvent être traités en utilisant des amendements contenant du calcium pour remplacer les ions sodium liés aux argiles, rétablissant ainsi la structure du sol (Thiruvengadam, V. et al. - *Impact of Climate Change on Soil Salinity and Strategies for Adaptation/Acclimatization)

2.3. Grandeurs utilisées pour caractériser les sols sales

La salinisation des sols peut être mesurée de différentes manières pour évaluer le niveau de sels hydrosolubles présents dans le sol.

Voici quelques méthodes couramment utilisées pour mesurer la salinisation des sols

2.3.1. Conductivité électrique : la mesure de la conductivité électrique du sol est une méthode simple et efficace pour évaluer la salinité. Une conductivité électrique élevée indique généralement une forte concentration en sels dans le sol.

Ce (DS/m) à 25oc	Degré de salinité
Ce 0,6	Sol non salé
0,6 et ce 02	Sol peu salé
02 - ce - 2.4	Sol salé
2.4 - ce - 06	Sol très salé
Ce 06	Sol extrêmement salé

Tableau 2.1 Echelle de la salinité en fonction de la conductivité électrique (Aubert, 1975)

2.3.2. Analyse chimique

L'analyse chimique du sol permet de déterminer la concentration en différents ions majeurs tels que le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, et le chlore. Cette analyse fournit des informations précises sur les types de sels présents dans le sol. L'analyse chimique du sol est essentielle pour évaluer la qualité et la fertilité du sol, afin de déterminer sa capacité à soutenir la croissance des cultures et la construction. Les principaux paramètres analysés sont le pH, la teneur en matière organique, la capacité d'échange cationique, le rapport c/n, le phosphore et le potassium échangeables l'analyse révèle que les sols peuvent présenter différents degrés de salinité, mesurés en conductivité électrique (ce). Les sols avec une ce supérieure à 4 DS/m sont considérés comme salins elle doit être réalisée avec rigueur, en respectant des protocoles stricts de prélèvement et de préparation des échantillons, afin de limiter les sources de variation et

d'obtenir des résultats fiables l'analyse chimique du sol est une étape cruciale pour évaluer la qualité du sol et adapter les techniques de construction en conséquence, afin d'assurer la durabilité des ouvrages.



Figure 2.2 l'analyse chimique des sols

2.3.3. Cartographie

La cartographie est un processus crucial qui implique la représentation graphique des caractéristiques du terrain et des éléments environnementaux pour planifier et concevoir des projets de construction. Cette démarche permet de visualiser les données spatiales, topographiques, géologiques, et environnementales pour une prise de décision éclairée lors de la conception et de l'aménagement des sites de construction

L'utilisation d'outils de télédétection et de cartographie permet de quantifier les taux de salinisation des sols à grande échelle. Ces techniques sont essentielles pour surveiller la salinité des sols, identifier les tendances et les facteurs de salinisation, ainsi que pour évaluer l'efficacité des programmes de restauration des sols salins.

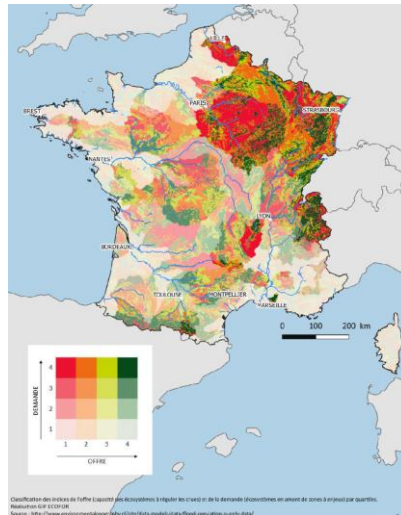


Figure 2.3 Une cartographie exploratoire de l'offre et la demande de régulation des crues par les écosystèmes en France métropolitaine

La cartographie est un outil fondamental pour les ingénieurs, leur permettant de visualiser et d'analyser les données spatiales pour une planification précise et une construction durable

2.3.4. Mesures sur le terrain

Des mesures directes sur le terrain, telles que l'observation des caractéristiques physiques du sol (croûte blanche en surface, humidité persistante après les pluies) et des symptômes sur les plantes (feuilles brûlées, mauvaise germination), peuvent également être utilisées pour évaluer la salinisation des sols.

En combinant ces différentes méthodes, il est possible d'obtenir une évaluation complète du niveau de salinisation des sols, ce qui est essentiel pour mettre en place des stratégies efficaces de gestion et de restauration des sols affectés par la salinité

2.4. Types de salinisation

Il existe différents types de salinisation des sols qui peuvent avoir un impact sur les ouvrages en génie civil. Voici quelques types de salinisation (Lall, U. - *Salinization of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies)

2.4.1. Salinisation naturelle

La salinisation primaire provient de l'altération naturelle des roches contenant des sels solubles, de l'activité volcanique, et du dépôt atmosphérique de sels marins par le vent ce processus naturel de salinisation affecte environ 80% des terres salinisées dans le monde

Elle se développe naturellement en raison de l'écoulement continu sur le long terme des eaux souterraines chargées en sels cela peut se produire lorsque le niveau du sol est peu profond et que l'eau issue des roches s'infiltré par capillarité jusqu'à la surface certains milieux naturels comme les lacs salés abritent des écosystèmes adaptés à ces conditions de salinité élevée donc la salinisation primaire est un phénomène naturel lié à des processus géologiques et climatiques, qui affecte la majorité des terres salinisées dans le monde.

2.4.2. Salinisation secondaire

Ce type de salinisation résulte d'activités humaines inappropriées, telles que l'utilisation de fertilisants minéraux ou l'irrigation avec une eau de mauvaise qualité. Les sels sont introduits dans les sols par ces pratiques agricoles inadéquates, ce qui peut compromettre la qualité des sols et affecter la production végétale

2.4.3. Salinisation directe

Dans ce cas, la salinisation est causée par des pratiques culturales inadaptées, comme l'utilisation d'une eau d'irrigation trop chargée en solutés combinée à un drainage insuffisant. Cette gestion inadéquate peut conduire à une augmentation de la salinité des sols, affectant ainsi la viabilité des cultures

Ces différents types de salinisation des sols peuvent avoir des conséquences importantes sur les ouvrages, nécessitant une gestion adéquate pour préserver la durabilité des structures et des infrastructures construites sur ces sols salins

2.5. Origine de la salinisation

Les principales raisons de la salinisation des sols sont diverses et peuvent être attribuées à l'entrée des sels dans le sol par le biais des eaux souterraines, des inondations ou de l'irrigation, étant donné que les sels sont solubles dans l'eau. Cette accumulation de sels dans le sol découle de perturbations dans la dynamique de l'eau et des sels solubles.

2.5.1. Causes naturelles :

Les causes naturelles de la salinisation des sols sont principalement liées à des processus naturels qui entraînent une accumulation de sels dans le sol. Ces causes comprennent (Cherif, S., & Gherib, A. - *État de la salinisation des sols irrigués en Algérie: cas de la plaine du bas-Chélif)

- Altération des roches contenant des sels solubles.
- Activité volcanique.

- Dépôt atmosphérique de sels marins par le vent.

Quelque cause naturelle de salinisation :

- **Climat** : dans les régions arides et semi-arides, les températures élevées et les faibles précipitations créent des conditions propices à une forte évaporation de l'eau du sol. Lorsque l'eau s'évapore, les sels dissous dans le sol restent à la surface, ce qui entraîne leur accumulation au fil du temps. Les précipitations insuffisantes ne suffisent pas à lessiver les sels accumulés, ce qui aggrave la salinité du sol.
- **Hydrologie** : variations dans le régime hydrologique, telles que les changements de niveau des nappes phréatiques ou les mouvements de l'eau de surface, peuvent affecter le transport et la distribution des sels dans le sol. Les sécheresses prolongées ou les périodes de fortes pluies peuvent modifier la quantité et la qualité de l'eau qui entre en contact avec le sol, ce qui peut influencer la salinité.
- **Topographie** : la topographie peut influencer la salinisation des sols de plusieurs manières. Par exemple, les plaines inondables des rivières et les bassins peu profonds sont sujets à des inondations temporaires. Lorsque l'eau s'écoule et s'évapore, elle laisse derrière elle des sels qui s'accumulent dans le sol. Les régions en pente douce peuvent également accumuler des sels lorsque l'eau s'écoule et que les sels se concentrent au fond des bassins peu profonds pendant l'évaporation.
- **Proximité des zones côtières** : les zones côtières sont particulièrement sensibles à la salinisation des sols en raison de leur proximité avec l'océan. Les tempêtes, les marées et les inondations peuvent transporter de l'eau salée sur les terres, laissant derrière elle des sels qui s'accumulent dans le sol. De plus, la montée du niveau de la mer peut augmenter le risque d'inondations d'eau salée, ce qui aggrave la salinité des sols côtiers.

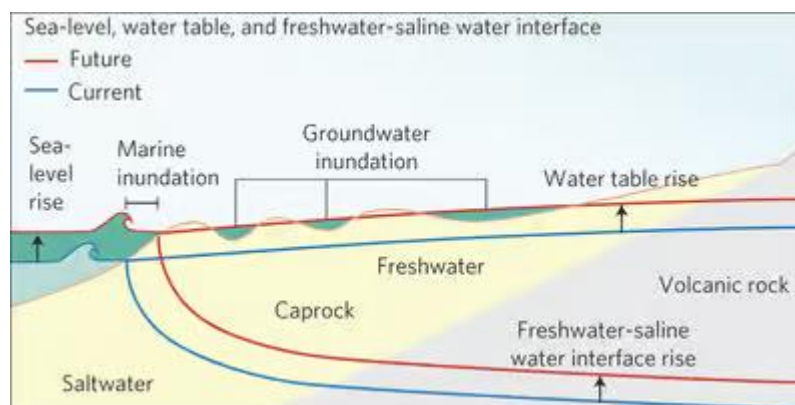


Figure 2.4 Diagramme conceptuel de l'aquifère

- **Écosystèmes naturels** : les écosystèmes naturels tels que les marais salants, les estuaires et les mangroves peuvent être des sources naturelles de sels. Les variations dans ces écosystèmes, causées par des facteurs tels que les changements climatiques ou les activités humaines, peuvent influencer la quantité de sels qui entre dans les sols adjacents.
 - **Processus biogéochimiques** : les processus biogéochimiques dans le sol, tels que la décomposition des matières organiques et les interactions entre les microorganismes du sol et les minéraux, peuvent également influencer la concentration en sels. Par exemple, la décomposition de la matière organique peut libérer des ions minéraux, ce qui peut contribuer à l'accumulation de sels dans le sol.
 - **Géologie** : la composition géologique du sol et du sous-sol peut influencer la concentration en sels dans les eaux souterraines. Dans certaines régions, les sols eux-mêmes peuvent contenir des minéraux salins ou être situés au-dessus de couches de roches salines. Lorsque l'eau souterraine remonte vers la surface, elle peut transporter ces sels vers les couches supérieures du sol.
- La salinisation des sols est un processus complexe influencé par une combinaison de facteurs naturels tels que la géologie, l'hydrologie, les écosystèmes naturels et les processus biogéochimiques. La compréhension de ces facteurs est cruciale pour développer des stratégies de gestion efficaces pour prévenir et atténuer la salinisation des sols.

2.5.2. Causes humaines

Les causes humaines de la salinisation des sols sont principalement liées à des activités anthropiques qui entraînent une augmentation de la concentration en sels dans le sol. Ces causes comprennent (Noomene, M. - *Étude de la dynamique des sels dans les sols irrigués: Cas des régions semi-arides)

- **Irrigation non adaptée** : l'irrigation mal gérée peut entraîner une augmentation de la salinité des sols. Lorsque l'eau d'irrigation contient des niveaux élevés de sels dissous, elle peut s'accumuler dans les sols si l'eau n'est pas correctement drainée ou évaporée les systèmes d'irrigation inefficaces ou obsolètes peuvent également conduire à une distribution inégale de l'eau, favorisant ainsi la concentration de sels dans certaines zones du sol.
- **Déforestation** : la déforestation peut perturber l'écosystème naturel en réduisant la capacité du sol à retenir l'eau et à maintenir son équilibre naturel en sels. Sans la protection des arbres et des plantes, le sol devient plus vulnérable à l'érosion, ce qui peut entraîner l'accumulation de sels dans les couches supérieures du sol à la suite du lessivage des sels présents dans les sols environnants.

- **Utilisation de fertilisants et de produits chimiques** : les fertilisants et les produits chimiques utilisés en agriculture peuvent contenir des sels tels que le nitrate, le phosphate et le chlorure. L'utilisation excessive de ces produits peut augmenter la concentration de sels dans le sol les résidus de pesticides et de fertilisants peuvent également altérer la structure du sol, augmentant ainsi sa perméabilité et facilitant la pénétration des sels dans les couches inférieures du sol.
- **Pratiques agricoles non durables** : le labourage excessif et la pratique de la monoculture peuvent épuiser les nutriments du sol et réduire sa fertilité naturelle, ce qui peut augmenter la sensibilité du sol l'utilisation de machines lourdes et la circulation fréquente des véhicules agricoles peuvent également entraîner une compactât du sol, ce qui compromet sa capacité à absorber l'eau et à éliminer les sels.
- **Développement industriel et urbain** : l'urbanisation croissante et le développement industriel entraînent souvent la production de déchets chimiques et de polluants, qui peuvent contaminer les sols et augmenter leur salinité. Les activités industrielles telles que l'extraction minière et le déversement de produits chimiques peuvent également contribuer à la salinisation des sols en libérant des sels et d'autres substances toxiques dans l'environnement.
En somme, ces diverses activités humaines contribuent à la dégradation des sols et à l'augmentation de leur salinité, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur l'agriculture, l'environnement et la durabilité des écosystèmes.

2.5.3. L'impact de la salinisation sur les ouvrages

La salinisation des sols affecte les ouvrages de plusieurs manières.

Tout d'abord, elle peut rendre les sols impropres à la construction en raison de leur mauvaise qualité et de leur instabilité

La salinisation peut affecter la capacité de support des sols de différentes manières. L'accumulation excessive de sels solubles dans le sol peut altérer sa structure, compromettant ainsi sa capacité à supporter efficacement des charges, comme celles des fondations des constructions¹

. En outre, la salinisation peut entraîner une dégradation de la structure du sol, le rendant moins stable et moins apte à supporter des charges importantes ,par conséquent, la salinisation des sols peut affaiblir la capacité de support des sols, ce qui peut avoir des répercussions sur la construction et la stabilité des infrastructures bâties sur ces sols , les sols salins peuvent

également affecter la durabilité des structures en car la présence de sels peut accélérer la corrosion des matériaux de construction tels que le béton et le métal , de plus, la salinisation des sols peut entraîner une augmentation de la pression interstitielle, ce qui peut provoquer des déformations et des affaissements dans les fondations et les structures

Enfin, la salinité des sols peut effectivement affecter la capacité de support des sols. Lorsque les sels s'accumulent en excès dans le sol, cela peut altérer sa structure et sa composition, ce qui peut compromettre la capacité du sol à supporter des charges, comme celles des fondations de constructions en conséquence, la salinité excessive peut affaiblir la stabilité du sol et rendre les sols moins adaptés à la construction en raison de leur capacité réduite à supporter efficacement des charges. Pour contrer ces effets négatifs, des techniques de gestion des sols salins doivent être mises en place (Punmia, B. C., Jain, A. K., & Jain, A. K. - *Soil Mechanics and Foundations)



Figure2.5. Dégradation de la couche de roulement d'une route en raison de la remontée d'eau saline



Figure 2.6. Corrosion des armatures d'un poteau béton

2.5.4. Ouvrages affectés par la salinisation

Les types d'ouvrages qui peuvent être affectés par la salinisation du sol comprennent les fondations profondes, les structures de génie civil telles que les bâtiments, les routes, les ponts et les barrages¹. La salinisation du sol peut affecter la capacité de support des sols, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité et de résistance structurelle. Les sols salins peuvent également affecter la durabilité des structures en car la présence de sels peut accélérer la corrosion des matériaux de construction tels que le béton et le métal

2.5.5. Inconvénients des sols salins

La salinisation des sols est en effet un problème important qui peut affecter les projets de génie civil de plusieurs façons. Voici quelques-unes des manières dont la salinisation peut impacter ces projets

- **Stabilité du sol** : certains sels absorbent l'eau (hygroscopicité), provoquant une variation du volume du sol (gonflement/rétraction), ce qui peut affecter la stabilité des terrains et entraîner des tassements différentiels des fondations. Les sols salins peuvent être moins stables et avoir une capacité portante réduite en raison de la présence de sels qui altèrent leur structure. Cela peut rendre le sol plus susceptible de se compacter, de se déformer ou même de s'affaisser, ce qui compromet la stabilité des fondations des bâtiments

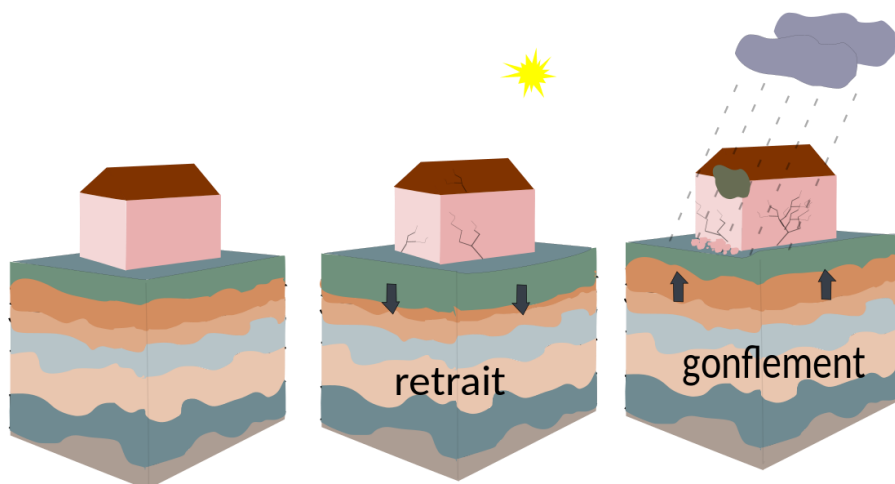


Figure2.7. Retrait-gonflement des argiles

- **Corrosion des infrastructures** : la présence de sels dans le sol peut en effet accélérer la corrosion des matériaux de construction, en particulier des métaux comme le fer et l'acier. Les sels, tels que le chlorure de sodium et le sulfate de calcium, sont souvent présents dans les sols dans les régions côtières ou arides, ou dans les sols irrigués avec de l'eau salée ou contenant des engrais chimiques.

Voici comment la présence de sels peut accélérer la corrosion des matériaux de construction :

- **Infiltration d'eau contenant des sels** : l'eau de pluie, l'eau d'irrigation ou les eaux souterraines contenant des sels peuvent infiltrer le sol et entrer en contact avec les matériaux de construction métalliques, tels que l'acier utilisé dans les fondations, les structures ou les canalisations.
- **Réaction chimique avec les métaux** : les sels dissous, en particulier les chlorures, peuvent réagir avec la surface des métaux exposés, formant des composés corrosifs qui attaquent la couche protectrice naturelle des métaux, comme l'oxyde de fer
- **Fondations et structures enterrées** : une forte concentration de sels dans les sols ou dans l'eau environnante peut entraîner la corrosion des armatures métalliques utilisées dans les éléments de béton armé. Cette corrosion compromet la durabilité et la résistance structurale des bâtiments et des infrastructures, diminuant la durée de vie et la résistance des fondations et des structures souterraines.
- **Constructions en métal** : la salinité du sol peut accélérer la corrosion des composants métalliques des structures. L'eau contenant des sels dissous, tels que le chlorure de sodium présent dans l'eau de mer ou dans les sols irrigués, peut entraîner des réactions chimiques qui favorisent la corrosion des métaux, en particulier du fer et de l'acier.

Lorsque les métaux sont exposés à des environnements riches en sels, notamment des sols salins ou des eaux salées, les ions chlorure peuvent pénétrer dans les pores du métal et entrer en contact avec la surface métallique. Ce processus peut entraîner la formation de chlorures métalliques solubles qui peuvent accélérer la corrosion en dissolvant la couche protectrice de l'acier, notamment l'oxyde de fer (rouille) qui le recouvre naturellement.



Figure2.8. L'effet de la corrosion sur les structures métalliques

- **Erosion** les sols salins peuvent en effet être plus sujets à l'érosion. La salinité du sol peut affecter sa structure et sa composition de plusieurs manières, ce qui rend le sol plus vulnérable à l'érosion, en particulier dans les zones arides ou semi-arides où les précipitations sont limitées et la végétation est rare.
- **Humidité** : les sols salins peuvent présenter une capacité de drainage réduite, ce qui peut conduire à des problèmes d'humidité à l'intérieur des constructions. L'accumulation d'humidité peut favoriser la croissance de moisissures et de champignons, ce qui peut affecter la qualité de l'air intérieur et la santé des occupants
- **Rétention d'eau accrue** : les sels dissous dans le sol peuvent augmenter la pression osmotique, ce qui diminue la capacité du sol à libérer l'eau excédentaire. Cela peut entraîner une rétention d'eau accrue dans le sol, ce qui peut causer des problèmes d'humidité à l'intérieur des constructions situées à proximité
- **Ruissellement et stagnation d'eau** : lorsque le sol est compacté et incapable de drainer correctement, l'eau de pluie ou d'irrigation peut s'accumuler à la surface, créant des zones de stagnation d'eau autour des constructions. Cela peut conduire à des infiltrations d'eau dans les sous-sols et les fondations, provoquant des problèmes d'humidité et de moisissures à l'intérieur des constructions.

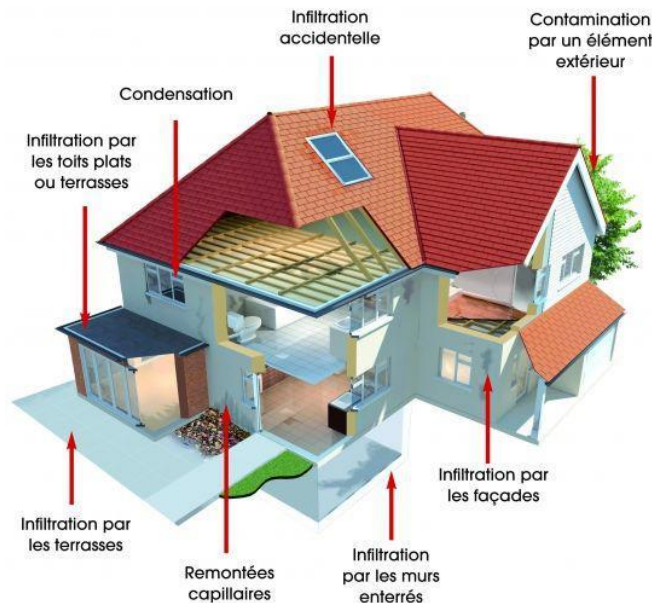


Figure 2.9 l'humidité dans la maison

- **Difficultés de construction** : la présence de sels dans le sol peut rendre la construction plus difficile et plus coûteuse en raison de la nécessité d'utiliser des techniques spéciales pour traiter le sol ou renforcer les fondations. Cela peut également entraîner des retards et des dépassements de coûts pendant le processus de construction.
- **Gestion de l'eau** : les méthodes habituelles de drainage peuvent être inadaptées ; il pourrait être nécessaire de concevoir des systèmes de drainage qui évitent l'accumulation de sels autour des structures. La salinisation peut altérer les propriétés de drainage du sol, ce qui peut entraîner des problèmes d'infiltration d'eau et de drainage insuffisant. Cela peut avoir des conséquences sur la conception des systèmes de drainage et d'égouts, ainsi que sur la gestion des eaux pluviales
- **Durabilité à long terme** : la salinisation des sols peut également avoir un impact significatif sur la durabilité des structures, en particulier dans les régions où l'eau d'irrigation contient des niveaux élevés de sels dissous ou dans les zones où la nappe phréatique est proche de la surface et où les sels du sol sont transportés par capillarité vers les fondations des bâtiments les effets corrosifs prolongés de la salinisation peuvent réduire la durabilité des structures et augmenter la nécessité pour des réparations fréquentes et coûteuses.
- **Conception paysagère** : la végétation sélectionnée pour l'aménagement autour des structures doit être tolérante à la salinité, limitant ainsi les choix de plantes.

- **Impact sur la main-d'œuvre et l'équipement** la salinité peut endommager l'équipement de construction et provoquer des irritations cutanées chez les travailleurs, ce qui affecte leur santé et la progression des travaux.

2.6. Salinisation des sols au monde

La salinisation des sols est un problème mondial majeur qui affecte environ 7% de la superficie terrestre, soit environ 1,1 milliard d'hectares de terres touchées par le sel.

La salinisation des sols réduit les superficies irriguées mondiales de 1 à 2% par an et affecte principalement les régions arides et semi-arides.

La salinisation des sols est un défi urgent pour l'agriculture mondiale, nécessitant des solutions adaptées à chaque contexte local pour prévenir l'accumulation excessive de sels. Actuellement, environ 800 millions d'hectares de terres à travers le monde sont affectés par la salinité, avec 434 millions d'hectares qualifiés de sodiques et 397 millions d'hectares classés comme salins (inadaptés ; 2006).

Régions	Superficie totale (10 ⁶ ha)	Sols salés (10 ⁶ ha)	%	Sols sodiques (10 ⁶ ha)	%
Afrique	1899.1	38.7	2.0	33.5	1.8
Asie, pacifique et Australie	3107.2	195.1	6.3	248.6	8.0
Europe	2010.8	6.7	0.3	72.7	3.6
Amérique latine	2038.6	60.5	3.0	50.9	
Proche orient	1801.9	91.5	5.1	14.1	0.8
Amérique du nord	1923.7	4.6	0.2	14.5	0.8
Total	12781.3	397.1	3.1	434.3	3.4

Tableau.2.2 répartitions des sols salins et sodique dans le monde (marle et job, 2006)

D'après les dernières évaluations, environ 2 milliards de dollars sont perdus en raison de l'impact de la salinité (marshalli et al., 2005 ; putride, 2006 ; Menouar, 2015). De plus, les estimations les plus récentes suggèrent que cette menace a touché près de 500 millions d'hectares et continue de progresser de manière alarmante (Fao, 2005). Cette situation revêt une importance considérable en termes de chiffres, d'autant plus que la superficie cultivée de la terre ne dépasse pas un milliard et demi d'hectares (Legros, 2009).

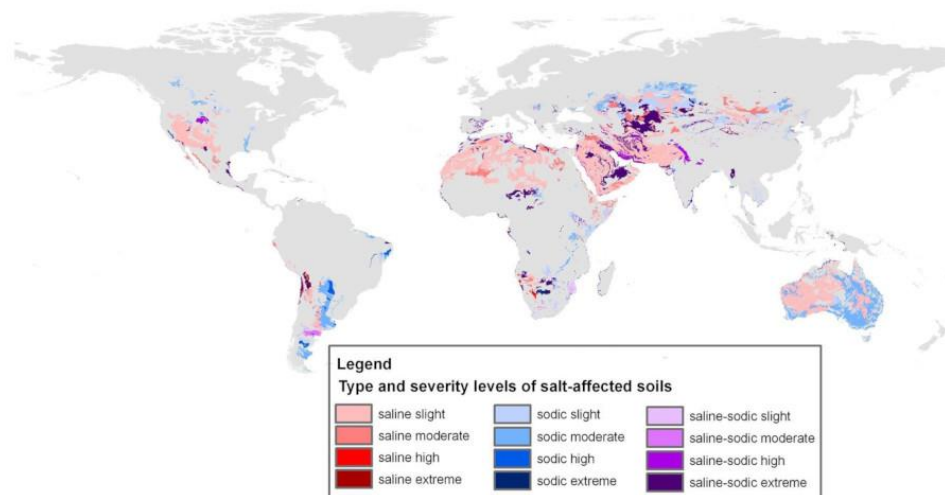


Figure 2.10. Répartition des sols salins dans le monde.

2.6.1. Salinisation des sols en Algérie

En Algérie, la salinisation des sols est un problème majeur qui affecte une partie significative des terres agricoles. Plus de 20 % des sols irrigués en Algérie sont touchés par le problème de la salinité, avec des régions spécifiques comme la plaine du bas-Chélif étant particulièrement concernées par ce phénomène. Des études spécialisées ont mis en évidence que des millions d'hectares de terres en Algérie subissent à des degrés variables le phénomène de salinisation, notamment dans les régions steppiques où les températures élevées et le manque d'exutoire contribuent à accentuer ce problème. Malgré l'absence de cartographie précise permettant de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et de quantifier la teneur en sels dans le sol, il est clair que la salinisation des sols est une préoccupation importante en Algérie, nécessitant une gestion scientifique et raisonnée pour préserver les terres agricoles et lutter contre ce phénomène (Acar, Y. B., & Alshwabkeh, A. N. - *Principles of Electrokinetic Remediation)

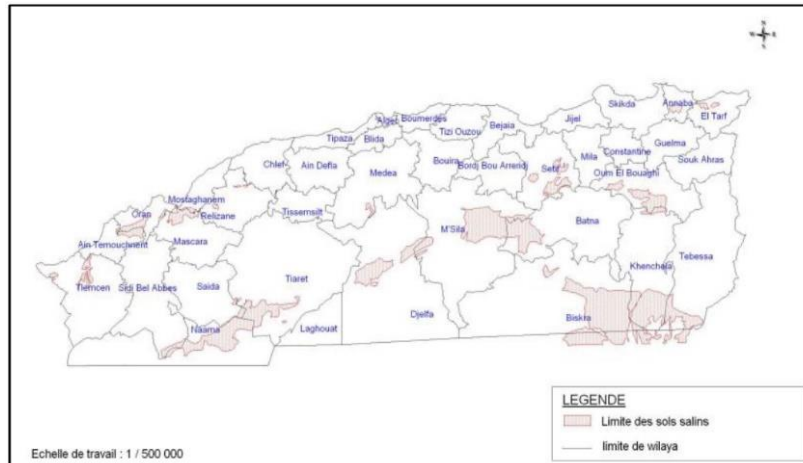


Figure 2.11. la répartition des sols salins en Algérie (Inside, 2008)

2.6.2 Sodisation

La sodisation fait référence à la fixation de sodium dans la partie superficielle des sols. Ce processus implique la saturation progressive du complexe organo-minéral par l'ion Na^+ . La sodisation est un phénomène important à prendre en compte dans l'étude des sols, en particulier lorsqu'il s'agit de comprendre les processus de salinisation et d'alcalinisation des sols la sodisation se distingue de la salinisation par la présence accrue de sel de sodium, qui remplace les ions sur les sites d'absorption des particules argileuses. La capacité d'échange d'ions, également connue sous le nom de capacité d'échange cationique (cec), est un indicateur clé. Plus la proportion de sodium dans les cations échangeables est élevée, plus le sol est considéré comme sodique. Cette sodisation est quantifiée par le pourcentage de sodium échangeable (esp), calculé selon la formule établie par (richards en 1954)

$$\text{ESP}(\%) = \frac{\text{Na}^+}{\text{CEC}} \times 100$$

Lorsque la teneur en ions échangeables du sol dépasse 15, le sol est qualifié comme sodique. À ce stade, le sol perd sa structure et sa capacité agronomique. En conséquence, la structure du sol devient dispersée, ce qui affecte la porosité, la perméabilité et la portance du sol (boutelli, 2012). La faible perméabilité entraîne un mauvais drainage de l'eau et des nutriments dans le sol, entraînant une diminution de la productivité. En plus de la baisse de productivité, la sodicité engendre plusieurs problèmes environnementaux et structurels, comme des dommages aux bâtiments, aux routes et aux autres infrastructures.

2.6.3. Mouvement des sels dans le sol

La mobilité des sels dans le sol est largement influencée par sa texture granulaire. Les sols à texture grossière, ayant une perméabilité élevée et un meilleur drainage, sont moins susceptibles d'être affectés par la salinisation. En revanche, les sols à texture fine et peu perméables présentent un risque accru de accumulation de sels dans leurs pores. Les sols sablonneux ont une capacité de drainage rapide mais une remontée capillaire limitée, ce qui peut limiter les problèmes de salinité en profondeur. Les sols argileux ont un drainage plus lent et une remontée capillaire importante, bien que cette dernière soit souvent atténuée par les fissures formées lors du dessèchement. Les sols limoneux, quant à eux, représentent un risque majeur car ils combinent une vitesse capillaire moyenne avec une remontée significative, sans la présence de fissures pour atténuer cet effet (van hoorn, 1994 ; noomene, 2011).

Le déplacement des sels à travers le milieu poreux est facilité par le mouvement de l'eau. Celui-ci peut se produire de manière descendante, appelée lixiviation, ou ascendante, connue sous le nom de remontée capillaire. (Barker, D. W., & Hubble, D. W. - *A review of electrokinetic remediation of contaminated soils)

- **La lixiviation** est un mécanisme qui consiste à éliminer les sels du sol par l'action de l'eau qui percole à travers celui-ci. L'eau s'infiltré dans la structure du sol, entraînant la dissolution des sels qui y sont présents. Ce processus de dissolution des sels varie en fonction de leur degré de solubilité (boutelli, 2012)
- **La capillarité** également appelée remontée capillaire, désigne le phénomène ascendant des sels en solution dans un milieu saturé à faible profondeur. Ce processus est plus prononcé dans les zones sujettes à une évaporation intense (duchaufour, 1977 ; boutelli, 2012). Plusieurs facteurs influent sur cette propriété, notamment la perméabilité du sol, la profondeur de la nappe phréatique, la granulométrie et la structure du sol (durand, 1983).

2.7. Construction sur un sol salin

Il est possible de construire sur un sol salin, mais il est essentiel de prendre en compte les défis et les précautions nécessaires pour assurer la stabilité et la durabilité des structures. Les sols salins peuvent poser des problèmes de corrosion des matériaux de construction, de stabilité des fondations et de dégradation de la structure du sol. Pour construire sur un sol salin, il est recommandé d'adopter des mesures spécifiques telles que :

2.7.1. Choix des matériaux

La salinité peut imposer l'utilisation de matériaux spécifiques (plus coûteux ou plus rares) la salinité des sols peut avoir un impact considérable sur le choix des matériaux de construction. Dans les régions où la salinité est un problème, il est souvent nécessaire d'utiliser des matériaux spécifiques qui peuvent résister à ces conditions pour assurer la durabilité des structures. Voici quelques considérations à prendre en compte :

- **Béton spécialisé** : le béton conçu pour résister à la salinité est un matériau spécialement formulé pour résister aux effets de la salinité dans les environnements marins ou en présence de sels dans le sol. Pour cela, les fabricants de béton utilisent des techniques de formulation qui incluent l'ajout d'adjuvants spécifiques, tels que des fibres, des verres, des coquilles broyées, qui augmentent la résistance des structures face à la corrosion extrême causée par la salinité. Ces bétons résistants à la salinité sont essentiels dans les applications telles que la construction de fonds marins, de passes à poissons, de récifs artificiels, et de sculptures sous-marines, où la salinité de l'eau et la forte houle créent des conditions corrosives difficiles à gérer
- **Acier inoxydable ou revêtements résistants à la corrosion** : opter pour des armatures en acier inoxydable ou en acier galvanisé revêtu de zinc ou d'autres matériaux résistants à la corrosion. Cela réduit le risque de corrosion des armatures exposées à la salinité. L'acier inoxydable est largement utilisé dans la construction en raison de sa solidité, de sa facilité de mise en œuvre et de sa résistance à la corrosion. Ce matériau offre une excellente protection contre la corrosion atmosphérique, ce qui en fait un choix privilégié pour les structures métalliques dans les environnements exposés aux intempéries.



Figure 2.12. Armature en acier inoxydable

- **Revêtements de surface protecteurs** les revêtements de surface spéciaux sur les éléments de construction exposés à la salinité sont essentiels pour protéger ces structures des effets corrosifs des sels. Ces revêtements doivent être conçus pour résister à l'abrasion, à l'humidité et à l'air salin pour assurer une protection efficace. Des revêtements tels que les résines époxy et polyuréthane sont couramment utilisés pour leur capacité à offrir une barrière protectrice durable contre la corrosion dans des environnements salins. De plus, les revêtements à base de zinc, de galvanisation à chaud, de galvanisation mécanique ou de zinc lamellaire sont également recommandés pour leur efficacité dans la protection contre la corrosion dans des conditions salines. Ces revêtements spéciaux sont cruciaux pour garantir la durabilité et l'intégrité des éléments de construction exposés à la salinité, tels que les ponts, les bâtiments côtiers, les structures maritimes et les équipements industriels sujets à des environnements corrosif
- **Matériaux composites et plastiques renforcés de fibres** :explorer l'utilisation de matériaux composites et de plastiques renforcés de fibres qui offrent une résistance supérieure à la corrosion et peuvent être une alternative aux matériaux traditionnels dans les environnements salins.
- **Revêtements de protection pour les fondations** : installer des membranes imperméables ou des barrières spéciales autour des fondations pour empêcher la pénétration des sels dans le sol et protéger les fondations des structures

2.7.2. Drainage efficace

Le drainage est essentiel dans la construction pour lutter contre les problèmes d'humidité, en particulier les remontées capillaires et les infiltrations d'eau. Il s'agit d'une solution privilégiée pour protéger les bâtiments des sources d'humidité proches des fondations, en empêchant l'eau d'atteindre les murs périphériques et de s'y infiltrer. Le drainage consiste à poser un drain autour de la maison, composé d'un tuyau perforé entouré d'un feutre géotextile, permettant la collecte du surplus d'eau contenu dans le sol. Ce dispositif est ensuite connecté à un bassin de pompage ou au système pluvial de la municipalité, et enrobé dans un complexe drainant avant la remise en place de la terre végétale ou du gazon. La mise en place d'un drainage nécessite une expertise technique pour garantir son efficacité, car des erreurs dans l'évaluation des causes de l'humidité peuvent rendre le drainage inefficace. Ainsi, le drainage efficace est crucial pour prévenir les problèmes d'humidité et assurer la durabilité des constructions.

2.7.3. Études géotechniques

Les études géotechniques sont essentielles dans les projets de construction pour analyser les caractéristiques des sols et des terrains afin de garantir la stabilité et la sécurité des ouvrages. Elles se déroulent en plusieurs étapes

- **Étude géotechnique préalable** pour analyse de la géologie, de la nature des sols et du niveau des nappes phréatiques et évaluation des risques naturels (mouvements de terrain, liquéfaction, etc.)
- **Étude géotechnique de conception** pour définition et comparaison des solutions envisageables (fondations, soutènements, etc.) Et pour une conception détaillée du projet de construction

Effectuer des études géotechniques approfondies pour évaluer la composition chimique du sol et déterminer les mesures nécessaires pour minimiser les effets de la salinité sur les structures.

En intégrant ces considérations dans le processus de conception et de construction, il est possible de choisir les matériaux appropriés et de mettre en œuvre les stratégies nécessaires pour garantir la durabilité des structures dans les environnements soumis à une forte salinité des sols. Ces études géotechniques permettent de réduire les incertitudes et les risques liés aux conditions du sol, assurant ainsi la sécurité et la pérennité des constructions. Elles sont obligatoires dans certains cas, notamment pour la vente de terrains constructibles exposés aux mouvements de terrain



Figure 2.13. Étude géotechnique

2.7.4. Prévention de la corrosion

L'idée de l'impact de la salinité sur la corrosion des composants métalliques des structures est très pertinente, surtout dans les régions côtières ou dans des environnements où il y a une exposition régulière à l'eau salée, comme les navires ou les infrastructures maritimes.

Pour aborder ce problème, voici quelques pistes que tu pourrais explorer pour développer une solution

- **Matériaux résistants à la corrosion** : travailler sur le développement de nouveaux alliages métalliques ou de revêtements spéciaux qui sont résistants à la corrosion causée par la salinité de l'eau. Ces matériaux pourraient être utilisés dans la construction navale, les ponts, les plateformes offshore et d'autres structures exposées à des environnements corrosifs.
- **Revêtements protecteurs** : concevoir des revêtements protecteurs qui peuvent être appliqués sur les surfaces métalliques pour les protéger de la corrosion due à la salinité. Ces revêtements pourraient être transparents, faciles à appliquer et durables dans des environnements marins agressifs
- **Systèmes de surveillance de la corrosion** : développer des systèmes de surveillance avancés qui permettent de détecter la corrosion des composants métalliques à un stade précoce. Ces systèmes pourraient utiliser des capteurs spéciaux pour mesurer les niveaux de corrosion et fournir des alertes en temps réel aux opérateurs pour qu'ils puissent prendre des mesures correctives rapidement.

- **Technologies de maintenance préventive** : mettre au point des méthodes de maintenance préventive qui peuvent aider à prolonger la durée de vie des structures métalliques exposées à la salinité. Cela pourrait inclure des programmes réguliers d'inspection et de nettoyage, ainsi que des techniques de restauration et de réparation des surfaces endommagées par la corrosion.
- **Éducation et sensibilisation** : fournir une formation et des ressources éducatives pour sensibiliser les ingénieurs, les constructeurs et les propriétaires de structures à l'importance de la protection contre la corrosion dans les environnements marins. Cela pourrait inclure des directives sur la sélection des matériaux, la conception des structures et les pratiques d'entretien appropriées.

En combinant ces différentes approches, il est possible de développer des solutions efficaces pour atténuer les effets de la corrosion causée par la salinité sur les composants métalliques des structures. Cela pourrait non seulement contribuer à améliorer la durabilité et la fiabilité des infrastructures, mais aussi à réduire les coûts d'entretien à long terme.

2.8. Stratégies pour les sols salins

Le traitement des sols salins pour la construction est crucial pour prévenir la corrosion des armatures et la dégradation du béton. Les stratégies clés pour les entreprises de construction impliquent plusieurs étapes essentielles pour assurer le succès et la durabilité des projets. Voici un aperçu des principales stratégies et actions recommandées

- **Définir les objectifs et le public cible** : il est crucial pour les entreprises de construction de définir clairement leurs objectifs et leur public cible afin d'orienter efficacement leurs actions.
Développer un processus de sélection complet : mettre en place un processus de sélection rigoureux pour les projets de construction est essentiel pour garantir la qualité et la rentabilité des réalisations
irrigation contrôlée: une gestion précise de l'irrigation pour éviter l'accumulation excessive de sels dans le sol est essentielle pour prévenir la salinisation.
- **Établir un plan de développement durable** : l'adoption de pratiques durables est devenue une priorité pour les entreprises de construction. Cela implique d'identifier les domaines d'amélioration, d'ajuster les plans de développement et de s'engager dans des projets respectueux de l'environnement
- **Former les employés aux nouvelles pratiques** : la mise en œuvre de pratiques durables nécessite une formation continue des employés pour s'assurer qu'ils sont au fait des dernières normes et procédures en matière de développement durable

- **Surveiller et évaluer les progrès** : il est essentiel pour les entreprises de construction de suivre et d'évaluer régulièrement leurs progrès vers l'atteinte des objectifs fixés, en mettant en place des boucles de rétroaction avec les parties prenantes pour ajuster les stratégies si nécessaire

- **Bioremédiations** la bioremédiations est un processus biotechnologique utilisé pour éliminer les polluants environnementaux de l'air, de l'eau et du sol en utilisant des systèmes biologiques. Cette méthode peut être classée en deux types principaux : ex situ et in situ. L'ex situ implique le retrait du sol ou de l'eau contaminés du site pour traitement, que l'in situ traite des contaminants sur place. Les techniques d'in situ incluent le bioventing, qui augmentent l'oxygène ou le flux d'air dans la zone non saturée du sol, pour la dégradation de la nature des contaminants hydrocarbonés ciblés. Le bioventing est un processus de bioremédiation aérobie l'estoxygène comme accepteur d'électrons pour l'oxydation des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP), des HAP et d'autres hydrocarbures. La bio-remédiation est une méthode respectueuse de l'environnement pour éliminer les contaminants de l'environnement. Elle utilise des micro-organismes, tels que des bactéries et des champignons, pour décomposer les polluants inoffensifs comme l'eau et le dioxyde de carbone. La bio-remédiation peut être utilisée pour traiter une grande gamme de contaminants, y compris les marées noires, les pesticides, les solvants et les métaux lourds. La bio-remédiation commerciale rapportée à la biostimulation, les cultures micro-biennes innovantes, à savoir le site contaminé pour l'emploi du processus de biodégradation. La bio augmentation est une technique d'augmentation des micro-organismes spécifiques sont introduits sur le site pour la pollution. En résumé, la bioremédiations est une approche prometteuse et durable pour nettoyer les polluants environnementaux. Elle offre une alternative rentable et respectueuse de l'environnement par rapport aux méthodes de remédiation traditionnelles, ce qui fait une option attrayante pour traiter divers types de contamination.

- **Lessivage ex-situ** lessivage ex-situ est un processus de dépollution des sols qui implique l'extraction des contaminants du sol par lavage en dehors de leur emplacement d'origine (figure 2.1), généralement après excavation. Cette méthode consiste à lessiver les sols contaminés en les traitant avec des agents extractants tels que des solvants organiques, des tensioactifs, des acides ou des bases pour extraire les polluants. Le lessivage ex-situ permet de traiter efficacement une variété de contaminants, y compris les polluants organiques et les métaux, en offrant un contrôle plus précis du processus de dépollution par rapport au lessivage in-situ.



Figure 2.14. Décontamination des sols et de l'eau souterraine

- **Traitement par pompage** le traitement des sols par pompage consiste à extraire les eaux souterraines contaminées à l'aide d'un système de pompage, puis à les traiter en surface avant de les éliminer ou de les réinjecter dans l'aquifère. Cette méthode est souvent utilisée pour contrôler la migration des contaminants et pour dépolluer les sols affectés. Le processus de pompage et de traitement des sols peut être une solution efficace pour une variété de contaminants, en particulier lorsque les contaminants sont solubles dans l'eau.

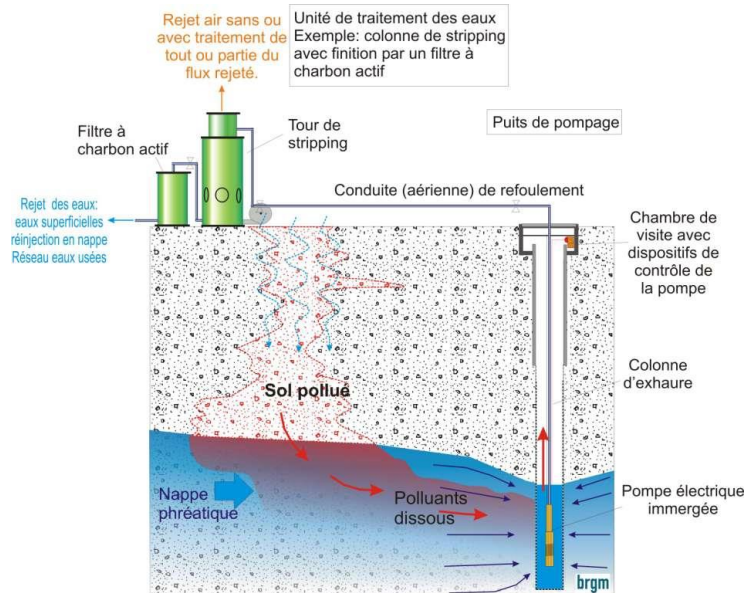


Figure 2.15. schéma de principe du pompage et traitement.

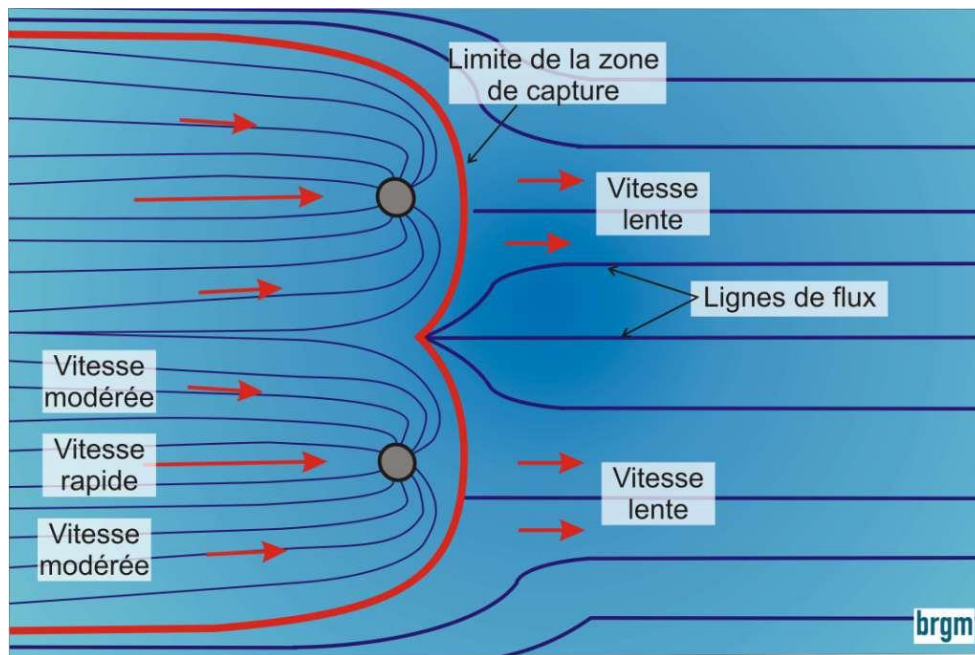


Figure 2.16. illustration de l'influence du pompage sur les écoulements piézométriques.

- **Excavation** l'excavation des sols est un processus qui consiste à enlever des sols contaminés sur une zone définie, généralement après des investigations. Cette méthode, bien que rapide pour aménager un site, ne constitue pas un traitement du sol en soi, mais plutôt une étape préliminaire. Les sols excavés peuvent être traités hors site, par exemple par incinération, ou mis en centre d'enfouissement technique (cet). Il est essentiel de noter que l'excavation est souvent utilisée pour supprimer une source de pollution ou résoudre une contamination difficilement traitable. Cette technique peut être appliquée à divers types de contaminants et nécessite souvent des étapes complémentaires pour traiter ou stocker les terres excavées.

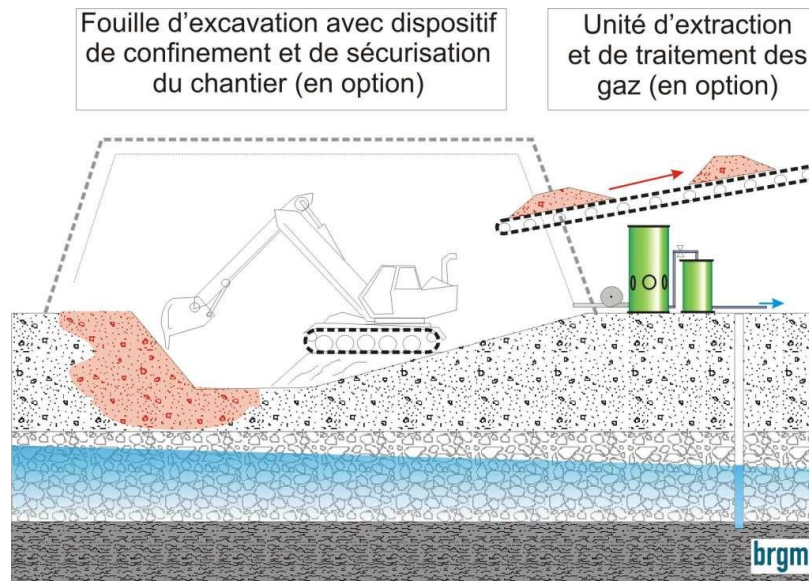


Figure 2.17. schéma de principe de l'excavation

- **Amendements chimiques** les amendements chimiques sur les sols, tels que l'amendement calcique, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la fertilité physique, chimique et biologique des sols. Ces amendements permettent de corriger l'acidité du sol, favorisent la neutralité des sols, améliorent l'activité biologique du sol, facilitent la pénétration des racines, et ont un impact positif sur la structure du sol. Le calcium, constituant majeur du calcaire, favorise la neutralité des sols, leur activité biologique et leur capacité d'échange cationique. En outre, le calcium régularise le pH des sols, augmente les échanges d'ions et favorise la fixation du phosphore, contribuant ainsi à une fertilité optimale des sols. L'amendement chimique est connu comme l'une des techniques les plus anciennes mais qui a prouvé son efficacité sur le terrain

2.9. Conclusion

La salinisation des sols peut avoir un impact significatif sur la construction lorsque les sols sont salinisés, cela peut compromettre la qualité et la stabilité des fondations des structures construites sur ces sols. La présence de sels dans le sol peut accélérer la corrosion des matériaux de construction tels que le béton et le métal, ce qui peut réduire la durabilité des ouvrages de plus, la salinisation des sols peut entraîner une augmentation de la pression interstitielle, ce qui peut provoquer des déformations et des affaissements dans les fondations et les structures, compromettant ainsi leur stabilité et leur résistance pour contrer ces effets négatifs de la salinisation des sols sur la construction, il est essentiel d'adopter des techniques de gestion des sols salins, telles que l'utilisation de matériaux de construction résistants à la corrosion, la mise en place de systèmes de drainage adéquats et la promotion de pratiques agricoles durables

Chapitre 03

Traitement électrocinétique

3.1.introduction

L'évolution de l'utilisation de l'électricité en tant que source d'énergie propre a incité les chercheurs à explorer des techniques et des méthodes pour traiter la salinité, un facteur majeur de dégradation des sols. La méthode électrocinétique s'est avérée être une approche novatrice, économique et respectueuse de l'environnement.

3.1.1definition

Le traitement électrocinétique est une méthode innovante utilisée pour décontaminer les sols pollués par des métaux lourds. Cette technique repose sur l'application d'un courant électrique dans le sol pour induire divers phénomènes physiques, chimiques et électrochimiques tels que l'électroosmose, l'électromigration et l'électrolyse de l'eau. Ces processus permettent le déplacement des contaminants vers les électrodes de charge opposée, facilitant ainsi leur extraction du sol. Le traitement électrocinétique est efficace pour éliminer les métaux lourds et certains composés organiques des sols contaminés. Il s'agit d'une méthode qui peut être mise en œuvre à différentes échelles, du laboratoire à l'échelle pilote, offrant des résultats satisfaisants en termes de dépollution des sols

Les types de sols qui peuvent être traités par électrocinétique incluent les sols contaminés par des métaux lourds, des substances organiques ou une combinaison de ces contaminants. Cette méthode de traitement des sols peut être appliquée avec succès pour la décontamination et la réhabilitation des sols pollués, offrant ainsi une solution efficace pour divers types de pollution du sol. (. BOUCHIBA, A., & BELMADI, M. - *Mémoire de Master académique Amélioration du procédé de désalinisation des sols)

3.1.2. Principe

Le traitement électrochimique repose sur l'application d'une différence de potentiel à travers des électrodes insérées dans le sol à traiter. Une fois cette tension appliquée, divers phénomènes se produisent, notamment un flux unidirectionnel de l'eau interstitielle et la migration des ions, des colloïdes et des micelles vers les électrodes de charge opposée. Ces processus complexes entraînent une modification de la composition chimique du milieu poreux, ce qui modifie les propriétés physico-chimiques, mécaniques et minéralogiques du sol. Cette transformation se traduit par une amélioration significative de la portance du sol ainsi que par une remédiation efficace. Le processus électrochimique se produit dans le sol en raison de la présence de fines

particules, notamment des particules d'argile dotées de propriétés minéralogiques spécifiques qui les rendent électriquement et chimiquement réactives. La présence de ces minéraux entraîne également d'autres mécanismes dans le sol, tels que l'électrolyse, l'électro-osmose, l'électromigration et l'électrophorèse (BESSAIM, M. - *Thèse de doctorat Traitement électrochimique des sols hétérogènes)

3.1.3. Avantages

La dépollution électrochimique présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes de dépollution. Tout d'abord, c'est un processus non polluant, car il ne nécessite pas l'ajout de produits chimiques ni la production de déchets secondaires. Ensuite, il est facilement automatisable et peut réduire les temps de traitement par rapport à d'autres méthodes. De plus, il est très polyvalent et peut être utilisé pour traiter une large gamme de polluants, y compris des composés organiques et inorganiques, des métaux et des nutriments. Il peut être réalisé in situ, sans nécessiter d'excavation ou de transport de sol contaminé, ce qui peut permettre d'économiser du temps et de l'argent. De plus, il peut générer des coagulants in situ, ce qui peut améliorer l'efficacité du processus de traitement. Enfin, il peut être utilisé en combinaison avec d'autres méthodes de dépollution pour en augmenter l'efficacité. Ces avantages font de la dépollution électrochimique une méthode prometteuse pour le traitement des sols et des eaux contaminés.

3.1.4. Inconvénients

Les inconvénients de la dépollution électrochimique incluent la génération de chlore et de sous-produits toxiques lors de la réaction électrochimique, ainsi que les risques de corrosion et d'électrolyse de l'eau associés à ce processus de plus, la configuration des électrodes et la distance inter électrodes peuvent influencer les performances du traitement et la consommation d'énergie enfin, l'utilisation de certains matériaux électrochimiques peut entraîner des risques liés à leur toxicité et à leur impact sur les propriétés de dépollution des électrodes développées

3.2. Contaminants éliminés lors de la décontamination électrocinétique

Les contaminants éliminés lors de la décontamination électrocinétique des sols sont principalement des polluants inorganiques, tels que les métaux lourds et les métalloïdes. Ces contaminants sont éliminés grâce à leurs propriétés chimiques et leur tendance à migrer vers des électrodes chargées sous l'effet d'un champ électrique. Les métaux lourds sont souvent éliminés en les faisant migrer vers une électrode chargée positivement, où ils peuvent être extraits ou traités les métaux lourds sont une source particulièrement importante de pollution dans les sols,

en particulier dans les déchets miniers et les terrils industriels la décontamination électrocinétique peut être utilisée pour éliminer le cadmium, le plomb et le zinc de ces sols contaminés les résultats d'une étude ont montré qu'il est possible de dépurifier un sol contaminé à 95% en utilisant l'électromigration pour éliminer le cadmium . En plus des métaux lourds, la décontamination électrocinétique peut également être utilisée pour éliminer d'autres contaminants, tels que les composés halogénés et les composés organiques ces contaminants peuvent être éliminés en utilisant des procédés chimiques spécifiques, tels que la déshalogénéation et la désorption thermique la décontamination électrocinétique est une technique prometteuse pour éliminer les contaminants des sols, car elle permet de déplacer des espèces chimiques variées dans des sols ou des boues sous un champ électrique circulant entre deux électrodes inattaquables . Cette technique peut être utilisée in situ, ce qui évite l'excavation et le transport du sol pour traitements. De plus, elle utilise de faibles courants électriques, ce qui en fait une technique potentiellement économique

3.3. Travaux réalisés sur la désalinisation par le traitement électrochimique

Les travaux réalisés sur la désalinisation par le traitement électrochimique consistent à utiliser des procédés électrochimiques pour éliminer les sels dissous dans l'eau de mer et produire de l'eau douce. Les chercheurs de l'université de Stanford ont inventé un dispositif de dessalement qui utilise la technologie de séparation électrochimique pour valoriser la saumure, un condensé de sel et de produits chimiques rejetés par les usines de désalinisation cette technologie permettrait de rendre le processus de désalinisation plus rentable et moins nocif pour l'environnement. L'électrodialyse sélective intelligente (isde) est une autre solution de désalinisation électrochimique. Elle élimine sélectivement les ions indésirables de l'eau tout en conservant les nutriments précieux comme le calcium et le magnésium cette technologie pourrait permettre d'économiser jusqu'à 25 % en consommation d'eau et 30 % en utilisation d'énergie par rapport aux méthodes traditionnelles de désalinisation. La capacitive déionisation (cdi) est une méthode électrochimique permettant l'extraction du sel dans l'eau elle utilise des électrodes chargées électriquement pour adsorber les ions présents dans l'eau, ce qui permet de produire de l'eau douce. Cette méthode est considérée comme une technique prometteuse pour la désalinisation de l'eau de mer et des eaux saumâtres en raison de sa faible consommation d'énergie et de sa capacité à produire de l'eau douce de haute qualité

3.4. Mécanismes de traitement électrocinétique

Les mécanismes liés au traitement électrocinétique des sols sont essentiels pour comprendre comment cette méthode innovante fonctionne pour décontaminer les sols pollués par des métaux lourds. Voici un aperçu des principaux mécanismes associés au traitement électrocinétique :

3.4.1. Electrolyse

L'électrolyse est un processus fondamental qui exploite les principes de la conductivité électrique pour effectuer des transformations chimiques contrôlées. Un courant électrique est utilisé pour provoquer une réaction chimique non spontanée. L'électrolyse est la décomposition chimique de certaines substances sous l'effet d'un courant électrique. Cette technique trouve de nombreuses applications dans la production industrielle, la métallurgie et la recherche en chimie.

L'électrolyse repose sur la présence d'une solution électrolytique, généralement un liquide ionique ou une solution ionique, qui permet la conduction électrique. Deux électrodes, l'anode et la cathode, sont plongées dans cette solution. L'électrolyse se réalise dans une cuve contenant un électrolyte dans lequel sont plongées deux électrodes reliées aux bornes d'un générateur de courant continu.

Lorsque le courant électrique circule à travers la solution électrolytique, les ions présents se déplacent vers les électrodes. On appelle anode l'électrode reliée à la borne positive du générateur et cathode celle reliée à la borne négative du générateur. L'anode est l'électrode positive où des ions subissent l'oxydation, libérant des électrons, tandis que la cathode, est l'électrode où des ions subissent la réduction, captant ces électrons. (Chun, M. S. - *Electrokinetic Flow Velocity in Charged Slit-like Microfluidic Channels with Linearized Poisson-Boltzmann Field)

Les équations des réactions ayant lieu aux électrodes

- **A l'anode (lieu de l'oxydation) : $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^-$**
- **A la cathode (lieu de la réduction) : $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{OH}^-(\text{aq})$**

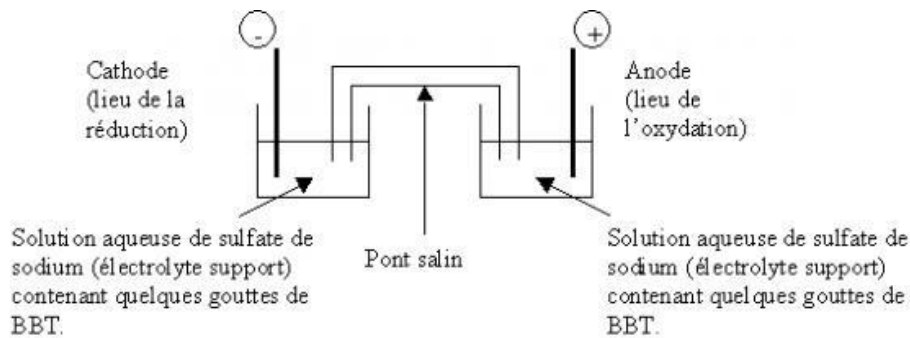


Figure 3.1. électrolyse de l'eau

L'électrolyse est provoquée par l'application d'un potentiel électrique externe suffisamment élevé pour surmonter l'énergie d'activation de la réaction redox (Ox réduction) non spontanée. Cela force la conversion d'ions en produits désirés aux électrodes, permettant la séparation des composés chimiques présents dans la solution électrolytique.

3.4.2. Electrophorèse

L'électrophorèse est une technique de séparation de particules chargées électriquement par migration différentielle sous l'action d'un champ électrique. Cette méthode est largement utilisée en biologie pour séparer et identifier des protéines dans le sang, ainsi qu'en chimie pour purifier des molécules solubles. L'électrophorèse du sérum sanguin est un examen couramment prescrit pour détecter des syndromes inflammatoires, des maladies auto-immunes, des problèmes hépatiques ou rénaux, et pour mesurer le taux de différentes fractions protéiques. Cette technique peut être réalisée avec différents supports tels que le papier, l'agarose et le polyacrylamide, en fonction des molécules à séparer. De plus, l'électrophorèse en conditions dénaturantes est souvent utilisée pour simplifier l'interprétation des résultats, en se basant uniquement sur la masse moléculaire des substances. (Yao, S., Huber, D., Mikkelsen, J., & Santiago, J. G. - *A Large Flowrate Electroosmotic Pump with Micron Pores)

3.4.3. Electromigration

L'électromigration est un phénomène qui se produit lorsque des atomes métalliques sont transportés par le flux d'électrons à des densités de courant élevées. Ce processus est significativement influencé par des facteurs tels que la température, le stress mécanique, les défauts du conducteur et la présence d'impuretés. L'électromigration est un phénomène crucial dans les applications où des densités de courant direct élevées sont utilisées, comme dans la microélectronique et les structures connexes. Ce phénomène peut entraîner une diminution de la

fiabilité des circuits intégrés, pouvant causer la perte de connexions ou la défaillance d'un circuit. En raison de l'importance critique de la fiabilité des circuits intégrés dans des domaines tels que les voyages spatiaux, les applications militaires, les systèmes de freinage antiblocage, les équipements médicaux, etc., la recherche sur la fiabilité des puces est un domaine d'intérêt majeur. Pour prédire la durée de vie des circuits intégrés, l'équation de black est souvent utilisée, où le composant est soumis à des tests de vie en température élevée pour extrapoler sa durée de vie attendue dans des conditions réelles. En laboratoire, les premiers symptômes de dommages dus à l'électromigration sont des pannes intermittentes, ce qui rend le diagnostic complexe. Ainsi, l'électromigration est un facteur essentiel à prendre en compte dans la conception et la fabrication des puces électroniques pour assurer leur fiabilité et leur durabilité (www.bvna.com - *Analyse granulométrique du sol et des sédiments)

3.4.5. L'électro-osmose

L'électro-osmose est une technique utilisée pour traiter l'humidité des murs, en particulier les remontées capillaires. Cette méthode repose sur l'application d'un courant électrique entre des électrodes insérées dans le mur affecté par l'humidité et une autre électrode plantée dans le sol. L'eau, polarisée en raison des ions qu'elle contient, est repoussée par les électrons du champ électrique, empêchant ainsi son ascension à travers le mur et stoppant les remontées humides. Il existe plusieurs variantes de l'électro-osmose, telles que l'électro-osmose passive, l'électro-osmose active, l'électro-osmose phorèse et l'électro-osmose électronique, chacune ayant ses propres caractéristiques et applications spécifiques. Cette méthode offre une solution durable pour lutter contre l'humidité des murs sans nécessiter de travaux de maçonnerie ou de terrassement, ce qui en fait une alternative intéressante pour résoudre les problèmes d'humidité dans les bâtiments

L'électro-osmose est un phénomène opposé au potentiel d'écoulement, où le déplacement du fluide à travers une membrane engendre une disparité de tension entre les deux côtés de ladite membrane. Dans le contexte de l'électrodialyse, l'électro-osmose représente un effet secondaire qui entraîne la migration de l'eau, provoquant ainsi une dilution des solutions (www.bvna.com - *Analyse granulométrique du sol et des sédiments)

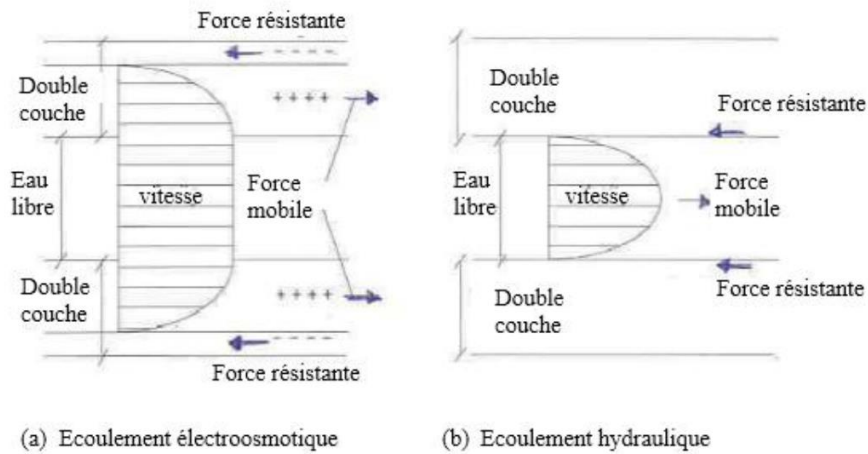


Figure 3.2. Comparaison entre l'écoulement électro osmotique et l'écoulement hydraulique (Casa grande, 1951).

➤ **L'équation de flux électro osmotique sous un potentiel électrique**

$$Q_e = \frac{\epsilon \zeta}{4\pi\eta} i_e A$$

Q_e : le débit électro osmotique de l'eau.

ϵ : est la constante diélectrique.

ζ : est le potentiel.

η : (v/cm)

η : la viscosité de l'eau (cm²/s).

i_e : la différence de potentiel électrique appliquée (v/cm).

A : la section transversale du flux électro osmotique (cm²).

➤ **Cette relation est exprimée comme suit**

$$Q_e = k_e i_e a$$

A partir de cette formule, le coefficient de perméabilité électroosmotique k_e (cm²/vs) pourra être exprimé en fonction de la porosité n comme suit

$$k_e = n \frac{\varepsilon \xi}{4\pi\pi}$$

Les types de sol	K_e (cm ² /Vs) x 10 ⁻⁵
Kaolinite	5.7
Argile limoneuse	5.0
Montmorillonite sodique	2.0 jusqu'à 12
Argile de London	5.8
Argile bleu de Boston	5.1
Tourbe	1.57

Tableau 3.1 le coefficient électroosmotique en fonction des différents types de sol

(Asad et al., 2013)

3.5. Transferts induits lors du traitement électrochimique

Les transferts induits lors du traitement électrochimique sont des phénomènes qui se produisent lors de la décomposition électrolytique d'un matériau. Ces transferts peuvent être de différents types, tels que les transferts électroniques, les transferts de charges dans la double couche et les transferts de matière

3.5.1. Transfert hydraulique

Définition le terme "hydraulique" peut être défini comme tout ce qui concerne le mouvement ou la circulation des liquides, en particulier de l'eau, dans un espace confiné sous pression il est également utilisé pour décrire la science et la branche scientifique qui étudient la pression des liquides, la flottation et leur gradient, l'écoulement des liquides avec sa résistance, et les équipements hydrauliques tels que les pompes. Les systèmes hydrauliques sont utilisés en ingénierie pour concevoir des canaux, des barrages, des vannes, des régulateurs et des déversoirs, ainsi que des systèmes d'irrigation et de traitement de l'eau. Les systèmes hydrauliques utilisent un fluide sous pression pour alimenter un moteur, et les presses hydrauliques utilisent une petite

quantité de fluide sous haute pression pour générer une grande quantité d'énergie. Le terme "hydraulique" est également utilisé pour décrire des choses qui sont déplacées ou alimentées par l'eau, telles que les moteurs hydrauliques et les machines hydrauliques

3.5.1.1. Domaines de l'hydraulique

Les domaines de l'hydraulique sont vastes et concernent plusieurs domaines d'activité. Dans le domaine des constructions hydrauliques, on retrouve plusieurs disciplines, telles que l'hydraulique fluviale, qui étudie l'écoulement des crues et permet d'accroître la sécurité contre les inondations, et l'hydraulique maritime, qui tient une place prépondérante dans la sécurité des ports contre la houle. Cette dernière discipline intègre l'étude de la stabilité des digues et des jetées, la lutte contre l'érosion des plages, l'ensablement des entrées de ports, l'envasement des bassins, et l'étude des courants de marée. L'hydraulique urbaine vise à fournir de l'eau aux villes et à évacuer les eaux usées, tandis que l'hydraulique agricole consiste à fournir de l'eau pour les cultures. Cette dernière discipline inclut la recherche et la captation de l'eau, son stockage pour l'irrigation grâce à des barrages, sa distribution par des stations de pompage ou encore des unités de comptage, son utilisation (ruissellement, aspersion, submersion, etc.), et le réglage du niveau de la nappe phréatique (drainage et recharges). Le domaine de l'ingénierie civile, l'hydraulique souterraine et les commandes hydrauliques étudie l'écoulement naturel ou provoqué de l'eau à travers les nappes phréatiques. Grâce au domaine des constructions hydrauliques, on peut concevoir le dispositif à mettre en œuvre afin d'obtenir le débit d'exploitation souhaité. La technique des commandes hydrauliques tourne autour de la transmission d'énergie par le moyen de liquides. En industrie, elle permet aux ingénieurs de concevoir des systèmes automatisés. L'hydraulique est utilisé dans de nombreux domaines, tels que les aménagements hydroélectriques, les aqueducs, les canaux, et l'approvisionnement et le traitement de l'eau. Cette science s'étend maintenant au-delà de son domaine traditionnel et aborde des domaines de plus en plus complexes, tels que l'étude approfondie des ondes de surface, la détermination des champs tridimensionnels de vitesses, et la turbulence en écoulements diphasiques.

3.5.1.2. Débit

Le débit d'eau est la quantité d'eau qui s'écoule pendant une durée déterminée. Il est mesuré en litres par seconde (l/s) ou en mètres cubes par heure (m³/h). Le débit d'eau dans une canalisation

est fonction de la vitesse (v) de l'eau et de la section (s) de la canalisation. Il est constant partout dans la canalisation

Pour mesurer le débit de l'eau exprimé par la lettre q_h , il est essentiel de prendre en compte la quantité d'eau qui s'écoule pendant une durée. Cette mesure peut être mise en utilisant un débitmètre pour une conférence directe du débit

L'appareil permet de mesurer le débit d'un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux, le débit hydraulique peut être calculé comme suit

$$Q_h = k_h i_h A$$

i_h : gradient hydraulique.

K_h : coefficient hydraulique.

A : section transversale

3.5.1.3. Pression hydraulique

la pression hydraulique, définie par blaise pascal, est une pression extérieure exercée sur une partie d'un fluide confiné qui se transmet à toutes les autres parties sans perte, agissant avec une force égale sur toutes les surfaces égales des parois de confinement et perpendiculaires à ces parois. Elle est le résultat d'une force appliquée sur une surface et s'exprime en bars, représentant 1 kg sur 1 cm². La pression hydraulique est fonction de la force, de la section et de la charge, et elle dépend de la dimension du cylindre et de la force appliquée sur la surface du fluide. La pression hydraulique est essentielle dans les systèmes hydrauliques, où elle est mesurée à l'aide d'un manomètre, et elle joue un rôle crucial dans le fonctionnement des machines hydrauliques en transmettant la force à travers un liquide dans un système fermé de tuyaux et cylindres l'unité de mesure pour exprimer la pression hydraulique est le pascal (Pa) ou également le bar (1 bar = 1.02 kg/cm² = 1 dan)

Elle se calcule grâce à la formule fondamentale suivante : $p = f/s$, soit la pression est égale à la force appliquée en newton, divisée par la surface (dont le résultat s'exprime en pascals). Ainsi, si une force d'un newton est exercée sur une surface d'un mètre carré, alors la pression exercée sera d'un pascal

3.5.2. Transfert chimique

Le transfert chimique est un processus qui implique le déplacement d'espèces chimiques dans le sol en présence d'un courant électrique. Ce processus est utilisé pour éliminer les polluants présents dans le sol, tels que les métaux lourds et certains composés organiques. Le traitement électrocinétique est une technique qui permet de provoquer un ensemble de phénomènes physiques, chimiques et électrochimiques dans le sol, tels que l'électroosmose, l'électromigration et l'électrolyse de l'eau. Ces phénomènes permettent le déplacement des polluants vers les compartiments des électrodes de charge opposée, ce qui facilite leur élimination.

Le transfert chimique est étroitement lié à la décontamination électrocinétique des sols, notamment dans le cadre de l'élimination des polluants présents dans le sol. Lors du traitement électrocinétique, le transfert chimique se produit à travers plusieurs mécanismes qui permettent de déplacer les contaminants du sol vers les électrodes pour leur élimination. Dans le processus de décontamination électrocinétique, des phénomènes tels que l'électromigration, l'électroosmose et l'électrolyse de l'eau sont utilisés pour induire le transfert des contaminants vers les électrodes chargées. Par exemple, l'électro-osmose peut entraîner le déplacement des contaminants vers les électrodes en raison du mouvement du fluide induit par le champ électrique. De plus, le transfert chimique peut se produire lors de l'électrolyse de l'eau, où des réactions chimiques se produisent à l'interface entre les électrodes et le sol, favorisant la dissolution ou la précipitation de certains contaminants. Par exemple, la génération d'ions h^+ et oh^- peut contribuer à la solubilisation des contaminants dans le sol. En résumé, le transfert chimique lors du traitement électrocinétique des sols est essentiel pour la décontamination, car il permet de déplacer les contaminants du sol vers les électrodes en utilisant des phénomènes électrochimiques et physico-chimiques. Ces processus de transfert chimique sont fondamentaux pour l'efficacité de la décontamination électrocinétique des sols contaminés par divers polluants.

3.5.2.1. Fonctionnement

Le transfert chimique lors de la décontamination électrocinétique des sols est un processus qui permet de déplacer des espèces chimiques variées dans des sols ou des boues sous un champ électrique circulant entre deux électrodes inattaquables. Les phénomènes physiques générés par ces systèmes électrodes/sol ou boue peuvent inclure l'électro-osmose, l'électrophorèse, l'électromigration et l'électrolyse de l'eau. Le traitement électrocinétique peut être utilisé pour éliminer les contaminants des sols, tels que les métaux lourds, en utilisant des électrodes respectivement plongées dans une solution contaminée. Lorsque le courant électrique est appliqué, les ions métalliques sont déplacés vers les électrodes chargées, où ils peuvent être

extraits ou récupérés. Différents paramètres peuvent influencer le processus de décontamination par voie électrocinétique, tels que le courant, le ph, la température, etc. Par exemple, l'acidification de l'anodique peut contribuer à solubiliser les contaminants dans le sol, tandis que le ph basique au voisinage de la cathode peut entraîner la précipitation de certains contaminants sous forme de sels d'hydroxydes, qui peuvent être récupérés ou extraits par pompage. Le traitement électrocinétique présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes de décontamination, tels que l'absence de besoin de pompage, la réduction des risques d'eutrophisation du milieu aquatique, et l'utilisation de faibles courants électriques, ce qui en fait une technique potentiellement économique.

3.5.3. Transfert électrique

3.5.3.1. Définition

Le transfert électrique peut être utilisé pour décrire le transfert d'énergie dans un circuit électrique. Lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, l'énergie électrique est dissipée sous forme de chaleur en raison de l'effet joule. Ce phénomène est utilisé dans les appareils de chauffage, les lampes à incandescence, et d'autres dispositifs où le transfert thermique est recherché. Cependant, lorsque le transfert thermique n'est pas souhaité, l'effet joule peut provoquer des pertes d'énergie dans les appareils électriques et le transport de l'électricité

Le transfert électrique peut également être utilisé pour décrire le transfert d'énergie dans un générateur électrique, qui transforme une forme d'énergie mécanique, chimique ou autre en énergie électrique. Dans un générateur, l'énergie électrique est produite par la force électromotrice (fem) et est transférée au circuit extérieur par les bornes du générateur

3.5.3.2. Transfert électrique sur les sols

Le transfert électrique sur les sols est un processus qui consiste à utiliser l'électricité pour modifier les propriétés physico-chimiques du sol. Ce processus peut être utilisé pour remédier les sols contaminés en dégradant ou en extrayant les polluants. Le traitement électrochimique des sols implique l'utilisation d'une cellule électrochimique, qui est constituée de trois électrodes : une électrode de travail, une contre-électrode et une électrode de référence. Lors du traitement, un courant électrique est appliqué entre l'électrode de travail et la contre-électrode, ce qui entraîne le transfert de charge électrique au sein de la matrice du sol. Ce transfert de charge peut entraîner la dégradation des polluants ou leur extraction du sol. Le transfert électrique au sein de la matrice du sol est influencé par plusieurs facteurs, tels que le type de sol, le type de

contaminant, les gradients de tension, l'espacement des électrodes, etc. La loi d'ohm établit une relation entre le voltage, la résistance et le courant. La résistance du sol peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que la teneur en eau, la composition minérale, l'organique et la structure du sol. Le transfert de charge électrique peut également être influencé par le gradient de tension et l'espacement des électrodes. (Fr.scribd.com - *Essai de Proctor)

3.5.3.3. Courant électrique

Le courant électrique est un phénomène physique provoqué par le déplacement d'électrons ou ions porteurs de champs électriques par convention, on considère que le courant est un flux de charges positives, et son intensité est la quantité de charge qui passe dans un conducteur par unité de temps, mesurée en ampère (a) le courant électrique peut être comparé à un débit de rivière, où le débit d'eau représente l'intensité exprimée en ampères (a) et la pression correspond à la tension exprimée en volts (v) lorsqu'un conducteur est traversé par un courant électrique, on observe des effets tels que l'effet calorifique (dégagement de chaleur), l'effet électromagnétique (création d'un champ magnétique) et l'effet électrochimique le courant électrique est le mouvement de charges électriques, généralement des électrons, à l'intérieur d'un conducteur, et peut être continu ou alternatif, se déplaçant dans des cycles réguliers dans les deux sens

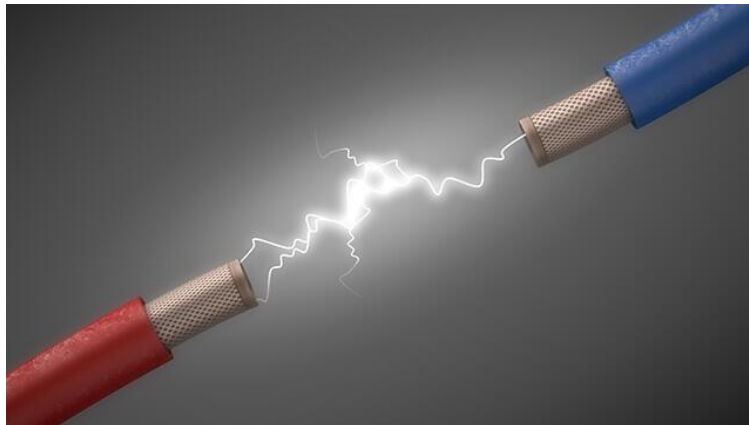


Figure 3.3. Courant électrique

➤ Solution électrolytique

Une solution électrolytique est une solution qui contient des ions, ce qui lui permet de conduire l'électricité les ions sont des espèces chimiques chargées, qui peuvent être obtenues en dissolvant des solides ioniques, des liquides polaires ou des gaz polaires dans l'eau les solides ioniques sont composés d'ions (cations et anions) régulièrement disposés dans

l'espace et formant une structure, et sont électriquement neutres lorsqu'ils sont dissous dans l'eau, les ions sont solvatés ou hydratés, ce qui signifie qu'ils sont entourés d'un certain nombre de molécules d'eau les équations de mise en solution aqueuse doivent être réécrites pour tenir compte de ce phénomène les solutions électrolytiques sont importantes dans de nombreux domaines dans le contexte des sols, les solutions électrolytiques peuvent être importantes pour comprendre les processus chimiques et biologiques qui s'y déroulent. Les sols sont des milieux complexes, constitués de matière minérale, de matière organique et d'eau les sols contiennent des sels minéraux, des acides et des bases, qui peuvent être dissous dans l'eau pour former des solutions électrolytiques ces solutions électrolytiques peuvent influencer la structure et la fertilité des sols, ainsi que la croissance des plantes les solutions électrolytiques dans les sols peuvent être étudiées en utilisant des techniques de chimie analytique, telles que la conductivité électrique et la spectroscopie ces techniques permettent de mesurer la concentration et l'activité des ions en solution, ainsi que les interactions entre les ions et les constituants du sol . Les résultats de ces analyses peuvent être utilisés pour évaluer la qualité des sols et pour développer des stratégies de gestion durable des sols

➤ Loi d'ohm

La loi d'ohm est une relation mathématique qui établit un lien entre la résistance (r), l'intensité du courant (i) et la tension (u) dans un circuit électrique. Elle s'écrit $u = ri$, où u est la tension aux bornes de la résistance, i est l'intensité qui traverse la résistance et r est la valeur de la résistance en ohms (ω). Cette loi a été nommée en référence au physicien allemand Georg Simon ohm, qui l'a énoncée en 1827. En utilisant la loi d'om, on peut calculer la tension, l'intensité ou la résistance d'un circuit électrique en connaissant deux de ces valeurs. Par exemple, pour calculer la tension, on peut utiliser la formule $u = ri$, où r est la résistance et i est l'intensité du courant. De même, pour calculer l'intensité, on peut utiliser la formule $i = u/r$, où u est la tension et r est la résistance. Enfin, pour calculer la résistance, on peut utiliser la formule $r = u/i$, où u est la tension et i est l'intensité du courant. La loi d'ohm est une relation fondamentale en électricité, qui permet de déterminer les caractéristiques d'un circuit électrique et de prédire son comportement. Elle est utilisée dans de nombreuses applications pratiques, telles que le dimensionnement de câbles électriques,

la conception de circuits électroniques et la régulation de la tension dans les réseaux électriques.

3.5.3.4. Porteurs de charge

Les porteurs de charge sont des particules chargées qui sont mobiles et capables de se déplacer dans un milieu conducteur, permettant ainsi le passage du courant électrique. Dans les métaux, les porteurs de charge sont des électrons libres notés e^- , tandis que dans les électrolytes, ce sont des ions les ions peuvent être de différentes natures, tels que o_2^- , al_3^+ , cl^- , cu_2^+ , so_4^{2-} , cr_3^+ , et se divisent en anions (chargés négativement) et cations (chargés positivement) dans un circuit électrique, le courant circule conventionnellement de la borne positive à la borne négative à l'extérieur du générateur et de la borne négative à la borne positive à l'intérieur du générateur la mobilité des porteurs de charge est une notion physique qui caractérise la capacité des porteurs de charge à se déplacer dans un milieu conducteur et à contribuer à la conduction électrique cette mobilité est essentielle pour comprendre le comportement des matériaux conducteurs et semi-conducteurs dans lesquels les porteurs de charge interagissent pour permettre le passage du courant électrique

3.5.3.5. Conductance

La conductance d'une portion de solution électrolytique est déterminée par sa capacité à conduire un courant électrique. Elle est mesurée en siemens par mètre (s/m) ou en microsiemens par centimètre ($\mu s/cm$). La conductance dépend de facteurs tels que la concentration des ions, la température, la viscosité, la nature de l'électrolyte, la taille des ions produits et leur solvation. Plus la concentration est élevée, plus la conductance est grande. La température influence la conductance en augmentant la dissociation des électrolytes et la mobilité des ions. La conductance est calculée en mesurant la résistance entre deux nœuds, et elle est directement liée à la quantité d'ions présents dans la solution électrolytique

3.6. Conclusion

Le traitement électrocinétique des sols est une méthode novatrice utilisée pour décontaminer les sols pollués par des métaux lourds. Cette approche repose sur l'application d'un courant électrique dans le sol pour éliminer les contaminants, en utilisant des phénomènes électrochimiques tels que l'électroosmose, l'électromigration et l'électrolyse de l'eau. Cette technique a montré des résultats prometteurs tant en laboratoire qu'à l'échelle pilote, offrant une solution durable, peu coûteuse et efficace pour la récupération des sols contaminés. Le traitement électrocinétique des sols est une alternative intéressante pour remédier aux problèmes de contamination des sols par des métaux lourds, offrant des rendements d'enlèvement des contaminants significatifs et contribuant ainsi à la dépollution des sols.

Chapitre 4

**Simulation numérique des écoulements
électroosmotiques dans des milieux poreux**

4.1. Présentation du logiciel comsol-multiphysiques

Le logiciel comsol multiphysics est une plateforme de simulation multiphysique utilisée par les ingénieurs et les chercheurs pour simuler des conceptions, des dispositifs et des processus du monde réel dans diverses industries. Il offre une interface utilisateur constante, des modules complémentaires pour des fonctionnalités spécialisées dans des domaines tels que l'électromagnétisme, la mécanique des structures, l'acoustique, l'écoulement des fluides, le transfert thermique et le génie chimique, ainsi que des outils pour créer des modèles basés sur la physique et des applications de simulation. Les utilisateurs peuvent compiler des applications en fichiers exécutables autonomes et les exécuter via un navigateur web ou un client léger. Comsol multiphysics vise à être l'outil principal pour les ingénieurs, les chercheurs et les enseignants dans les domaines de l'éducation et du développement de produits de haute technologie

Les fonctionnalités du logiciel comsol multiphysics incluent la capacité de créer des modèles basés sur la physique et des applications de simulation, une interface utilisateur cohérente pour divers phénomènes physiques, des modules complémentaires spécialisés pour l'électromagnétisme, la mécanique des structures, l'acoustique, l'écoulement des fluides, le transfert thermique et le génie chimique, ainsi que des outils pour combiner plusieurs physiques dans un modèle, créer des applications de simulation, et gérer les modèles et simulations. De plus, comsol multiphysics permet de compiler des applications en fichiers exécutables autonomes pour une exécution universelle, de déployer et distribuer des applications via le web ou un client léger, et offre des solveurs multiphysiques de haute performance pour des analyses avancées.

4.2. Simulation numérique

Cet exemple traite de la modélisation des écoulements électroosmotiques dans des milieux poreux (réf. 36,réf. 37). Le système se compose d'un compartiment en matériau poreux et de deux électrodes qui génèrent un champ électrique. La cellule combine un flux induit par la pression et un flux électroosmotique.

Le but de cet exemple est d'illustrer la modélisation de l'électroosmose et de l'électrophorèse en milieu poreux dans comsol multiphysics.

La figure 1 montre la géométrie du système. Il est constitué d'un domaine de matériau poreux contenant l'électrolyte et de deux électrodes générant une différence de potentiel. La conductivité est très faible et le modèle suppose que les effets des réactions électrochimiques à la surface des électrodes sont négligeables

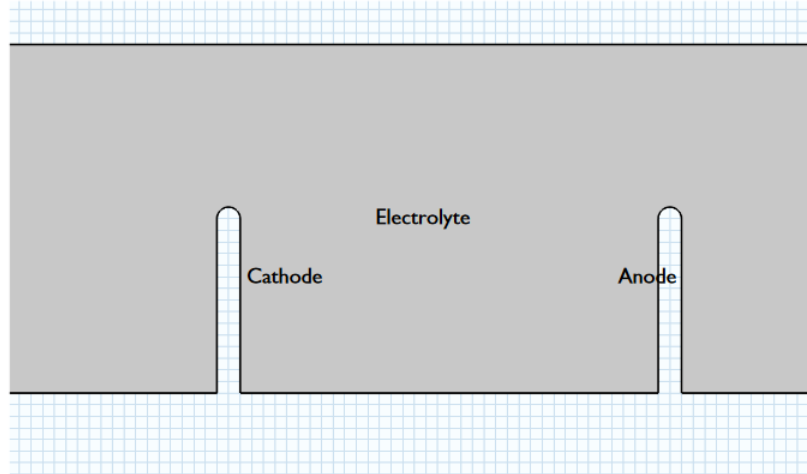


Figure 4.1 : le domaine modélisé est constitué d'un électrolyte contenu dans une structure poreuse et de deux électrodes qui génèrent un champ électrique.

Dans la première partie du modèle, vous résolvez les équations de continuité pour la vitesse d'écoulement et la densité de courant en régime permanent :

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{i} &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

U désigne la vitesse (m/s) et i représente le vecteur densité de courant (a/m^2). La vitesse comprend deux forces motrices : un terme de pression et un terme électroosmotique

$$\mathbf{u} = -\frac{\varepsilon_p a^2}{8\mu\tau} \nabla p + \frac{\varepsilon_p \varepsilon_w \zeta}{\mu\tau} \nabla V\tag{2}$$

Dans cette équation, ϵ_p désigne la porosité, a est le rayon moyen des pores (m), μ donne la viscosité dynamique du fluide (pa·s), τ représente la tortuosité de la structure poreuse

ϵ_w est la permittivité du fluide (f/m), p donne la pression (pa), ζ est le potentiel zêta (v), et v est le potentiel électrique(v). Cette équation est résolue avec l'interface de (équations a dérivés partielles). La densité du courant est modélisée avec l'interface courants électriques et résout les problèmes suivants

$$\mathbf{i} = -\kappa \nabla V \quad (3)$$

Où κ désigne la conductivité (s/m).

Au niveau des murs solides, la composante de vitesse normale disparaît

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n} = 0$$

A l'entrée et à la sortie, la pression est fixe.

Les conditions aux limites pour l'équilibre densité de courant sont isolantes pour toutes les limites, à l'exception des surfaces des électrodes, où le potentiel est fixé

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (\text{toutes les limites sauf les électrodes})$$

$$v = v_1 \quad (\text{surface de l'anode})$$

$$v = 0 \quad (\text{surface de cathodique})$$

Dans la deuxième étape du modèle, vous utilisez la vitesse en régime permanent et les champs de potentiel dans une simulation transitoire de la concentration d'une espèce traceuse chargée injectée dans le système, en supposant que l'espèce traceuse n'influence pas la conductivité ou le potentiel défini dans le milieu poreux. Structure. L'équation de transport de masse pour le traceur est résolue avec l'interface transport des espèces diluées et s'écrit

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (4)$$

Où \mathbf{n} est le vecteur flux donné par l'équation de nernst-planck

$$\mathbf{N} = -D \nabla c - z u_m F c \nabla V + c \mathbf{u} \quad (5)$$

Dans cette équation, d désigne la diffusivité du traceur (m^2/s), c donne sa concentration (mol/m^3), z représente le numéro de charge du traceur, et f est la constante de faraday (C/mol). La mobilité, u_m ($mol \cdot m^2 / (j \cdot s)$), est donnée par l'équation de nernst-einstein

$$u_m = \frac{D}{R_g T} \quad (6)$$

Où $R_g = 8,314 J / (mol \cdot K)$ est la constante du gaz et $T(K)$ est la température

Les conditions aux limites pour équation 4, l'équation du transport de masse, sont isolantes sauf à l'entrée et à la sortie. Là, vous utilisez la condition flux pour définir à zéro les contributions diffusives et convectives au flux à travers les frontières

$$\mathbf{n} \cdot (-D \nabla c + c \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{entrée et sortie})$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (\text{toutes les autres limites})$$

La concentration initiale est donnée par une distribution uniforme en y et en forme de cloche en x

$$c(t=0) = c_{top} \exp\left(-0.5 \left(\frac{x - x_m}{p_w}\right)^2\right) \quad (7)$$

Ici c_{top} désigne la concentration maximale, x_m est la position du pic le long de x -axe, et p_w est égale à la largeur de base du pic.

4.3. Etude paramétrique

4.3.1. Répartition du flux

La parcelle supérieure dans (figure 4.2) montre la répartition du flux dans la structure poreuse lorsque seul le champ électrique agit comme force motrice. Dans le graphique du bas, c 'est plutôt le gradient de pression qui détermine le débit. Dans les deux cas, la vitesse est importante autour des coins des électrodes, là où l'intensité du champ est importante et où l'effet de la diminution de la section efficace de la géométrie est le plus prononcé. Une comparaison des valeurs maximales de vitesse d'écoulement montre que le gradient de pression est la force motrice dominante.

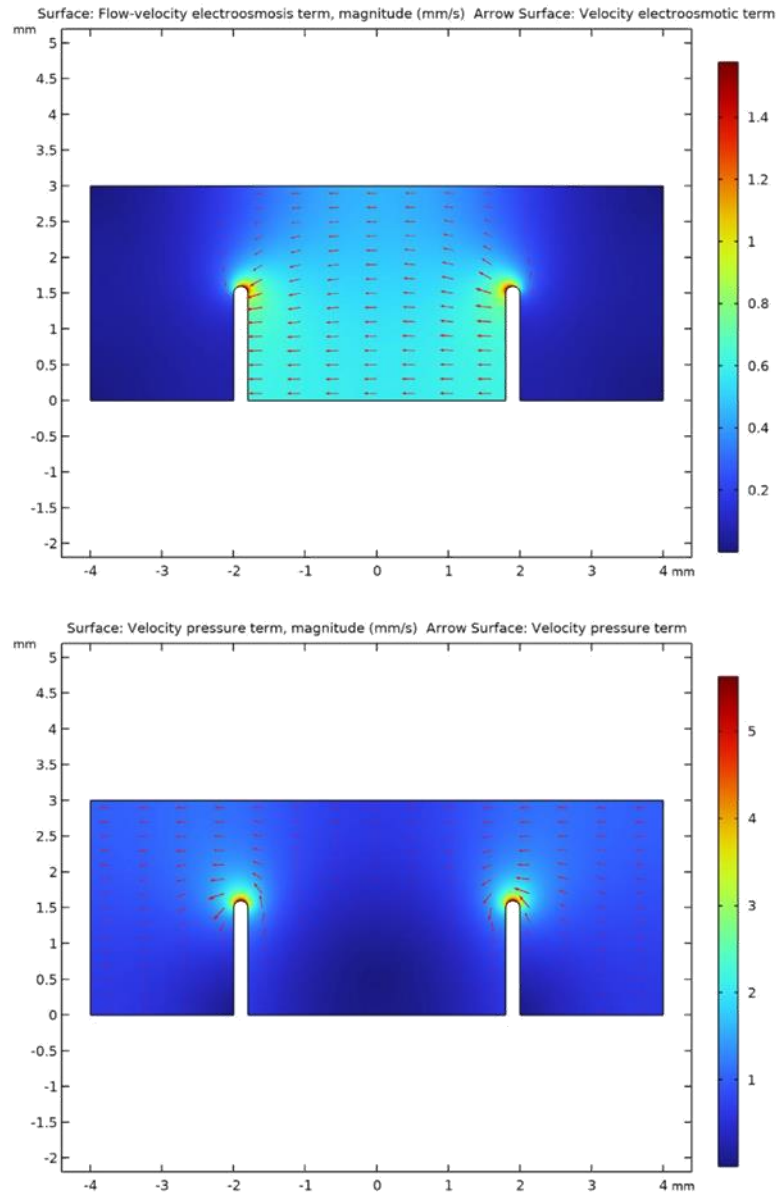


Figure 4.2 : distributions de vitesse dans la cellule avec un champ électrique appliqué (en haut) et une différence de pression appliquée (en bas). L'unité pour le tracé de la surface de magnitude est le mm/s.

4.3.2. Le champ de concentration

Figure 4.3 montre le champ de concentration dans le cas où la pression et les forces électroosmotiques sont incluses. La figure montre que la migration du traceur chargé influence également le taux de transport. Dans ce cas, le traceur est transporté à la fois par le mouvement du flux, dû à la pression et aux termes électroosmotiques, et par l'effet électrophorétique sur le traceur chargé lui-même. À $t=0$, le traceur est introduit sous forme d'une distribution verticale

en forme de cloche à proximité de l'entrée. Dans la simulation ultérieure, cette distribution est cisailée et transportée par diffusion, migration et convection.

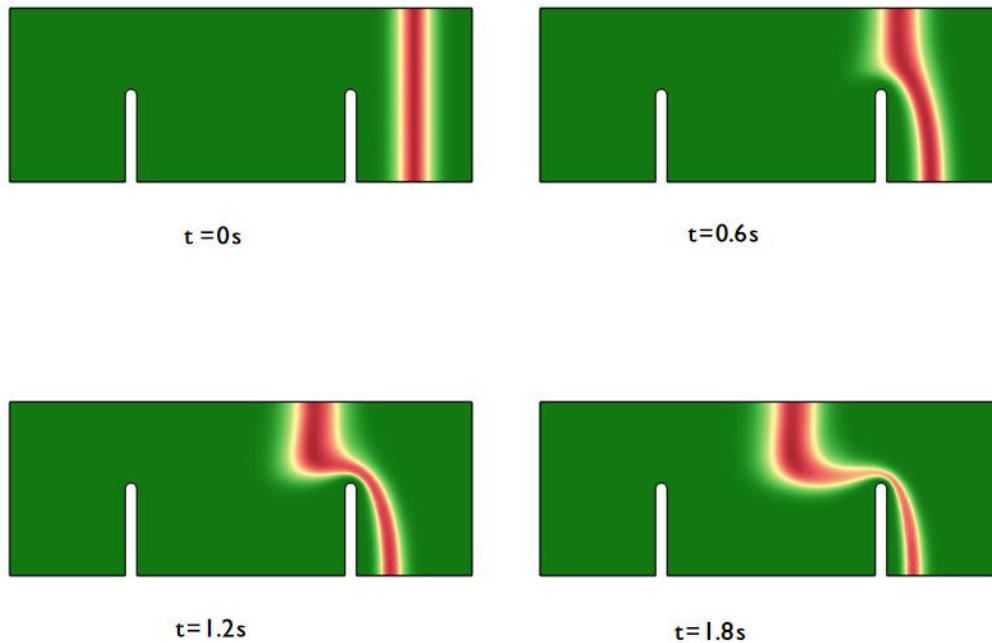


Figure 4.3 : distribution des concentrations à différents instants après injection. Les effets de diffusion, de convection et de migration déforment l'impulsion initiale en forme de cloche.

La Figure 4.4 montre les sections efficaces de l'impulsion le long d'une ligne à $y=2.5mm$ pour les temps $t= 0, 0.5s, 1.0s, 1.5$ et $2.0s$. La diffusion, principalement numérique, brouille les impulsions, tandis que la migration et la convection la traduisent et la cisailent principalement, en fonction de la pression et du champ électrique.

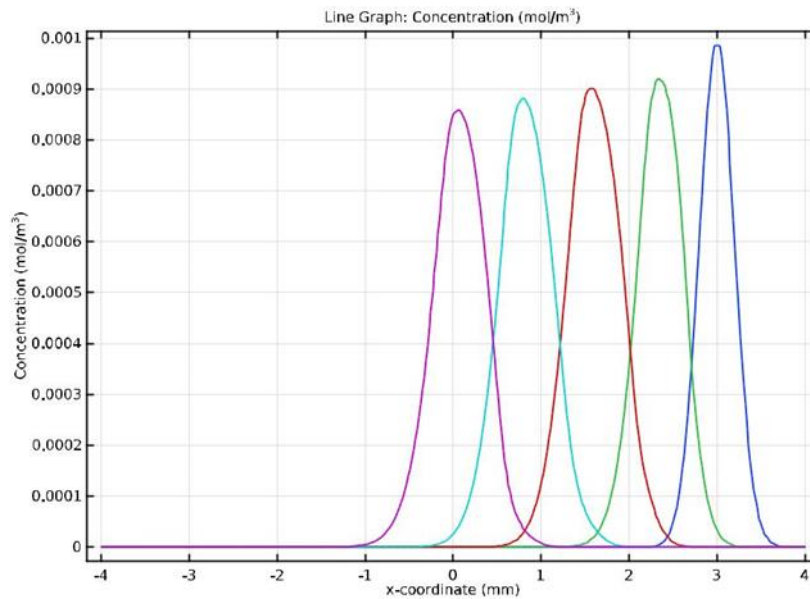


Figure 4.4 : tracé en coupe transversale de la concentration le long d'une ligne horizontale à $y = 2,5$ mm pour les temps $t = 0$ (solide bleu), $0,5$ s, $1,0$ s, $1,5$ s et $2,0$ s

4.3.3. Effet de la variation du potentiel électrique

La *figure 4.5* se compose de plusieurs images prises à intervalles réguliers de deux secondes (2 s) chaque image correspond à un potentiel électrique différent appliqué. En comparant les images, on peut observer des changements dans la concentration, à mesure que le potentiel électrique change, la concentration réagit en conséquence, devenant plus dense ou plus diffuse selon les conditions électrochimiques imposées. Cette représentation visuelle met en évidence comment le potentiel électrique peut influencer directement la distribution et l'intensité de la concentration dans la solution.

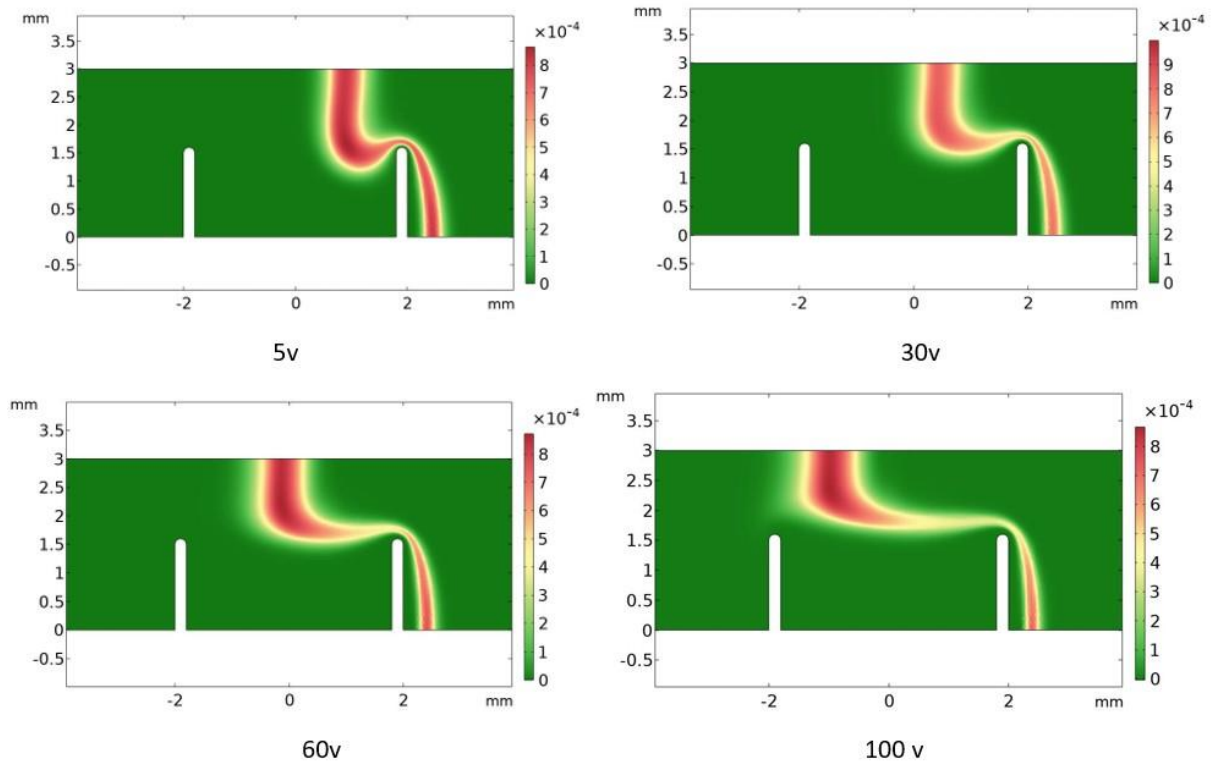


Figure 4.5 : effet de la variation du potentiel électrique sur la concentration a 2 secondes

4.3.4. Effet de la variation de porosité sur la concentration

La figure 4.6 présente une série d'images montrant l'impact de la variation de la porosité sur la concentration. Chaque image a été capturée à des intervalles de deux secondes après un changement de porosité. On constate que les modifications de la porosité entraînent des variations significatives dans la distribution de la concentration.

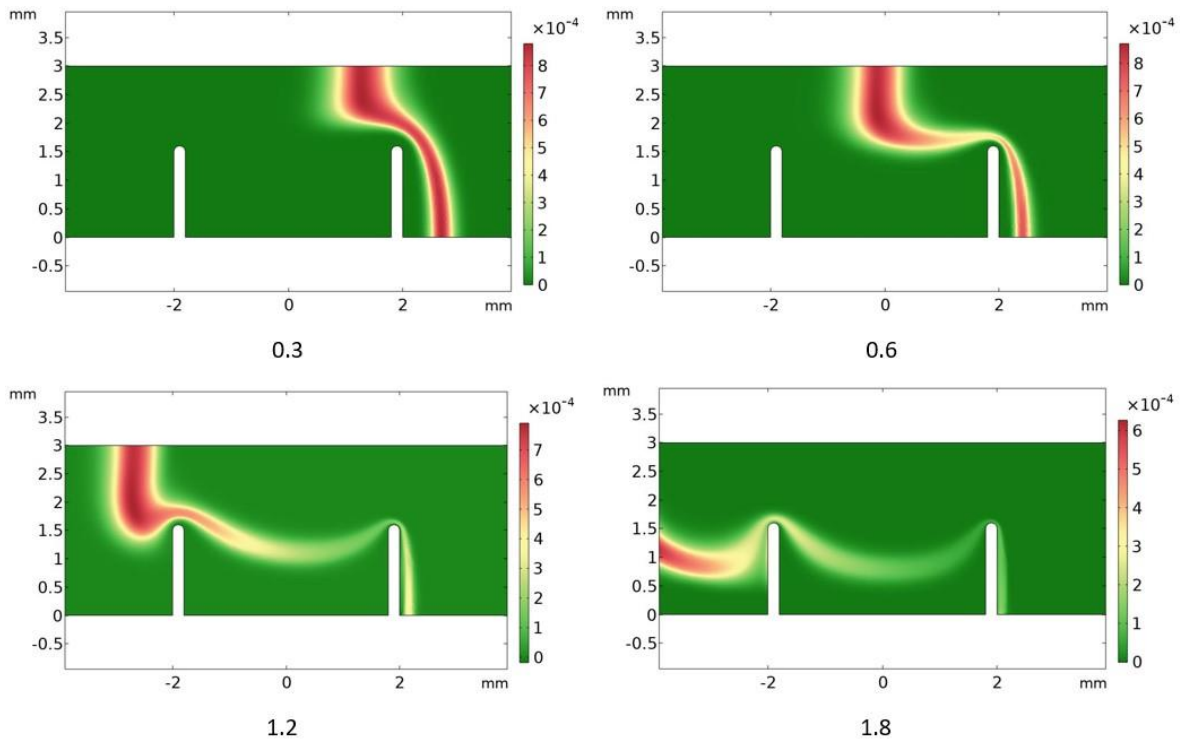


Figure 4.6. Effet de la variation de la porosité sur la concentration à 2 secondes

4.3.5. Effet de variation de la taille des pores

Cette figure (*figure 4.7*) présente quatre images montrant l'effet de la variation de la taille moyenne des pores ($0,5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, et $20 \mu\text{m}$) sur la distribution de la concentration dans un système donné. Chaque image illustre la distribution spatiale de la concentration (en $\times 10^{-4}$ mol/m³, sauf pour la dernière image en $\times 10^{-5}$ mol/m³) sur une surface de 7 mm par 4 mm, avec les axes horizontaux et verticaux représentant les distances en millimètres. Les couleurs indiquent les niveaux de concentration, avec une échelle allant du vert (faible concentration) au rouge (haute concentration).

- $0,5 \mu\text{m}$: la concentration est principalement localisée près de la surface verticale droite avec des valeurs élevées, atteignant jusqu'à 8×10^{-4} mol/m³.
- $10 \mu\text{m}$: la concentration élevée se diffuse légèrement vers la gauche et le centre, avec des valeurs maximales similaires à celles de $0,5 \mu\text{m}$.
- $15 \mu\text{m}$: la zone de concentration élevée se déplace encore plus vers la gauche et le centre, avec une diffusion plus étendue, bien que les valeurs maximales restent comparables.

- 20 μm : la concentration élevée se répartit de manière plus uniforme, avec une diminution des valeurs maximales à environ $5 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^3$, indiquant une diffusion plus large et moins concentrée.

Ces images montrent comment l'augmentation de la taille des pores influence la diffusion et la répartition de la concentration, avec une diffusion plus étendue et uniforme pour des tailles de pores plus grandes.

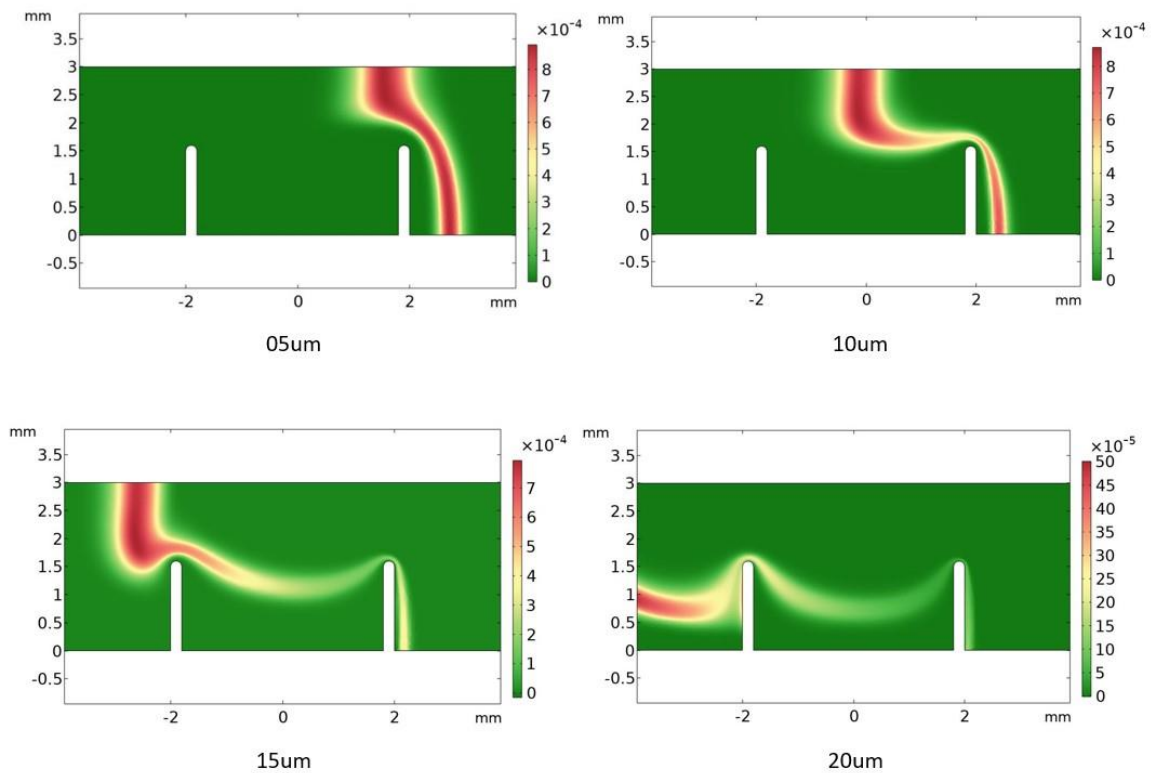


Figure 4.7 Effet de variation de la taille des pores a 2 secondes

4.4. Conclusion

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 illustrent de manière détaillée l'influence de divers paramètres électrochimiques et structuraux sur la distribution de la concentration. La figure 4.5 démontre comment des potentiels électriques variés peuvent moduler la densité et la diffusion de la concentration. La figure 4.6 met en évidence l'impact significatif de la porosité sur la répartition de la concentration, tandis que la figure 4.7 explore l'effet de la taille des pores, montrant que des variations dans les dimensions des pores entraînent des changements notables dans la distribution spatiale de la concentration. Ensemble, ces représentations visuelles confirment l'importance cruciale des conditions électrochimiques et des caractéristiques structurelles dans la détermination de la distribution de la concentration dans des systèmes complexes.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était d'étudier la salinisation des sols, en analysant ses causes, ses impacts et les méthodes de remédiation. Le but était de comprendre comment les processus naturels et anthropiques contribuent à l'accumulation de sels dans les sols et d'examiner les différentes techniques de traitement pour restaurer la qualité des sols affectés par cette dégradation.

Il a été démontré que la texture et la structure du sol influencent significativement sa capacité de rétention en eau et sa perméabilité, des facteurs clés dans la gestion de la salinisation. Les résultats ont révélé que la salinisation peut être causée par des facteurs naturels, comme l'évaporation intense dans les régions arides, et des pratiques humaines, telles que l'irrigation inadéquate et l'utilisation excessive de fertilisants. L'étude a mis en lumière les effets négatifs de la salinisation sur l'environnement, incluant la réduction de la fertilité des sols, la perte de biodiversité et les dommages aux infrastructures.

En ce qui concerne les méthodes de remédiation, plusieurs techniques ont été évaluées :

- Le traitement électrocinétique s'est avéré efficace pour déplacer et extraire les contaminants des sols pollués par des métaux lourds, sans générer de pollution supplémentaire.
- La bioremédiation, qui utilise des micro-organismes pour décomposer les polluants, s'est montrée prometteuse pour sa durabilité et son respect de l'environnement.
- Le lessivage ex-situ, qui implique le traitement des sols en dehors de leur emplacement d'origine, a été présenté comme une solution viable pour des cas de pollution sévère.

Une simulation numérique de l'écoulement électroosmotique a été réalisée pour analyser l'influence de divers paramètres électrochimiques et structuraux sur la distribution de la concentration. Les figures montrent que des potentiels électriques variés, la porosité et la taille des pores affectent de manière significative la répartition de la concentration. Ces résultats confirment l'importance cruciale des conditions électrochimiques et des caractéristiques structurelles dans la détermination de la distribution de la concentration dans des systèmes complexes.

Bien que ce mémoire apporte une compréhension approfondie de la salinisation des sols et propose des solutions innovantes pour sa gestion, certaines limitations subsistent. Les analyses

se basent principalement sur des études de cas spécifiques qui peuvent ne pas être représentatives de toutes les régions affectées par la salinisation. Les effets à long terme des techniques de remédiation présentées n'ont pas été suffisamment étudiés, ce qui limite l'évaluation de leur durabilité à long terme. De plus, il manque une discussion plus approfondie sur l'intégration des différentes techniques de remédiation pour une approche holistique et multifonctionnelle de la gestion de la salinisation des sols.

Référence bibliographique

- 1-Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall.
- 2-Coduto, D. P., Yeung, M. C., & Kitch, W. A. (2011). Geotechnical Engineering: Principles and Practices. Pearson
- 3-"Geotechnical Engineering: Principles and Practices" par Donald P. Coduto, Man-chu Ronald Yeung,
- 4-Mitchell, J.K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons. (p. 60-65).
- 5-Coduto, D.P. (2013). Geotechnical Engineering: Principles and Practices. Pearson. (p. 50-55)
- 6-Das, B.M. (2010). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning. (p. 28-30).
- 7-Holtz, R.D., Kovacs, W.D., & Sheahan, T.C. (2010). An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall. (p. 101-105).
- 8-Brady, N.C., & Weil, R.R. (2010). Elements of the Nature and Properties of Soils. Pearson. (p. 240-245).
- 9-Coduto, D.P., Yeung, M.R., & Kitch, W.A. (2011). Geotechnical Engineering: Principles and Practices. Prentice Hall. (p. 85-90)
- 10-Das, B.M. (2010). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning. (p. 51-55)
- 11- Craig, R.F. (2004). Craig's Soil Mechanics. CRC Press. (p. 105-110).
- 12- Lambe, T.W., & Whitman, R.V. (1969). Soil Mechanics. John Wiley & Sons. (p. 40-45).
- 13- Coduto, D.P., Yeung, M.R., & Kitch, W.A. (2011). Geotechnical Engineering: Principles and Practices. Prentice Hall. (p. 90-95)..
- 13- Das, B.M. (2010). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning. (p. 69-72).
- 14- www.bvna.com/fr/insight/analyse-granulometrique-du-sol-et-des-sediments
- 15 tpdemain.com/module/les-differentes-classes-de-sol/
- 16-Casagrande, A. (1948). Classification and Identification of Soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, 901-930.

- 17- fr.scribd.com/document/477024558/Essai-de-Proctor
- 18 - <https://arboquebec.com/blog/33/la-porosite-du-sol>
- 19-Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology* (2nd ed.). Wiley.
- 20-Rengasamy, P. (2006). "World salinization with emphasis on Australia". *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017-1023.
- 21 - FAO. (2002). "The Salt of the Earth: Hazardous for Food Production". *FAO Soils Bulletin* No. 38
- 22-"Salinity: Environment - Plants - Molecules" par M. Ashraf, M. Ozturk, M.S.A. Ahmad (Eds), 2008. Chapitre 2: "Types of Salinity and Their Impacts on Agriculture" (pp. 25-44).
- 23- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179(4), 945-963
- 24- "Impact of Climate Change on Soil Salinity and Strategies for Adaptation/Acclimatization" par Venkatesan Thiruvengadam et al., publié dans le livre "Climate Change and Agriculture: Emerging Scenarios and Strategies" (Chapitre 7, pages 127-147).
- 25- "Salinization of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies" par Upmanu Lall, publié dans le livre "Water: Science, Policy, and Management" (Chapitre 12, pages 281-305).
- 26- Palmer, S. J., & Bucher, D. J. (2008). "Salinity in Soils: Impacts on Construction and Mitigation Strategies". *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 329-345.
- 27-Cherif, S., & Gherib, A. (2017). "État de la salinisation des sols irrigués en Algérie : cas de la plaine du bas-Chélif". *Journal Algérien des Régions Arides*, Vol. 3, No. 2, pp. 89-102.
- 28- Noomene, M. (2011). "Étude de la dynamique des sels dans les sols irrigués : Cas des régions semi-arides". *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 24, No. 1, pp. 101-116.
- 29 - Punmia, B. C., Jain, A. K., & Jain, A. K. (2005). "Soil Mechanics and Foundations". Laxmi Publications. Chapitre 14 : Effets de la salinisation sur les propriétés des sols, pp. 456-472.
- 30- Acar, Y. B., & Alshawabkeh, A. N. (1993). "Principles of Electrokinetic Remediation". *Environmental Science & Technology*, Vol. 27, No. 13, pp. 2638-2647.

- 31- Barker, D. W., & Hubble, D. W. (1998). "A review of electrokinetic remediation of contaminated soils". *Environmental Reviews*, Vol. 6, No. 3, pp. 191-206
- 32-Bardolle, J. (2015). "Les procédés électrochimiques en chimie industrielle". *Techniques de l'Ingénieur*.
- 33- Bardolle, J. (2015). *Les procédés électrochimiques en chimie industrielle. Techniques de l'Ingénieur*.
- 34 – A.BOUCHIBA M.BELMADI Mémoire de Master académique Amélioration du procédé de désalinisation des sols UMAB(2022-23)
- 35- M.BESSAIM thèse de doctorat Traitement électrochimique des sols hétérogènes UMAB (2018-19)
- 37- M-S. Chun, "Electrokinetic Flow Velocity in Charged Slit-like Microfluidic Channels with Linearized Poisson-Boltzmann Field," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 19, no. 5, pp. 729–734, 2002.
- 38- S. Yao, D. Huber, J. Mikkelsen, and J.G. Santiago, "A Large Flowrate Electroosmotic Pump with Micron Pores," *Proc. IMECE, 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, November 2001*