

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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 ...../2019

## Mémoire de Master

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Arts (VOA)

Thème

**Renforcement d'un sable par des processus biologiques inspirés par la nature : Etude de l'évolution des propriétés physiques de sable bio-cimenté**

Nom et Prénom de l'étudiant :

Mlle. Cheima BOURAOUI

Encadrant: Dr. Sadok FEIA

Co-Encadrant : Dr. Abdelali DADDA

Promotion Juillet 2019

# *Dédicaces*

*À mes chers parents*

*À mon frère Dr. Zakaria zaki*

*À mes sœurs*

*À mes nièces et neveu*

*À toute ma famille*

## *Remercîments*

*Je dois tout d'abord remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.*

*Je tiens à exprimer en premier lieu ma reconnaissance à Mr. **Sadok FEIA**, Docteur à l'Université de Biskra de m'avoir encouragé, soutenu et orienté pour la réalisation de ce travail. Je le remercie encore très vivement pour son encadrement et son aide.*

*J'adresse mes remerciements à mon Co-encadreur de mémoire Dr. **Abdelali DADDA**. Je voudrais aussi lui exprimer ma reconnaissance pour les conseils très précieux et les orientations qu'il m'a émis pour faire ce travail.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger ce travail.*

*Je remercie aussi l'ensemble des enseignants de département de génie civil qui ont contribué à notre formation.*

*Pour tous ceux ou celles qui m'ont apporté leur soutien et qui m'ont aidé de loin ou de près pour l'achèvement de ce travail trouvent ici l'expression de mon vive et sincère reconnaissance.*

## Sommaire

I.	Introduction.....	5
I.1	<i>Bio cémentation, un concept prometteur .....</i>	6
I.2	<i>MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation) .....</i>	7
I.3	<i>EICP (Enzyme Induced Carbonate Precipitation).....</i>	8
I.4	<i>Principe de la bio calcification .....</i>	9
I.5	<i>Enzymes et Enzyme Uréase.....</i>	10
I.6	<i>Activité d'uréase .....</i>	10
I.7	<i>Utilisation de l'uréase d'origine végétale dans l'environnement géo environnemental.....</i>	11
I.8	<i>Applications existantes et potentielles de la précipitation de CaCO<sub>3</sub> à l'aide d'uréase dérivée de plantes .....</i>	11
I.9	<i>Facteurs Affectant L'efficacité Du Traitement Des Précipitations De Calcite .....</i>	13
I.9.1	<i>Types de sols .....</i>	14
I.9.2	<i>Niveau de pH .....</i>	14
I.9.3	<i>Degré de Saturation .....</i>	15
I.9.4	<i>Salinité de l'eau .....</i>	16
I.9.5	<i>Température.....</i>	16
I.9.6	<i>Concentration de la solution calcifiante .....</i>	16
I.10	<i>Effet de la bio-cimentation sur la porosité.....</i>	18
I.11	<i>Effet de la bio-cimentation sur la rigidité .....</i>	19
I.12	<i>Effet de la bio-cimentation sur la perméabilité .....</i>	20
I.13	<i>Effet de la bio-cimentation sur la résistance au cisaillement .....</i>	21
I.14	<i>Avantages potentiels de l'EICP par rapport au MICP.....</i>	22
I.15	<i>Désavantages potentiels de L'EICP .....</i>	23
I.16	<i>Domaines d'application de la procédé.....</i>	23
I.17	<i>Technique de traitement de sol .....</i>	25
I.17.1	<i>Méthodes d'injection .....</i>	25
I.17.2	<i>Soil-mixing .....</i>	27
I.17.3	<i>Percolation de surface .....</i>	27
I.18	<i>Conclusion.....</i>	28
II.	Introduction.....	29

<i>II.1</i>	<i>Description du sable étudié</i> .....	29
<i>II.2</i>	<i>Méthodes de caractérisation des matériaux testés</i> .....	29
II.2.1	Analyse granulométrique par tamisage .....	31
II.2.2	Evaluation des indices des vides minimum et maximum .....	31
II.2.3	Dispositif de mesure de perméabilité.....	33
<i>II.3</i>	<i>Dispositif d'essai de cisaillement</i> .....	35
II.3.1	Les différents types de résistances au cisaillement .....	36
II.3.2	Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette .....	37
II.3.3	Le dispositif produisant le cisaillement.....	37
II.3.4	Système de mesure.....	37
II.3.5	Composants d'appareil de cisaillement .....	37
II.3.6	Principe d'exécution de l'essai .....	39
<i>II.4</i>	<i>Programme expérimentale</i> .....	41
II.4.1	Tests de précipitation .....	41
II.4.2	Processus de traitement de sable par EICP.....	44
<i>II.5</i>	<i>Conclusion</i> .....	49
III.	Introduction.....	50
<i>III.1</i>	<i>Présentation et analyse des résultats expérimentaux</i> .....	50
<i>III.2</i>	<i>Test de précipitation de CaCO<sub>3</sub> dans des tubes</i> .....	51
<i>III.3</i>	<i>Evaluation des propriétés physiques de sable bio cimenté</i> .....	52
III.3.1	Perméabilité .....	52
<i>III.4</i>	<i>Microscopie électronique à balayage (MEB)</i> .....	56
III.4.1	Observations MEB des éprouvettes bio-calcifiées.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>III.5</i>	<i>Evaluation des propriétés microstructurales de sable bio cimenté</i> .....	57
III.5.1	Porosité .....	57
<i>III.6</i>	<i>Observations par la micro-tomographie à rayons X des échantillons bio calcifié</i> 58	
<i>III.7</i>	<i>Conclusion</i> .....	61
IV.	Références :.....	64

# Résumé

Le procédé de bio-cimentation est une technique prometteuse pour renforcer les sols lâches et de faible résistance mécanique. Cette technique a montré une très bonne efficacité pour plusieurs types de sols lors des essais en laboratoire, dans des modèles physiques ou lors des essais sur site. En revanche, elle a montré une forte sensibilité aux conditions de traitement telles que la concentration des réactifs, bactéries, enzymes, vitesse d'injection, type de sols, température, etc.... Ces facteurs influencent principalement la distribution spatiale de la calcite précipitée dans l'espace poreuse, sa forme et sa morphologie, ce qui influence par la suite les propriétés effectives (physiques et mécaniques) des sols traités. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de fin d'étude. L'objectif de ce travail est d'étudier le processus de la biocimentation d'un sable via une méthode dite EICP (enzyme induced carbonate precipitation). Il est également pour but d'étudier l'évolution des propriétés physiques du sable biocimenté (perméabilité, porosité) par la réalisation d'essais de mesures de perméabilité en laboratoire, et de lier cette évolution aux changements microstructuraux via des observations par micro-tomographie RX et MEB. Dans le cadre de ce travail nous avons proposé un modèle (une loi empirique) reliant l'évolution de la perméabilité en fonction du pourcentage de la calcite. Ce modèle capable de prédire la valeur de la perméabilité en connaissant le pourcentage de la calcite disponible dans le matériau sans avoir besoin de réaliser des essais au laboratoire.

## Mots-clés :

Bio-cimentation, calcite, perméabilité, Uréase, percolation a la surface, précipitation de calcite.

## ملخص

إن عملية الترسيب الحيوي هي تقنية واعدة لتقوية التربة الضعيفة والمنخفضة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية. أظهرت هذه التقنية فعالية جيدة للغاية لعدة أنواع من التربة في الاختبارات المعملية أو في النماذج الفيزيائية أو في الاختبارات الميدانية. من ناحية أخرى، فقد أظهرت حساسية عالية لظروف العلاج مثل تركيزات الكواشف، والبكتيريا، والإنزيمات، ومعدل الحقن، ونوع التربة، ودرجة الحرارة، وما إلى ذلك. هذه العوامل تؤثر بشكل رئيسي على التوزيع المكاني للكالسيت المرسب، وشكله ومورفولوجيا لها، والتي تؤثر في وقت لاحق الخصائص الفعالة للتربة المعالجة. تم تحقيق هذه الأعمال من الذاكرة في إطار مشروع نهاية الدراسة. الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تطور الخواص الفيزيائية والميكانيكية للرمال المتحكم فيه حيوياً (النفاذية، المقاومة الميكانيكية) من خلال تحقيق الاختبارات الميكانيكية وقياسات النفاذية المختبرية، وربط هذا التطور بالتغيرات المجهرية. عبر الملاحظات بواسطة التصوير المقطعي الدقيق

كلمات:

ترشيح السطح، ترسيب الكالسيت Urease الأسمت الحيوي، الكالسيت، النفاذية، التماسك،

# INTRODUCTION GENERALE

**E**n général, les risques existent dans n'importe quel projet, on ne peut guère réaliser un projet sans prendre des risques. Les projets routiers sont des projets assez complexes dans leur conception, construction et exploitation, et sont souvent soumis à des risques géotechniques multiples pouvant influencer à leur fiabilité, et peuvent avoir un impact négatif sur leur environnement (perte humaine, matérielles, pollution, etc.). Pour cela, intégrer le processus du management des risques dans les projets routiers s'avère nécessaire.

Le projet routier est élaboré en assurant le respect des objectifs à atteindre, tout en tenant compte de multiples contraintes liées à l'environnement humain et naturel, à la technique, à l'économie ou aux aspects sociaux. Cependant, beaucoup des risques peuvent intervenir pendant la construction du projet, et dont les contenus qui ne sont pas les moindres. Ils peuvent avoir un impact très fort sur les coûts, les délais de réalisation du projet et la qualité des ouvrages. Parmi tous les risques pouvant impacter un projet routier, nous avons les risques géotechniques. Ces derniers sont de natures très différentes, leur prise en considérations est nécessaire dès la phase de faisabilité afin d'assurer une gestion optimale du projet.

La géotechnique est un élément essentiel pour tous les travaux de projet routier. Elle joue un rôle important pour la pérennité de l'infrastructure routière. La géotechnique a pour objet principalement d'étudier le sous-sol, c'est-à-dire le non visible, le plus souvent en vue de construire un ouvrage.

Dans ce contexte, Ces sols donc nécessitent une certaine amélioration pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer leur performance. La durabilité naturelle du sol peut être amélioré par le processus de la stabilisation de sol en utilisant différents techniques d'améliorations.

Les techniques utilisées dans la pratique pour améliorer les propriétés mécaniques du sol granulaire comprennent les colonnes en pierre, la vibration par vibration, l'enlèvement et le compactage, le compactage dynamique et le scellement chimique. Les préoccupations croissantes quant à la durabilité de ces techniques conventionnelles d'amélioration des sols ont amené les ingénieurs géotechniciens à rechercher solutions d'amélioration des sols utilisant des techniques biologiques. Ces techniques à base biologique peuvent être divisées en deux catégories : les techniques bio-médiées 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.

La précipitation carbonatée induite par des microorganismes est une technique bio médiée qui a été étudiée au cours des dix dernières années comme alternative au ciment Portland pour l'amélioration des sols (Dejong et al., 2013). L'un des principaux avantages du MICP par rapport au ciment Portland pour l'amélioration des sols est que le MICP est non perturbateur.

Un autre aspect L'utilisation du MICP au lieu du ciment Portland a certes pour effet de réduire les émissions liées à la fabrication du ciment, notamment le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ). Des études suggèrent que la cimentation à l'aide de MICP peut traiter une variété de problèmes géotechniques dans les sols granulaires, y compris la capacité portante des fondations peu profondes, la stabilité des excavations, l'érosion et l'affouillement, le sous-écoulement des levées, le creusement de tunnels en creusant ou courant, le tassement et la liquéfaction (DeJong et al. 2010);(Kavazanjian et al., 2008); (van Paassen et al. 2010).

Le MICP repose sur la précipitation de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) pour induire une cimentation liant les particules dans un sol sableux, limitant leur mobilité et améliorant la résistance et la rigidité du sol (Harkes et al., 2010). Les précipitations de  $\text{CaCO}_3$  peuvent également combler les vides du sol, diminuer la porosité du sol, diminuer la tendance à la diminution du volume conduisant à la liquéfaction (Andrus et Chung, 1995) et augmenter la tendance à la dilatation (dilatance) lors du cisaillement (Yang et al. 2016). De plus, le  $\text{CaCO}_3$  précipité est fort et résiste à la dissolution, se dissolvant lentement à l'échelle géologique dans des conditions normales (van Paassen et al. 2010)

La précipitation de  $\text{CaCO}_3$  à l'aide de cellules bactériennes contenant de l'uréase est une technique de biométrie (Harkes et al., 2010). Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation de la précipitation au  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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'enzyme uréase libre utilisée dans la plupart des études EICP à ce jour a été isolée de plantes, notamment de graines de soja, de haricot jack, de graines de pastèque et de



pois (Das et al. 2002). Le haricot Jack, un parent du soja résistant à la sécheresse, est la source la plus courante d'uréase libre. L'enzyme est le composant le plus coûteux de la solution EICP. Il a une taille de 12 nm par sous-unité et est soluble dans l'eau, ce qui facilite son transport dans les pores des sols. Étant donné que la réaction de précipitation de  $\text{CaCO}_3$  par le biais du EICP n'emploie pas d'organismes vivants, elle n'est pas limitée par la disponibilité en oxygène comme lors de l'utilisation du MICP pour le traitement des sols en profondeur. En outre, le MICP nécessite nutriments pour l'activité bactérienne, est soumis aux effets concurrents d'autres micro-organismes ou repose sur la fixation des cellules aux particules de sol. Pour ces raisons, l'EICP possède de nombreux avantages pratiques par rapport au MICP.

Un autre avantage de l'EICP par rapport au MICP est que, dans certains cas, le processus de réaction de l'EICP est plus rapide que celui du MICP, ce qui le rend particulièrement utile pour certaines applications en milieux arides et semi-arides.

L'objectif de ce travail est définir une procédure de traitement de sol basée sur les processus biologiques naturels, qui soit effective dans un temps raisonnable et respectueuse pour l'environnement, et aussi étudier l'influence de cette technique aux propriétés physiques et microstructurales d'un sable bio-cimenté avec des échantillons de calcite en masse, qui ont été soumis à une solution agressive dans des proportions différentes et comparés à un échantillon intact pour détecter les changements des propriétés physique et mécanique du sol bio cimenté.

Le mémoire est structuré en **03** chapitres :

Après une introduction générale exposant la problématique et définissant les objectifs et le plan de travail,

- ✓ Le premier chapitre s'articule autour de recherche bibliographique présente un panorama sur les différentes techniques d'amélioration des sols instables, et présente une nouvelle technique prometteuse pour renforcer les sols lâches et de faible résistance mécanique.
- ✓ Le deuxième chapitre est un programme expérimental présente un ensemble des essais réalisés en laboratoire pour caractériser le sol étudié.
- ✓ Le troisième chapitre consiste en la présentation des résultats expérimentaux ainsi que les résultats de traitement d'un sable traité et comparer au sable non traité.
- ✓ Enfin, nous clôturons ce rapport par une conclusion générale qui présente des recommandations pour la prise en compte l'évaluation des propriétés physique du sol bio cimenté.

---

# **Chapitre 1**

---

## **Etude Bibliographique**

## I. Introduction

Grâce à des techniques innovantes il est désormais possible de construire sur tous types de sol. Le savoir-faire des ingénieurs est mobilisé pour analyser, étudier, renforcer et consolider les sols. 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. ...

Que nous réserve l'avenir ?

L'ingénieur géotechnique pourra compter sur de Nouveaux alliés aussi inattendus que les Bactéries par exemple qui sont déjà Utilisées pour améliorer la portance des sols par (Technique de bio cimentation). Des perspectives très prometteuses aujourd'hui ! Le procédé de bio-cimentation est une technique prometteuse pour renforcer les sols lâches et de faible résistance mécanique. Cette technique a montré une très bonne efficacité pour plusieurs types de sols lors d'essais en laboratoire, dans des modèles physiques ou lors d'essais sur site. Par contre, elle a montré une forte sensibilité aux conditions de traitement telles que Concentrations des réactifs, Bactéries, enzymes, mode d'injection, type de sols, température, etc...

Le chapitre 1 est consacré à une étude bibliographique détaillée sur la technique de bio cimentation. Dans ce chapitre, une revue de littérature approfondie sur la technique de bio calcification est présentée. Cette étude se concentre particulièrement sur les facteurs qui contrôlent le processus, l'évolutions des propriétés mécanique et physique dans les sols biocimenté, ainsi que les défis et limites pour des applications réelles.

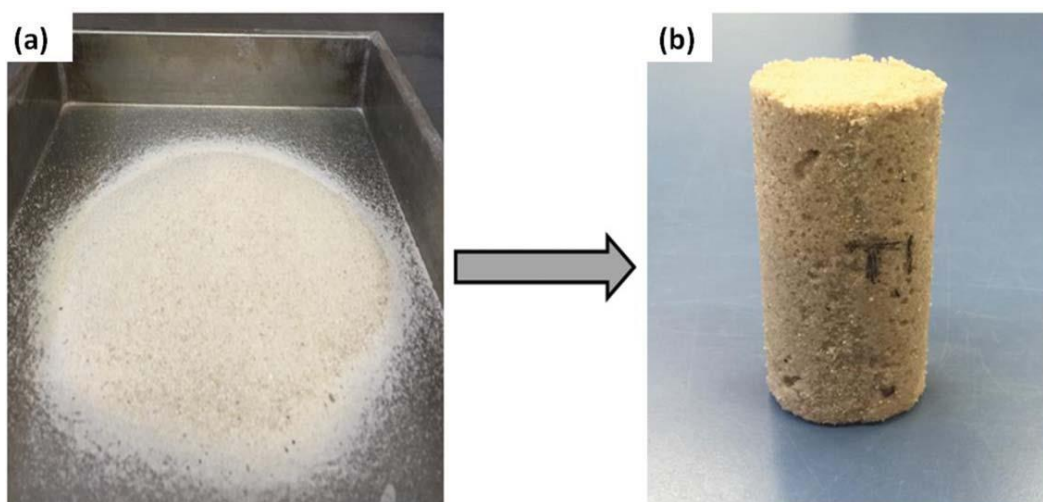


Figure 1-1 : Métamorphose du sable : (a) sable naturel,  
(b) sable bio cimenté (Mujah, et al ,(2017)

### I.1 Bio cémentation, un concept prometteur

Le recours à la bio-calcification dans le domaine des travaux souterrains est un axe de recherche récent qui fait l'objet de nombreuses études en Europe et à l'international. Certaines bactéries, présentes dans le milieu naturel, sont connues pour précipiter différents minéraux à majorité constitués de carbonate de calcium. Leur accumulation sur des centaines d'années conduit à la formation de concrétions calcaires sur des surfaces plus ou moins étendues en fonction des conditions physico-chimiques présentes. L'un des exemples le plus représentatif et spectaculaire dans ce domaine est un phénomène rencontré en Australie avec la formation de stromatolithes à la surface d'eaux salines, mais il existe d'autres phénomènes du même type en France et dans le monde.



Figure 1-2 : Stromatolithes calcifiés, formés par l'activité microbienne dans un environnement riche en calcium et bicarbonate. Lac Clifton, Parc national de Yalgorup (Australie) (Moore, 1987)

C'est en observant ces phénomènes que l'idée d'amélioration des sols par bio calcification in situ est née, par mimétisme de ces réactions biogéochimiques naturelles. Les premières recherches en laboratoire ont été menées en Australie, à l'université de Murdoch, aux débuts des années 2000, avec l'identification des micro-organismes naturellement présents dans les sols capables d'accélérer le processus de précipitation. Selon Whiffin (2004) Le mécanisme est connu sous le terme de Microbially Induced Carbonate précipitation (MICP). La formation des cristaux de calcite est obtenue grâce à l'action d'une bactérie : *Sporosarcina pasteurii* en présence d'une solution calcifiante composée d'urée et de chlorure de calcium. Ces cristaux vont lier les grains de sable entre eux et par conséquent en augmenter la cohésion et la résistance mécanique.

Le matériau obtenu est assimilable à un grès calcaire dont la résistance mécanique peut atteindre quelques centaines de kPa (comme une argile dure) à plusieurs MPa (comme un béton) en quelques jours, en fonction des paramètres de préparation.

Depuis 2004, Soletanche Bachy mène des travaux de recherche pour appliquer cette technologie aux travaux de fondation à une échelle industrielle, deux essais de biocalcification sur des volumes d'environ 100 m<sup>3</sup> de sable. En confirmant notamment le fait que les bactéries pouvaient être injectées sur de longues distances (3 à 5 mètres dans les conditions du test), le concept industriel du procédé ainsi que l'intérêt technico-économique de son utilisation pour des travaux d'amélioration de sol a été démontré. Plusieurs autres applications industrielles ont été étudiées depuis cette date par Soletanche Bachy.

### I.2 MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation)

Solon DeJong, et al (2006) la précipitation carbonatée induite par les microbes (MICP) est une technique innovante d'amélioration des sols capable d'améliorer la résistance et la rigidité des sols et de contrôler leur conductivité hydraulique. Ces propriétés techniques des sols après le traitement du MICP sont influencées par de nombreux facteurs, tels que la teneur en CaCO<sub>3</sub>, sa quantité et sa répartition dans les sols.

Les corrélations entre les propriétés de CaCO<sub>3</sub> et les propriétés d'ingénierie du sol ont été étudiées par des méthodes d'essais à l'échelle macroscopique. Plusieurs de ces études sont passées en revue. Des études microscopiques des processus MICP sont introduites pour discuter du rôle précis des microbes et de CaCO<sub>3</sub> dans le processus MICP. Une nouvelle méthode utilisant une puce micro fluidique est introduite dans laquelle le processus MICP est directement observé à l'aide d'un microscope. Plusieurs exemples expérimentaux utilisant la nouvelle méthode sont présentés pour démontrer que les bactéries injectées et le CaCO<sub>3</sub> généré peuvent être observés dans l'espace et dans le temps. Il est suggéré que cette nouvelle méthode soit un outil utile pour optimiser le processus MICP. Elle présente plusieurs avantages à la fois écologique et économique face aux autres procédés traditionnels, cette technique a été initialement évaluée par (Victoria S. Whiffin 2004) et (DeJong et al. 2006). Jusqu'à maintenant, les études réalisées ont principalement porté sur les méthodes d'injections et les facteurs influençant la précipitation Whiffin (2004) DeJong et al. (2006), Ferris et al. (2004). 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. Cette précipitation diminue la porosité des sols traités dans un essai Consolidé drainé et ainsi conduit à une réduction de la perméabilité.

Lorsque la *S. pasteurii* est injectée dans un sol granulaire avec un milieu urée et des sels de calcite, elle augmente le pH, ce qui amène les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  en sursaturation. Finalement les ions vont se grouper et précipiter.

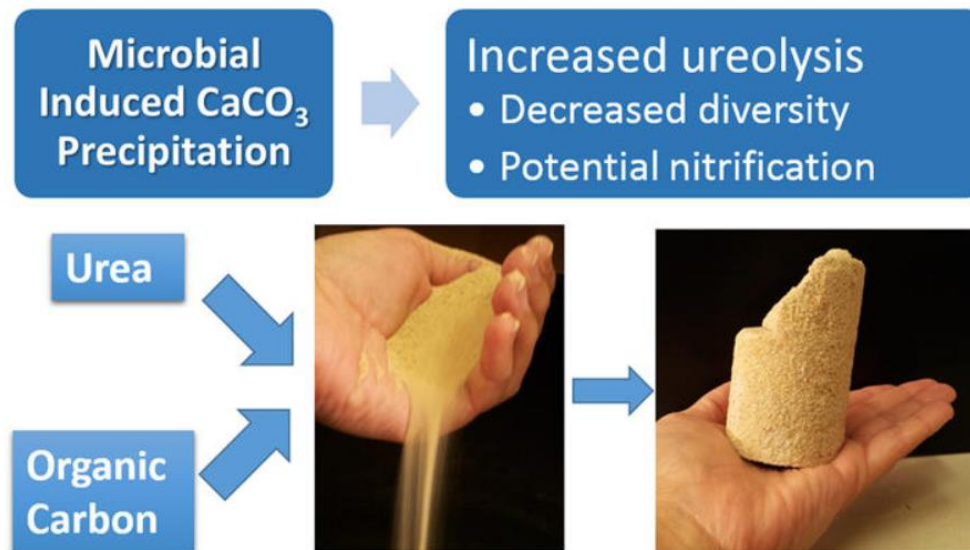


Figure 1-3 : Précipitation de CaCO<sub>3</sub> induite par les microbes via une hydrolyse d'urée (uréolyse)(Gat, Ronen, et Tsesarsky 2016)

### I.3 EICP (Enzyme Induced Carbonate Precipitation)

La précipitation de carbonate induite par une enzyme a un large éventail d'applications potentielles en géotechnique. Ce large éventail d'applications est dû en partie à la taille plus petite de l'enzyme uréase libre utilisée dans le PCI, comparée à celle des bactéries uréolytiques utilisées dans le MICP. Les applications potentielles de l'EICP comprennent l'atténuation des poussières diffuses, le contrôle de l'érosion des eaux de surface, la création de barrières souterraines, la stabilisation des excavations, la correction des fissures dans le béton, le clouage des sols, la réduction de la liquéfaction et le soutien des fondations.

Bien qu'encore à ses débuts de développement, l'application de l'EICP a démontré sa capacité à réduire de manière significative les niveaux de poussière fugitive (Knorr 2014 ; Bang et al.2009 ; Eyer et al.2011). EICP et MICP peuvent tous deux être utilisés pour atténuer la poussière fugitive. Cependant, l'EICP présente des avantages pratiques par rapport au MICP, car son processus de réaction se déroule plus rapidement que dans le MICP. Au cours de la première année d'exploitation du EICP, nous avons mis au point un acide polyacrylique (PAA), un hydrogel synthétique de précurseur, comme alternative à l'utilisation d'une poudre d'hydrogel naturel pour l'amélioration des sols.

Le précurseur injectable que nous avons mis au point est avantageux par rapport au traitement à la poudre d'hydrogel en ce qui concerne (1) il peut être durci in situ dans le sol pendant une durée contrôlable; (2) il facilite la précipitation du carbonate dans les composites pour former un réseau uniforme de gel-calcite-sol; et (3) la polymérisation simultanée d'un hydrogel en forme de racine avec une précipitation de calcite a considérablement augmenté la résistance mécanique du sol amélioré, comme illustré à la figure 7.

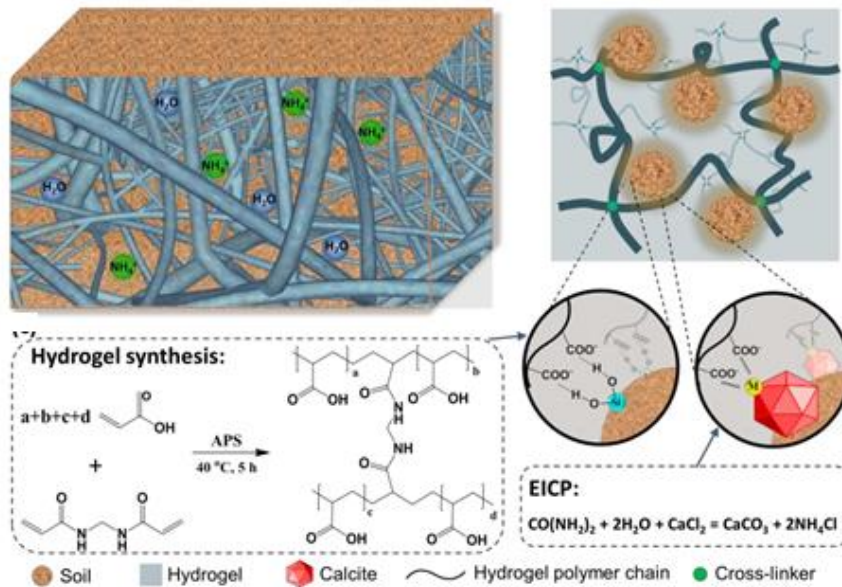


Figure 1-4 : Les étapes de procédure de la réaction de bio cémentation par ECIP. (Source internet)

#### I.4 Principe de la bio calcification

Le procédé de bio calcification repose sur l'hydrolyse enzymatique d'urée en présence de bactéries *Sporosarcina pasteurii* ou d'enzyme, suivie par une précipitation de calcite au contact d'une solution calcifiante.

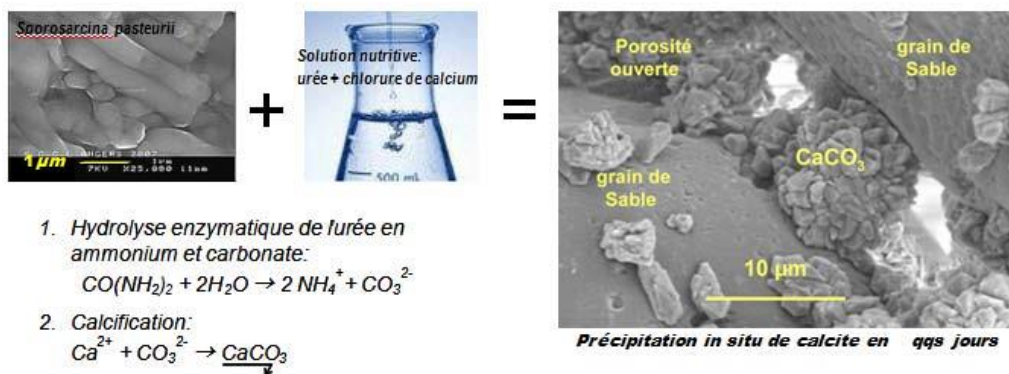


Figure 1-5 : Principe de la bio-calcification par voie uréolytique (source internet)

### I.5 Enzymes et Enzyme Uréase

Les enzymes sont des macromolécules bio polymères hautement sélectives qui catalysent des réactions chimiques sans être consommées dans les réactions. Les enzymes ont des structures tridimensionnelles complexes basées sur des liaisons chimiques et des interactions électrostatiques qui peuvent être altérées de manière réversible ou irréversible (dénaturées) dans certaines conditions environnementales et chimiques. Les enzymes ont été décrites comme les chevaux de travail de tous les organismes vivants et interviennent dans presque tous les domaines.

L'effet net des enzymes est d'augmenter les taux de réaction. Les enzymes y parviennent en réduisant l'énergie d'activation des réactions entre les réactifs et l'état de transition. L'enzyme uréase est une protéine hexamère d'environ 12 nanomètres à 12 nanomètres. L'enzyme uréase la plus connue et la plus étudiée est celle extraite de la plante de haricot. Le plant de haricot est une légumineuse résistante à la sécheresse de la famille des fabacées (ou légumineuses). L'uréase d'origine végétale n'est pas propre au haricot jack, elle est synthétisée par de nombreuses plantes, notamment le pois cajan (*Cajanus cajan* L.). On trouve également de l'uréase dans les feuilles des plantes énumérées ci-dessus et dans de nombreuses autres, y compris certaines plantes non cultivées communes aux environnements semi-arides, telles que le *Callistemon viminalis* (pinceau à bouteilles pleureur). ont montré qu'il suffisait de couper les feuilles de plusieurs plantes contenant de l'uréase plutôt que d'extraire chimiquement l'enzyme pour induire une activité de l'uréase dans des solutions d'urée. L'extraction de l'enzyme uréase de certaines cultures s'est révélée très simple et ne nécessite que du matériel de laboratoire de base (Srivastava et al, 2001). Les fruits, les graines et les haricots de la plupart des plantes contenant de l'uréase peuvent être facilement obtenus sur les marchés locaux et l'enzyme peut ensuite être isolée suivant un protocole bien établi. Les feuilles de plantes contenant de l'uréase peuvent être obtenues en tant que litière de plantes et l'extraction enzymatique peut être poursuivie à l'aide de plusieurs méthodes, notamment des méthodes d'extraction des feuilles brutes et peu coûteuses. L'enzyme peut également être obtenue auprès de fournisseurs de laboratoires car l'uréase a de nombreuses utilisations, y compris des applications biomédicales.

### I.6 Activité d'uréase

Selon van Paassen (2009) l'activité de l'uréase a été mesurée immédiatement après l'échantillonnage. En l'absence d'ions calcium, l'activité de l'uréase a été déterminée par une méthode de conductivité.

La réaction d'uréase implique l'hydrolyse de l'urée substrat non ionique en produits ioniques, générant ainsi une augmentation proportionnelle de la conductivité dans des conditions standard. 1 ml de suspension bactérienne a été ajouté à 9 ml d'urée 1,11



M (concentration réactionnelle 1 M d'urée) et le changement de conductivité relative en  $\text{mS min}^{-1}$  a été enregistré pendant 5 minutes à  $20^\circ \text{C}$ . L'activité de l'uréase a ensuite été calculée en tenant compte de la dilution pour fournir la valeur non diluée. Dans la plage d'activités mesurée,  $1 \text{ mS min}^{-1}$  en corrélation avec une activité d'hydrolyse de  $11 \text{ mM d'urée min}$ . Selon Cheng (2012) l'activité de l'uréase retenue dans la colonne a été déterminée en soustrayant l'activité de l'uréase présente dans l'effluent à la quantité d'uréase introduite. Comme la culture a été collectée à la phase stationnaire de croissance (c'est-à-dire que tous les nutriments facilement disponibles ont été consommés à partir du milieu), aucune croissance supplémentaire de cellules bactériennes dans la colonne de sable pendant la période d'incubation ne pouvait se produire. La détection de l'activité des effluents étant effectuée immédiatement, la décroissance de l'activité ou l'excrétion de l'uréase par les cellules bactériennes ne serait pas prise en compte.

### **I.7 Utilisation de l'uréase d'origine végétale dans l'environnement géo-environnemental**

Selon (RAN et Kawasaki (2016) l'enzyme uréase est largement utilisée dans différents domaines de l'industrie médicale, de la construction, de l'agriculture, de l'alimentation, etc. Différents types de bactéries uréolithiques et micro-algues, de l'uréase du sol et de l'uréase végétale ont été appliqués dans les domaines susmentionnés. Actuellement, le potentiel d'utilisation de l'enzyme uréase d'origine végétale pour précipiter le carbonate (principalement la calcite) par l'hydrolyse de l'urée dans plusieurs applications d'ingénierie environnementale et géotechnique a été démontré. Le but de cette section est de résumer les applications existantes et potentielles de la précipitation de  $\text{CaCO}_3$  à l'aide d'uréase provenant de plantes.

### **I.8 Applications existantes et potentielles de la précipitation de $\text{CaCO}_3$ à l'aide d'uréase dérivée de plantes**

Selon RAN and Kawasaki (2016) des tentatives d'utilisation de l'enzyme uréase d'origine végétale pour précipiter le  $\text{CaCO}_3$  ont été effectuées au cours des dernières années pour diminuer la conductivité hydraulique de sols, pour renforcer les sols meubles et pour prévenir l'érosion des sols. Cependant, toutes ces applications sont limitées à l'échelle du laboratoire et aucun type d'application sur le terrain n'a été rapporté jusqu'à présent. La précipitation de calcite à l'aide d'uréase de haricot jack a été étudiée pour améliorer les propriétés mécaniques du sable.

En conséquence, une résistance à la compression non confinée (UCS) de  $317 \text{ kPa}$  a été atteinte, comparée à celle du sable sans uréase de haricot jack. La plus haute résistance de l'échantillon a été obtenue en utilisant une solution mère de chlorure de calcium plutôt que les autres solutions mères de sources de calcium (hydroxyde de calcium et

nitrate de calcium). Nemati et Voordouw (2003) ont étudié la formation de calcite induite par l'uréase de plantes, des études de colmatage dans un système de milieu poreux non consolidé et des études de colmatage du grès de Berea dans un système d'inondation du noyau. Selon les résultats de l'étude sur le colmatage de milieux poreux non consolidés par du  $\text{CaCO}_3$  formé enzymatiquement, une diminution significative de la perméabilité des milieux poreux a été observée. À faible concentration d'enzyme (0,03 g / l), le degré d'obturation augmente avec l'augmentation de la température de 22 ° C à 30 ° C. Bien que la température soit un facteur influant sur la précipitation du carbonate, son influence est moindre avec les concentrations élevées d'enzyme utilisée dans cette étude. Cependant, Nemati and Voordouw expliquent qu'une augmentation proportionnelle des réactifs et des concentrations d'enzymes supérieures à un certain niveau inhibe l'activité de l'uréase et diminue la quantité de  $\text{CaCO}_3$  produite et le colmatage des milieux poreux. Une autre tentative visant à trouver une méthode pour créer des matériaux de construction à l'aide de  $\text{CaCO}_3$  précipité a été réalisée par Bull avec l'aide de l'uréase de haricot jack (*Canavalia ensiformis*) de Sigma-Aldrich Co. LLC.

L'activité spécifique de l'uréase de haricot jack utilisée dans l'étude est comprise entre 15 000 et 50 000 unités / g de solide. Ils ont obtenu des échantillons cimentés uniformes en dissolvant de l'urée et du  $\text{CaCl}_2$  dans une solution et de l'uréase dans une autre solution. Après durcissement et séchage à l'air pendant 2 semaines, un SCU maximum de 319 kPa et un module d'élasticité d'environ 10 MPa ont été obtenus. Bull a également observé que la cimentation au  $\text{CaCO}_3$  n'aboutissait pas avec des solutions contenant de fortes concentrations de  $\text{CaCl}_2$  et d'urée. Par conséquent, il est avantageux d'étudier les limites tolérables des concentrations de chaque solution pour obtenir un meilleur rendement.

## I.9 Facteurs Affectant L'efficacité Du Traitement Des Précipitations De Calcite

Selon St-onge et al. (2016) l'efficacité de la bio cimentation semble étroitement dépendante de la composition du milieu de culture, du niveau d'activité enzymatique injecté, de la nature du sable, du sel de calcium et des mélanges, des concentrations appliquées, de la température, du temps et des paramètres d'injection (vitesse, pression, séquence d'injection, durée de batch).

Pour obtenir une précipitation optimale de la calcite, il faut connaître et contrôler tous les facteurs pouvant influencer les réactions biochimiques. Cette section portera sur les facteurs externes à la technique, tels que la température et la granulométrie.

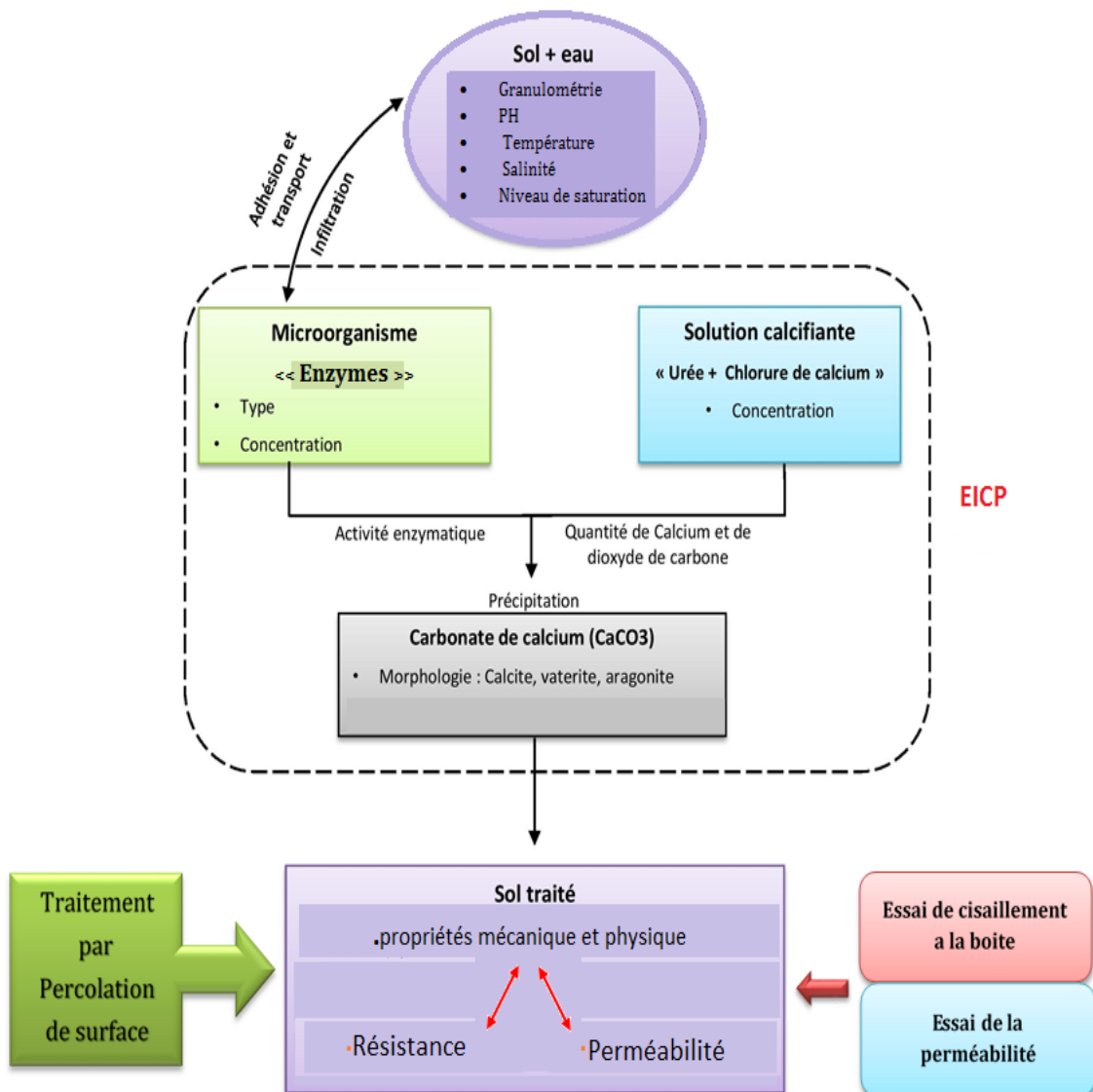


Figure 1-6 : Schéma représentatif des facteurs qui contrôlent le procédé

Dans les paragraphes suivants, les différents facteurs contrôlant ce processus sont présentés en détails ainsi que leurs influences sur la technique de bio cimentation.

### I.9.1 Types de sols

La granulométrie, la composition du sol, la forme des grains, ainsi que leur taille influence l'efficacité du bio cimentation. Premièrement, selon Mitchell et Santamarina (2005) .L'applicabilité de la technique est limitée par la taille des particules. La *S. pasteurii* mesure en moyenne entre 1,3 et 4,0  $\mu\text{m}$ . De ce fait, pour conserver une bonne mobilité de la bactérie, il n'est pas recommandé de traité des sols plus fins qu'un silt, soit d'une granulométrie inférieure à 6,0  $\mu\text{m}$ .

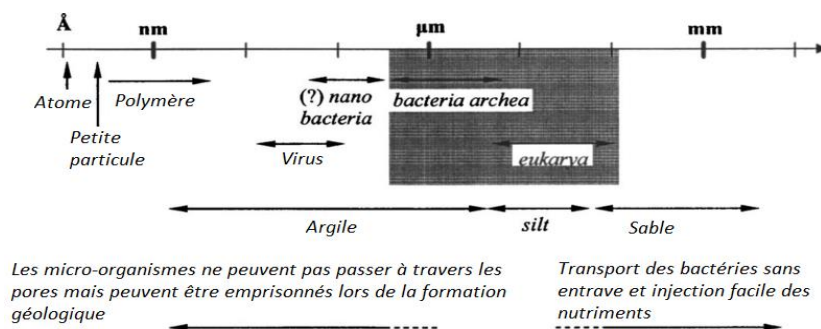


Figure 1-7 : Limitation du mouvement des bactéries selon la granulométrie du sol (Mitchell and Santamarina, 2005)

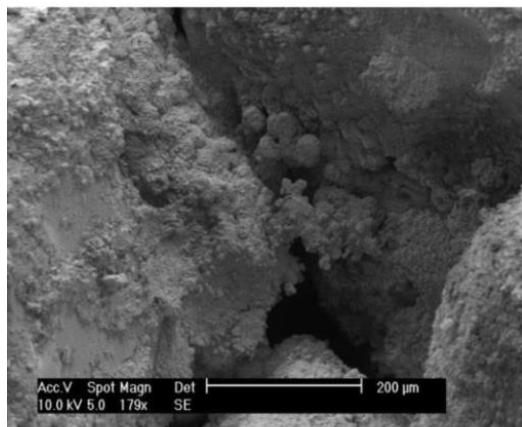
### I.9.2 Niveau de pH

Le pH des sols varie généralement entre 4 et 10. Cette variation dépend de plusieurs paramètres comme la composition minéralogique du sol, le type de précipitation dans la région (ex : pluie acide), et l'existence des polluants acides ou basiques dans le sol. Par conséquent, l'étude de l'influence de l'acidité des sols est indispensable pour des applications in-situ de la technique de bio-cimentation. D'après des études réalisées sur cet aspect, le pH du sol ou du milieu peut affecter différemment (1) la croissance et l'activité enzymatique des bactéries, (2) les propriétés de transport et d'adhésion des bactéries et (3) la cristallisation du carbonate de calcium (StocksFischer et al., 1999 ; Achal et al., 2009 ; DeJong et al., 2010a ; Bang et al., 2001 ; Harkes et al., 2010 ; Tobler et al., 2011 ; Cheng et al., 2014).

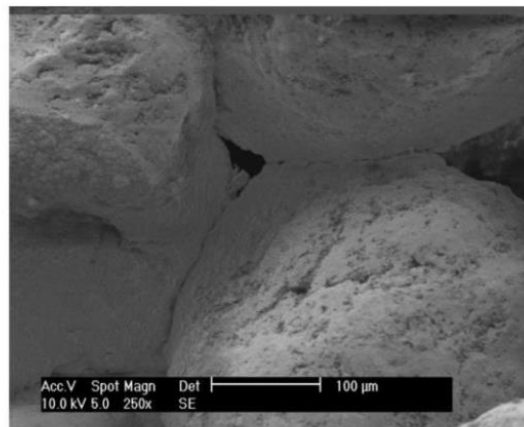
### I.9.3 Degré de Saturation

Cheng, et al (2013) ont réalisé des échantillons bio calcifiés avec différents niveaux de saturation (Figure 2.20). La précipitation dans les sols non-saturés se passe généralement au niveau des ménisques d'eau formés entre les grains, qui contiennent les bactéries et la solution calcifiante (Figure 11). Cette localisation permet d'augmenter de façon significative la surface cohésive entre les grains de sable, en diminuant le niveau de saturation. De ce fait, lorsque les bactéries hydrolysent l'urée, la grande majorité des précipitations se fera sur la surface et à l'intersection des grains, ce qui optimise grandement le positionnement des dépôts de calcite. Les figures ci-dessous prises par Cheng et al. (2013) montrent l'effet de la saturation sur les dépôts de calcite. Lorsque la saturation est à 100%, la précipitation est moins bien répartie et plusieurs dépôts se font sur la surface et non sur les contacts. Lorsque la saturation est de 20% seulement, la précipitation est plus homogène sur la surface des grains et les contacts grains à grains sont fortement cimentés.

Selon van Paassen (2009) le degré de sursaturation du carbonate de calcium influence la précipitation de vaterite. Pour un degré de sursaturation inférieur à 2, la calcite est prédominante, ce qui permet de la précipiter rapidement à l'intérieur de l'échantillon. Si le degré de saturation est supérieur à 2, les cristaux se réarrangent dans le temps, ce qui augmente le temps d'attente de la prise.



(a) Saturation totale



(b) saturation partielle (20%)

Figure 1-8 : Effet de la saturation sur la précipitation de calcite sur les particules de sol  
 À gauche, un échantillon traité à 100% de saturation. À droite, un Échantillon traité à 20% de saturation (Cheng et al., 2013).

### I.9.4 Salinité de l'eau

Plusieurs études ont été réalisées pour analyser l'influence de la salinité du milieu sur le processus de bio-cimentation. Ces études ont montré que la salinité peut influencer certains paramètres tels que la croissance des bactéries, l'activité enzymatique, l'adhésion, et le transport. Les études que menées par Mortensen et al. (2011) montrent que la précipitation est favorisée lorsque le sol est préalablement saturé avec de l'eau salée. Les essais ont ainsi montré que la précipitation double lorsque le sol est saturé par une eau interstitielle saline. L'augmentation de la salinité du milieu peut augmenter l'alcalinité du milieu ce qui augmente systématiquement l'activité enzymatique in-situ.

### I.9.5 Température

La température sur la terre change d'une région à une autre et d'une saison à l'autre, et elle dépend de plusieurs paramètres comme l'altitude, la latitude, le type de sols, la saturation, la conductivité, la radiation solaire, etc. (Ng et al., 2012). Différentes études ont été réalisées pour caractériser l'effet de la température sur l'efficacité du traitement par bio calcification. Généralement, ces études montrent que la température du milieu influence (1) l'activité enzymatique, ce qui influence aussi la quantité de carbonate de calcium précipitée, (2) la distribution et la morphologie du carbonate de calcium précipité et (3) la croissance et la survie des bactéries.

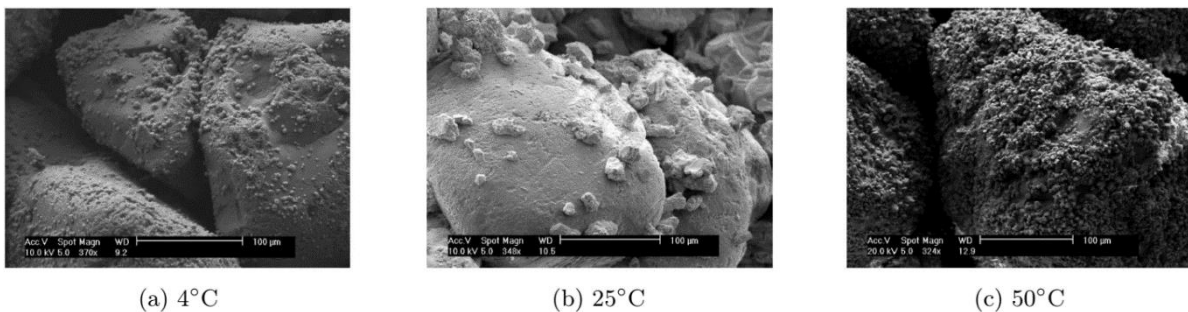
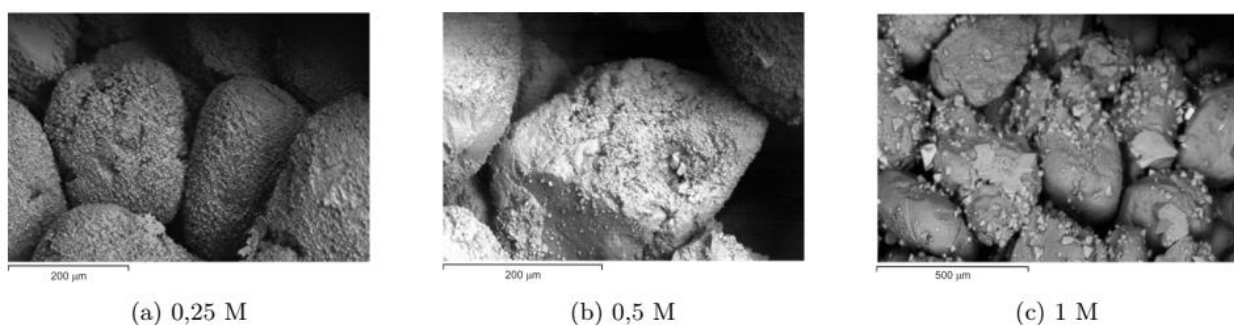


Figure 1-9 : Observation MEB pour des échantillons de sable calcifiés sous différentes températures, a)  $\text{CaCO}_3 = 0.021\text{g/g}$  de sable,  $R_c = 108\text{ kPa}$ , b)  $\text{CaCO}_3 = 0.028\text{ g/g}$  de sable,  $R_c = 245\text{ kPa}$ , c)  $\text{CaCO}_3 = 0.034\text{ g/g}$  de sable,  $R_c = 121\text{ kPa}$  (Cheng et al., 2016).

### I.9.6 Concentration de la solution calcifiante

Le processus de bio calcification nécessite une source de calcium et une source de dioxyde de carbone pour la réaction biochimique de précipitation de la calcite. Généralement, dans le processus de bio-cimentation on utilise le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) comme une source de calcium et l'urée comme une source de carbone

( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ). (Nemati et al. (2005) ont montré qu'une solution calcifiante équimolaire (même quantité molaire de chlorure de calcium et d'urée) conduit à une meilleure conversion en calcite (efficacité maximale de précipitation). On pense que l'efficacité de la formation de cristaux de  $\text{CaCO}_3$  est affectée par diverses concentrations de solution de cimentation. Ceci est attribué au fait que l'on observe généralement une distribution plus homogène des cristaux de  $\text{CaCO}_3$  le long de la matrice de sable à une concentration inférieure de la solution de cimentation. D'autre part, les cristaux de  $\text{CaCO}_3$  précipités à une concentration plus élevée de solution de cimentation se forment généralement de manière aléatoire dans les vides du sol en raison de la précipitation plus rapide induite par la concentration plus élevée de solution de cimentation (Okwadha et Li 2010). Le sable traité avec une concentration de réactif inférieure donnait une résistance supérieure à celle traitée avec une concentration de réactif supérieure. La concentration plus faible a entraîné une formation plus homogène de cristaux de  $\text{CaCO}_3$  aux points de contact des particules, ce qui a contribué à l'amélioration de la résistance avec une perturbation minimale du sol et une réduction de la perméabilité. Cela concorde avec les conclusions de Ng et al. (2014) qui ont affirmé que la bio-cimentation était plus efficace sur le sol résiduel traité avec un réactif de cimentation 0,5 M par rapport à celui traité avec un réactif de cimentation 1 M. Cheng et al (2014) ont même produit des colonnes de sable bio-cimentées en utilisant une faible concentration de source de  $\text{CaCO}_3$  (c'est-à-dire 10 mM) à partir d'eau de mer ; cependant, un plus grand nombre d'injections était nécessaire pour obtenir la même quantité de précipitation de cristaux de  $\text{CaCO}_3$  lorsqu'une concentration plus faible en réactif de cimentation était utilisée. En revanche, l'utilisation d'une concentration élevée de solution calcifiante (0.5 à 1 M) peut donner une quantité considérable de calcite avec de grands cristaux ; par contre la précipitation dans ce cas est très hétérogène à l'intérieur de l'échantillon du sol traité (Figure 13), ce qui réduit l'efficacité mécanique de ce procédé (Cheng et al., 2016)



**Figure 1-10** : Observation MEB pour des échantillons de sable traités avec différentes concentrations de solution calcifiante (Al Qabany and Soga, 2013).

**Tableau 1 :** Taux d'entrée de la solution de cimentation dans la littérature  
(modifié après Al Qabany, et al (2012) )

	DeJong et al. (2006)	Rebata-Landa (2007)	Whiffin et al. (2007)	Al Qabany et al. (2012)	
Infiltration rate (mol/L/h)	0.0025	0.042	0.0088	0.042	0.084
Concentration (M)	0.1	0.25	1.1	0.1/0.25/0.5	
Efficiency (%)	92	95	88	>90	50

### **I.10 Effet de la bio-cimentation sur la porosité**

Selon whiffin (2007) la porosité a été déterminée à partir des densités humide et sèche au cours des tests de résistance. La présence de carbonate de calcium avait un effet net sur la porosité du matériau et une linéarité raisonnable la relation entre les deux paramètres a été observée. Au teneur maximale en carbonate de calcium (105 kg / m<sup>3</sup> CaCO<sub>3</sub>) la porosité de la colonne a été réduite à 90% du matériau non traité. La précipitation de calcite réduit la porosité du sol, la précipitation se fait principalement au contact grain à grain et sur leurs surfaces. Cette précipitation est idéale, car elle permet de cimenter les grains tout en laissant les pores vides. La figure 25 présente l'influence de la précipitation sur l'indice des vides. La diminution du volume des vides a été calculé à partir du gain de masse sèche mesuré et de la densité relative de la calcite qui est de 2,71. La porosité est la quantité de vides dans un matériau. Qian et al. (2010) ont caractérisé l'efficacité de la cimentation en termes de porosité des échantillons de sable cimenté et de réduction, et ont constaté que la porosité était réduite à 25% après le traitement par MICP.

Tagliaferri et al. (2011) ont eu recours à l'imagerie par rayons X et à l'analyse quantitative d'images numériques 3D pour analyser les liaisons bio cimentées broyées et ont montré que la porosité globale du sol bio cimenté était réduite à 30%. Bien que la valeur de la porosité ait été réduite, les précipités de CaCO<sub>3</sub> ont été trouvés pour remplir les pores du sol de grains de sable. Il convient de noter que la porosité conditionne l'efficacité des échantillons traités au MICP en contrôlant le remplacement du contenu en pores des grains de sable par du CaCO<sub>3</sub> (Rong et al. 2012). Au fur et à mesure que le degré de cimentation augmente, la quantité de CaCO<sub>3</sub> précipité augmente et une quantité plus importante de cristaux de CaCO<sub>3</sub> remplace la teneur en pores de la structure interne de la matrice du sol, ce qui conduit à une résistance accrue.



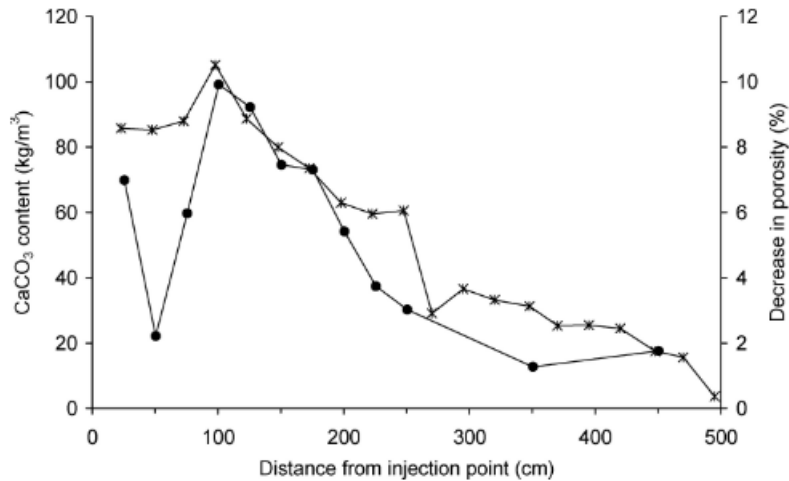


Figure 1-11: Diminution relative de la porosité (•) par rapport à la teneur en carbonate de calcium (\*) sur la longueur de la colonne (Whiffin et al. 2007)

### I.11 Effet de la bio-cimentation sur la rigidité

La rigidité du sol, communément appelée module d'élasticité du sol ( $E$ ), est le rapport contrainte sur déformation. La rigidité du sol est étroitement liée à la force de liaison entre les grains de sol en vrac. Cheng et ses collaborateurs (2013) ont comparé le module d'élasticité du sable biocimenté à d'autres types de géo matériaux tels que le béton, le gravier et les roches tendres, et ont constaté que le sable bio traité était le plus flexible parmi les matériaux testés. Dans les zones sujettes aux tremblements de terre, un sol moins raide peut offrir un temps supplémentaire pour l'évacuation en raison de sa capacité à maintenir une résistance résiduelle significative même après une défaillance. Lee et al. (2013) ont réalisé un MICP sur un sol résiduel et ont constaté que le comportement de rigidité d'un sol résiduel bio cimenté est similaire à celui d'un sable naturel biocimenté. Auparavant, les chercheurs avaient étudié les effets de la cimentation sur la résistance et la rigidité des sols granulaires en utilisant divers agents de cimentation, notamment le ciment Portland, le gypse et le silicate de sodium (Amini et Hamidi 2014 ; Fernandez et Santamarina 2001 ; Haeri et al. 2006 ; Sharma et al. 2011). Il a été constaté que la résistance et la rigidité des matériaux cimentés augmentent avec l'augmentation de la quantité de matériau de cimentation dans la matrice de sol ; bien que la quantité de matériau de cimentation nécessaire pour produire un certain effet de cimentation puisse varier. Sur cette base, Montoya et DeJong (2015) ont étudié l'effet de la bio cimentation sur le comportement contrainte-déformation du sable bio traité et ont constaté que la rigidité était considérablement améliorée avec l'augmentation de la cimentation MICP (c'est-à-dire la teneur en  $\text{CaCO}_3$ ).

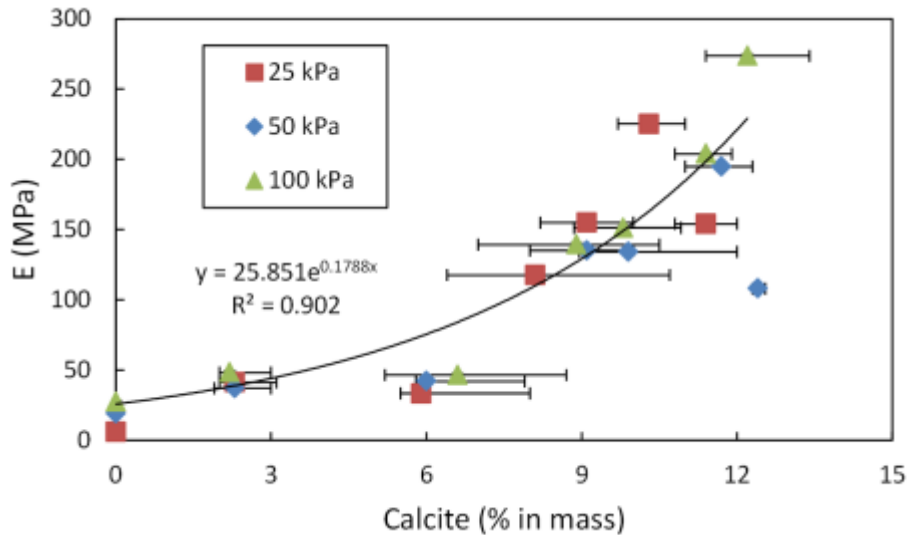


Figure1-12 : Evolution du module d'élasticité de différents sables biocimentés testés sous différentes pressions de confinement (25, 50 et 100 kPa) (Dadda 2017)

### I.12 Effet de la bio-cimentation sur la perméabilité

La formation de précipitation de calcite près des contacts particule à particule réduit les pores et limite le débit d'eau. Expérimentalement, Ferris et al. (1996) ont observé une réduction perméabilité de 15% à 20% de la perméabilité initiale et Whiffin et al. (2007) ont observé une réduction de la perméabilité de 22% à 75% de la perméabilité initiale. Cependant, il est concevable que la perméabilité puisse être réduite davantage avec un traitement supplémentaire. A titre expérimental, il convient de reconnaître que la perméabilité peut ne pas être uniforme entre les échantillons traités, une tendance générale étant à une réduction plus importante de la perméabilité se produisant plus près de la source d'injection. La perméabilité mesure la capacité des matériaux poreux à permettre le passage du fluide. Dans le MICP, la perméabilité est de la plus haute importance car la technique est préférée pour les sols de nature perméable ou semi-perméable, tels que les sols à grains grossiers (par exemple, le sable et le gravier).

Les matériaux poreux à haute perméabilité peuvent empêcher le développement d'une pression excessive de l'eau interstitielle pendant le chargement. En règle générale, le MICP peut être utilisé pour augmenter la résistance du sol tout en conservant une perméabilité suffisante (en cas de bio cimentation du sol) ou pour bloquer complètement les pores du sol (en cas de bio chargement). Van Paassen (2009) a signalé une réduction de 60% de la perméabilité initiale des sols bio traités avec des précipitations d'environ 100 kg / m<sup>3</sup> de CaCO<sub>3</sub>, alors qu'Ivanov et al. (2010) ont enregistré une réduction de la perméabilité de 50 à 99% avec une solution de cimentation 1 M.

Al Qabany et Soga (2013) ont utilisé une solution de cimentation de 0,5 M et ont constaté une réduction de 20% de la valeur de la perméabilité initiale à une précipitation de 2% de CaCO<sub>3</sub>. De plus gros cristaux de CaCO<sub>3</sub> ont été produits et ont obstrué les pores lorsqu'une solution à haute concentration a été utilisée. Par conséquent, pour les échantillons traités avec une solution à forte concentration (0,5 à 1 M), la réduction de la perméabilité est généralement supérieure à celle des échantillons traités avec une solution à faible concentration (0,1 à 0,5 M). Cependant, l'homogénéité le long des échantillons de la colonne de sable peut toujours être attribuée au colmatage localisé. Il est donc recommandé d'utiliser une solution à faible concentration si l'on désire moins de réduction de la perméabilité pour assurer une consistance uniforme de la précipitation de CaCO<sub>3</sub>. Une solution à faible concentration peut produire un modèle de précipitation plus uniforme et des échantillons plus puissants pour une quantité donnée de précipitation de CaCO<sub>3</sub>.

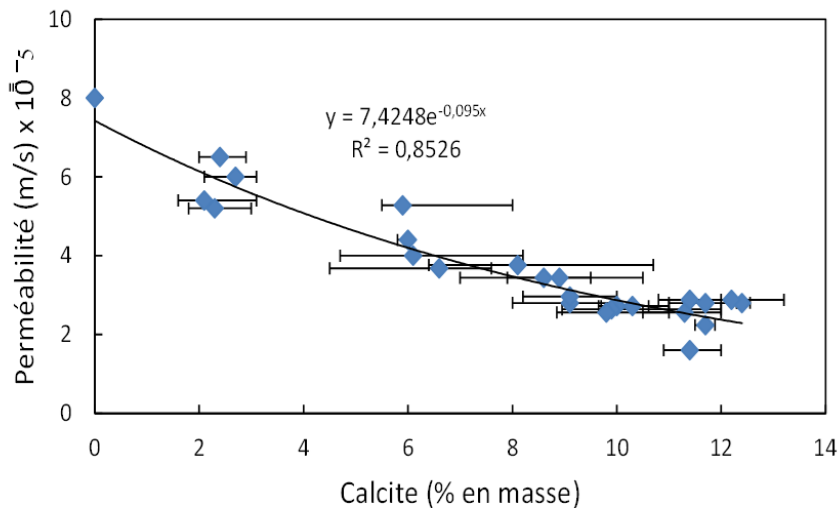


Figure 1-13 : Effet de la bio-cimentation sur la perméabilité (Dadda 2017)

### I.13 Effet de la bio-cimentation sur la résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement est l'ampleur de la contrainte de cisaillement qu'un sol peut supporter et dépend strictement des paramètres de résistance au cisaillement du sol, y compris la cohésion (c) et l'angle de frottement ( $\phi$ ). Duraisamy et Airey (2012) ont corrélé la résistance au cisaillement d'un sol sableux liquéfiable. Traité avec MICP au degré de cimentation en utilisant la technique de vitesse d'onde de cisaillement. Il a été constaté que la résistance au cisaillement des sols bio-cimentés était strictement affectée par l'augmentation de la cohésion du sol résultant de l'augmentation de la teneur en ciment, tandis que l'angle de frottement n'était pas grandement affecté par le processus de cimentation. En revanche, Chou et al. (2011) ont signalé une forte

augmentation de l'angle de friction du sol, mais une légère augmentation de la cohésion du sol a été détectée pour la quasi-totalité des échantillons traités à l'aide de MICP catalysée par trois conditions de *Sporosarcina pasteurii* (cellules en croissance, en repos et mortes). Il a également été constaté que la résistance maximale au cisaillement du sol biocimenté était supérieure à celle des échantillons non traités et généralement plus élevée dans le traitement des cellules en croissance que celle des autres méthodes de traitement. Ng et al. (2012) ont appliqué MICP à l'aide de *Bacillus megaterium* pour traiter un sol résiduel et ont constaté que le rapport de résistance au cisaillement des sols traités aux sols non traités était augmenté à des valeurs comprises entre 1,40 et 2,64. Montoya et DeJon (2015) ont observé que la résistance au cisaillement du sable traité au MICP était considérablement améliorée avec l'augmentation de la cémentation du MICP. Avec l'augmentation du niveau de cémentation, la résistance maximale au cisaillement a augmenté, entraînant une transition du comportement contrainte-déformation d'un durcissement à l'effort à un ramollissement par contrainte. Cheng et al. (2013) ont également examiné la cohésion et l'angle de frottement des échantillons de sol bio cimentés traités à différents degrés de saturation et ont montré qu'à un degré de saturation inférieur, les cristaux de  $\text{CaCO}_3$  précipités contribuaient davantage à améliorer la cohésion du sol que l'angle de frottement. D'autre part, quel que soit le degré de saturation, la cohésion et l'angle de frottement ont augmenté à une teneur élevée en  $\text{CaCO}_3$  en raison de l'effet de remplissage des cristaux de calcite dans les espaces de pores du sol.

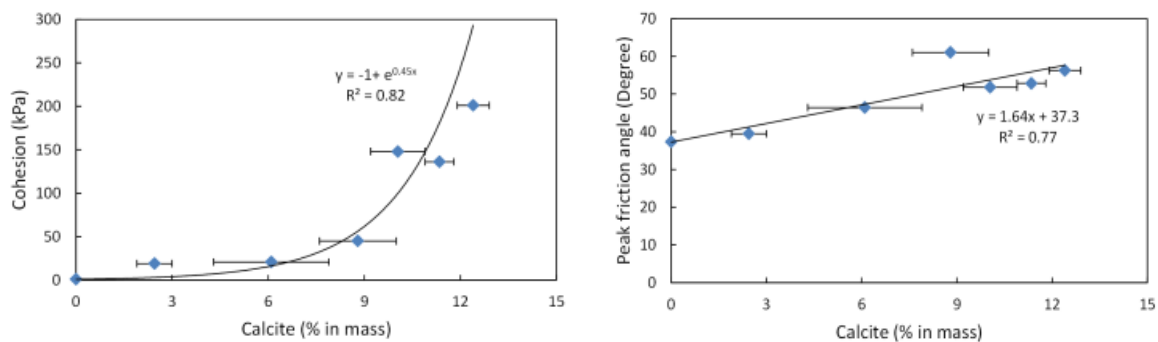


Figure1-13 : effet de biocimentation sur la résistance au cisaillement.(Dadda 2017)

### I.14 Avantages potentiels de l'EICP par rapport au MICP

La petite taille de l'enzyme uréase libre solubilisée utilisée dans le 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, tels que le limon. La petite sous-unité de l'enzyme uréase, sur le dimension 12 nm permet à la solution IPPC de diffuser dans des sols plus fins dans lesquels des microbes uréolytiques, d'une taille

typiquement comprise entre 300 et 500 nm, ne peuvent pas pénétrer ou qui, combinés à une précipitation de  $\text{CaCO}_3$ , entraînent un encrassement biologique pores du sol), inhibant le transport des nutriments et du substrat dans le sol. La solubilité dans l'eau de l'enzyme uréase libre lui permet de pénétrer dans tous les pores de l'eau, ce qui minimise le risque de bouchage biologique. L'utilisation de l'enzyme uréase libre présente un autre avantage potentiel, à savoir la diminution de l'activité enzymatique et de sa fonctionnalité dans le temps, réduisant potentiellement les impacts environnementaux à long terme. L'activité de l'uréase éphémère serait plus efficace pour atteindre des objectifs techniques à court terme, après quoi l'enzyme se dégradera, évitant ainsi les impacts biologiques potentiels à long terme. Bien que l'enzyme 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. 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.

### I.15 Désavantages potentiels de L'EICP

L'utilisation de l'enzyme uréase libre à la place de l'uréase microbienne présente plusieurs inconvénients potentiels. L'utilisation d'enzyme libre peut entraîner un manque de points de nucléation dans le sol pour la précipitation de carbonate de calcium ; Les microbes MICP adhèrent généralement aux particules de sol, fournissant des points de nucléation pour la précipitation des minéraux. De plus, la précipitation rapide de carbonate dans l'EICP peut être désavantageux car elle peut entraîner la formation de vaterite et de  $\text{CaCO}_3$  amorphe. Ces polymorphes de  $\text{CaCO}_3$  sont moins structurés et se dissolvent plus facilement dans l'eau que la phase calcite de  $\text{CaCO}_3$  (van Paassen, 2009). Un autre inconvénient de l'enzyme libre est son coût relativement élevé. Le coût de l'enzyme uréase libre représente entre 57% et 98% du coût total de l'application de l'EICP aux applications pratiques, du fait que des matériaux de qualité laboratoire sont utilisés dans la plupart des essais d'EICP. L'utilisation à la fois d'EICP et de MICP a pour autre inconvénient de permettre l'utilisation du chlorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), contaminant reconnu des eaux souterraines, en tant que sous-produit de leurs réactions.

### I.16 Domaines d'application de la procédé

Le procédé Biocalcis permet d'améliorer les caractéristiques d'un sol in situ sans utiliser de ciment ou autre liant. Au point de vue pratique, la mise en œuvre du procédé Biocalcis peut s'apparenter à une injection d'imprégnation ; à ce ci presque :

- Il n'y a pas de montée en pression dans le terrain, le procédé reposant sur une circulation de liquides.

- Les produits utilisés sont très fluides (caractéristiques de viscosité et densité proches de l'eau) Le liant est produit in situ par des bactéries et la calcite fixée sur les grains de sol.
- Le procédé Biocalcis peut être mis en œuvre dans des terrains perméables, y compris des terrains assez fins ; sous nappe ou hors nappe. Les terrains traités acquièrent de nouvelles caractéristiques mécaniques tout en conservant une certaine perméabilité.

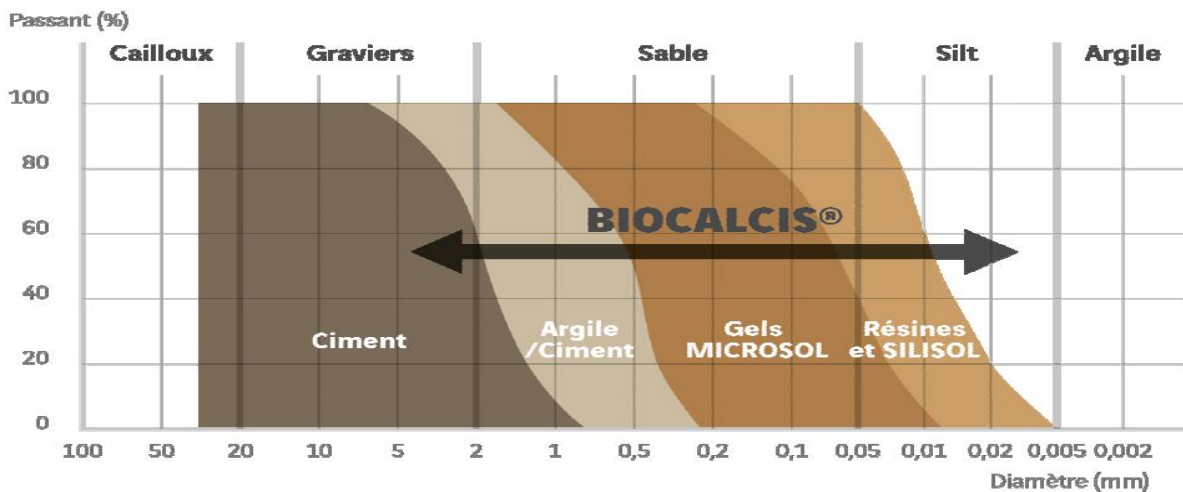


Figure 1-14 : Classification granulométrique des sols et domaine d'utilisation du Bilocalcis  
(Source internet)

Les applications du Biocalcis concernent typiquement les domaines suivants :

1. Les traitements anti-liquéfaction des sols à risque : il est possible de prévenir des risques de liquéfaction dans des sols lâches en améliorant leur résistance à la cisaillement : une augmentation de quelques dizaines de kPa de leur cohésion suffit. Le maintien de la perméabilité initiale du milieu n'affecte pas la dissipation des surpressions interstitielles en cas de séisme. L'application concerne surtout les constructions existantes, dans le cadre de l'évolution et de la mise à jour des cartes sismiques et des nouvelles normes sur certains ouvrages sensibles.
2. Le traitement contre l'érosion interne de dunes, digues, talus : l'entraînement de particules fines peut être évité pour prévenir des risques d'érosion interne de contact (entre un limon et un gravier), les risques de suffusion (entraînement de particules fines à travers les vides de particules plus grossières).
3. Le renforcement des sols en vue de diminuer la poussée des terres sur des murs de soutènement existants : approfondissement de murs de quais, renforcement de remblais Terre Armée en cas de corrosion des armatures.
4. Le renforcement des sols en vue d'augmenter leur résistance : amélioration de la capacité portante d'une couche de sol, augmentation de la butée en pied de soutènement.

5. Toute autre application nécessitant l'augmentation de la résistance au cisaillement d'un sol fin.

### I.17 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). Ces méthodes sont inspirées des méthodes classiques de traitement des sols comme (1) l'injection de coulis, qui consiste à injecter sous une forte pression un mélange visqueux d'un liant hydraulique (Figure 2.a). (2) le soilmixing qui consiste à mélanger mécaniquement les sols à traiter par des liants hydrauliques (ciment, chaux, etc.) (Figure 2.b).



(a)



(b)

Figure 1-15 : a) renforcement de sol par l'injection de coulis de ciment, b) réalisation d'une paroi étanche

#### I.17.1 Méthodes d'injection

Certaines situations particulières appellent un renforcement par remplissage des vides naturels ou créés artificiellement on a alors recours au injection qui est un domaine extrêmement vastes. Dans la gamme des sables et des limons, la technique d'injection est une alternative très pertinente. Le principe consiste à injecter par forage, un coulis plus ou moins visqueux dans le sol. Il existe plusieurs types de traitements, ce qui permet de s'adapter aux configurations spécifiques du terrain exploité. On peut, par exemple, injecter par avancement ou depuis la surface. On distingue l'injection par imprégnation de l'injection par claquage, qui diffère dans la manière dont le coulis d'injection pénètre dans le sol. Dans les deux cas, les propriétés hydrauliques du sol sont modifiées. D'un point de vue physico-chimique, le coulis d'injection

peut être une suspension à base de liants hydrauliques, une solution organique ou minérale. En effet, le coulis doit être adapté à la nature du sol et à l'application recherchée. L'amélioration des sols fins par injection est également limitée par les faibles perméabilités (de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s), qui empêchent une bonne pénétration et une bonne diffusion du liant dans le sol.

Combinée avec les propriétés de viscosité et de prise du coulis évoquées ci-avant, on constate les importantes limitations des méthodes d'injection pour le renforcement des sols fins. Les coulis à base de produits chimiques sont actuellement utilisés pour traiter ce type de terrain. De par leur constitution, la plupart de ces coulis génèrent des résidus toxiques qui s'accumulent dans le sol et ne se dégradent pas naturellement dans le temps. Ainsi, la solution actuelle d'injection de coulis à base de produits chimiques (Chemical grouting) n'est pas satisfaisante, écologiquement parlant.

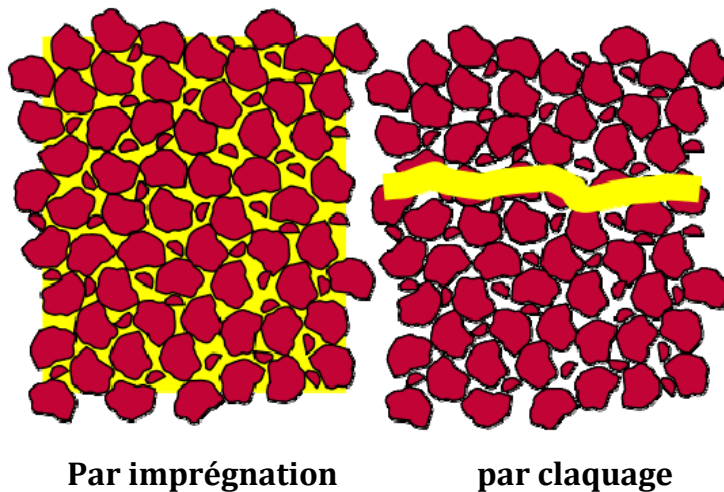


Figure 1-16 : Principe de répartition du coulis dans le sol  
(Source internet)

Cette méthode d'injection est la plus utilisée dans les études antérieures en bio-cimentation, étant donné qu'elle est semblable à la technique des sols injectés, qui est caractérisée par la facilité de contrôle in-situ (contrôle de la vitesse d'injection, direction). En outre, cette méthode est recommandée pour le renforcement des anciennes structures (barrages et digues en terre), qui ne sont pas prêtes pour des techniques intrusives. Une stratégie d'injection a été utilisée dans les premières études sur la bio-cimentation qui consiste à mélanger la solution bactérienne avec la solution calcifiante avant l'injection. Cette méthode a montré une cristallisation de la calcite et la floculation des bactéries avant injection, ce qui provoque un colmatage important au voisinage du point d'injection (Whiffin et al., 2007). Cette méthode peut être utilisée pour le renforcement des surfaces (ex : couche de forme des chaussées), car elle présente un coût moins élevé par rapport aux autres stratégies d'injection (nombre d'injections minimal).



### I.17.2 Soil-mixing

L'introduction des bactéries et de la solution calcifiante dans les sols avec cette méthode est réalisée par le malaxage mécanique des deux solutions et le sol à traiter. Cette méthode donne des traitements plus homogènes par rapport à la méthode d'injection (Zhao et al., 2014). Par contre, le malaxage mécanique peut endommager les cellules bactériennes et diminuer l'efficacité du traitement. En outre, cette méthode n'est pas favorable pour plusieurs types de structures notamment les anciennes structures (barrage et digue, fondations des bâtiments, etc.), ou le malaxage mécanique peut provoquer des perturbations locales et des instabilités dans la structure (Mujah et al., 2017).

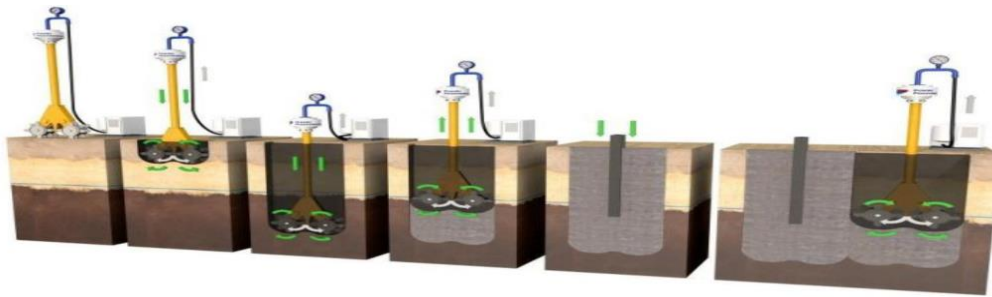


Figure 1-17 : Principe de fonctionnement des Colonnes de Soil Mixing (Pascal VILLARD 2018)

### I.17.3 Percolation de surface

Cette méthode de renforcement consiste à pulvériser la solution bactérienne et la solution calcifiante qui contient des réactifs sur la surface des sols. Les solutions bactérienne et calcifiante vont se diffuser sous l'effet de la gravité dans le sol (Mujah et al., 2017). L'avantage de cette méthode est l'énergie minimale nécessaire pour la réalisation de l'opération de biocimentation par rapport aux autres méthodes présentées précédemment. Cette méthode ne permet pas de renforcer des sols dans de grandes profondeurs, notamment les sols dont les faibles perméabilités peuvent gêner la diffusion des bactéries et de la solution calcifiante plus profondément. Cheng and Cord-Ruwisch (2014) ont montré que cette stratégie de traitement a permis de calcifier avec succès, de manière quasi-uniforme, une couche de sable grossier de 2 m. Par contre, cette méthode présente des limitations pour des sables fins (< 3 mm). La précipitation de la calcite ne dépasse pas 1 m avec une grande hétérogénéité (colmatage à la surface). Cette méthode n'est pas adaptée pour les grands ouvrages de dimensions importantes (épaisseurs) et qui sont constitués par des sols fins comme les barrages en terre. Par contre, cette stratégie de traitement peut être une solution très efficace pour

le renforcement de la couche de forme dans les projets routiers, pour la suppression de poussières et la stabilisation des sols contre l'érosion externe (Cheng et al., 2016).

### I.18 Conclusion

Cette étude bibliographique sur la biocimentation a montré que l'efficacité de la technique sur l'augmentation et l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols, ce qui a rend prometteuse pour lutter contre des problèmes géotechniques traditionnels, comme l'érosion interne dans les barrages en terre ou bien la liquéfaction des sols lâches. Cette étude montre aussi que l'efficacité du traitement, d'un point de vue mécanique, dépend de nombreux paramètres à savoir.

- Les propriétés du sol (granulométrie, composition, niveau de saturation, etc.) et les conditions environnementales (température, pH, salinité, etc.).
- Les bactéries/les enzymes (type, concentration).
- La solution calcifiante (composition, concentration).

L'ensemble de ces paramètres vont jouer un rôle important d'une part dans le phénomène de précipitation même (morphologie et cristallographie de la calcite), et d'autre part dans les modifications microstructurales (répartition de la calcite) des sols traités, qui sont-elles-mêmes responsables des modifications des propriétés physiques (perméabilité, diffusivité, etc.) et mécaniques (modules élastiques, paramètres de résistance : cohésion et angle de frottement, dilatance, etc.).

---

# **Chapitre 2**

---

**Matériaux étudié et  
techniques  
expérimentales**

## **II. Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques de sable étudié, puis les essais utilisés pour la caractérisation de sable. Ensuite, nous présentons les dispositifs expérimentaux utilisés, pour le traitement par la technique de bio cimentation par voie enzymatique et nous décrivons aussi brièvement les procédures d'essais réalisés dans le cadre de ce travail et les raisons d'utilisation de chaque méthode et essai, ainsi que les protocoles expérimentaux développés dans le cadre de cette étude.

### **II.1 Description du sable étudié**

Dans cette étude expérimentale pour le processus de bio cimentation, nous avons choisi le sable ElHajeb (Biskra) avec  $D_{50} \approx 240 \mu\text{m}$ , car il s'agit d'un sable fin avec une distribution granulométrique étroite et proche du sable de Fontainebleau (NE34) ( $D_{50} \approx 210 \mu\text{m}$ ) qui présente une forme de grain sub-arrondie qui a été utilisé dans des nombreux recherches international. Ce type de sable est une cible potentielle de la technique de bio cimentation en tant que mesure d'atténuation des problèmes de liquéfaction.

### **II.2 Méthodes de caractérisation des matériaux testés**

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

- Granulométrie par tamisage ;
- Mesure de la perméabilité ;
- Mesure d'indices des vides maximal et minimal ;
- Essai cisaillement à la boîte.



Figure 2-1 : les essais de caractérisation du sable non traité

### II.2.1 Analyse granulométrique par tamisage

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. En emboîte les tamis utilisée les uns sur les autres dans un ordre croissant de bas en haut en commençant par un récipient à fond plein (pour recueillir les éléments fin) et le dessus on met un couvercle pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure). On procède au tamisage en versant le matériau sec. On récupérera un refus (partie qui reste sur le premier tamis) et un tamisât (partie qui reste passe à travers le tamis) et une partie du tamisât sera retenue et une autre partie passera et ainsi de suite jusqu'au dernier tamis qui laissera passer les éléments inférieurs à 0.08 mm Si le tamisage est manuel on secoue les différents tamis pour faire passer la partie à diamètre inférieur à celui du tamis, Les résultats sont portés sur un graphique semi logarithmique ou ils construisent une courbe granulométrique.

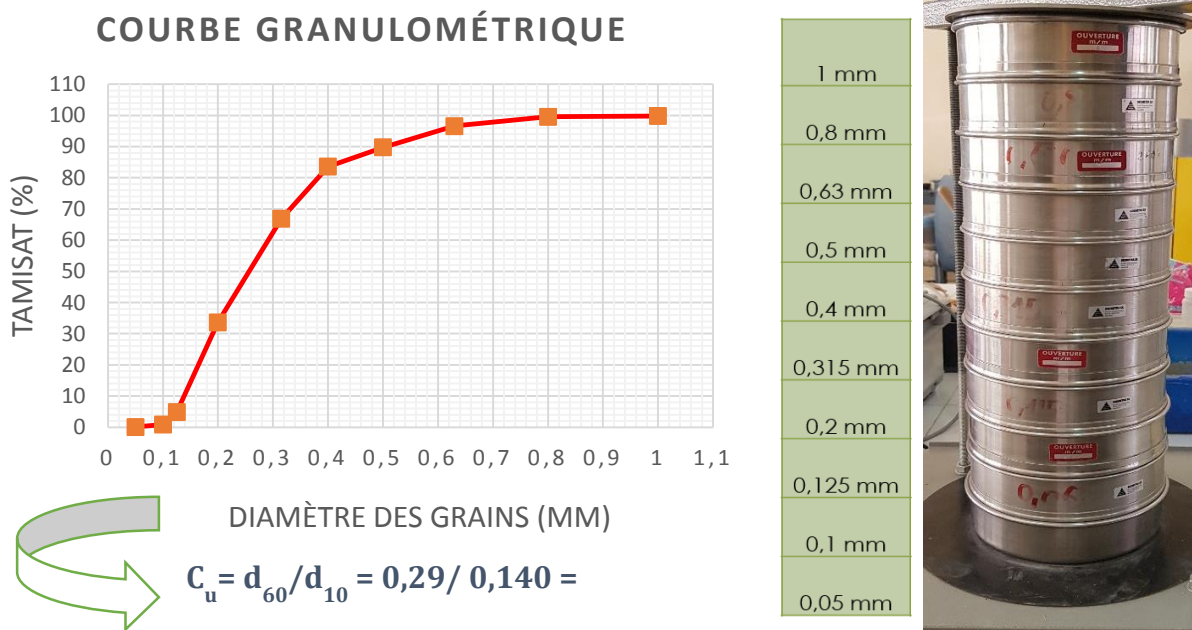


Figure 2-2 : courbe granulométrique de sable étudié et série des tamis utilisé

### II.2.2 Evaluation des indices des vides minimum et maximum

$e_{min}$  : est le taux de vide pour l'état le plus compact possible. Nous mettons soigneusement une couche de sable dans le moule avec une cuillère et secouons le moule avec un petit marteau.

Nous répétons le processus jusqu'à ce que le moule soit rempli et avec une règle nous enlevons la quantité excédentaire sur le moule. Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons-la valeur ( $e_{min}$ ) à travers la loi... (1.1)



Figure 2-3 : Préparation de L'indice de vide minimum

$e_{max}$  : est le taux de vide pour l'état le plus lâche possible. Nous prenons l'entonnoir du papier, Et le mettre au fond du moule. Nous remplissons l'entonnoir par le sable, puis on soulève lentement l'entonnoir en veillant à ce que l'entonnoir reste plein d'échantillon jusqu'à la fin de l'expérience, Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons la valeur ( $e_{max}$ ) à travers la loi... (2.2)

Avec :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad \dots (2.1)$$

$$\rho_d = \frac{m}{v} \quad \dots (2.2)$$

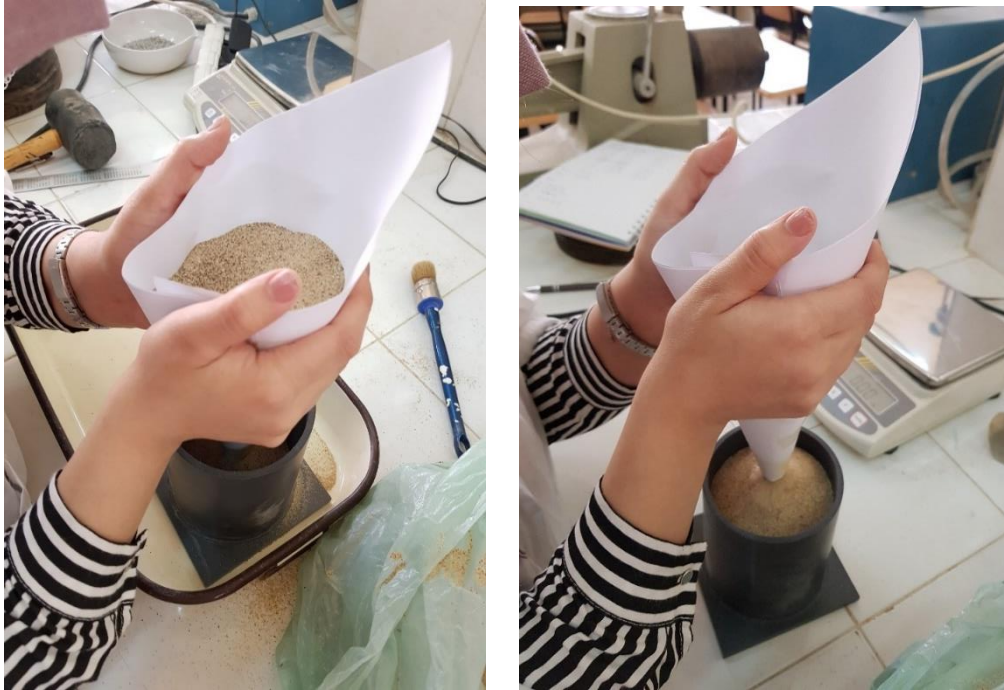


Figure 2-4 : préparation d'échantillon de sable avant le mesure de perméabilité

### II.2.3 Dispositif de mesure de perméabilité

Le dispositif de mesure de perméabilité à charge constante est basé sur un tube de Mariotte. Le tube de Mariotte est un récipient qui est fermé à l'exception d'une ouverture en haut pour un tube d'entrée et d'une ouverture, soit en haut, soit ailleurs, pour un tube de sortie. Dans le dispositif montré sur la Figure (d), la plaque de métal fait un joint hermétique au sommet du cylindre en plastique par l'intermédiaire d'un joint en caoutchouc graissé, et le tube d'entrée traverse la plaque par l'intermédiaire d'un raccord de compression qui scelle avec un joint. La pression au fond du tube d'entrée est toujours la pression atmosphérique, mais la pression à l'intérieur du trou de sortie dépasse la pression atmosphérique. Dès que l'eau commence à sortir du trou de sortie, la pression à l'intérieur du récipient diminue, entraînant une chute de la pression au fond du tube d'entrée au-dessous de la pression atmosphérique. Cela provoque l'entrée d'air dans le tube, en maintenant la pression au fond du tube à la pression atmosphérique. Ainsi, tant que le niveau d'eau à l'intérieur du cylindre est au-dessus du fond du tube d'entrée, la pression au niveau du trou de sortie restera constante. L'air qui entre dans le système fait des bulles depuis le bas du tube jusqu'à l'espace situé en haut du cylindre, comme vous pouvez le voir sur la figure (c).

Une perte de charge constante  $D_h$  provoque l'écoulement de l'eau à travers l'échantillon de sol. On mesure le débit d'eau  $q$  en recueillent un volume d'eau  $v$  en temps  $t$ . connaissant la longueur de l'échantillon  $l$  et la surface  $s$  à travers laquelle l'eau s'écoule.



La perméabilité du milieu peut être calculée à l'aide de loi de Darcy de l'équation suivante :

$$k = \frac{V.L}{\Delta h.s.t}$$



Figure 2-5 : préparation d'échantillon de sable avant le mesure de perméabilité

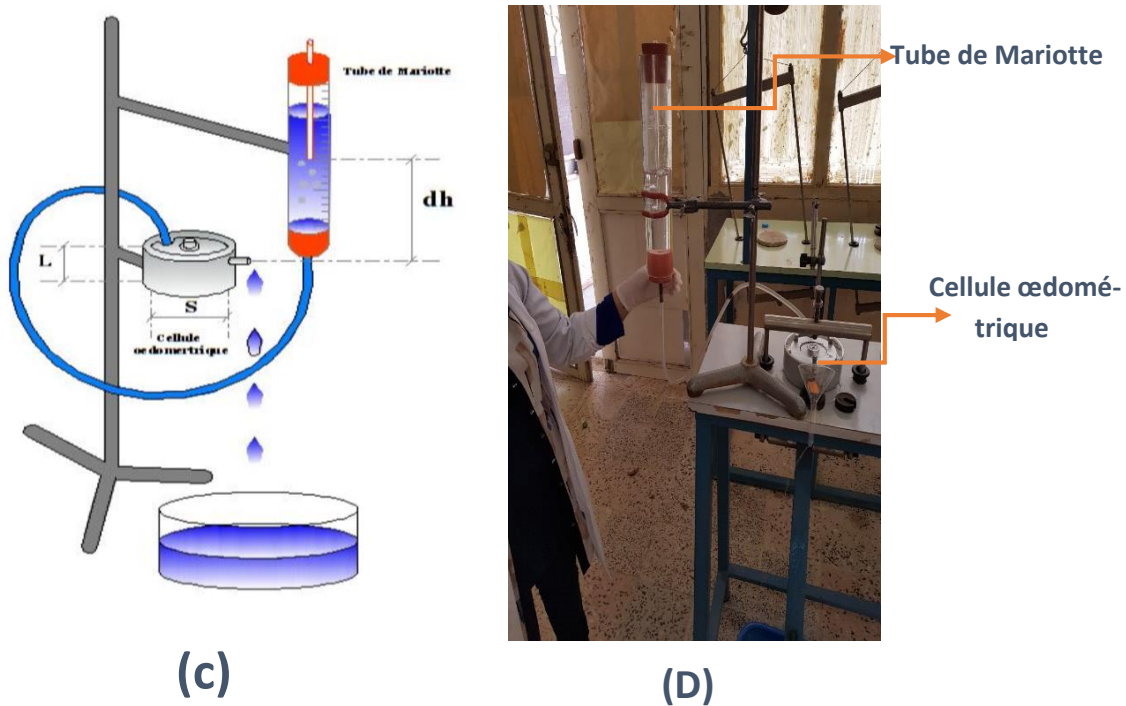


Figure 2-6 : mesure de perméabilité d'échantillon de sable avant le traitement de bio cémentation

### II.3 Dispositif d'essai de cisaillement

L'essai utilisé pour la réalisation de notre étude est l'essai de cisaillement direct à la boîte de CASAGRANDE suivant la norme française **NF P 94-071**.

Cet essai est réalisé en niveau de **L.N.H.C** Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (Batna) pour mesurer les caractéristiques de plasticités (rupture), d'un échantillon de sol fin soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé à une vitesse suffisamment lente, pour que la pression interstitielle reste nulle tout au long de l'essai. Ou de soumettre à cet échantillon de sol à un effort appelé force ou effort de cisaillement, qui portera ce sol au cisaillement afin de tester sa résistance ou encore de soumettre deux matériaux différents, réalisation type « joints » à un effort qui produira le cisaillement afin de tester le glissement entre les deux matériaux.

Cela permettra de déterminer la résistance d'un sol sous les conditions données et aussi de déterminer deux paramètres de ce sol qui sont la cohésion "**C**" et angle de frottement interne "**ϕ**" entre les grains d'un matériau. C'est deux paramètres sont très utiles pour les études de stabilité de terrain. Détermination des paramètres **C** et **ϕ** Après avoir déterminé les valeurs de la résistance au cisaillement, on porte ces valeurs sur un graphique en fonction de la contrainte normale **σ** qui s'applique sur le plan de rupture.

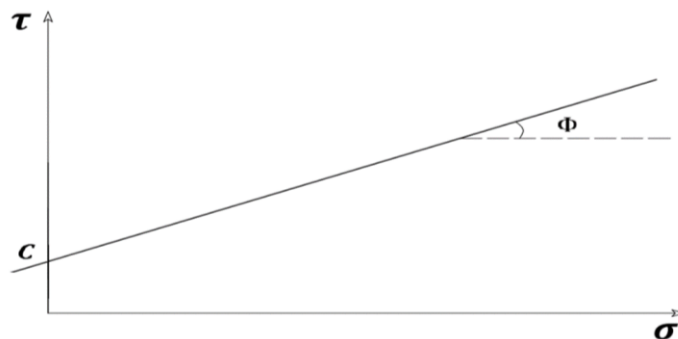


Figure 2-7 : Courbe intrinsèque [ $\tau$  ( $\sigma$ )]

Après avoir placé les points, on trace une droite qui sera le plus possible à équidistance par rapport tous les points du graphique. Cette droite est appelée "**courbe intrinsèque**". L'angle que forme cette droite avec l'axe des abscisses est appelé "**l'angle F**". L'ordonnée à l'origine de cette droite est appelé "**la valeur de C**". (Laboratoire centrale de pont et chaussée, 1987) L'équation de la droite est donc :

$$\tau = C + \sigma \tan\Phi$$

Cette équation exprime ainsi la loi de **coulomb**. (Laboratoire centrale de pont et chaussée, 1987).

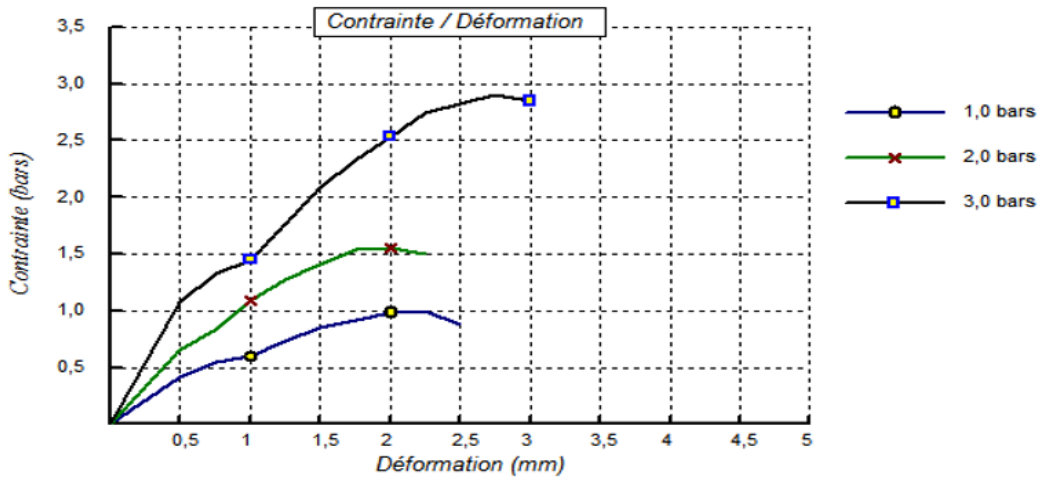


Figure 2-8 : Courbe de contrainte /déformation de sable étudié

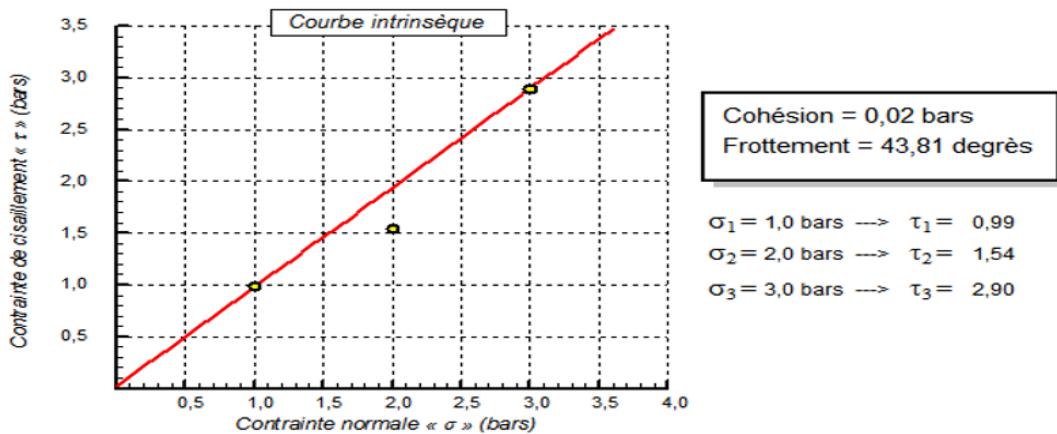


Figure 2-9 : Courbe d'intrinsèque  $[\tau (\sigma)]$  de sable étudié

### II.3.1 Les différents types de résistances au cisaillement

La plupart des sols naturels sont anisotropes. Pour cette raison, les différents types d'essais qui permettent de mesurer la résistance au cisaillement ne donnent pas tous les mêmes résultats. Ainsi on peut définir plusieurs résistances au cisaillement, correspondant à des états de déformation différents :

- La résistance de pic, qui correspond à la structure initiale du sol est atteinte pour de petites déformations (de l'ordre du pour-cent) ;

- La résistance stabilisée après le pic, ou résistance à l'état critique, en général égale à la résistance que l'on obtient quand le sol est remanié et que la courbe "effort déformation" a une forme asymptotique ;
- La résistance après de grands déplacements sur une surface de rupture, appelée résistance résiduelle.

### **II.3.2 Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette**

Ce dispositif est constitué d'un piston qui coulisse verticalement dans la demi-boîte supérieure avec un effort normal  $N$  vertical bien précis.

### **II.3.3 Le dispositif produisant le cisaillement**

Il permet le cisaillement dû à vitesse constante grâce à un déplacement horizontal entre les demi-boîte. Il est constitué :

- D'un anneau dynamométrique
- D'un charriot dans lequel on vient placer la boîte de Casagrande. Ce chariot est animé par un moteur d'un mouvement de translation à vitesse constante et réglable.

### **II.3.4 Système de mesure**

L'intensité de la force verticale constante ( $N$ ) est connue avec une incertitude de 1/100 de sa valeur. La mesure de l'effort horizontal ( $T$ ) s'effectue au moyen d'un capteur avec une incertitude de 1/100 de la valeur maximale lue au cours de l'essai ou à l'aide d'un anneau dynamométrique. Le déplacement vertical dans l'axe du piston placé à la partie supérieure de l'éprouvette, est mesuré par rapport à un repère fixe avec une incertitude de 0.05mm. Le déplacement horizontal des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre est mesurée au moyen d'un capteur avec une incertitude de 0.05mm.

### **II.3.5 Composants d'appareil de cisaillement**

Il est essentiellement constitué de l'appareil de cisaillement rectiligne de Casagrande. L'appareillage spécifique de cette machine à l'essai comprend :

- Le bâti de consolidation ;
- La boîte de cisaillement ;
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette ;
- Le dispositif produisant le cisaillement ;
- Le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps.



Figure 2-10 : appareil de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande (LNHC Batna)

### II.3.6 Principe d'exécution de l'essai

L'échantillon de sol a étudié est placé entre les deux demi-boîtes de telle sorte qu'il ait capacité de déplacement horizontal des demi-boîtes l'une par rapport à l'autre. Un piston va permettre d'exécuter sur le sol une contrainte normale verticale  $\sigma$ . Ce principe est représenté par la figure ci-dessous.

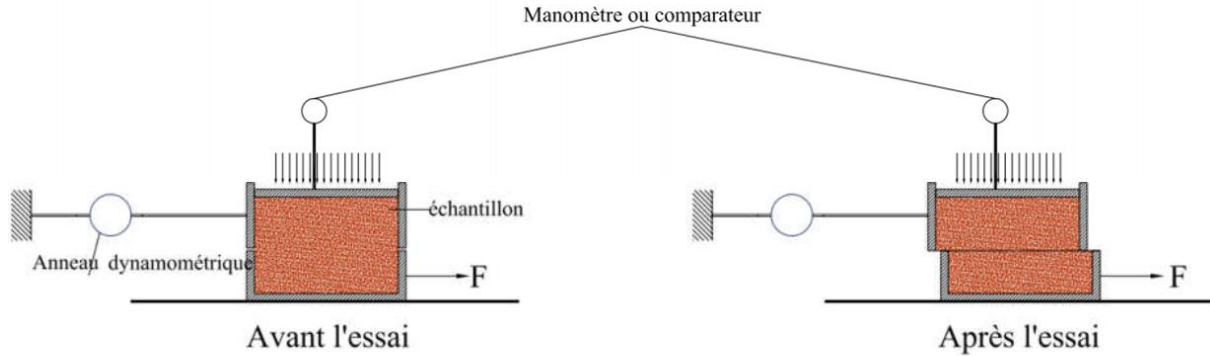
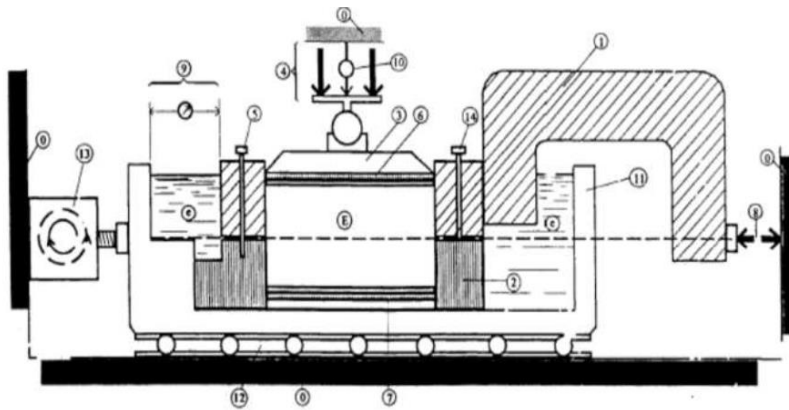


Figure 2-11 : Principe d'exécution de l'essai de cisailment



- |  |   |
|--|---|
| 0 Bâti   | 9 Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal $\delta_l$ |
| 1 Demi-boîte supérieure  | 10 Dispositif de mesure du déplacement vertical $\delta_h$          |
| 2 Demi-boîte inférieure  | 11 Châssis étanche  |
| 3 Piston rigide  | 12 Glissière sans frottement  |
| 4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston | 13 Système de déplacement à vitesse constante                       |
| 5 Solidarisation des demi-boîtes                                       | 14 Vis de soulèvement de la demi-boîte                              |
| 6 Plaque drainante supérieure  | e Eau déminéralisée   |
| 7 Plaque drainante inférieure amovible                                 | E Éprouvette de sol   |
| 8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T                        |   |



Figure 2-12 : éléments constitutifs de la boîte de Casagrande

La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante (dépendant du type d'essai). La force totale de cisaillement  $F$  est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon sous la contrainte normale. L'échantillon subit donc un cisaillement direct rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée. Le déplacement horizontal entre les deux demi-boîte peut se faire sur une distance maximale de 80mm ; sachant que le diamètre de l'échantillon placé entre les deux demi-boîte est de 6cm, le cisaillement de sol peut être total si la résistance de celui-ci est assez faible.

Après tous les essais réaliser de caractérisation de sable étudié sont données dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Caractéristiques de sable étudié

Matériau	Diamètre moyen $D_{50}$ (mm)	Coefficient d'uniformité $C_u$	L'indice des vides minimum $e_{min}$	L'indice des vides maximum $e_{max}$	Poids de grains de sable $\rho_s$ (kg / m <sup>3</sup> )
Sable de Elhadjeb	0.26	2.07	0.5	0.8	2.65

## II.4 Programme expérimentale

### II.4.1 Tests de précipitation

#### II.4.1.1 Configuration et procédure de test

Dans ce travail, le carbonate de calcium précipité est évalué directement dans les tubes en polypropylène (PP) transparent. Une combinaison d'urée- $\text{CaCl}_2$  et d'uréase sont mélangées soigneusement et laissées réagir. Les concentrations de réactifs sont sélectionnées. Comme le schéma de la figure montre ci-dessous, on prépare 250 ml d'une solution équimolaire d'urée- $\text{CaCl}_2$ , avec des concentrations de 30 g et 55,5 g respectivement, séparément. La combinaison d'uréase (0,5 g / 250 ml) sont soigneusement mélangées dans de l'eau pendant 5 min et filtrées à l'aide de papiers filtres (taille de pores de 8 mm) pour éliminer les particules non dissoutes d'uréase. La solution d'uréase filtrée et la solution d'urée- $\text{CaCl}_2$  sont soigneusement mélangées dans les tubes en PP, ce qui donne un volume total de solution de 500 ml. La précipitation de  $\text{CaCO}_3$  a lieu après plusieurs minutes, et le carbonate précipité se dépose à là-bas des tubes en quelques heures. Au bout de 24 h, la solution est filtrée à travers le papier filtre. Les particules déposées sur le papier filtre et restant dans les tubes sont séchées et leurs quantités évaluées.

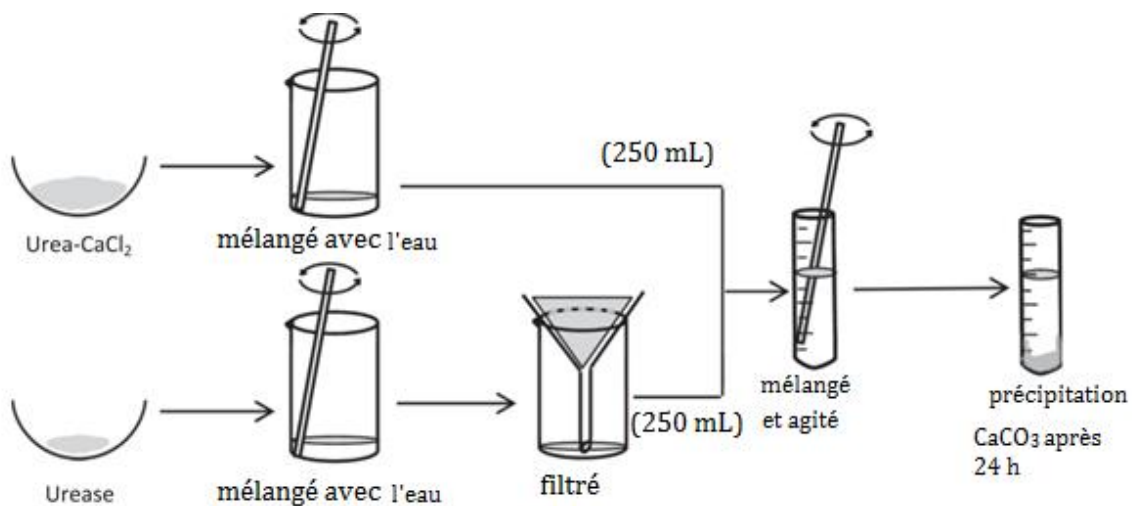


Figure 2-13 : Schéma du test de précipitation

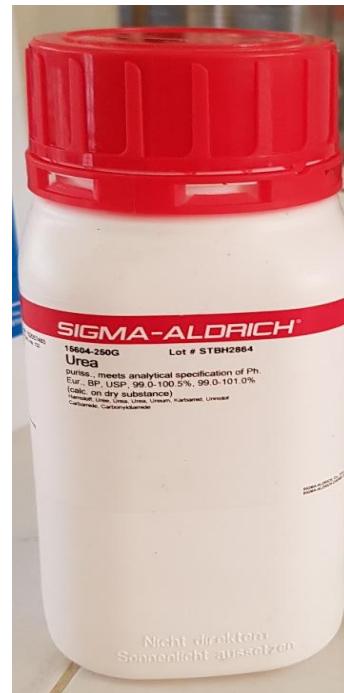


II.4.1.2 Produits utilisé et mode opératoire

CaCl<sub>2</sub>



Urée



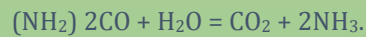
Uréase ....!!!

**Description**

-L'uréase (EC 3.5.1.5) est une enzyme qui catalyse l'hydrolyse de l'urée en dioxyde de carbone et en ammoniac.

-l'uréase est une protéine, se trouve dans les bactéries, les levures et plusieurs plantes.

**La réaction se produit comme suit**



**Source**

Jack beans plante

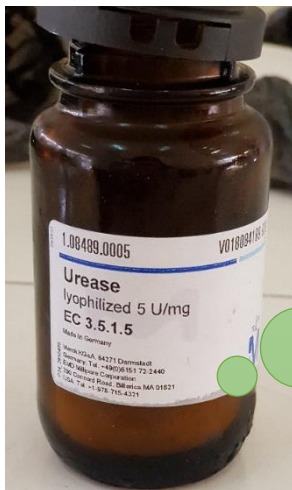


Figure 2-14 : différents produits utilisées aux teste de precipitation



Figure 2-15 : déroulements de test de précipitation

## **II.4.2 Processus de traitement de sable par EICP**

Cette expérience démontre, à petite échelle, l'une des nombreuses applications de l'EICP comme alternative aux technologies d'amélioration des sols à base de ciment Portland. Le clouage de sol conventionnel utilise une barre d'acier insérée dans un trou foré rempli d'un coulis de ciment Portland. La technologie EICP démontrée dans cette expérience n'utilisait ni l'acier ni le ciment Portland, ce qui réduisait considérablement l'énergie incorporée dans le processus de clouage du sol. Les clous de sol sont utilisés dans plus de 40% des fouilles de construction effectuées en Europe et sont de plus en plus utilisés à cette fin aux États-Unis. Le clouage de sol EICP constitue une alternative durable lorsque les conditions du sol sont appropriées (par exemple, du gravier, du sable et du limon pouvant être traversés par la solution EICP).

Les applications techniques de l'EICP ont été entravées par la rapidité avec laquelle la réaction de précipitation du carbonate se produit. Ce taux est généralement si rapide qu'il empêche la dispersion de la solution de cimentation, ce qui se traduit par une mince croûte stabilisée à l'interface entre le sol et le point d'injection de la solution de précipitation. Cependant, les chercheurs du CBBG ont trouvé un moyen de retarder les précipitations, en permettant à la solution de cimentation de pénétrer dans le sol et de créer une masse stabilisée plus uniforme. Cette technique brevetée a été utilisée avec succès pour créer le mur de clou de sol à petite échelle décrit ci-dessus, permettant à la solution de cimentation injectée par le haut des tubes insérés de circuler autour du tube et de créer une masse mal stabilisée.

La cimentation de sable par du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) produit par l'enzyme uréase obtenue à partir de plantes a été réalisée en laboratoire. Les avantages d'utiliser de l'uréase obtenue de plantes plutôt que de l'uréase produite microbiologiquement pour produire la cimentation carbonatée sont la petite taille de l'enzyme qui permet la pénétration dans les sols fins et rend le processus moins sujet au colmatage biologique et la disponibilité à 100% du carbone présent dans le substratum pour conversion en  $\text{CaCO}_3$ .

### **II.4.2.1 Préparation de sable**

Le sable de ElHadjeb qui pris le sable de Fontainebleau, a été utilisé dans cette étude expérimentale du processus de bio cimentation car il s'agit d'un sable fin ( $D_{50} = 260 \mu\text{m}$ ) à distribution granulométrique étroite (une cible potentielle de la technique de bio cimentation comme mesure d'atténuation des problèmes de liquéfaction). Selon Rebata-Landa (2007), il représente un sable optimal pour le processus de bio cimentation en termes de compatibilité géométrique entre la taille des cellules des pores et des enzymes. Toutes les caractéristiques physiques sont données dans le tableau,

Tableau 2 : caractéristique du sable pour le traité par EICP processus

Matériau	Diamètre moyen $D_{50}$ (mm)	Coefficient d'uniformité $C_u$	L'indice des vides minimum $e_{min}$	L'indice des vides maximum $e_{max}$	Poids de grains de sable $\rho_s$ (kg / m <sup>3</sup> )
Sable de ElHadjeb	0.26	2.07	0.5	0.8	2.65

#### II.4.2.2 Préparation des échantillons biocimenté

Pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques d'un sable traité par le processus de EICP, nous avons préparé des différents moules pour certains essais telle que l'essai de cisaillement direct à la boîte, la mesure de perméabilité ainsi que le test de compression. Les dimensions de ces moules sont distinctes l'un des autres, de manière précise les Cinq moules de même diamètre de 6 cm et d'hauteurs 2 cm pour l'essai de cisaillement et deux moules de 6.3 cm de diamètre et 1.6 cm d'hauteurs pour l'essai de perméabilité, en outre une colonne de 6 cm de diamètre et 12 cm d'hauteur pour le test de compression. En été préparées avec une technique de couche par couche dans les moules en plastique (PVC), illustrée à la figure 4.1. Ces échantillons été préparées avec une densité relative de (65%,70%) pour la mesure de perméabilité, cisaillement, et compression respectivement. Le mesure de quantité de masse pour chaque échantillon a été adapté afin de calculer l'indices des vides relatifs à chaque densité choisie. On utilise dans cette étude expérimentale le système de percolation comme une stratégie de traitement, une phase de saturation de chaque échantillon a été adoptée avant de commencer. Après cette phase, une injection d'un volume de pores de la solution enzymatique a été réalisée avec un débit constant. Au bout d'une heure, deux percolation de solution calcifiante d'un volume de pores a été réalisées et un décalage de 10 heures entre ces deux traitements. Deux solutions de traitement ont été préparées pour le processus de bio cimentation par voie enzymatique :

Une solution enzymatique, compose de quantité d'enzyme sous forme poudre lyophilisée stérile, avec une activité extrait d'un source végétal (plante de jack beans) importé de France ; avec une dose de 2g/l mélanger avec d'eau commerciale de différents volumes ; La deuxième Solution de réactifs (solution calcifiante) contenant 1,4 mole d'urée et la même quantité de chlorure de calcium( $CaCl_2$ ).

Pour bien illustré le traitement par percolation du de surface on utilise un vert en plastique perce a la base pour faciliter l'utilisation. Pour assurer un bon déroulement de processus, le teste est réalisé sous une température optimale de 25 c°.

Après le traitement on fait un rinçage avant l'étuvage, l'effet du rinçage à l'eau sur le sable traité selon l'EICP a provoqué l'écroulement ou la perte totale de résistance de certains échantillons préparés à une densité relative de 45% à l'aide de techniques par percolation. Cette observation suggère que le précipité produit par le traitement EICP peut contenir des composés organiques, des sels inorganiques et des polymorphes amorphes et / ou métastables de carbonate de calcium totalement ou partiellement solubles dans l'eau. Ces résultats indiquent que les sels de chlorure d'ammonium sont restés dans le sol traité après l'évaporation de la solution de EICP pendant le séchage des échantillons. L'objectif de cette recette était d'utiliser efficacement l'enzyme nécessaire à la production de carbonate précipité, car cette enzyme est le composant le plus coûteux de la solution de EICP.



Figure 2-16 : phase de saturation des échantillons



Figure 2-17 : préparation la solution enzymatique



Figure 2-18 : phase de percolation la solution enzymatique



Figure 2-19 : préparation la solution calcifiante



Figure 2-20 : phase de percolation la solution calcifiante



Figure 2-21 : l'échantillons après l'étuvage

## II.5 Conclusion

La méthode d'amélioration des sols par précipitation de calcite catalysée par des enzymes est une technique prometteuse dans le domaine de la sécurisation des structures hydrauliques, potentiellement sujette à l'érosion interne et à la liquéfaction. Des travaux plus avancés sur les applications géotechniques biologiques sont possibles grâce à diverses recherches, notamment sur le renforcement par bio cimentation. Cependant, de sérieux problèmes restent non résolus, empêchant le développement de tels processus à grande échelle. Le principal défi dans ce processus est l'hétérogénéité du traitement ; Ce phénomène est lié à plusieurs facteurs (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.). Avant une application à grande échelle du processus, une recherche fondamentale est encore nécessaire pour définir les conditions d'applicabilité de ce processus, afin de valider son efficacité en termes de comportement mécanique. Des tests spécifiques seront effectués pour chaque numéro afin de poursuivre les recherches sur les modifications des propriétés microstructurales et de déterminer les liens possibles entre les changements microstructuraux et le comportement mécanique. La plupart des travaux de recherche effectués à ce jour ont porté sur la mise en œuvre de processus biogéochimiques des propriétés du sol. Amélioration. Par ailleurs, la réalisation d'un traitement in situ n'est que la première étape du développement de la technique, qu'il s'agisse de la durabilité mécanique ou biogéochimique dans le temps (par exemple de l'eau saturée en dioxyde de carbone).

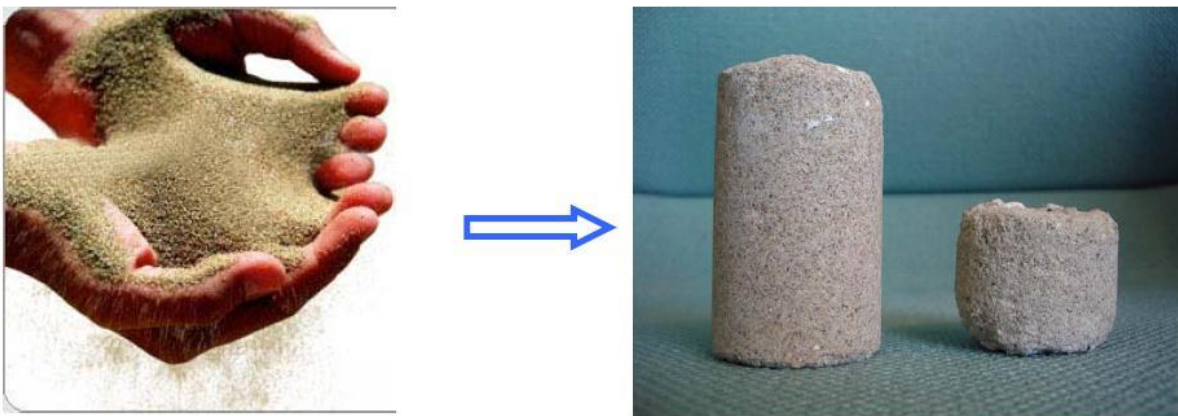


Figure 2-22 : principe de la biocimentation



---

# **Chapitre 3**

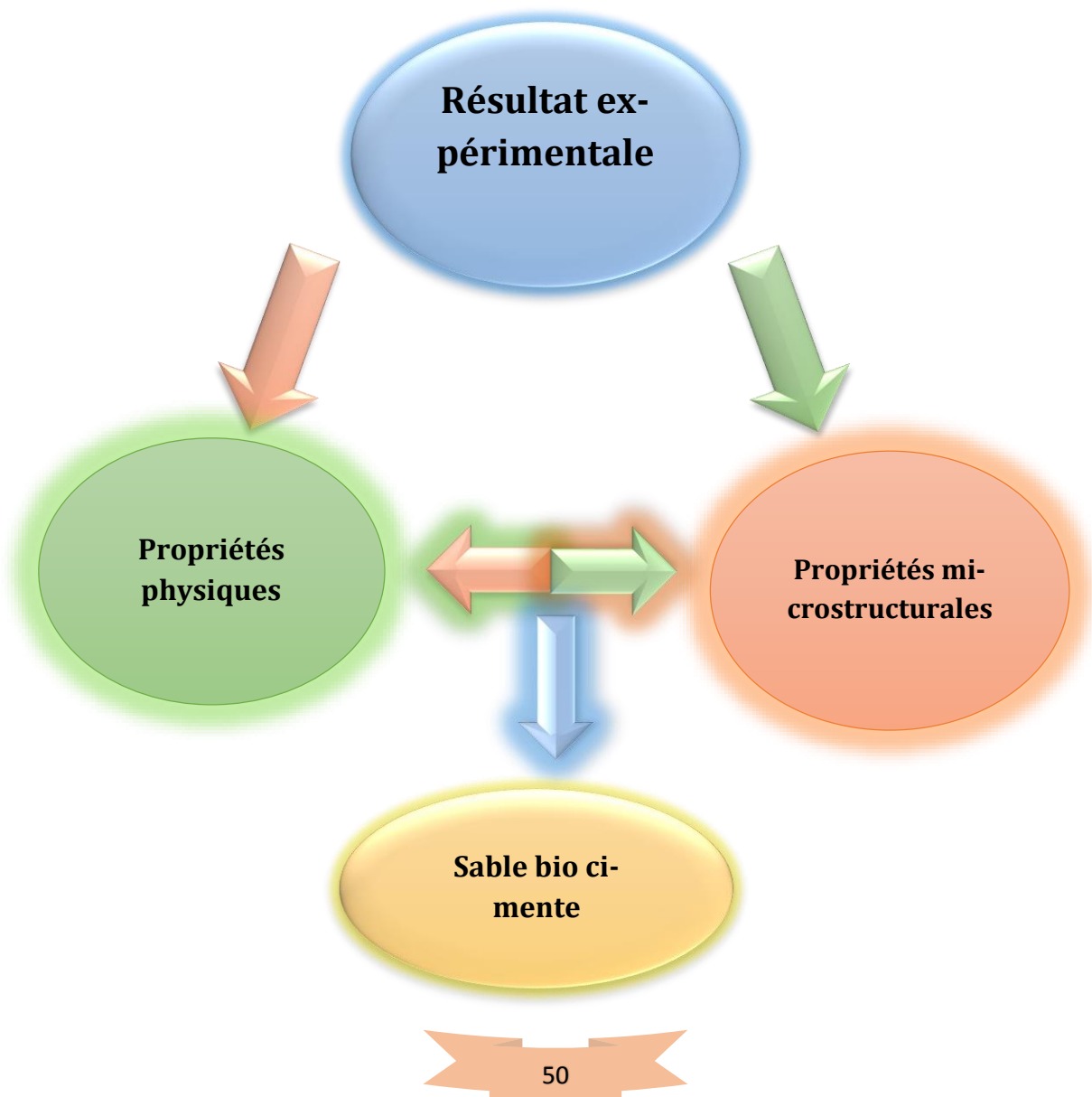
---

## **Résultats expérimentaux et discussion**

### III. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux de l'évaluation de propriété physique de sable bio cimenté, et nous commenterons les résultats expérimentaux pour objectif d'analyser l'effet de la bio cimentation sur le comportement physique du sable, principalement ses paramètres de perméabilité, porosité et taille des pores, d'explorer une gamme de niveaux de cimentation plus étendue que celle envisagée dans les recherches précédentes. L'analyse en laboratoire comprend des essais de perméabilité mesures effectuées avec défèrent indice de densité, l'application de la bio cimentation sur des digues et des barrages en terre avec des observations par micro-tomographie au MEB et aux rayons X ont également été effectuées sur plusieurs échantillons de sable bio cimentés afin d'explorer de manière qualitative le changement de la microstructure, la distribution spatiale des cristaux de calcite et leur morphologie.

#### III.1 Présentation et analyse des résultats expérimentaux



### III.2 Test de précipitation de $\text{CaCO}_3$ dans des tubes :

Le test est réalisé au sein de laboratoire de biologie université de Laghouat par un doctorant de l'université de Biskra.

Dans ce test nous avons préparé les quantités comme suit :

- 0.25M Urée.
- 0.25M  $\text{CaCl}_2$ .
- 2ml de l'extrait brute de l'uréase.

Les diverses combinaisons 0.25M/L d'urée- $\text{CaCl}_2$  et 2ml de l'extrait brute de l'uréase sont mélangées soigneusement dans 100 ml d'eau distillé et laissées réagir.

Les réacteurs sont misés dans de petits tubes et laisser reposer pendant 24 heures. Après 24h, on a calculé les quantités de carbonate de calcium précipiter dans les tubes.

#### Les résultats obtenus :

La quantité de  $\text{CaCO}_3$  obtenus dans cette test est :

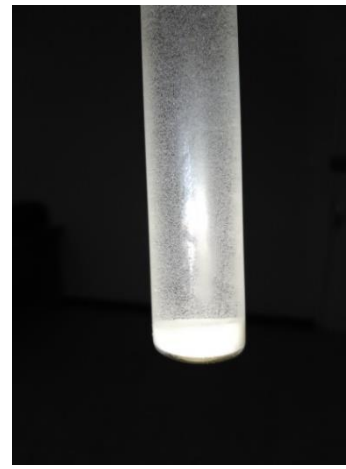
■  $M_{\text{CaCO}_3} = 0.1 \text{ g/l}$



Avant la précipitation



Après 24h



après la précipitation

Figure 3.1 : test de précipitation

plusieurs raisons probables que les tests de précipitations ne sont pas réussi au labo mds de Biskra sont possibles :

- 1- La source de carbone qui est l'urée fournit à notre laboratoire n'est pas conforme au besoin de notre test
- 2- la méthode adoptée pour la préparation des éprouvettes qui était la percolation pourrait affecter le bon fonctionnement des bactéries

3- les conditions de transport de l'enzyme et/ou des bactéries (France -Biskra) qui devaient être sous une température très basses n'était probablement pas assurée.

### **III.3 Evaluation des propriétés physiques de sable bio cimenté**

#### **III.3.1 Perméabilité**

La perméabilité mesure la possibilité des matériaux poreux à permettre le passage du fluide. Dans la technique de la bio cimentation, la perméabilité est de la plus haute importance car la technique est préférée pour les sols de nature perméable ou semi-perméable, tels que les sols à grains grossiers (par exemple, le sable ou le gravier). Les matériaux poreux à haute perméabilité peuvent empêcher le développement d'une pression excessive de l'eau interstitielle pendant le chargement. En général, La bio cimentation peut être utilisée pour augmenter la résistance du sol tout en conservant une perméabilité suffisante (en cas de bio cimentation du sol) ou pour bloquer complètement les pores du sol (en cas de bio colmatage du sol).

Il a été observé que la perméabilité du sable traité biologiquement variait avec la teneur en calcium précipité. Comme le montre la figure 3-1, on observe clairement la perte de perméabilité dans les échantillons de sol biocimentés traités par la technique de bio cimentation par rapport à la valeur initiale de sol non traité ; cette perte due à l'occupation de la cristallisation de  $\text{CaCO}_3$  dans les espaces poreux du sol, autrement dit à cause du bio cimentation parmi les particules de sol, le débit de l'eau dans les sols est entravé et la porosité et la perméabilité du sol diminué Dans la bio cimentation des sols, la bio calcification facilite la rétention de la perméabilité pour les échantillons de sol bio cimentés, mieux que les autres matériaux à base de ciment tels que le ciment Portland ordinaire (OPC). Par exemple, Cheng et al. (2013) ont suggéré qu'une perte de perméabilité dans les échantillons de sol traités avec du ciment Portland était due à l'occupation d'espaces interstitiels par des hydrates insolubles dans l'eau formés à la suite de la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau interstitielle. Pendant ce temps, dans les sols bio cimentés, les cristaux de  $\text{CaCO}_3$  provoquent une légère modification du volume dans les espaces des pores par opposition aux hydrates, assurant ainsi un bon drainage permettant un passage du liquide à travers la matrice de sol bio cimentée. Les résultats d'études précédentes sur la technique de bio cimentation, par exemple, (van Paassen 2009) a rapporté une réduction de 60% de la perméabilité initiale des sols bio-traités à environ 100 kg / m<sup>3</sup> de précipitations de  $\text{CaCO}_3$ , alors qu'Ivanov et al. (2010) ont enregistré une réduction de la perméabilité de 50 à 99% avec une solution de cimentation 1 M. Al Qabany et Soga (2013) ont utilisé une solution de cimentation de 0,5 M et ont constaté une réduction de 20% de la valeur de la perméabilité initiale à une précipitation de 2% de  $\text{CaCO}_3$ . De plus gros cristaux de  $\text{CaCO}_3$  ont été produits et ont obstrué les pores lorsqu'une solution à haute

concentration a été utilisée. Par conséquent, pour les échantillons traités avec concentration élevée (0,5–1 M), la réduction de la perméabilité est généralement supérieure à celle des solutions traitées avec une solution à faible concentration (0,1–0,5 M). Cependant, l'homogénéité le long des échantillons de la colonne de sable peut toujours être attribuée au colmatage localisé. Il est donc recommandé d'utiliser une solution à faible concentration si l'on désire moins de réduction de la perméabilité afin d'assurer une consistance uniforme de la précipitation de  $\text{CaCO}_3$ . Une solution à faible concentration peut produire un modèle de précipitation plus uniforme et des échantillons plus puissants pour une quantité donnée de précipitation de  $\text{CaCO}_3$ .

Bien que la technique de bio cémentation puisse conserver une perméabilité du sol suffisante après le traitement, elle peut être utilisée pour le colmatage du sol, un procédé permettant de réduire de manière significative la conductivité hydraulique ou la perméabilité de milieux de sol poreux. La diminution de la perméabilité est principalement due à la réduction de la porosité causée par la précipitation de calcite à l'intérieur du pore du sable. D'autres paramètres pourraient influencer sur la perméabilité du sable traité, tels que l'obstruction des pores et la réduction de la tortuosité dans les milieux poreux (Dadda et al. 2017).

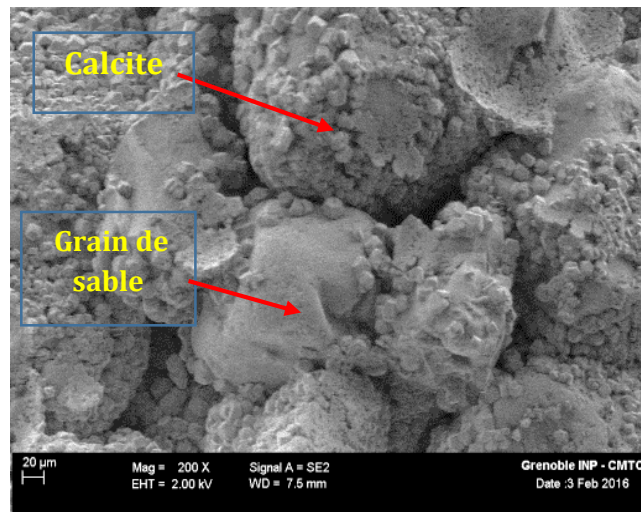
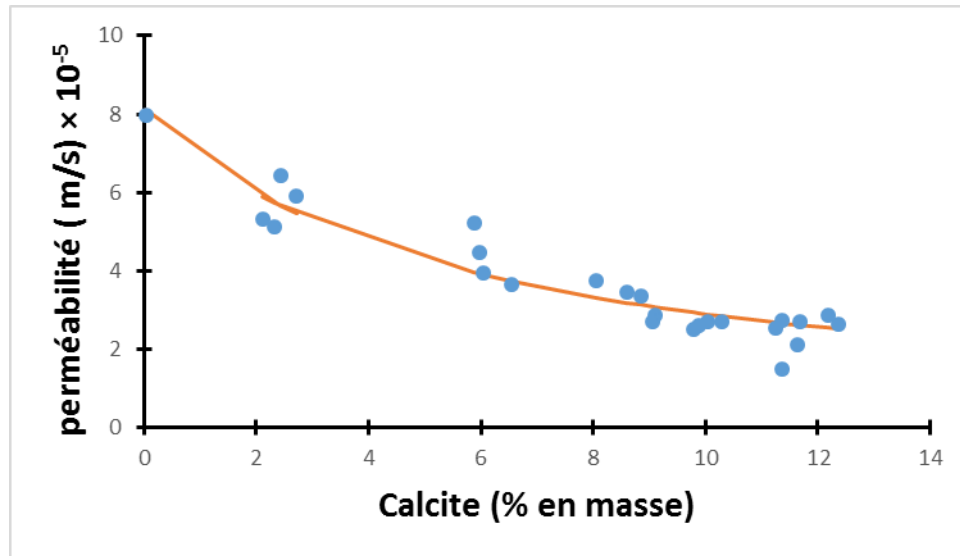


Figure 3.2 : Perméabilité des échantillons testés par rapport à la quantité de calcite (données obtenues dans les travaux de thèse de Dadda 2017)

La perméabilité présente une nette décroissance quasi linéaire avec la quantité de calcite dans le spécimen de sable. Pour les petites quantités de calcite, la perméabilité a été légèrement réduite de 20% par rapport au sable non traité. Cette réduction atteint 75% pour la plus grande quantité de calcite testée (12,4%) mais le sol peut toujours être considéré comme hautement perméable.

A partir des résultats de l'évolution de la perméabilité en fonction du pourcentage de la calcite obtenue par Dadda et al. (2017) nous aimerions obtenir un modèle (une loi empirique) qui permettrait de relier ces deux paramètres sans avoir besoin de réaliser des tests. Pour ce faire nous avons adopté une procédure de calcul à l'aide des options disponible sur Excel. L'évolution de la perméabilité en fonction du pourcentage de calcite peut suivre la fonction mathématique suivante :

$$f(x) = \frac{a}{x + b} \dots\dots\dots (3.1)$$

Par identification avec nos paramètres qu'on souhaiterait relier l'équation (1) devient donc de forme :

$$k(c) = \frac{a}{c+b} \dots\dots\dots (3.2)$$

Telle que **K** est la perméabilité du milieu ; **C** est le pourcentage de la calcite ; *a* et *b* sont les paramètres du modèle. À l'aide de la méthode des moindres carrés et un solveur disponible sur Excel, en minimisant l'erreur entre la valeur de *k* donnée par Dadda et al. (2017) et celle donnée par l'expression proposée, nous pourrions déterminer l'expression des paramètres *a* et *b* qui sont exprimées dans les équations (1) et (2)

$$\left. \begin{array}{l} a=45 \\ b=5,51 \end{array} \right\}$$

L'expression de perméabilité **K** en fonction du pourcentage de calcite **C** devient donc l'équation (3) :

$$k(C) \times 10^{-5} = \frac{45}{C+5,51} \dots\dots\dots (3.3)$$

Afin de vérifier la bonne cohérence entre le résultat de l'expression proposée et celui obtenu par Dadda et al. (2017), nous avons ploté les deux résultats sur le même graphique, cette comparaison est présentée sur la Figure (3.1). Nous observons que les courbes sont assez similaires ce qui montre une bonne cohérence.

### **III.4 Observations par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) des éprouvettes bio-calcifiées**

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. Le principe de l'essai consiste à balayer la surface d'un échantillon avec un faisceau d'électrons et d'étudier la réponse en termes de réémission de particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface. Les observations au MEB permettent d'avoir des informations sur la morphologie (taille, forme, arrangement) et la nature chimique de l'échantillon (argile, sable...etc). Dans le cadre de cette recherche, nous avons utilisé le MEB sur des échantillons avant essai afin de caractériser les matériaux testés (sables, particules injectées). Nous avons également réalisé des observations sur des échantillons prélevés après essai afin d'étudier les modes de dépôt des particules dans le milieu poreux.

Les observations des échantillons de sable bio cimentés avec microscopie électronique à balayage et microscopie électronique à balayage ont été effectuées à l'issue des tests triaxiaux. Ces observations peuvent fournir des informations qualitatives sur la calcification (taille et forme des cristaux, localisation des précipitations, etc.). La figure 2 montre l'observation d'un sous-échantillon prélevé sur un échantillon de sable fortement cimenté (échantillons triaxiaux 14M : 12,4%). L'observation MEB montre une localisation des précipitations entre deux grains de sable avec, au contraire, de petites quantités à la surface de ces grains. Cette non-homogénéité de la distribution des cristaux de calcite est probablement due à la forte concentration de la solution de calcification qui a été utilisé dans ce travail. (La figure 3.2 c) montre des cristaux fixés entre deux grains formant un pont de calcite de forme polyédrique et de dimensions comprises entre 5 et 15  $\mu\text{m}$ . Près de cette zone de contact, une couche lisse de calcite s'est formée (Figure 3.2 a) ; probablement un pont de calcite avec du grain voisin qui s'est détaché lors de la préparation des échantillons pour les observations au MEB. Cette taille importante et la morphologie parfaite des cristaux de calcite confirment la saturation du milieu en calcium au cours du processus de bio cimentation, induite par la concentration élevée de la solution de calcification (source de calcium et d'urée).



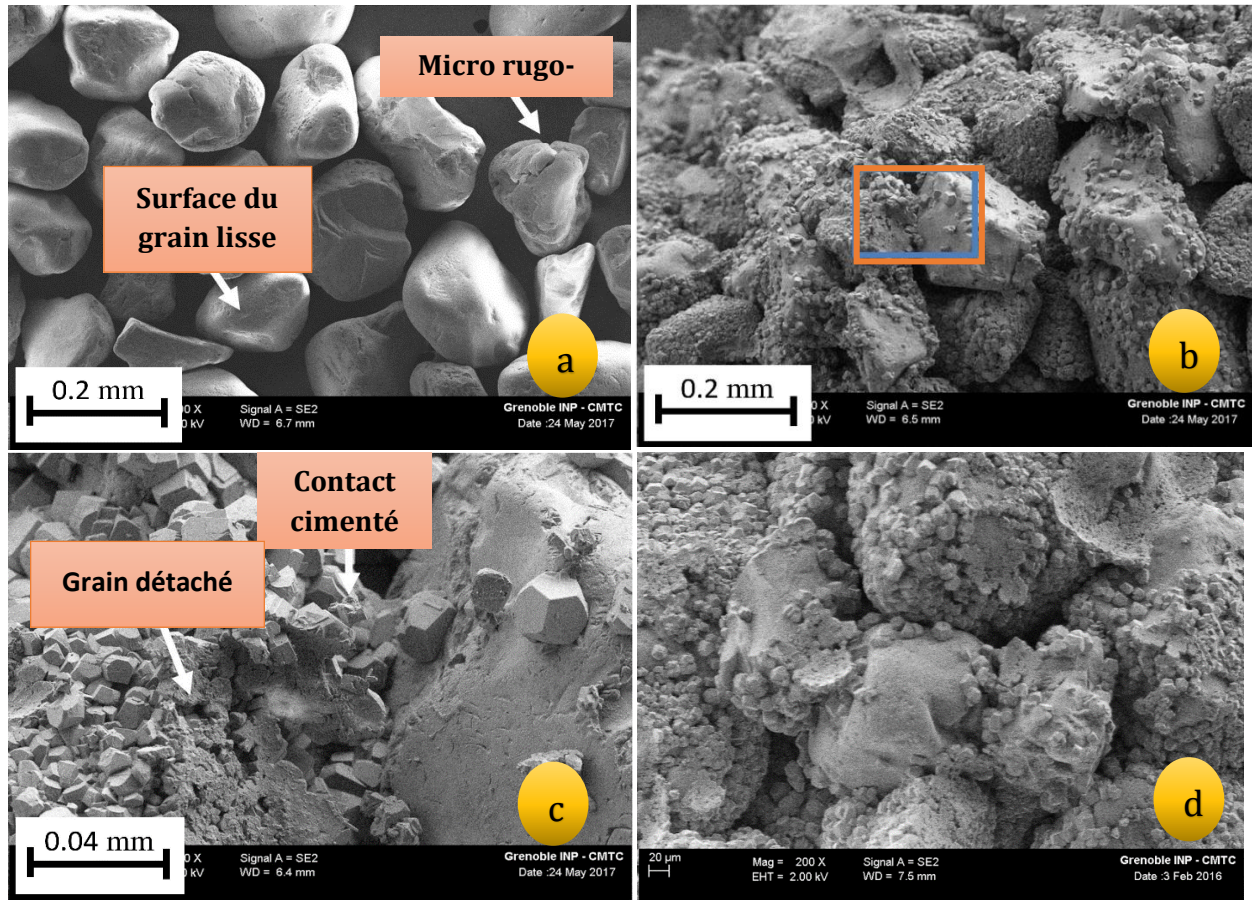


Figure 3.3 : Observations microstructurales de sable bio cimentés, a) Observation au MEB de grains de sable non traités, b) Observation au MEB de ciment sable d'agglomération, c) contact grain à grain avec observation MEB, d) Observation MEB du sable biocimenté.(Dadda 2017)

### III.5 Evaluation des propriétés microstructurales de sable bio cimenté

#### III.5.1 Porosité

La porosité par définition est la quantité de vides dans un matériau. La présence de carbonate de calcium avait un effet évident sur la porosité du matériau et une relation raisonnablement linéaire entre les deux paramètres a été observée. À la teneur maximale en carbonate de calcium, la porosité de la colonne a été réduite à 90% du matériau non traité. Avec accordance dans la littérature, Qian et al. (2010) caractérisé l'efficacité de la cimentation en termes de la porosité des échantillons de sable cimenté et sa réduction, et ont constaté que la porosité était réduite à 25% après le traitement par MICP. Tagliaferri et al. (2011) ont utilisé l'imagerie par rayons X et l'analyse quantitative d'images numériques 3D pour analyser les biocimentées et a constaté que la

porosité globale du sol biocimenté était réduite à 30%. Bien que la valeur de la porosité a été trouvée, les précipités de  $\text{CaCO}_3$  remplissaient le sol pores de grains de sable. Il convient de noter que la porosité conditionne l'efficacité des échantillons traités au MICP au moyen de contrôler le remplacement de la teneur en pores des grains de sable par  $\text{CaCO}_3$  (Rong, et al, 2012). Comme le degré de cimentation augmente, la quantité de  $\text{CaCO}_3$  précipité augmente et une quantité plus élevée de cristaux de  $\text{CaCO}_3$  remplace la teneur en pores de la structure interne de la matrice de sol, conduisant à une plus grande résistance

### **III.6 Observations par la micro-tomographie à rayons X des échantillons bio calcifié**

De nos jours, la micro-tomographie à rayons X représente l'une des techniques les plus efficaces pour explorer les propriétés de microstructure 3D d'un support poreux de manière qualitative et quantitative. La précision des résultats dépend de la résolution et du contraste des objets dans les images 3D.

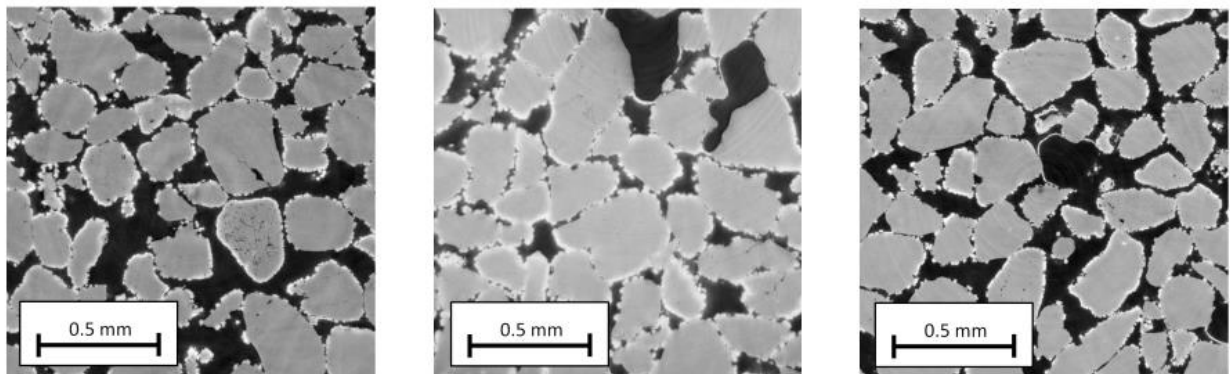


Figure 3.4 : Images par micro-tomographie à rayons X de sous-échantillons de sable biocimenté (Dadda 2017)

Montre quelques vues 2D de trois sous-échantillons après reconstruction. On peut distinguer les trois phases : air (phase sombre), grain de sable (phase grise) et calcite (phase gris clair). L'approche choisie permet d'augmenter le contraste entre les deux phases avec une légère brillance de la calcite recouvrant les grains de sable (Figure 3.3).

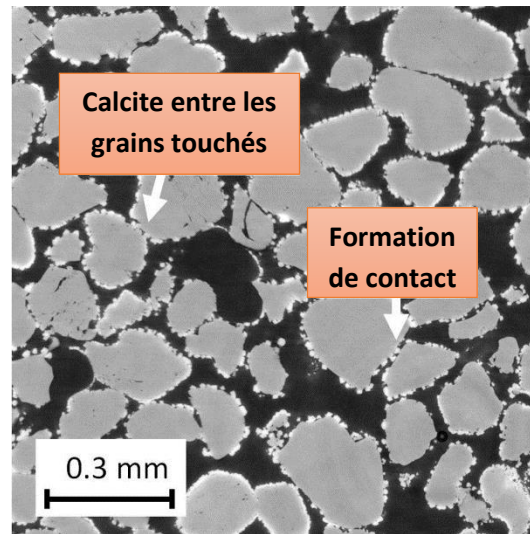


Figure 3.5 : Observation par micro-tomographie à rayons X (noir : vide, gris : sable et blanc : calcite)(Dadda 2017)

L'image 2D de tomographie à rayons X du même spécimen (figure 3.4) montre en blanc la calcite, en gris les grains de sable et en noir le vide. Cette observation par tomographie à rayons X montre des précipitations non uniformes sur les grains avec une faible localisation dans les contacts des grains. La largeur de la couche de calcite précipitée est comprise entre 5 et 20  $\mu\text{m}$ , ce qui est cohérent avec les observations MEB. Des cristaux de calcite plus petits (2 à 5  $\mu\text{m}$ ) ont été trouvés à, où de petites La concentration de la solution de calcification (0,37 mol / l) a été utilisée dans le processus de calcification. Bien que l'image radiographique présentée soit en 2D, cette image nous permet de voir clairement la formation de deux types de contact (1) de la calcite au contact de deux grains et (2) d'un nouveau pont de calcite, entre deux grains. Il apparaît sur cette image que la surface des grains n'a pas été totalement recouverte de précipitation de calcite, même dans le cas d'une forte quantité de calcite (12,4%), et qu'une importante surface reste non recouverte. Après la calcification, ce qui peut renforcer l'hypothèse de l'affinité de la technique pour se lier à endroits spécifiques dans le support poreux tels que : microrugosité sur les surfaces des grains et dans les contacts des grains. Les images radiographiques 3D peuvent être utilisées pour extraire différentes propriétés microstructurales et physiques telles que (porosité, quantité de calcite, perméabilité, etc.) (Dada et al., 2017b). Une première tentative a récemment été réalisée par Dada et al. (2017a) sur des images 3D d'échantillons calcifiés afin d'extraire les surfaces de contact créées entre les grains et l'évolution du nombre de coordination. Les images 3D en niveaux de gris doivent être traitées pour séparer les trois phases (pores, sable et calcite). L'histogramme typique des niveaux de gris d'une image est présenté à la figure 3.5.

Cela montre que les phases de pores et de sable peuvent être facilement séparé par un simple seuillage. En revanche, la séparation des La calcite et les phases de sable n'est pas simple, à cause de la densité similaire de ces deux constituants.

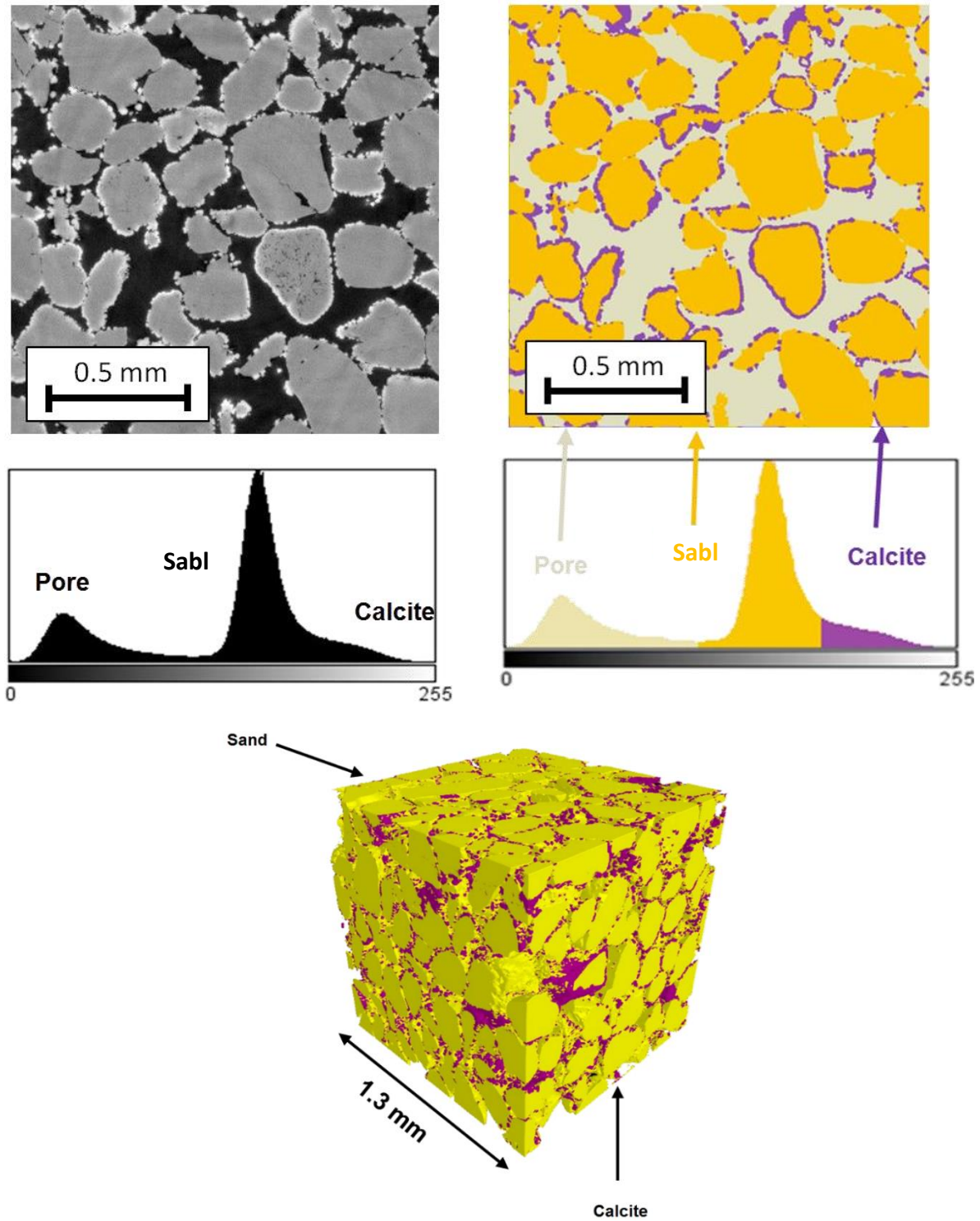


Figure 3.6 : Traitements d'image appliqués aux images 2D et au volume 3D correspondant.(Dadda 2017)

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté une investigation expérimentale pour évaluer la perméabilité de sable lâche de Elhadjeb Biskra traité par la technique de biocimentation. A partir les résultats présenté dans cette section ont constaté que la perméabilité de sable biocimenté diminué avec l'augmentation du taux de calcite précipité dans le sol, la réduction de la perméabilité liée directement par la diminution des pores entre les grains de sol parce que les cristaux de calcite bouché les pores et provoque une diminution des vides entre les grains. Nous avons fait des observations par MEB et micro-tomographe à rayon X pour regarder ce phénomène réellement et pour vérifier la distribution des cristaux de calcite dans le sol et la morphologie de ces cristaux. L'évolution des propriétés physiques est directement liée aux changements de la microstructure du sable biocimenté. Cependant, une relation claire entre le changement de la microstructure et ces propriétés physiques.

# Conclusion général

**D**ans ce travail nous avons présenté une étude expérimentale via une nouvelle technique de stabilisation et de renforcement des sols. Cette technique se base sur des procédures biochimiques par l'utilisation des bactéries ou des enzymes pour catalyser des réactions chimiques. La biocimentation est une méthode récente de renforcement et d'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du sol, respectueuse de l'environnement et économique, qui a attiré l'attention au XXI<sup>e</sup> siècle en raison de ses grands avantages par rapport aux méthodes de renforcement traditionnelles. Ce processus est effectué par un catalyseur (enzyme d'uréase) et d'autres solutions chimiques comme source de calcium et de carbone (urée-CaCl<sub>2</sub>).

Cette technique se fait en trois étapes principales ; (1) L'enzyme uréase catalyse l'hydrolyse de l'urée (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) pour former des ions ammonium et carbonate, (2) Les ions carbonates produits réagissent avec les ions calcium et précipitent sous forme de cristaux de carbonate de calcium, (3) les grains de sable sont liés ensemble par les cristaux de carbonate de calcium et formant un matériau solide cristallin. Ces réactions entraînant la précipitation de carbonate de calcium sous forme des cristaux solides qui augmentent la cohésion entre les grains de sol et augmentent la rigidité et la résistance mécanique du sol. Certains facteurs importants peuvent influencer ce processus, tels que la concentration de bactéries ou de l'enzyme d'uréase, la concentration de solutions chimiques, la température, le pH et d'autres facteurs doivent être surveillés pendant ce processus. Un changement significatif est observé dans toutes les propriétés du sol traité via la technique de biocimentation ce changement suivi directement par une modification sur les propriétés microstructurales tels que la diminution de porosité et l'augmentation de contacts entre les grains dans le sol traité.

Le principal travail de cette mémoire est l'évaluation des propriétés physique de sable de dune de Elhadjeb Biskra définie comme un sol lâche faible cohésion. Nous avons également utilisé des données obtenues dans la thèse de doctorat de Dadda (2017) afin d'essayer de définir une loi empirique.

Les résultats les plus importants obtenus dans ce travail sont :

- Une diminution significative de la perméabilité de sol biocimenté.
- L'augmentation du taux de calcite dans le sol biocimenté entraîne une réduction de la perméabilité.
- Proposé un modèle (une loi empirique) reliant l'évolution de la perméabilité en fonction du pourcentage de la calcite. Ce modèle capable de prédire la valeur de la perméabilité en connaissant le pourcentage de la calcite disponible dans le matériau sans avoir besoin de réaliser des essais au laboratoire.

- Les observations microstructurales par MEB et le micro-tomographie à rayon X peut être donné une image avec une bonne précision afin de mieux comprendre ce phénomène à l'échelle microscopique.

#### IV. Références :

- Cheng, L., Shahin, M., & Cord-Ruwisch, R. 2014. « Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments ». *Géotechnique* 64(12):1010-13.
- Cheng, L. 2012. « Innovative Ground Enhancement by Improved Microbially Induced CaCO<sub>3</sub> Precipitation Technology ». (March):251.
- Cheng, Liang, Ralf Cord-Ruwisch, et Mohamed A. Shahin. 2013. « Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation ». *Canadian Geotechnical Journal* 50(1):81-90.
- Dadda, Abdelali. 2017. « Étude Mécanique Et Microstructurale Des Sols Bio-Cimentés : Application Aux Ouvrages Hydrauliques En Terre ». 174.
- DeJong, Jason T., Michael B. Fritzges, et Klaus Nüsslein. 2006. « Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(5):591-602.
- DeJong, Jason T., Brina M. Mortensen, Brian C. Martinez, et Douglas C. Nelson. 2010. « Bio-mediated soil improvement ». *Ecological Engineering* 36(2):197-210.
- Ferris, F. G., V. Phoenix, Y. Fujita, et R. W. Smith. 2004. « Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20°C in artificial groundwater ». *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68(8):1701-22.
- Gat, Daniella, Zeev Ronen, et Michael Tsesarsky. 2016. « Soil Bacteria Population Dynamics Following Stimulation for Ureolytic Microbial-Induced CaCO<sub>3</sub> Precipitation ». *Environmental Science and Technology* 50(2):616-24.
- Kavazanjian, Karatas. 2008. « Microbiological Improvement of the Physical Properties of Soil CONTRIBUTIONS OF JAMES K. MITCHELL ( 1 ) • Clay Fabric and Compacted Soil Properties ». (August).
- Mitchell, James K. et J. Carlos Santamarina. 2005. « Biological Considerations in Geotechnical Engineering ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131(10):1222-33.
- Mortensen, B. M., M. J. Haber, J. T. Dejong, L. F. Caslake, et D. C. Nelson. 2011. « Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation ». *Journal of Applied Microbiology* 111(2):338-49.
- Mujah, D., Shahin, M. A., & Cheng, L. (2017). 2017. « State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization ». *Geomicrobiology Journal* 34(6):524-37.
- Nemati, M. et G. Voordouw. 2003. « Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ ». *Enzyme and Microbial Technology* 33(5):635-42.
- Okwadha, George D. O. et Jin Li. 2010. « Optimum conditions for microbial carbonate precipitation ». *Chemosphere* 81(9):1143-48.
- van Paassen, Leon A. 2009. *Biogrout: Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation*.
- van Paassen, Leon A., Ranajit Ghose, Thomas J. M. van der Linden, Wouter R. L. van der Star, et Mark C. M. van Loosdrecht. 2010. « Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(12):1721-28.
- Pascal VILLARD, BRIANÇON Laurent. 2018. *Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables*.
- Al Qabany, Ahmed, Kenichi Soga, et Carlos Santamarina. 2012. « Factors Affecting



- Efficiency of Microbially Induced Calcite Precipitation ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138(8):992-1001.
- RAN, Dilrukshi et Satoru Kawasaki. 2016. « Effective Use of Plant-Derived Urease in the Field of Geoenvironmental/ Geotechnical Engineering ». *Journal of Civil & Environmental Engineering* 06(01):1-13.
- Rong, Hui, Chun Xiang Qian, et Long Zhi Li. 2012. « Study on microstructure and properties of sandstone cemented by microbe cement ». *Construction and Building Materials* 36:687-94.
- Soon, Ng Wei, Lee Min Lee, Tan Chew Khun, et Hii Siew Ling. 2014. « Factors Affecting Improvement in Engineering Properties of Residual Soil through Microbial-Induced Calcite Precipitation ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 140(5):04014006.
- St-onge, Benoit, Département D. E. Génies Civil, Géologique Et, et D. E. S. Mines. 2016. « No Title ». (Génie Civil).
- Whiffin, Victoria S. 2004. « Guidelines for teachers of parentcraft and relaxation. 5. The new arrival. » *Midwives chronicle* 88(1048):155.
- Whiffin, Victoria S. 2004. « Microbial CaCO<sub>3</sub> Precipitation for the production of Biocement ». *Victoria Whiffin* (September):1-162.
- Whiffin, Victoria S., Leon A. van Paassen, et Marien P. Harkes. 2007. « Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique ». *Geomicrobiology Journal* 24(5):417-23.