

Université Mohamed khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

Référence :...../ 2019

جامعة محمد خيضر - بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية و الري

المرجع:



Mémoire de Master

Spécialité : génie civil

Option : géotechnique

Thème

**Renforcement des sols par un processus biologique
inespéré par la nature : étude à l'échelle laboratoire**

Etudiante :

Melle. Meriem Selmi

Encadrant

Dr.Sadok Feia

Co-encadrant

Dr.Abdelali Dadda

Promotion : Septembre 2020

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce mémoire

Je tiens à remercier mon encadrant et mon enseignant à qui je dois beaucoup de respect Dr. Sadok Feia il n'a pas épargné le moindre effort pour m'orienter à l'aide de ses conseils malgré toutes ses préoccupations.

J'adresse mes sincères remerciements à Mon Co-encadrant Dr-Abdelalli Dadda, M^{me} benguerichi, et tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, Mohamed Tayeb Souhila Djouadi, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs, mes frères, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Meriem Selmi

Table des matières

TABLE DES MATIERES

I.1	INTRODUCTION	1
I.2	BIO-CIMENTATION PAR BIO-PRECIPITATION DE CALCITE (CaCO ₃)	1
I.3	MICP: MICROBIAL INDUCED CARBONATE PRECIPITATION	2
I.3.1	Facteurs contrôlent le processus MICP	3
I.4	EICP (ENZYME INDUCED CARBONATE PRECIPITATION “EICP”)	3
I.4.1	Hydrolyse enzymatique d’urée	4
I.5	MODIFICATIONS DES PROPRIETES DES MATERIAUX BIO-CIMENTES PAR EICP	4
I.5.1	Changements microstructuraux	4
I.5.2	Évolution de la porosité	4
I.5.3	Évolution de la perméabilité	5
I.5.4	Résistance à la compression simple (essai d’écrasement USC)	6
I.6	FACTEURS CONTROLANTS DU PROCESSUS EICP	7
I.6.1	PH et alcalinité	7
I.6.2	Effet de la concentration d’enzyme l’uréase	7
I.6.3	Effet du temps de durcissement sur la masse de CaCO ₃	8
I.6.4	Effet de type de sol	9
I.7	Technique de traitement de sol	10
I.8	CONCLUSION	11
II.1	INTRODUCTION	23
II.2	L’ENZYME D’UREASE UTILISE	23
II.3	L’EXTRACTION DE L’ENZYME L’UREASE	23
II.4	PURIFICATION DE L’UREASE	24
II.5	REALISATION DE L’EXTRACTION D’ENZYME	24
II.5.1	Présentation de laboratoire AMRANE	24
II.5.2	Préparation tampon phosphate (KH ₂ PO ₄ et K ₂ HPO ₄)	25
II.5.3	Préparation des grains de soja	25
II.6	MESURE DE L’ACTIVITE DE L’UREASE ET SA STABILITE	27
II.6.1	Méthodes de caractérisation du sable:	28
II.7	Conclusion	34
III.1	Introduction	37

III.2	Test précipitation de CaCO_3	37
III.2.1	Les caractéristiques du sable utilisé :	39
III.2.2	Test dans le sol	39
III.2.3	Réalisation de l'essai :	39
	2 éme essai :	42
III.2.4	Observations et analyse des résultats.....	43
III.3	Résultats attendus :	43
III.3.1	Perméabilité.....	43
III.3.2	Evaluation de la cohésion et l'angle de frottement.....	44
III.4	Conclusions	44

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le béton, l'acier et le bois sont des matériaux de construction. Tous peuvent être à chaque fois adaptés aux besoins du projet : section des éléments porteurs, composition du béton, armature etc. Mais, pour un ingénieur géotechnicien, les matériaux de travail sont les formations géologiques naturelles. Les sols et les roches *in-situ* représentent un «état donné», une constante qui joue le rôle le plus décisif lors de la conception des fondations et pour la protection des structures contre les risques d'instabilité. Souvent, les ingénieurs se trouvent face à des terrains moins résistants, avec de faibles paramètres mécaniques, qui empêchent la réalisation des projets. Il n'est pas exagéré de dire que les bons sols, surtout dans les régions urbaines, sont déjà occupés et que ceux qui restent sont souvent d'une qualité inférieure. Le renforcement des terrains va, dans plusieurs cas, main dans la main avec la mise en place des fondations, ouvrant ainsi un grand marché pour les techniques d'amélioration de sols.

Le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL a développé une technique de bio-minéralisation de la calcite pour produire un géo-matériau bio-cimenté et fournir ainsi des solutions applicables à une large palette de problématiques géotechniques. La bio-cimentation des sols permet même de reconsidérer leur rôle comme matériau de construction. La précipitation de CaCO_3 à l'aide de cellules bactériennes contenant de l'uréase est une technique de biocimentation (Harkes et al. 2010). Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation de la précipitation au CaCO_3 facilitée par l'uréase bactérienne, parfois appelée bio ciment, comme méthode de renforcement des sols (par exemple, van Paassen et al. 2009 ; Whiffin et al. 2007 ; Harkes et al. 2007). La précipitation de CaCO_3 à l'aide de l'enzyme uréase libre, désignée ici par précipitation au carbonate induit par une enzyme (EICP), est une technique beaucoup moins étudiée pour l'amélioration des sols. L'EICP peut être considéré comme une technique bio-inspirée, car aucun organisme vivant n'est directement impliqué dans le processus de précipitation. Au cours des six dernières années, l'EICP a été étudié comme technique alternative au MICP pour l'amélioration des sols par Dilrukshi et Kawasaki (2016), Hamdan (2015), Hamdan et al. (2013), Hamdan et Kavazanjian (2016), Kavazanjian et Hamdan (2015).

L'objectif de ce projet de recherche est d'optimiser cette technique en utilisant des matériaux naturels qui ne sont pas chers tels que : la plante de soja comme source de l'enzyme uréase. Cette technique pourrait être testée en laboratoire pour développer une nouvelle technique de construction de routes par percolation de surface de l'enzyme et du composant chimique afin de renforcer la couche de fondation des routes construites sur des sols de faible résistance.

Résumé

Les sables et les graviers sont des matériaux sans cohésion. Plus ils sont denses, plus ils sont résistants. Selon la taille des grains, ces matériaux peuvent se densifier jusqu'à une certaine limite qui correspond à une résistance ultime. Dans la technique de bio-minéralisation, des cristaux de calcite se forment et occupent une partie de l'espace poral, ce qui donne une structure plus dense. Au lieu de points de contact, les forces sont transmises par des surfaces de contact dans le matériau bio-traité. De cette façon, il acquiert des paramètres mécaniques améliorés. Ces travaux de mémoire ont été réalisés dans le cadre du projet de fin d'étude. L'objectif de cette thèse de master est d'optimiser cette technique en utilisant l'uréase libre d'une source végétale (plantes de soja) au but d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol.

Mot clé : bio-cimentation, EICP, renforcement du sol, uréase, Précipitation de calcite

الملخص

الرمال والحصى مواد غير متماسكة. كلما كانت أكثر كثافة، زادت مقاومتها. اعتماداً على حجم الحبيبات، يمكن لهذه المواد أن تتكثف إلى حد معين يتوافق مع القوة القصوى. في تقنية الترسيب الحيوي، تتشكل بلورات الكالسيت وتحتل جزءاً من مساحة المسام، مما يؤدي إلى بنية أكثر كثافة، تنتقل القوى من خلال أسطح التلامس في المواد المعالجة حيويًا. بدلاً من نقاط الاتصال. وبهذه الطريقة يكتسب خصائص ميكانيكية محسنة. وقد نفنت هذه الأطروحة في إطار مشروع نهاية الدراسة، والهدف الرئيسي هو تحسين هذه التقنية باستخدام انزيم اليورياز الحر من مصدر نباتي (نباتات فول الصويا) بهدف تحسين الخصائص الميكانيكية للتربة دون التأثير على المسامية

، تحسين التربة، اليورياز، ترسيب الكالسيت EICP الترابط الحيوي

Abstract

Sand and gravel are materials without cohesion. The denser they are, the stronger they are. Depending on the grain size, these materials may densify to a certain limit that corresponds to ultimate strength. In the bio-mineralization technique, calcite crystals form and occupy part of the poral space, giving a denser structure. Instead of contact points, forces are transmitted through contact surfaces in the bio-treated material. In this way, it acquires improved mechanical parameters. This memory work was carried out as part of the final project. The objective of this master thesis is to optimize this technique by using the free urease enzyme of a plant source (soybean plants) to improve the mechanical characteristics of the soil

Keywords: bio-cementation, EICP, soil indentation, urease, calcite precipitation

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I.1 INTRODUCTION

Le renforcement du sol est un domaine très particulier qui consiste à surmonter des fameux problèmes géotechniques comme (la faible portance du sol, l'instabilité des talus, la liquéfaction des sols, etc...). En effet, plusieurs techniques de renforcement sont utilisées de nos jours, certaines de ces méthodes sont très anciennes, d'autres sont plus récentes. Une de ces nouvelles techniques est la bio-cimentation qu'est une technique de renforcement par des processus biologiques inspiré de la nature.

Les premiers à avoir suggéré l'utilisation de ces bactéries en tant que biocatalyseur potentiel pour cimenter les sols, sont Whiffin (2004) et Mitchell and Santamarina (2005). Les protocoles de traitement et l'évolution de la résistance mécanique des sols bio-cimentés sont bien maîtrisés ; surtout la voie bactérienne de bio-cimentation où les bactéries jouent un rôle considérable sur l'accélération du processus de précipitation de calcite (CaCO_3) (Castanier et al, 2000).

I.2 BIO-CIMENTATION PAR BIO-PRECIPITATION DE CALCITE (CaCO_3)

La bio-cimentation est une technique de renforcement de sol par des processus biologiques inspirée de la nature, basée sur une réaction biogéochimique, de l'enzyme l'uréase en présence d'une source de calcium et l'urée comme une source de dioxyde de carbone). Elle génère généralement trois morphologies différentes de carbonate de calcium (calcite, aragonite et vaterite), en fonction des conditions physico-chimiques du milieu de réaction (Figure.1) (Ivanov and Stabnikov, 2017).

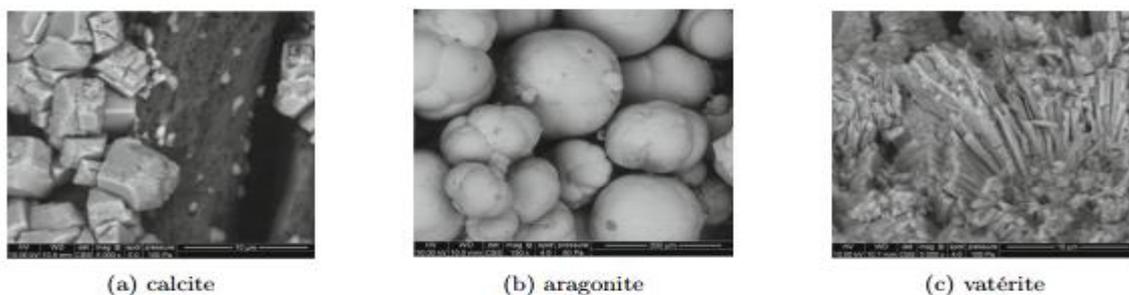


Figure I.1: Morphologies du carbonate de calcium induites par des activités bactériennes (Ivanov and Stabnikov, 2017).

Trois éléments sont nécessaires pour l'application de la technique : Les bactéries (*Sporarcina Pasteurii*) ou des plantes qui peuvent sécréter de l'uréase (de l'urée et du calcium. représenté dans l'équation suivante)



Deux réactions chimiques sont au cœur de la technique: l'hydrolyse de l'urée qui produit des anions de carbonate (CO_3^{2-}) et la précipitation des cristaux de calcite (CaCO_3). Pour réaliser la technique de bio-cimentation on a deux méthodes :



Figure I.2 : Deux types de sable avant et après la bio-cimentation

I.3 MICP: MICROBIAL INDUCED CARBONATE PRECIPITATION

Le principe général est d'injecter dans le sous-sol une biomasse bactérienne (*Sporosarcina pasteurii*) présentant une activité uréasique importante, de faciliter son adhésion sur les grains de sable, puis de fournir l'urée et une source de calcium. La production bactérienne de calcite entre les grains aboutit alors à augmenter considérablement la résistance mécanique grâce à la précipitation.



Figure I.3 : Précipitation de CaCO_3 induite par les microbes via une hydrolyse d'urée (uréolyse)(Gat, Ronen, et Tsesarsky 2016)

La première se fait grâce à l'activité métabolique des bactéries qui décomposent l'urée et utilisent les produits pour se nourrir et améliorer leur microenvironnement. Le carbonate qui se dégage (CO_3^{2-}) réagit immédiatement avec le calcium (Ca^{2+}) pour former des particules solides de CaCO_3 . Avec la présence de l'enzyme uréase l'hydrolyse de l'urée se fait 1017 fois plus vite que la réaction non catalysée.

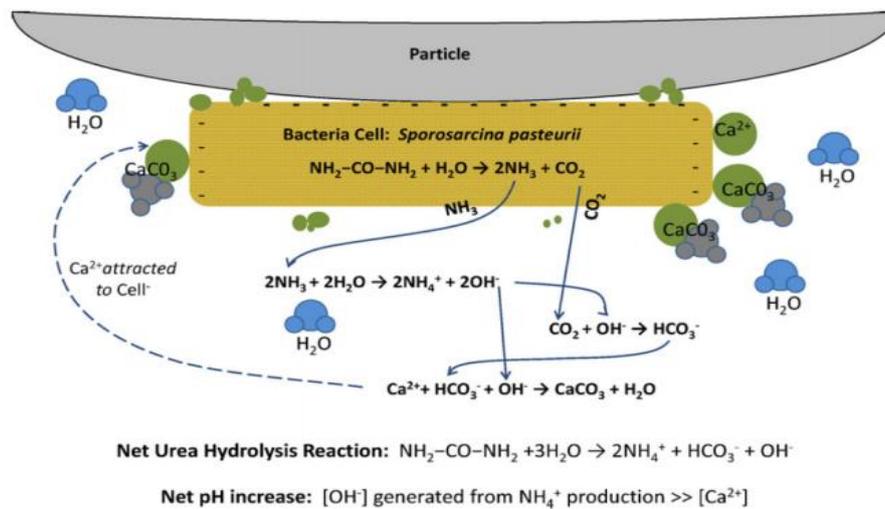


Figure I.4 : Précipitation de CaCO_3 induite par les microbes via une hydrolyse d'urée (uréolyse) (Gat, Ronen, et Tsesarsky 2016)

I.3.1 Facteurs contrôleur le processus MICP

Pour réaliser cette processus in situ il faut comprendre et contrôler les facteurs affectant l'efficacité du Traitement des Précipitations de calcite, à partir des anciennes recherches :

Les trois principaux paramètres :

- (1) le type et la concentration de microorganismes
- (2) la concentration de solution calcifiante (concentration d'ion de calcium et le carbone inorganique dissous)

les facteurs environnementaux: PH, température, salinité, type de sols (granulométrie et minéralogie)

I.4 EICP (ENZYME INDUCED CARBONATE PRECIPITATION "EICP")

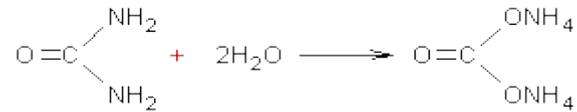
Précipitation de CaCO_3 en utilisant une enzyme uréase libre, L'enzyme utilisée est extraite des plantes comme (soja, haricot gris, graines de pastèque et pois (Kayastha et Das 1999; Das et al.2002).

Le principe du technique est d'injecté une solution composé de :

- 1- Urée comme une source de carbonate
- 2- Chlorure de calcium comme une source de calcium
- 3- Enzyme l'uréase

I.4.1 Hydrolyse enzymatique d'urée

A froid et en présence d'uréase, une enzyme spécifique, l'urée est complètement hydrolysée ; le pH optimal pour cette hydrolyse étant 7 on opère en présence d'un mélange tampon donnant ce pH :



L'uréolyse peut induire une précipitation de carbonate en présence de cations divalents appropriés tels que les ions calcium. Le chlorure de calcium (CaCl_2) est une source potentielle d'ions calcium. L'enzyme uréase agit comme un catalyseur pour la réaction d'hydrolyse. La réaction ci-dessus augmente l'alcalinité et le pH de la solution créant une idéale condition pour la précipitation de carbonate en présence des ions du calcium.

I.5 MODIFICATIONS DES PROPRIETES DES MATERIAUX BIO-CIMENTES PAR EICP

I.5.1 Changements microstructuraux

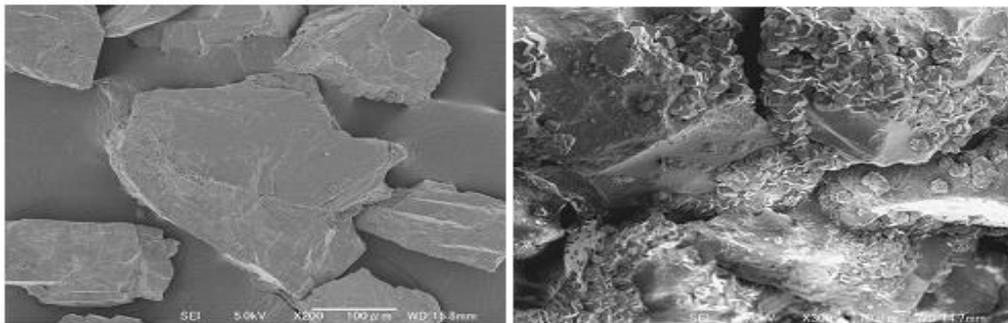


Figure I.10 : image SEM d'un sable avant et après le processus (Yasuhara et al. 2012)

Comme montré dans la figure I.10, la calcite précipité est située sur la surface libre et aux frontières des grains. Le carbonate de calcium précipité, collé autour des grains, ce qui reflète le nombre plus élevé de liaisons entre les particules du sol, ce qui donne une augmentation des propriétés mécanique du sol traité (Al Qabany et Soga, 2013; Cheng et al. 2013; Neupane et al. 2015a; Whiffin et al. 2007; Yasuhara et al. 2012). Dans plusieurs études, les propriétés mécaniques ont montré une relation proportionnelle avec la teneur en carbonate de calcium,

I.5.2 Évolution de la porosité

La bio-cimentation a l'effet de la réduction de la porosité du sol, cette diminution est liée à la précipitation de la calcite au niveau des pores (Figure I.11)

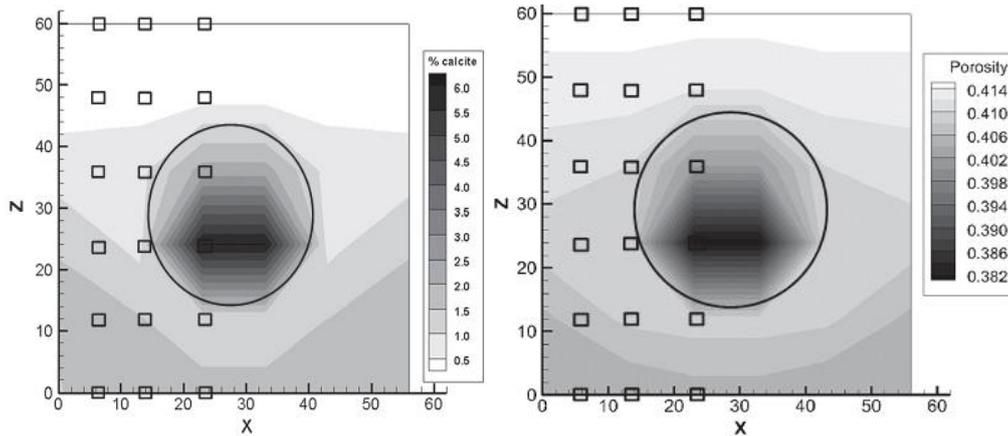


Figure I.11 : Distribution de CaCO_3 et la porosité à l'intérieur du tambour d'essai dans un plan vertical près du centre, (Neupane.2013)

On observe que plus que le taux de calcite est élevé plus la réduction de porosité est importante. (Neupane. 2013) a montré que pour un taux de précipitation des carbonates de calcium de 1.5 % à 6 % la réduction correspondante de la porosité varie de 2 % à 7 % Et que la réduction de la porosité est élevée près du point d'injection, et il diminue en se déplaçant vers le haut ou vers le bas (figure I.12)

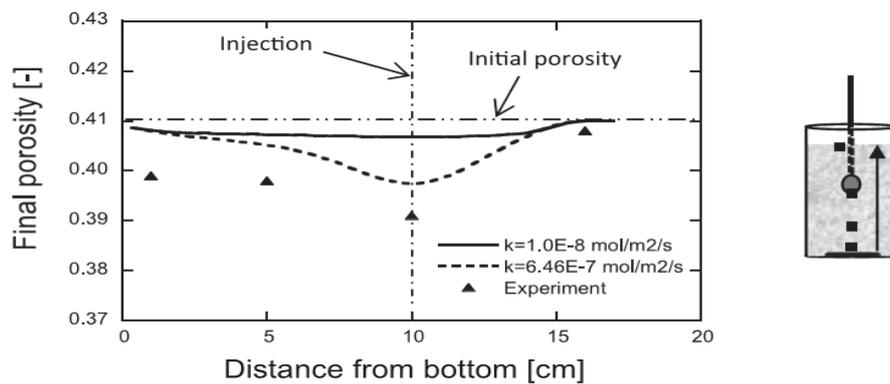


Figure.12 : Répartition verticale de la porosité à l'intérieur du cylindre médian

I.5.3 Évolution de la perméabilité

La perméabilité est de la plus haute importance car la technique est préférée pour les sols de nature perméable ou semi-perméable (par exemple, le sable et le gravier).

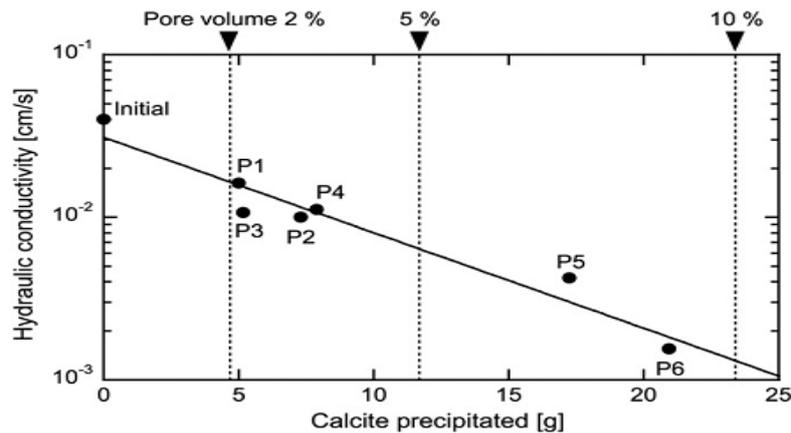


Figure I.13 : la relation entre la conductivité hydraulique (la perméabilité) et la masse de calcite précipitée (Yasuhara et al ,2012)

Ce graphe montre que la perméabilité décroît de façon log-linéaire en fonction du taux de calcite précipitée. La conductivité hydraulique initiale de 0,04 cm / s diminue de 60 à 70% avec l'augmentation de taux de la calcite précipitée. (Yasuhara et al ,2012) ont montrant que les concentrations urée - CaCl_2 et la quantité d'uréase n'influencent pas de façon significative les changements de perméabilité lorsque le nombre des injections de solution est juste 1 par contre plus il y a de nombres d'injection, plus on aura des diminutions de perméabilité.

I.5.4 Résistance à la compression simple (essai d'écrasement USC)

Plusieurs études dans littératures ont montré l'efficacité du processus EICP a amélioré la résistance (Yasuhara et al.2012; Neupane et al. 2013; Neupane et al. 2015; Putra et al.2016). Les tests de compression simple sont menés pour examiner les effets de l'amélioration exercée sur la rigidité et la résistance des échantillons de sable traités.

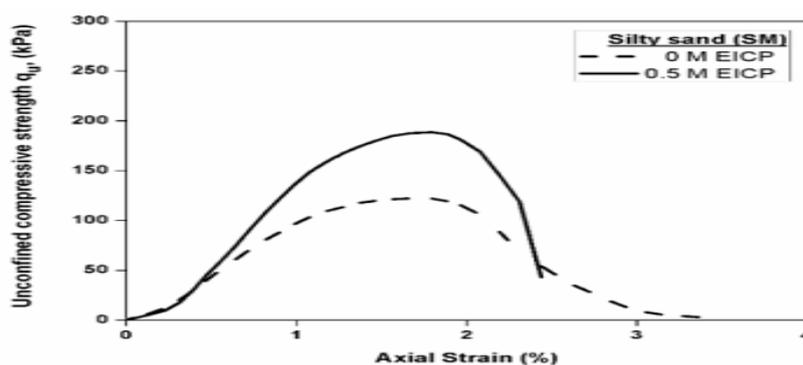


Figure I.14 : courbes contrainte-déformation d'un sol traité et non-traité (Alok Chandra et Ravi .2018)

Analyse de la figure :

Ce graphe représente les courbes contrainte-déformation d'un sable limoneux avant et après la bio-cimentation, on observe que la résistance maximale d'un sol non-traité est 120 kPa et presque 180 kPa après le traitement c'est-à-dire une augmentation de 60 KPa dans la

résistance cette résultat montre l'efficacité du processus a augmenté la résistance d'un sol, cette augmentation est liée à la quantité du carbonate du calcium précipité dans l'échantillon (figure I.16).

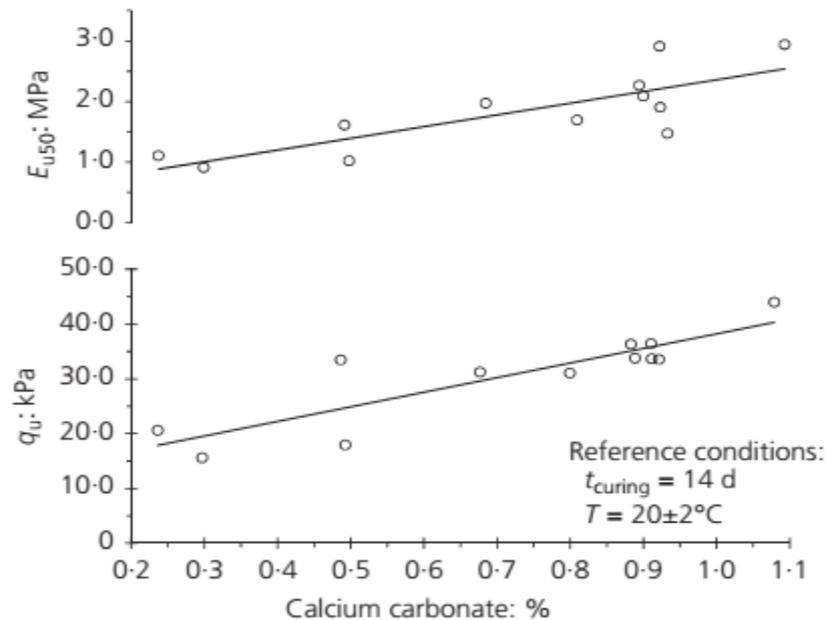


Figure I.15: relation entre q_u et E_{u50} et le taux de précipitation du CaCO_3 (Carmona et al .2017)

Cette courbe montre que les propriétés mécaniques avaient tendance à augmenter avec la teneur en carbonate de calcium .Carmona 2017 a expliqué que la forte dispersion dans les résultats malgré l'augmentation générale des propriétés mécanique est essentiellement due à la non-uniformité du processus de bio-cimentation.

I.6 FACTEURS CONTROLEURS DU PROCESSUS EICP

I.6.1 PH et alcalinité

La précipitation de CaCO_3 ne peut pas se produire sans un pH et une alcalinité suffisamment élevés les principaux avantages d'induire et de maintenir un pH suffisamment élevé dans un environnement EICP (par exemple, $\text{pH} > 9$) sont les suivants:

1. une saturation accrue par rapport au CaCO_3 qui pousse la réaction EICP plus loin vers l'achèvement,
2. suppression des organismes nitrifiants typiques qui produisent des conditions acides via l'oxydation de $\text{NH}_4^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ puisque ces organismes sont généralement inhibés à pH élevé.

I.6.2 Effet de la concentration d'enzyme l'uréase

La figure I.21 montre qu'une augmentation de la quantité d'uréase augmenté l'efficacité de la réaction, car une quantité plus élevée d'urée a été hydrolysée et par conséquent une plus grande masse de le carbonate de calcium a précipité.

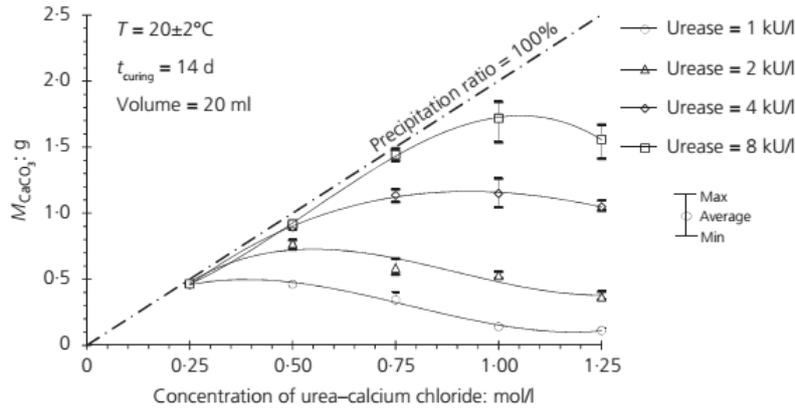


Figure I.21 : la masse du carbonate de calcium précipitée en fonction de la concentration de l'uréase et du l'urée-CaCl₂ Carmona et al. (2017)

I.6.3 Effet du temps de durcissementsur La masse de CaCO₃

L'effet du temps de durcissement sur le mCaCO₃ pour différents concentrations d'urée - chlorure de calcium (0.25 - 1.25 mol / l) et uréase (4 et 8 Ku / l) est illustré sur la figure

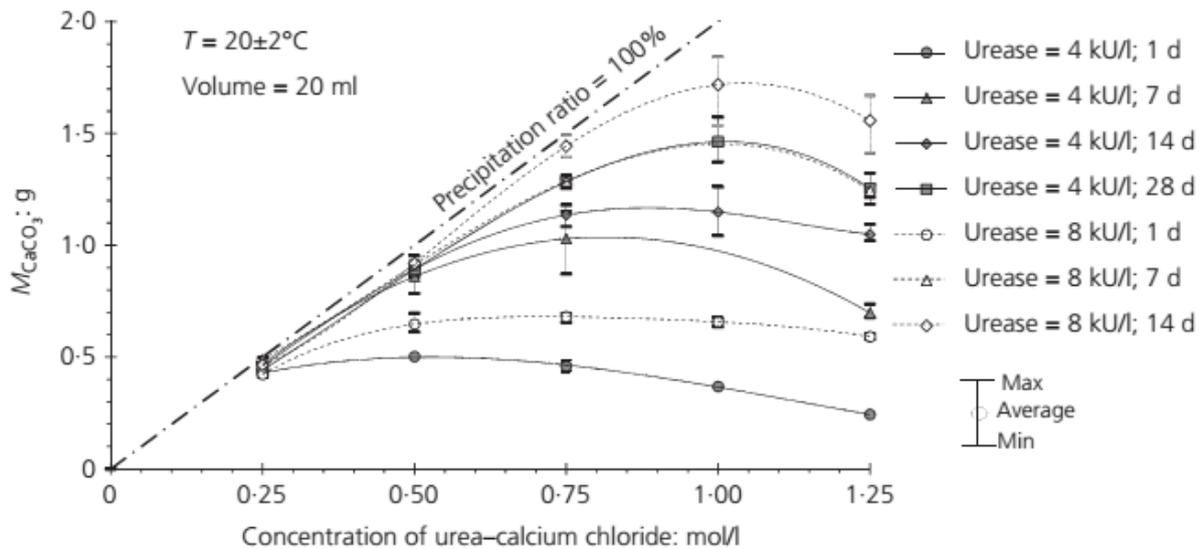


Figure I.24 : Masse de carbonate de calcium précipitée dans des Tests de précipitation de CaCO₃ en fonction du temps de durcissement et concentration d'uréase et d'urée-chlorure de calcium Carmona et al. 2017

Cette courbe présente la variation de la masse de carbonate de calcium précipitée en fonction du temps de durcissement et concentration de l'uréase et urée-CaCl₂, On observe que pour la même concentration de l'uréase (4 KU/l) et de l'urée-CaCl₂ (0.75 M/l) l'augmentation du temps de durcissement de 1 j à 28 j a augmenté la masse CaCO₃ précipitée de 0.4 g à 1.3 g une précipitation maximale dans un temps spécifique est correspondent a une concentration optimale exemple : la concentration optimale pour 14 jours est 0.75 M/l pour une concentration de 0.25 M/l un jour était suffisant pour avoir un taux précipitations ≈ 100% .

Carmona et al .2017 ont montré que pour de faibles concentrations des réactifs (urée – chlorure de calcium), le mCaCO₃ a augmenté fondamentalement pendant la période initiale.

Et pour des concentrations de réactif élevées, le $mCaCO_3$ a augmenté plus progressivement sur un temps de durcissement prolongé (environ 28 j).

L'effet du temps de durcissement montre certains aspects en accord avec les résultats rapportés par Nemati et Voordouw (2003).

I.6.4 Effet de type de sol

Alok Chandra .2018 ont réalisés la technique EICP sur trois types de sol (limon ML, sable limoneux SM et sable argileux SC) pour illustrer l'effet de type de sol sur la technique et trouvent une efficacité de cette technique dans les trois types de sol les images SEM montrent l'existence de la calcite dans les trois sols traités avec une augmentation dans les propriétés mécaniques (Figure I.25)

On observe une augmentation de $q_{u_{max}}$ dans les trois types de sol mais une moindre augmentation dans limon ML de 130 KPa à 170 KPa et des augmentations plus fortes dans le sable limoneux de 120 KPa a 190 KPa et le sable argileux de 160 KPa a 270 kPa.

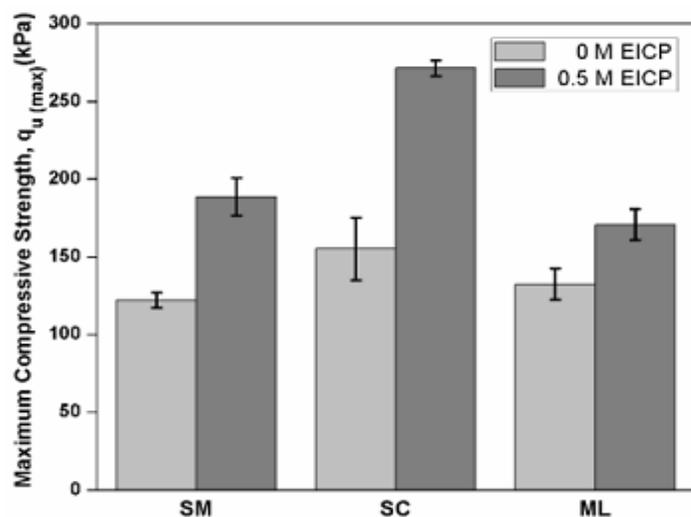


Figure I.25 : Effet du traitement sur la Résistance maximale à la compression de trois types de sol différents. ($q_{u_{max}}$)

D'après Alok Chandra.2018 la différence de la résistance dans les trois types de sol peut être expliquée pour les deux raisons possibles à savoir (1) la compatibilité de taille entre la granulométrie du sol et les cristaux de calcite; (Harkas et al.2010; Mortensen et al.2011) : L'augmentation la plus efficace de la résistance et de la rigidité du sol est lorsque les grains du sol sont densément disposés pour fournir un grand nombre de points de contact pour la nucléation des cristaux de calcite et ainsi faciliter un meilleur transfert de charge entre les grains du sol au niveau des contacts inter-particules .

(2) pH du sol ; le sable limoneux (SM) a un $ph= 7.5$ et le sable argileux (SC) $ph= 7$, comme on a déjà discuté dans le paragraphe précédent (effet de ph) fournit un environnement potentiel pour l'hydrolyse de l'urée et les précipitations de $CaCO_3$ montré aussi par (Chou et al.2011; Burbank et al.2013).

Dans le cas d'un sable limoneux Oliveira et al. (2016) et Soon et al. (2012) ont observé un taux d'amélioration significatif contradictoire avec l'étude de ALOK Chandra la différence entre les deux sols limoneux utilisé dans ces deux étude est la valeur de $ph 7.75$ et moins de 5

respectivement .Alors le $\text{pH} < 5$ crée un environnement légèrement acide et empêche le l'hydrolyse de l'urée précipitant ainsi moins de calcite.

I.7 Technique de traitement de sol

Trois stratégies de traitement ont été utilisées dans les études au laboratoire du processus de bio-cimentation (méthode d'injection, méthode de percolation de surface et méthode de pré-mixing).

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des méthodes de traitement.

Méthode d'injection	Percolation de surface	Pré-mixing
<p>Définition : inspirée de méthode classique de traitement l'injection de coulis qui consiste à injecter sous une forte pression un mélange visqueux d'un liant hydraulique</p> <p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> -La plus utilisée (Whiffin et al. 2007, Neupane, 2013) -facilité de contrôle in situ (contrôle de la vitesse d'injection, direction) -Utilisé pour renforcer l'ancienne structure /renforcement de la surface 	<p>Définition : Cette méthode de renforcement consiste à pulvériser la solution EICP a la se diffuser sous l'effet de la gravité dans le sol.</p> <p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> -énergie minimale pour la réalisation, Très efficace pour renforcer les couche de forme et la suppression de poussières / contre l'érosion externe <p>Limites : on ne peut pas utiliser cette méthode pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> Les grandes profondeurs Les sols dont des faibles perméabilités (sols fins < 3 mm) 	<p>Définition :</p> <p>L'introduction de la solution EICP/MICP dans les sols avec cette méthode est réalisée par le malaxage mécanique de solutions et le sol à traiter</p> <p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> Plus homogènes <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Le malaxage mécanique peut diminuer l'efficacité de traitement -N'est pas favorable pour plusieurs types de structures

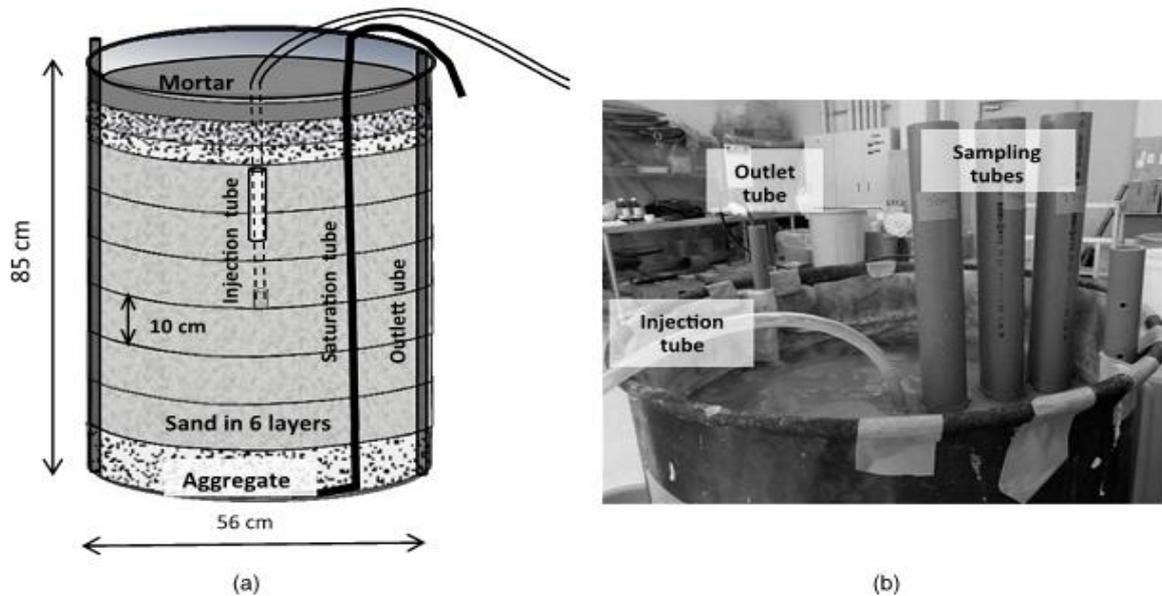


Figure I.26 : essai a grand échelle au laboratoire par méthode d'injection (Neupane et al, 2013)

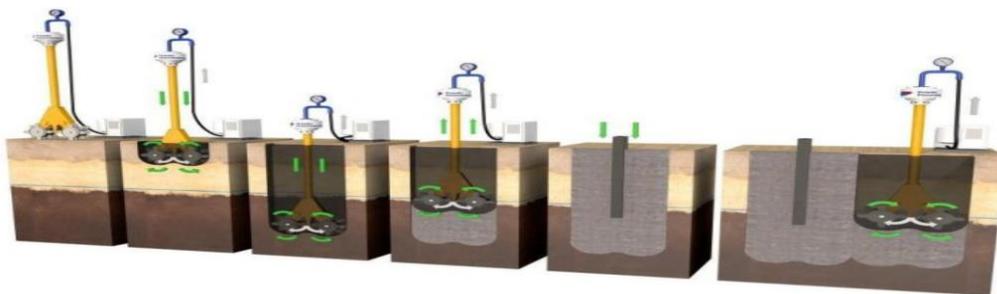


Figure I.27: Principe de fonctionnement des Colonnes de Soil-Mixing(Pascal VILLARD 2018)

I.8 CONCLUSION

Ces dernières années, le « EICP » a attiré les chercheurs qui ont démontré avec succès son application par des expériences à l'échelle de laboratoire. Cela comprend injecter ou percoler la solution EICP dans la colonne de sable, ce qui améliore la résistance et la réduction de la perméabilité (Yasuhara et al.2012; Neupane et al.2013; Neupane et al.2015; Putra et al.2016). La petite taille de l'enzyme uréase libre solubilisée utilisée dans l'EICP lui confère un avantage unique par rapport à l'uréase microbienne pour les applications d'ingénierie nécessitant une pénétration dans des sols à grain plus fin.

L'utilisation de l'enzyme d'uréase libre présente un autre avantage potentiel, à savoir la diminution de l'activité enzymatique et de sa fonctionnalité dans le temps (Pettit et al. 1976 ; Marzadori et al. 1998), Bien que l'enzyme d'uréase libre doive se dégrader rapidement, l'uréase absorbée par les particules du sol peut persister plus longtemps sans perte de fonction ni dégradation protéolytique (Pettit et al. 1976). L'utilisation de l'enzyme uréase libre est

également beaucoup plus simple que l'utilisation de microbes, car il n'est pas nécessaire de cultiver ni de stimuler les bactéries.

Les colonnes EICP peuvent être installées sous forme de pieux pour assurer la stabilité des pentes, pour soutenir les fondations et les remblais, pour limiter l'épandage latéral dans les sols liquéfiables et pour réparer le tassement de la fondation sous les structures existantes (Hamden et al.2013). L'EICP peut être utilisé pour le colmatage sélectif des fractures présentes dans la structure endommagée des puits d'extraction de pétrole, empêchant ainsi le transport de sable pendant la récupération du pétrole (Nemati et Voordouw 2003) et améliorant également la récupération d'huile de la craie réservoirs (Larsen et al.2008).

Finalement après cette recherche bibliographique sur la bio-cimentation spécialement la bio-cimentation par l'EICP qui a montré une bonne efficacité a laboratoire pour le renforcement des sols, ce qui améliore la résistance et la réduction de la perméabilité mais cette efficacité est conditionnelle aux concentrations d'urée- CaCl_2 , au concentration de l'uréase le pH et l'alcalinité type de sol, temps de durcissement, etc...

Chapitre2

Identification des matériaux utilisés

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous avons présentées l'identification des matériaux étudié dans notre travail (le sol a traité et ces caractéristiques mécanique et physiques, la source de l'enzyme d'uréase). Nous allons décrire aussi brièvement le protocole a suivi pour cette identification.

II.2 L'ENZYME D'UREASE UTILISE

Le processus EICP qu'est basé sur la précipitation de carbonate de calcium par l'enzyme d'uréase libre qu'est disponible au marché sous forme de poudre.

l'uréase commercialisé est très cher, en raison de la difficulté de l'extraction et de la purification. Il est produit en petites quantités à usage médical, alors on a essayé a extraire l'enzyme d'une source végétale car c'est une source moins cher et riche en enzyme.

II.3 L'EXTRACTION DE L'ENZYME L'UREASE

On peut dire que le mot extraction désigne l'action de séparer une substance quelconque du composé dont elle fait partie.

Les méthodes d'extraction correspondent au transfert sélectif d'un soluté contenu dans le milieu initial vers un second milieu sans lequel il est soluble en vue de son isolement (Brisset, 2005).

Principe : l'extraction consiste en la libération des enzymes des cellules ou constituants cellulaires

Nécessitant donc un éclatement de la paroi on de la membrane cellulaire par des procédés mécaniques, physiques ou chimiques (LAURENT ,1982).

Pour l'extraction de l'enzyme d'uréase, on a suivi un protocole simple dont la procédure est comme suit :

1. Mettre 50 g de graine broyé dans 100 ml d'une solution composé de 30 ml d'acétone froide et le reste c'est du tampon phosphate (KH_2PO_4 et K_2HPO_4) 0.1 M à pH 7.0 (comme solvant d'extraction) ;
2. Conserver le mélange à une température de 4 °C pendant 3 à 4 heures.
3. Après la période de conservation, filtrer la solution dans un bécher à l'aide de compresses;
4. Centrifuger la solution à une vitesse de 4000rpm pendant 10 à 15 min.
5. Finalement, on obtient le filtrat qui est considéré comme un extrait brut de l'uréase.

II.4 PURIFICATION DE L'UREASE

La purification est un ensemble d'opération visant à enlever toutes les impuretés d'un extrait brut contenant l'enzyme d'intérêt.

En principe, n'importe quelle méthode destinée du fractionnement de protéines peut être employée pour la purification d'enzymes (ILLANES, 2008)

Objectifs de la purification : (HAINQUE et al .2008 ; CEZARD, 2009)

- Un maximum du rendement et de l'enzyme
- Un maximum de pureté possible
- Un maximum de son activité catalytique

Les étapes de la purification :

1. Pour purifier l'enzyme on prépare un mélange de 50% de l'acétone froide à l'extrait brut de l'uréase;
2. Conserver le mélange a une température de -10 °C pendant 2 à 3 heures
3. Centrifuger le mélange à une vitesse de 4000rpm pendant 10 à 15 min

La pâte précipitée à la base de tube est riche en protéines et contient l'enzyme objet

II.5 REALISATION DE L'EXTRACTION D'ENZYME

Tous les essais concernent l'enzyme (extraction purification, activité enzymatique, type teste ...) étiez réalisés ou laboratoire Amrane à la wilaya de Biskra.

II.5.1 Présentation de laboratoire AMRANE

Laboratoire AMRANE, est un laboratoire privé de contrôle de qualité et de la conformité situé à la Wilaya de BISKRA. L'organisation interne de laboratoire est sous la responsabilité de la directrice Dr. AMRANE Manel.

« Mme AMRANE Manel est une diététicienne nutritionniste depuis 2016, Ingénieur en technologies agro-alimentaire, diplômée de l'université de Constantine depuis 2017 et membre à l'association de la protection de consommateur depuis 2018. Avec plus de cinq ans d'expérience, Mme AMRANE a eu l'opportunité de travailler avec plusieurs organisations et dans des milieux de travail variés, comme les secteurs Alimentaires, restauration collective, laboratoire de contrôle et laboratoire universitaire.

Mme AMRANE a participé à plusieurs formations dans le domaine de conseils et bonne pratique d'hygiène, sécurité alimentaire, formation en technologies agro-alimentaire.

Avec ses expertises, AMRANE Laboratoire propose une palette de services pour prévenir l'ensemble des risques alimentaires, de sécurité ou environnementaux pour la protection des biens et des personnes. Notre expertise et notre réseau nous permettons de répondre à une clientèle très large :

- Secteur agro-alimentaire;
- Alimentation de bétail;
- Produits pharmaceutique et parapharmaceutique;
- roduit d'entretien et de nettoyage;
- Analyses de sol, analyses d'eau et de sels industriels;
- Produits de texture et d'emballage;
- Analyses environnementales et nutritionnelles;
- Produits cosmétique;
- Étude des fiches technique des sociétés agro-alimentaires;
- Formation et conseils en bonne pratique d'hygiène et sécurité alimentaire;
- Formation en technologies agro-alimentaire

II.5.2 Préparation tampon phosphate (KH_2PO_4 et K_2HPO_4)

Pour une concentration de 0.1 M de tampon on mélange 87.09 g de K_2HPO_4 dans 0.5 l d'eau distillé et 68.045 g de KH_2PO_4 dans 0.5 L d'eau distillé une valeur de pH égale à 7.0nécessite 61.5 ml de solution K_2HPO_4 et 38.5 ml de solution KH_2PO_4 .

II.5.3 Préparation des grains de soja

Nous pesons 50 g des grains de soja et les broyés



Figure II.1 préparation des grains de soja.



Figure II.2 grains broyé, acétone et tampon, avant et après le mélange

Conserver le mélange à une température de 4 °C pendant 3 à 4 heures.



Fig. III.4 solution enzymatique



Figure II.5 : Centrifuger le mélange



Figure II.6 résultat de centrifugeas de l'enzyme brut

La pâte précipitée à la base de tube est riche en protéines et contient l'enzyme objet de l'étude.

II.6 MESURE DE L'ACTIVITE DE L'UREASE ET SA STABILITE

Il y a différentes techniques de mesure de l'activité de l'uréase, mais la méthode colorimétrique est considérée comme la méthode la plus précise.

Méthode utilisée :

- On prépare une solution qui contient :
- 100 ml de l'urée de 1M de concentration, 0.7 ml tampon phosphate à pH 7.0, 100 ml rouge de phénol et 100 ml d'uréase.
- On calcule l'absorbance de cette solution par un spectrophotomètre à DO 540nm.

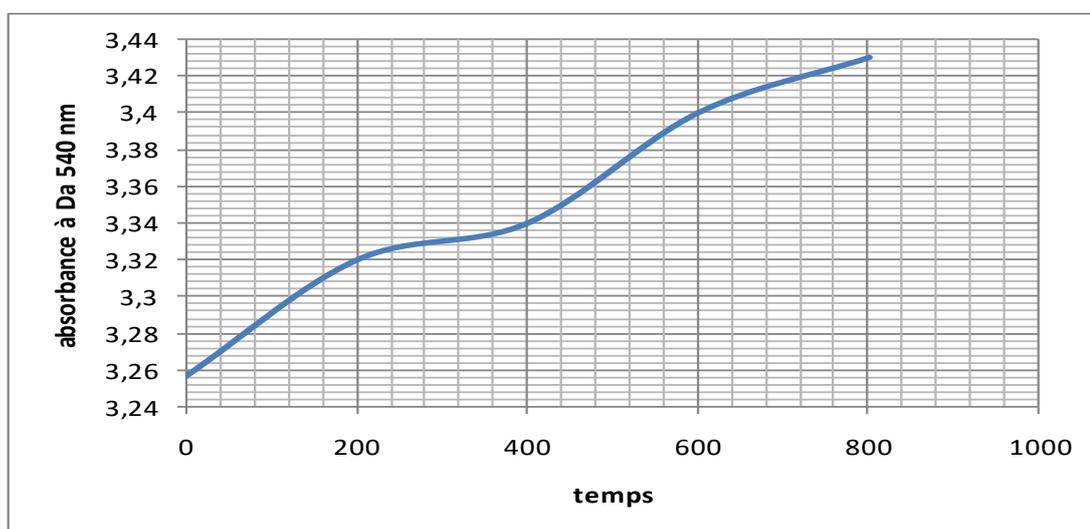


Figure II.7.L'absorbance en fonction de temps d'une solution d'enzyme brute

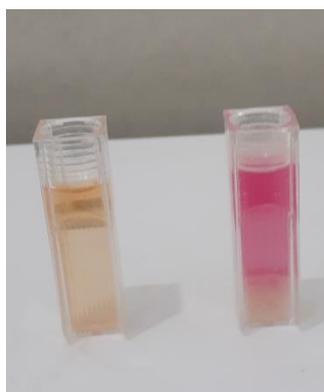


Figure II.8 .L'essais de mesure l'activité par la méthode colorimétrique (en rose c'est de l'enzyme et en jaune c'est un test a blanc).

TYPE DE SOL TESTE

Dans cette étude expérimentale nous avons utilisé le sable des dunes de Oued-Souf qui présente une granulométrie uniforme.

II.6.1 Méthodes de caractérisation du sable:

Pour mieux interpréter nos résultats expérimentaux, une caractérisation du sable étudié, avant et après l'essai est nécessaire pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques du sable bio-cimenté. Pour cela nous avons été amenés à réaliser les essais suivants :

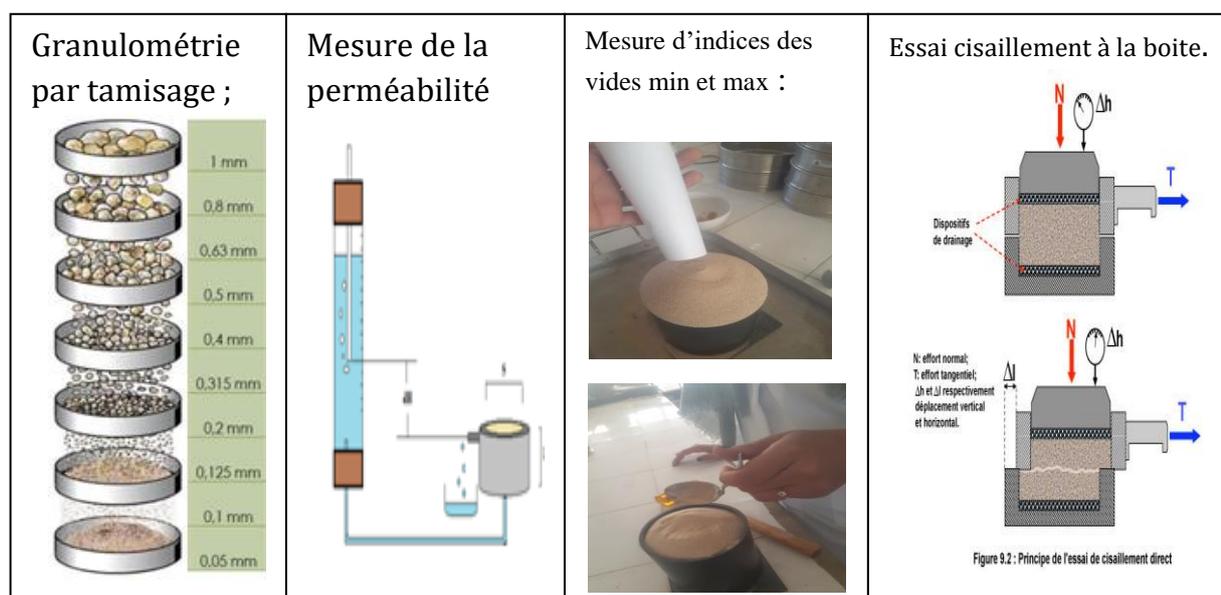


Fig. II.9 Méthodes de caractérisation du sable testé

1- Granulométrie par tamisage :

L'analyse granulométrique permet, à l'aide de différents tamis, de déterminer précisément la composition d'un matériau afin d'en déduire ses caractéristiques mécaniques. Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols. Il est important de caractériser un sol mais aussi de le classer. C'est-à-dire les mettre dans un groupe ayant les comportements similaires, les tamis sont emboîtés dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissantes du bas de la colonne vers le haut.

- La pesée de départ de l'échantillon est de 1 kg,
- Laver l'échantillon de telle façon à éliminer les éléments fins, de diamètre inférieur à 0.08mm, en projetant de l'eau en pluviation à faible débit tout en remuant et en brossant les matériaux jusqu'à ce qu'il ne reste que des éléments propres,
- Sécher l'échantillon à l'étuve,
- Peser l'échantillon après sa sortie de l'étuve,
- Verser la totalité du matériau sèche au sommet d'une colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. Pendant 15 min

- Terminer le tamisage en remuant soigneusement le matériau à la main jusqu'à ce que plus aucun élément ne passe à travers les mailles de chaque tamis.
 - Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R1 la masse de ce refus.
 - Peser le refus du tamis immédiatement inférieur avec le refus précédant, soit R2 la masse des deux refus
 - Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ord des ouvertures décroissantes, ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R aux différent niveau de la colonne de tamis, le tamisât présent sur le fond de la colonne est également pesé.
- La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit au sommet de la colonne.
- La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 1% du poids total de l'échantillon, de départ.

Résultat :

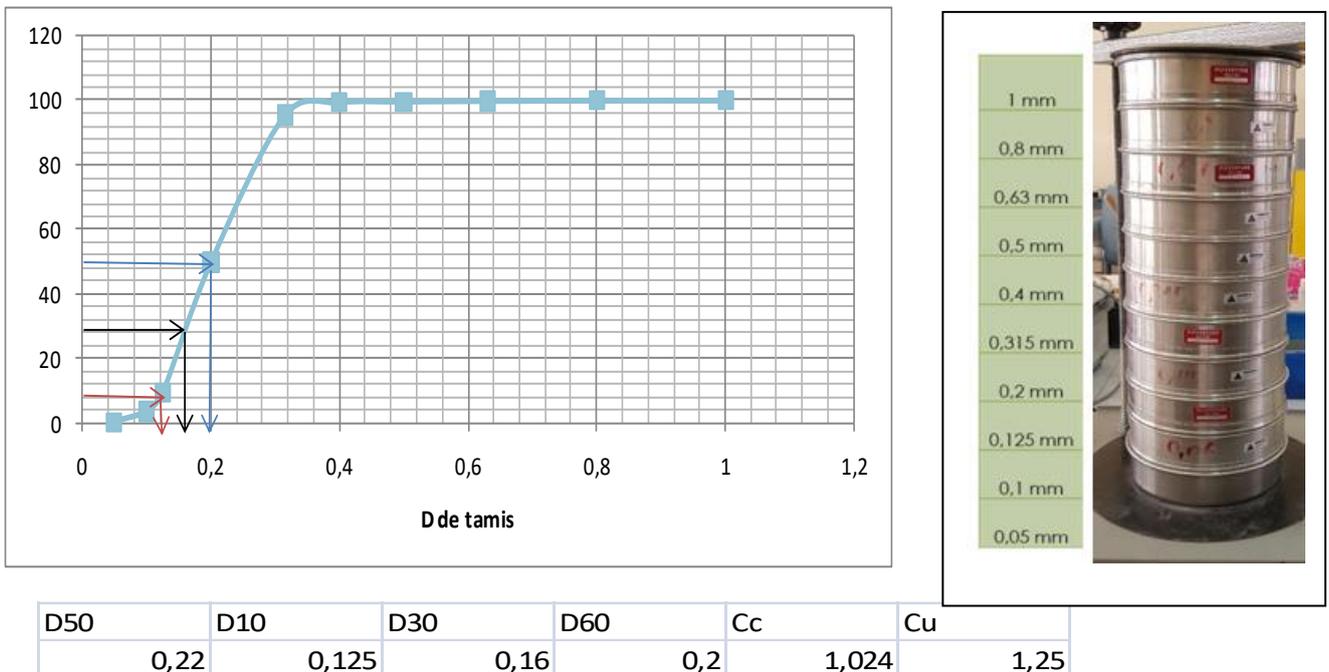


Figure II.10 : Courbe granulométrique de sable étudié

2- mesure de perméabilité:

La perméabilité intrinsèque est caractéristique d'un sol et est fonction des grosseurs des pores et de la distribution des différentes grosseurs, de la tortuosité des pores par rapport à un écoulement droit, et finalement de la texture du sol où les différents minéraux avec leurs surfaces spécifiques définissent l'intensité des forces d'adsorption dont découlent les frottements.

PERMÉAMÈTRE À CHARGE CONSTANTE :

La méthode du perméamétrie à charge constante découle directement de l'application de la loi de Darcy en utilisant un montage correspondant à la figure suivante :

La loi de Darcy :

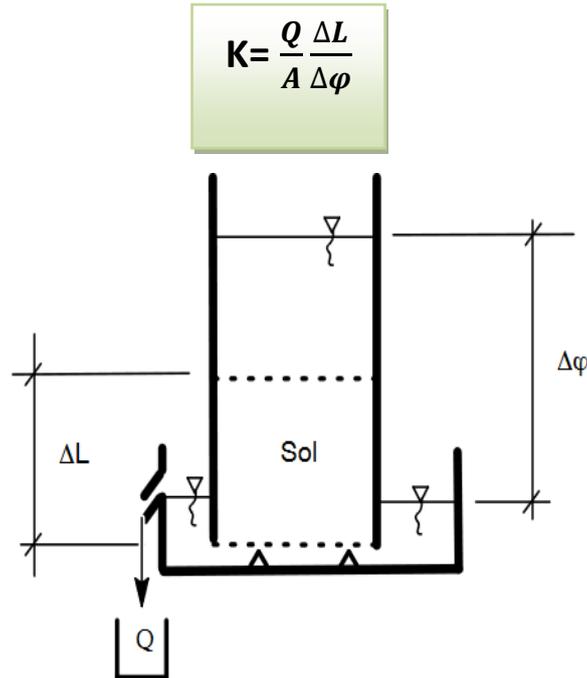
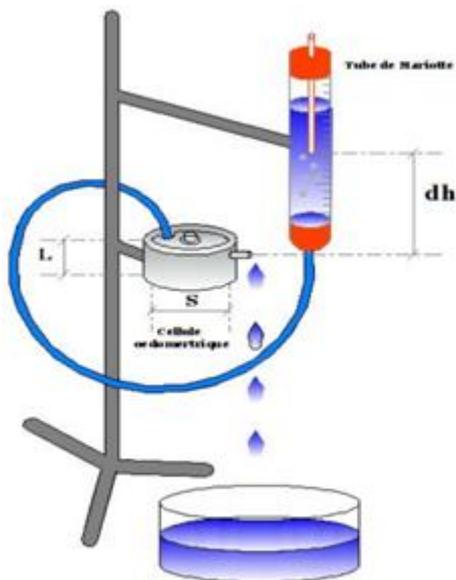


Fig II.11 : schéma descriptive d'essai de perméabilité

Le perméamétrie est constitué en ajoutant au-dessus de l'échantillon une seconde chambre de mêmes dimensions que celle utilisée pour contenir l'échantillon de sol et en scellant le joint entre les deux à l'aide d'un ruban. Le niveau d'eau est maintenu constant dans la partie supérieure à l'aide d'une bouteille de Mariotte. Le gradient hydraulique doit être inférieur à l'unité ; Pour chasser tout l'air contenu dans l'échantillon, il est préférable de la saturer par le bas en plaçant l'échantillon avec sa seconde chambre dans un contenant d'eau ou le niveau d'eau est supérieur au niveau du sol.



$$K = 6.69 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Forte perméabilité
sable très fin

Fig. II.12 schéma descriptive d'essai de perméabilité

3- mesure d'indices des vides min et max :

Pour ce type de sol, les grandeurs repères choisies sont l'indice des vides maximum e_{max} et l'indice des vides minimum e_{min} . Chacune de ces deux valeurs est déterminée expérimentalement.

Pour e_{max} (état le plus lâche du sol), on déverse le sable soigneusement avec la hauteur de chute la plus faible possible et sans provoquer de vibrations dans un récipient de volume connu. La masse de sol déversé permet de déterminer γ_d, γ_s étant connu, cela donne e

Pour e_{min} (état le plus compact du sol), on soumet une masse de sol connu à des vibrations élevées dans un récipient où on détermine le volume occupé par le sable qui permet d'obtenir e .

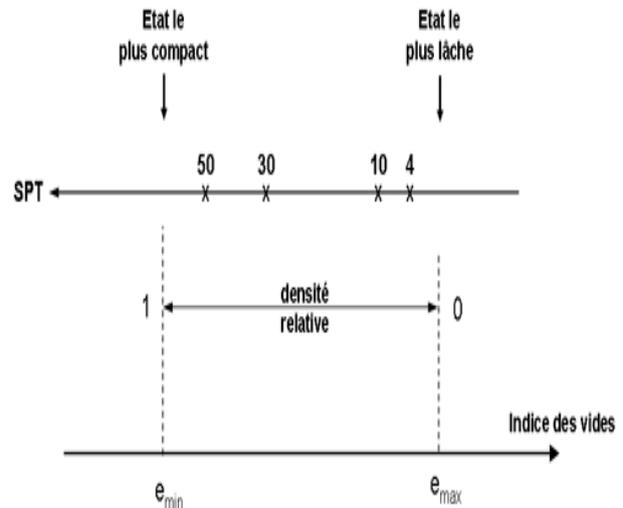


Fig II.13 : Etat de compacité d'un sol

Connaissant la valeur de e_{nat} (ce qui n'est pas toujours facile à obtenir), on peut calculer l'indice de densité I_D , appelé également la compacité relative C_r au moyen de la formule suivante : $ID = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100\%$ Un sable de densité relative élevée (compact) aura une faible compressibilité et une résistance au cisaillement élevée, au contraire un sable de faible densité relative (lâche) montrera une compressibilité élevée et une résistance au cisaillement faible.

Résultat :

Tous les essais sont répétés 3 fois pour minimiser les erreurs

Formule :

$$\rho_d = \frac{m}{v}, \quad e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

e_{min}	0.465
e_{max}	0.796
ρ_s	2.65

4- Essai de cisaillement

Appareil de cisaillement direct

Essai simple et ancien

Procédure

- cisaillement direct rectiligne sur un plan imposé
- éprouvette de sol entre 2 demi-boîtes
- déplacement horizontal à vitesse constante d'une des boîtes
- effort normal
- force de cisaillement mesurée par un anneau dynamométrique
- mesure de la variation de hauteur

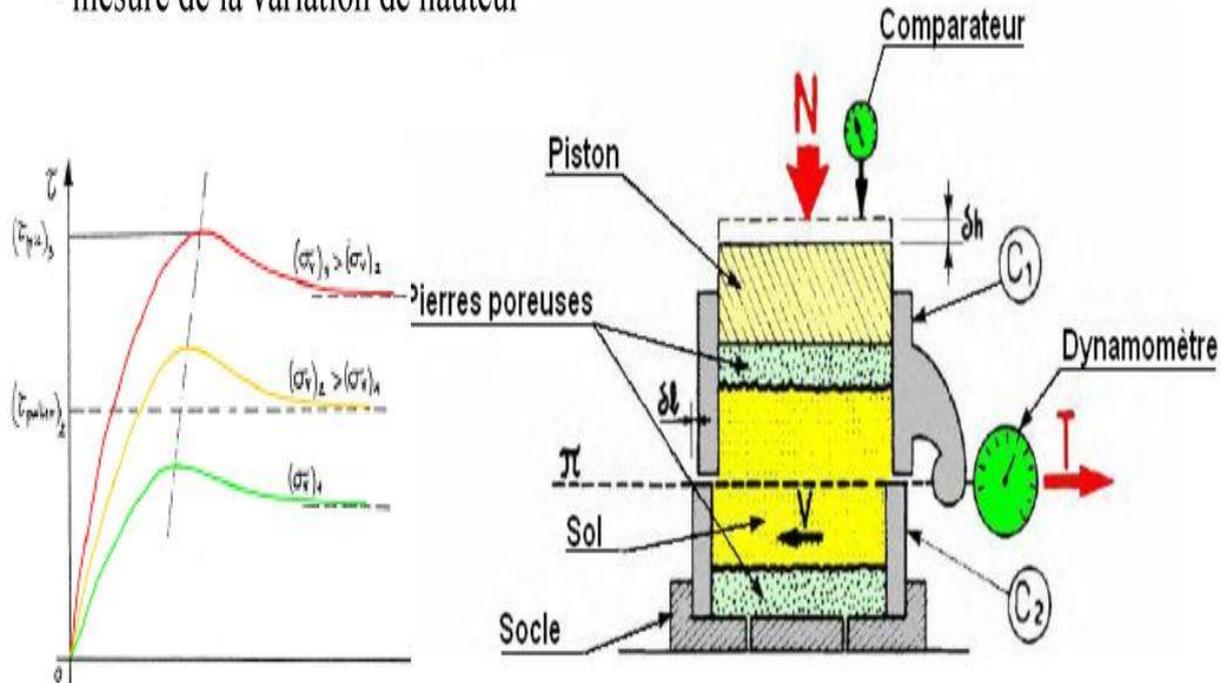
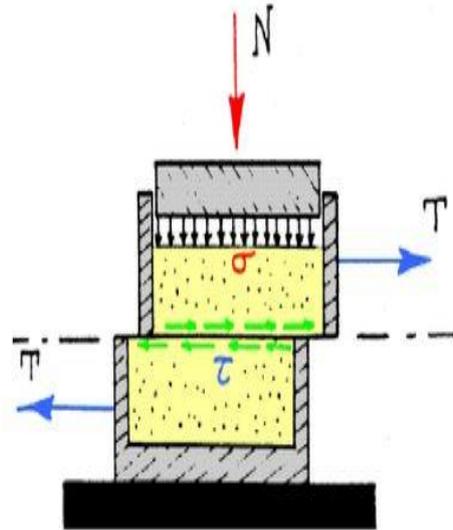


Fig II.16 principe de l'essai de cisaillement

Résultat :

- La masse de l'éprouvette $M= 180 \text{ g}$
- Vitesse de cisaillement $V=1.5 \text{ mm/min}$
- Dimensions de la boîte $L= 60 \text{ mm}$; $D=60 \text{ mm}$; $H= 34 \text{ mm}$
- Contrainte de confinement $\sigma = 0.1 \text{ MPa}$
- Indice de densité $I_d= 0.9$
- Indice des vides maximales et minimales : $e_{\max} = 0.796$; $e_{\min}= 0.465$
- Volume de l'échantillon $V = 122400 \text{ mm}^3$

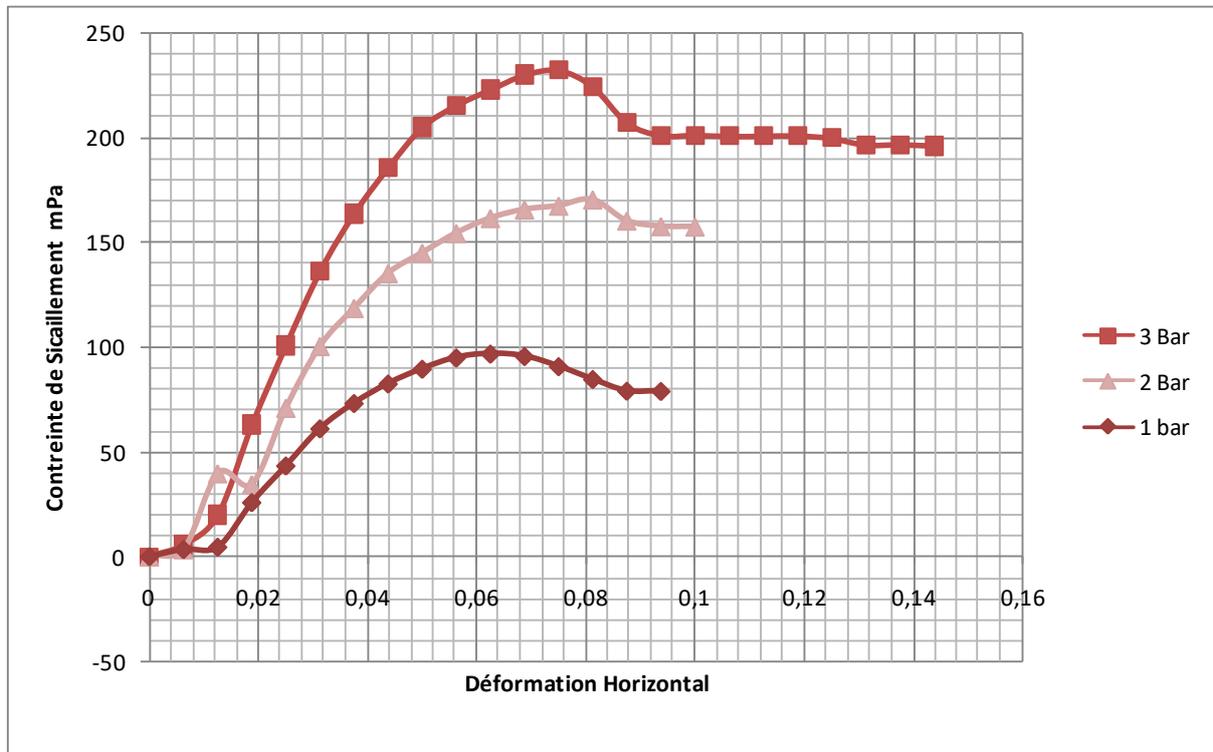
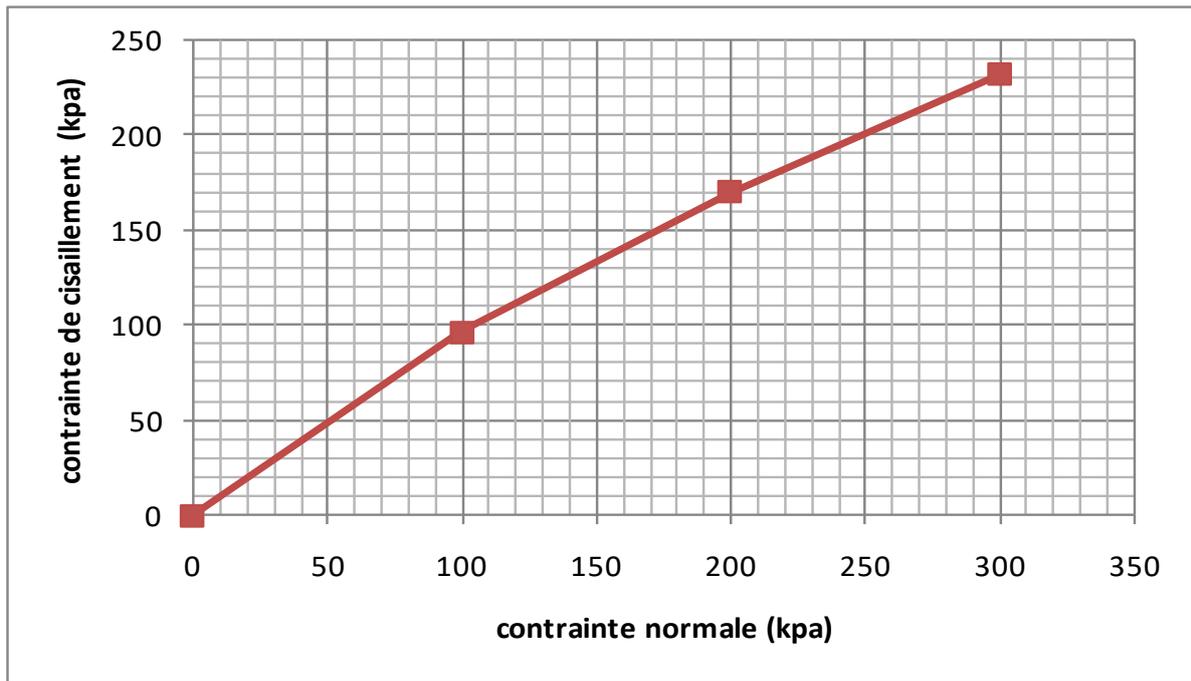


Figure II.17 : Courbe de contrainte /déformation de sable étudié

Contrainte de cisaillement (KPa)	0	96.5696	170.4308	230.312
Contrainte normale (KPa)	0	100	200	300

Figure II-18: Courbe d'intrinsèque [τ (σ)] de sable étudié

Cohésion \longrightarrow $C = 0$

Angle de frottement \longrightarrow $\phi = 40.43^\circ$

II.7 Conclusion

L'identification du sable étudié et détermination des propriétés mécanique et physique initiales permet de bien observer l'effet de traitement sur ces propriétés aussi pour contrôler et assurer l'efficacité de la technique. L'enzyme d'uréase qui est le composant le plus cher de l'EICP a été Extrait des grains de soja, l'activité et la stabilité ont été étudiées au laboratoire. Après cette étude on peut dire que il y a la possibilité de renfoncer ce sable par la technique de bio-cimentation (EICP), le défi qui reste est de bien contrôler le traitement avec l'enzyme extrait de soja son savoir la concentration initiale de l'enzyme.

Chapitre 3

Techniques expérimentales et résultats

III.1 Introduction

Après l'étude de chaque matériau séparément dans le chapitre précédent. Le sable est renforcé par la technique EICP avec l'enzyme d'uréase qui était obtenu par le protocole d'extraction expliqué précédemment. Les changements mécaniques et physiques des échantillons renforcés sont discutés dans ce chapitre en détail.

III.2 Test précipitation de CaCO_3

Dans des tubes en polypropylène (PP) transparent, la solution EICP (urée- CaCl_2 et l'uréase) sont mélangés soigneusement, pour évaluer le carbonate de calcium précipité. Comme le schéma de la figure montre ci-dessous :

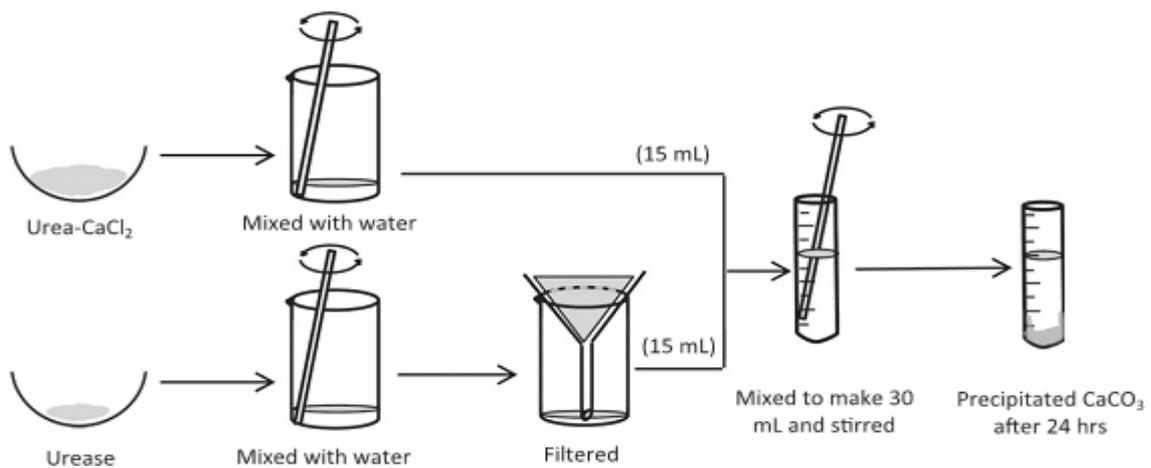


Fig. III.1 Schéma de test de précipitation (Newpane, 2013)

Concentrations de réactifs :

0.25M Urée.

0.25M CaCl_2 .

2ml de l'extrait brute de l'uréase.

Résultat

La Figure 3.2 présente les résultats du test de précipitation de CaCO_3 après 30min et 24h après l'agitation du tube. Nous observons que sur le tube mis au repos pendant 24h le CaCO_3 est précipité sur le fond du tube ce qui montre une précipitation quasi-totale du CaCO_3

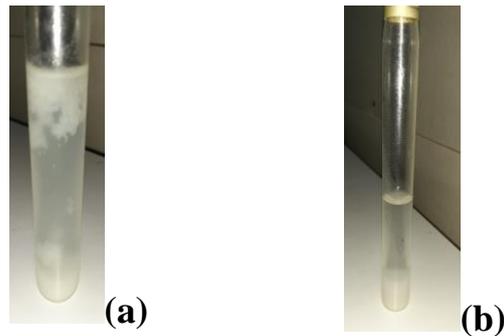


Figure III.2 – Test de précipitation a) après 30 min
b) après 24 h

Calcul de la masse CaCO_3 précipitée dans les tubes

Formule :

$$M_{\text{CaCO}_3} = C \times V \times M$$

C : concentration de l'urée- CaCl_2

V : volume de la solution

M : la masse molaire du CaCO_3

$$M_{\text{CaCO}_3} = 1.0087 \text{ g}$$

C (mol)	V (ml)	M (g/l)
1	10	100.087

Note : cette valeur analytique est estimée à partir des données expérimentales,

Pour déterminer la masse CaCO_3 précipitée dans les tubes, après 24 h les tubes sont vidés et séchés dans l'étuve jusqu'à ce que la masse soit stable. La masse de la calcite précipitée expérimentale est $M_{\text{CaCO}_3} = 0.74 \text{ g}$. Cette différence entre la masse analytique et expérimentale est illustrée par la calcite collée aux parois du tube.

La cimentation de sable par du carbonate de calcium (CaCO_3) produit par l'enzyme uréase obtenue à partir de plantes a été réalisée en laboratoire, à petite échelle pour assurer l'efficacité de la technique et améliorer le sol, et pour bien contrôler tous les facteurs contrôlant le processus (concentration de l'urée- CaCl_2 , uréase) et pour observer l'effet de la technique sur la perméabilité de sol et sur la résistance à la compression simple et cisaillement.

III.2.1 Les caractéristiques du sable utilisé :

Le sable utilisé dans cette étude est le sable de dune d'Oud Souf dont les caractéristiques suivantes : \$

Tableau III.1 : caractéristique du sable pour le traité par EICP processus

matériau	Diamètre moyen D_{50} (mm)	Coefficient d'uniformité C_u	C_c	L'indice des vides minimum e_{min}	L'indice des vides maximum e_{max}	ρ_s (kg / m ³)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	c	ϕ
Sable de dune	0.2	1.25	1.024	0.46	0.796	2.65	$6.69 * 10^{-5}$	0	40.43°

D'après les résultats de chapitre 2 on a un sable très fin ($D_{50} = 0.2$ mm) sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière ($C_u = 1.25 > 2$) et ($1 < C_c = 1.25 < 3$) avec une forte perméabilité. Ces caractéristiques rendent le sable convenable au traitement. L'enzyme utilisé dans le traitement est l'enzyme d'uréase obtenue de grains de soja, l'activité était conformé et l'efficacité de l'enzyme à uréolyse l'urée et par conséquence a précipité de la calcite.

III.2.2 Test dans le sol

Des petites échantillons sont utilisé dans les premiers essais, dans l'objectif de déterminer le nombre de traitement nécessaire pour obtenir un sol renforcé correctement.

Préparation des échantillons :

L'uréase utilisé sans déluge pour garantir l'activité maximale. Par conséquence, il faut faire une étude détaillée pour bien identifié l'enzyme. Le sable sec a été utilisé on a fait trois échantillons 2 par la méthode de percolation à la surface et un échantillon par la méthode de pré-mixing. Le nombre de traitement varie entre 1 et 3 traitement dans chaque méthode

III.2.3 Réalisation de l'essai :

Préparation de la solution EICP :

14.7 g de $CaCl_2$ dans 100 ml d'eau distillé \rightarrow $CaCl_2$ 1M

60.06 g de urée dans 100 ml d'eau distillé \rightarrow Urée 1M

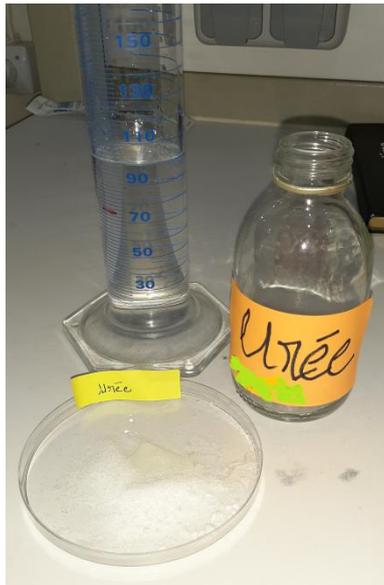


Figure III.5 préparation de l'urée

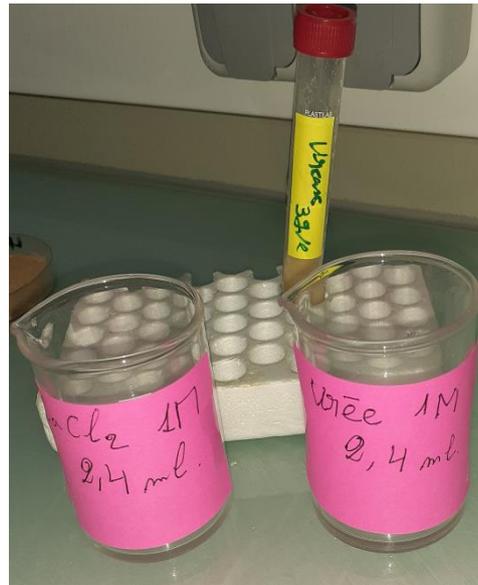


Figure III.6 solution EICP

1 ère essai :

On utilise dans cet essai le système de percolation comme une stratégie de traitement, ce protocole consiste à pulvériser la solution EICP qui contient des réactifs et de l'enzyme sur la surface des sols. Une injection d'un volume de pores de la solution EICP a été réalisée avec un débit constant. Trois percolations de solution d'un volume de pores a été réalisées et un décalage de 24 heures entre ces traitements a été respecté. Deux solutions de traitement ont été préparées pour le processus de bio-cimentation par voie enzymatique, solution enzymatique composé de l'enzyme d'uréase brute a été extrait des graines de soja et une solution calcifiante composée de 4 ml de l'urée et de la même quantité de CaCl_2 (1 mol de concentration) le teste est réalisé sous une température optimale de 25 c° .

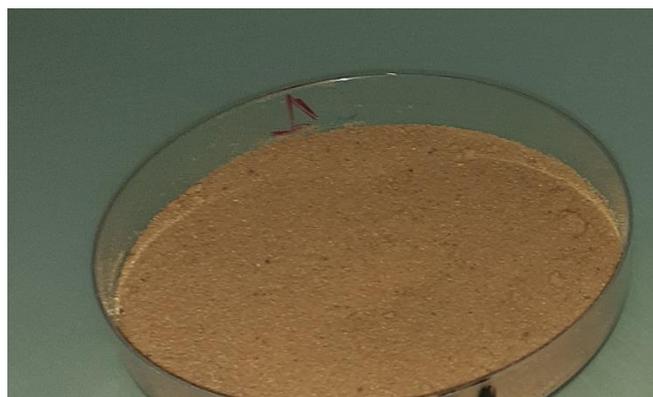


Figure III.7 la masse de sol a traitée

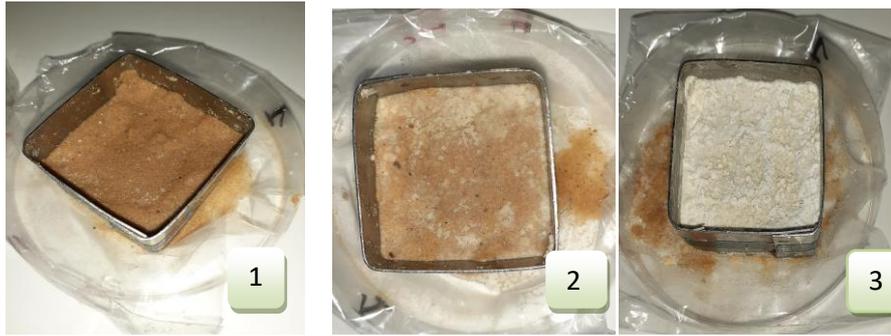


Figure III .8 1 ère, 2.3 ém traitement par l'EICP

Après le traitement on fait un rinçage avant l'étuvage, le rinçage à l'eau était pour l'objectif d'éliminer les sels organiques restés dans le sol.



Figure III.8 échantillon cimenté



Figure III.9 rinçage à l'eau



Figure III .10 échantillons après le rinçage à leau.

2^{ème} essai :

Dans le deuxième test, on a utilisé le un protocole de pré-mixing. Cette méthode est réalisée par une agitation de solutions et le sol à traiter. Ci-après les étapes que nous avons suivies pour le traitement de sol. Ces étapes ont été inspirées de la part d'Almajed et al (2017).

- 1- Mélanger 10 g de sable sec avec de la solution EICP (2.4 ml de chaque réactifs + 2 ml d'enzyme l'uréase brute) ,
- 2- Placer dans le moule avant 30 min pour garantir l'efficacité de la méthode,
- 3- Couvrir les colonnes avec une feuille d'aluminium pour minimiser les évaporations de la solution,
- 4- Laisser chaque échantillon durcir,.



Figure III.13 les étapes de traitement par pré-mixing.



Figure III.14 mettre l'échantillon au moule

III.2.4 Observations et analyse des résultats

L'échantillon ont été traités 3 fois par la méthode de percolation à la surface et pré-mixing ensuite de traitement a été rincé à l'eau. On observe une cimentation partielle, mais dans les parties non-cimentées on peut avoir une certaine cohésion formée par les sels organiques et les réactifs non catalysés. L'hétérogénéité du traitement est lié à plusieurs facteurs à savoir : dosage de solution calcifiante et solution enzymatique, viscosité et densité de la solution injectée, taille de l'enzyme par rapport à la taille des pores du sol, existence d'un écoulement d'eau, etc. Pour assurer une certaine homogénéité de traitement il faudrait effectuer plusieurs traitements pour que l'échantillon soit solide (consolidé). L'efficacité de ce traitement peut être validée en termes de comportement mécanique et l'évaluation de la perméabilité.

III.3 Résultats attendus :

III.3.1 Perméabilité

La perméabilité a été légèrement réduite de 20% par rapport au sable. Dans cette échantillon dans laquelle la quantité de calcite testée est (12.4%) la réduction atteint 75% mais le sol reste toujours perméable. la diminution de la perméabilité est principalement due à la réduction de la porosité par la précipitation de calcite.

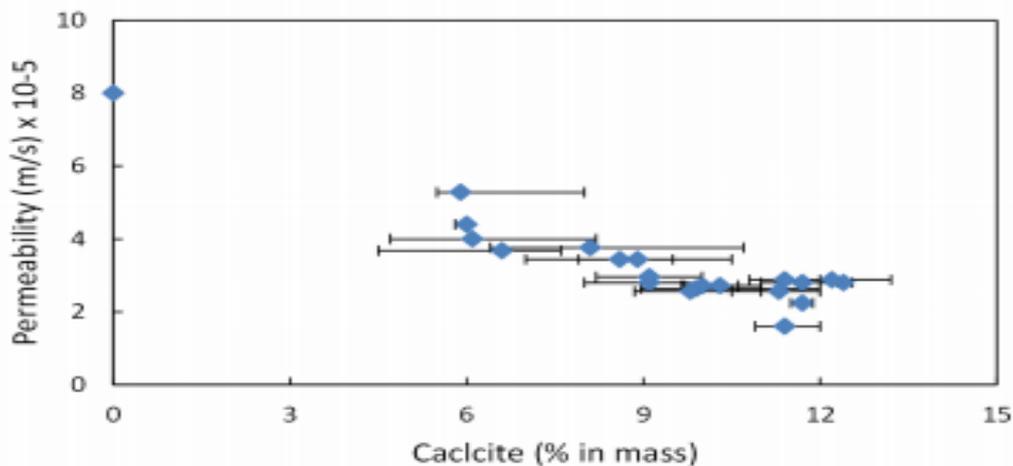


Fig.III.14 perméabilité de sable traité en fonction de taux de calcite (Dadda.2017)

III.3.2 Evaluation de la cohésion et l'angle de frottement

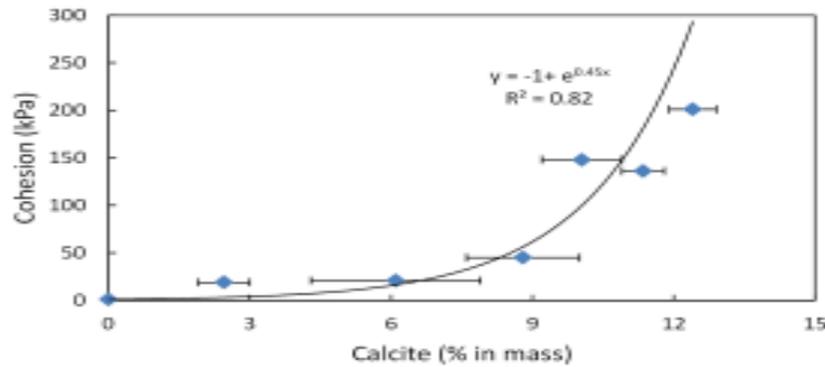


Figure III.15 : Evaluation de la cohésion n fonction de taux de calcite (Dadda.2017)

La figure III.14 montre que la cohésion du sable cimenté évolue de manière non linéaire avec la quantité de calcite jusqu'à une valeur de 215 kPa pour des colonnes cimentées avec 11,9% de calcite. Cette non-linéarité peut être interprétée comme le résultat de la précipitation préférentielle de la calcite au contact des grains. (Dadda.2017).

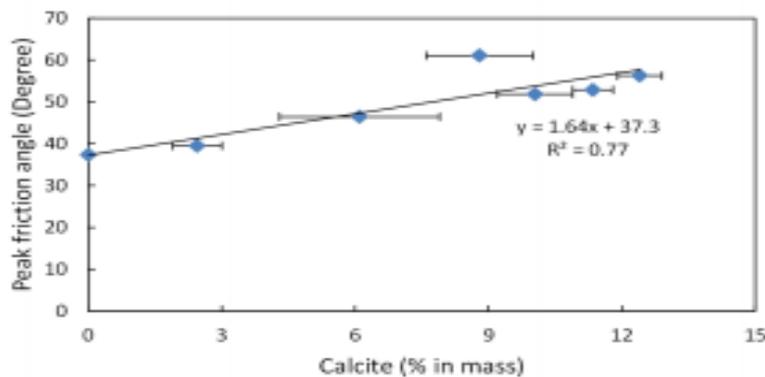


Figure III.16 Evaluation de l'angle de frottement en fonction de taux de précipitation de la calcite (Dadda, 2017)

Les figures III.15 montre une évolution linéaire globale du frottement angles, avec le niveau de cimentation. L'angle de frottement maximal augmente linéairement de la valeur initiale du sable non traité (37°) à une valeur finale de 55° dans le sable hautement cimenté (11,9%). L'angle de frottement ultime est initialement égal à 33° dans les échantillons non traités; il augmente linéairement jusqu'à une valeur finale de 49 ° inférieure à l'angle de frottement maximal pour les échantillons de sable fortement cimentés

III.4 Conclusions

Pour avoir des colonnes complètement cimentée avec des évaluations correctes des propriétés mécaniques (cohésion, angle de frottement, résistance à la compression simple) il faut augmenter le taux de la calcite dans le sol par injection de la solution EICP plus que six fois dans une étude similaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

La pollution et ses effets négatifs sur l'homme et l'environnement ont incité les scientifiques à chercher des alternatives aux substances nocives dans divers domaines, même dans le génie civil. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement donc pour aboutir à des solutions de renforcement optimisées. Il existe plusieurs techniques permettant l'augmentation de la capacité, que ce soit par l'inclusion rigide, les colonnes Ballastées et le compactage dynamique, l'insertion de pieux ou L'injection de coulis chimique...., une de ces techniques la technique de bio-cimentation, cette technique à base biologique inspirée de la nature peuvent être divisées en deux catégories : les techniques bio-cimentés qui utilisent des organismes vivants pour l'amélioration des sols ; et des techniques bio-inspirées, qui imitent des processus biologiques sans impliquer réellement des organismes vivants. Dans ce dernier on utilise l'enzyme libre. Les avantages de la technique EICP par rapport de MICP sont (1) la taille plus petite de l'enzyme uréase libre (large éventail d'applications), (2) écologique et économique, (3) capable d'améliorer la résistance et la rigidité des sols et de contrôler leur conductivité hydraulique, (4) réduire de manière significative les niveaux de poussière fugitive (Knorr 2014 ; Hamdan 2015 ; Bang et al.2009 ; Eyer et al.2011) et (5) processus de réaction se déroule plus rapidement que l'MICP.

Dans ce travail on a pu extraire l'enzyme l'uréase à partir des grains de soja et qui a montré son efficacité de traitement. Les perspectives de ces travaux de recherche ce sont à multiplier les tests pour pouvoir évaluer correctement l'efficacité mécanique de l'EICP et de pouvoir comprendre ce processus dans les deux cotés géotechnique et biologique.

Bibliographies

References:

- ✚ Abdullah Almajed1, HamedKhodadadiTirkolaei , Edward Kavazanjian Jr. Nasser Hamdan ,(2019) Enzyme induced biocementated sand with high strength at low carbonate content.Scientific Reports, (2019) 9:1135 | <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38361-1>
- ✚ Al Qabany A and Soga K (2013) Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils. *Géotechnique* 63(4): 331–339, <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.022>
- ✚ Alok Chandra, K. Ravi,(2018).Application of Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) to improve the shear strength of different type of soils.
- ✚ Burbank, M., Weaver, T., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2013). Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 139(6), 928-936
- ✚ Cheng L, Cord-Ruwisch R and Shahin MA (2013) Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal* 50(1): 81–90.
- ✚ Chou, C., Seagren, E., Aydilek, A. & Lai, M. Biocalcification of Sand through Ureolysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137, 1179–1189 (2011).
- ✚ DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010a). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2) :197–210.
- ✚ Dadda A., (2017). « Etude mécanique et microstructurale des sols bio-cimentés : application aux ouvrages hydrauliques en terre. » Thèse de doctorat, Université de Grenoble Alpes.
- ✚ Gat, Daniella, ZeevRonen, et Michael Tsesarsky. 2016. « Soil Bacteria Population Dynamics Following Stimulation for Ureolytic Microbial-Induced CaCO₃ Precipitation ». *Environmental Science and Technology* 50(2):616-24.
- ✚ Garcia-Ruiz JM (2003) Influence of lysozyme on the precipitation of calcium carbonate: a kinetic and morphologic study. *GeochimicaetCosmochimicaActa* 67(9): 1667–1676.
- ✚ Hideaki Yasuhara, DebendraNeupane, Kazuyuki Hayashi, Mitsu Okamura,(2012) Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation.*Soils and foundations* 2012 ;52(3) :539-549.
- ✚ Harkes, M.P., van Paassen, L.E., Booster, J.L., Whiffin, V.S., van Loosdrecht, M.C.M., 2010. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement. *Ecological Engineering* 36, 112–117
- ✚ Hamdan, N., Kavazanjian, E. & O'Donnell, S. Carbonate Cementation via Plant Derived Urease. in the 18th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2489–2492 (Presses des Ponts, 2013).
- ✚ Hamdan, N. Applications of Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Soil Improvement. Ph.D. dissertation, Arizona State University (2015).

- ✚ Hamdan, N., & Kavazanjian Jr, E. (2016). Enzyme-induced carbonate mineral precipitation for fugitive dust control. *Géotechnique*, 66(7), 546-555.
- ✚ Ivanov, V. and Stabnikov, V. (2017). Biocementation and biocements. In *Construction Biotechnology*, pages 109–138. Springer
- ✚ [James K. Mitchell](#), Hon.M.ASCE; and [J. Carlos Santamarina](#), M.ASC,(2005) Biological Considerations in Geotechnical Engineering [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2005\)131:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2005)131:10(1222))
- ✚ Jimenez-Lopez C, Rodriguez-Navarro A, Dominguez-Vera JM and -Knorr, B. (2014). Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust. Arizona State University.
- ✚ Kawasaki, S., Murao, A., Hiroyoshi, N., Tsunekawa, M., Kaneko, K., 2006. Fundamental study on novel gout cementing due to microbial metabolism. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology* 47, 2–12.
- ✚ Kile, D. E., D. D. Eberl, A. R. Hoch, and M. M. Reddy. "An assessment of calcite crystal growth mechanisms based on crystal size distributions." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, no. 17 (2000): 2937-2950
- ✚ Larsen, J., Paulsen, M., Lundgaard, T., & Agerbaek, M. (2008). Plugging of fractures in chalk reservoirs by enzyme-induced calcium carbonate precipitation. *SPE Production & Operations*, 23(04), 478-483.
- ✚ Li W, Chen WS, Zhou PP and Yu LJ (2013) Influence of enzyme concentration on bio-sequestration of CO₂ in carbonate form using bacterial carbonic anhydrase. *Chemical Engineering Journal* 232: 149–156, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.069>.
- ✚ Marzadori, Claudio, Silvia Miletto, Carlo Gessa, and Stefano Ciurli. "Immobilization of jack bean urease on hydroxyapatite: urease immobilization in alkaline soils." *Soil Biology and Biochemistry* 30, no. 12 (1998): 1485-1490
- ✚ Mortensen BM, Haber MJ, DeJong JT, Caslake LF and Nelson DC (2011) Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. *Journal of Applied Microbiology* 111(2): 338–349.
- ✚ -Neupane, D., Yasuhara, H., Kinoshita, N., and Unno, T. (2013). Applicability of enzymatic calcium carbonate precipitation as a soil-strengthening technique. *Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE* 139, 2201–2211. doi:10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0000959
- ✚ Neupane, D., Yasuhara, H., Kinoshita, N., and Ando, Y. (2015). Distribution of mineralized carbonate and its quantification method in enzyme mediated calcite precipitation technique. *Soil Found.* 55, 447–457. doi:10.1016/j.sandf.2015.02.018
- ✚ Natalie A.Molodecky, Ing Shian Soon, Doreen M.Rabi, William A.Ghali, Mollie Ferris, Greg Chernoff, Eric I. Benchimol, Remo Panaccio, Subrata Ghosh, Herman W. Barkema, Gilaad, G. Kaplan. (2012) Increasing Incidence and Prevalence of the Inflammatory Bowel Diseases With Time, Based on Systematic Review. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2011.10.001>

- ✚ Nemati, M., Voordouw, G., 2003. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ. *Enzyme and Microbial Technology* 33, 635–642
- ✚ Oliveira, P. J. V., Freitas, L. D., & Carmona, J. P. (2016). Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4), 04016263.
- ✚ Putra, H., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Neupane, D., & Lu, C. W. (2016). Effect of magnesium as substitute material in enzyme mediated calcite precipitation for soil-improvement technique. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4, 37.
- ✚ Pascal VILLARD, BRIANÇON Laurent. 2018. *Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables*
- ✚ -Pettit, N. M., A. R. J. Smith, R. B. Freedman, and R. G. Burns. "Soil urease: activity, stability and kinetic properties." *Soil Biology and Biochemistry* 8, no. 6 (1976): 479-484
- ✚ Whiffin,(2004). «Microbial CaCO₃ Precipitation for the production of Biocement. »Thèse de doctorat, Murdoch University Western Australia
- ✚ Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A., Harkes, M.P., 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil
- ✚ Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soilimprovement technique. *Geomicrobiol. J.* 24, 417–423. doi:10.1080/01490450701436505