

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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Laboratoire de recherche Génie Minier



Mémoire de Projet de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur  
d'Etat en Génie Minier

Amélioration des propriétés du sable par la méthode de précipitation de  
la calcite induite par des microorganismes (MICP)

Présenté par : AIT YAHIATENE Amina & SEGHAGHRA Yousra

Sous la Direction de M. : Malek OULD HAMOU Grade Pr

Présenté(e) et soutenue publiquement le (23/09/2024)

**Composition du jury :**

Président : M. MANSOUR Farid Aghilasse MCB ENP

Promoteur : M. OULD HAMOU Malek Pr ENP

Examinatrice : Mme.GUERFI Nabila MRA CRTSE

Représentant de  
l'incubateur : M.BOUSBAl M'hamed Dr Incubator ENP

Représentant de  
LAFARGE : M.ZEROUB Hamid Ing LAFARGE

Invité Mme.MARCHICHI Amira Dr UQAT



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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Laboratoire de recherche Génie Minier



Mémoire de Projet de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur  
d'Etat en Génie Minier

Amélioration des propriétés du sable par la méthode de précipitation de  
la calcite induite par des microorganismes (MICP)

Présenté par : AIT YAHIATENE Amina & SEGHAGHRA Yousra

Sous la Direction de M. : Malek OULD HAMOU Grade Pr

Présenté(e) et soutenue publiquement le (23/09/2024)

**Composition du jury :**

Président :	M. MANSOUR Farid Aghilasse	MCB	ENP
Promoteur :	M. OULD HAMOU Malek	Pr	ENP
Examinatrice :	Mme.GUERFI Nabila	MRA	CRTSE
Représentant de l'incubateur :	M.BOUSBAL M'hamed	Dr	Incubator ENP
Représentant de LAFARGE :	M.ZEROUB Hamid	Ing	LAFARGE
Invité	Mme.MARCHICHI Amira	Dr	UQAT

## ملخص

إن البحث عن عمليات جديدة اقتصادية وصديقة للبيئة يمثل تحديًا لجميع البلدان للحفاظ على البيئة وتشجيع الاقتصاد الدائري. أطروحتنا الحالية تقدم عملية جديدة تسمح لنا بالحصول على أسمنت حيوي يعتمد على التكلس الحيوي من خلال ترسيب الكالسيت الناجم عن الكائنات الحية الدقيقة (MICP). تعتمد هذه العملية على تحسين النشاط البكتيري لـ *Sporosarcina pasteurii*، القادرة على تحليل اليوريا لزيادة درجة الحموضة محليًا، مما يتسبب في ترسيب الكالسيت. وقد سمحت لنا هذه الدراسة بتطوير بروتوكول فعال للتدعيم يهدف إلى تحسين الخواص الميكانيكية للرمل، من حيث القوة والنفاذية والتركيب المعدني. أظهرت النتائج التجريبية انخفاضًا بنسبة 59% في النفاذية، مما يسلط الضوء على قدرة المعالجة على الحد من تدفق السوائل، وزيادة في قوة الرمل، من 0.1 ميغا باسكال إلى 1.0 ميغا باسكال، مما يعكس تحسنًا كبيرًا في الخواص الميكانيكية. علاوة على ذلك، يؤكد المحتوى العالي من  $CaCO_3$  المقاس في الرمل المعالج فعالية عملية التدعيم وقدرتها على تحويل الرمل السائب إلى مادة صلبة. هذه النتائج تثبت فعالية MICP وتمهد الطريق لتطبيقه في مجال البناء والأشغال الهندسية.

الكلمات المفتاحية: التكلس الحيوي - *Sporosarcina Pasteurii* - MICP - ترسيب الكالسيت - تثبيت التربة - الرمل.

## Abstract

The search for new economical and ecological processes is a challenge for all countries to preserve the environment and encourage the circular economy. Our current thesis presents a new process that allows us to obtain a biological cement based on biocalcification through calcite precipitation induced by microorganisms (MICP). This process relies on optimizing the bacterial activity of *Sporosarcina pasteurii*, capable of hydrolyzing urea to locally increase the pH, which causes calcite precipitation. This study allowed us to develop an effective cementation protocol aimed at improving the mechanical properties of sand, in terms of strength, permeability, and mineralogical composition. The experimental results showed a 59% reduction in permeability, highlighting the treatment's ability to limit fluid flow, and an increase in sand strength, from 0.1 MPa to 1.0 MPa, which reflects a significant improvement in mechanical properties. Furthermore, the high  $CaCO_3$  content measured in the treated sand confirms the effectiveness of the cementation process and its ability to transform loose sand into a solid material. These results demonstrate the effectiveness of MICP and pave the way for its application in the field of construction and engineering works.

**Keywords :** Biocalcification - MICP- *Sporosarcina Pasteurii*- calcite Precipitation - soil Stabilization

## Résumé

La recherche des nouveaux procédés économiques et écologiques est un enjeu de tous les pays pour la préservation de l'environnement et encourager l'économie circulaire. Notre présent mémoire est un nouveau procédé qui nous permet de l'obtention d'un ciment biologique basé sur la biocalcification par précipitation de calcite induite par des microorganismes (MICP). Ce procédé repose sur l'optimisation de l'activité bactérienne de *Sporosarcina pasteurii*, capable d'hydrolyser l'urée pour augmenter localement le pH, ce qui provoque la précipitation de la calcite. Cette étude nous a permis de développer un protocole efficace de cimentation visant à améliorer les propriétés mécaniques d'un sable, en termes de résistance, de perméabilité et de composition minéralogique. Les résultats expérimentaux ont montré une réduction de 59% de la perméabilité, soulignant la capacité du traitement à limiter les écoulements de fluides, et une augmentation de la résistance du sable, passant de 0,1 MPa à 1,0 MPa, ce qui traduit une amélioration significative des propriétés mécaniques. Par ailleurs, la forte teneur en CaCO<sub>3</sub> mesurée dans le sable traité confirme l'efficacité du processus de cimentation et sa capacité à transformer un sable meuble en un matériau solide. Ces résultats démontrent l'efficacité du MICP et ouvrent la voie à son application dans le domaine de la construction et des travaux d'ingénierie.

**Mots clés :** Biocalcification - MICP- *Sporosarcina Pasteurii* - Précipitation de calcite - Stabilisation des sols.

# Table des matières

Liste des tableaux	9
Table des figures	10
Liste des acronymes	12
Introduction générale	14
1. Introduction à la bio-cimentation	16
1.1. Introduction	16
1.2. La biominéralisation	16
1.3. La biocimentation	17
1.3.1. Précipitation de carbonate microbiquement induite (MICP) à l'aide de bactéries produisant de l'urée (UPB)	18
1.3.1.1. Le développement de l'activité enzymatique chez <i>S. pasteurii</i> (ATCC11859)	20
1.3.1.2. La production d'enzyme sous contraintes industrielles	21
1.3.2. Cimentation par des hydroxydes de fer à l'aide de bactéries réduisant le fer (IRB)	21
1.3.3. Cimentation hypothétique du sulfure ferreux à l'aide de bactéries sulfatoréductrices (SRB)	22
1.4. Biocolmatage	23
1.5. Bioremédiation	24
1.6. Facteurs affectant l'efficacité du traitement des précipitations de calcite	25
1.6.1. Température	25
1.6.2. Types de sols	25
1.6.3. Degré de saturation	26
1.6.4. Salinité de l'eau	27

1.6.5.	Niveau de pH . . . . .	27
1.6.6.	Concentration de Sporosarcina Pasteurii . . . . .	27
1.6.7.	Concentration de chlorure d'ammonium NH <sub>4</sub> Cl . . . . .	28
1.6.8.	Méthodes d'injection . . . . .	29
1.6.8.1.	Injection en continu . . . . .	29
1.6.8.2.	Injection en discontinu . . . . .	30
1.6.8.3.	Percolation . . . . .	31
1.7.	Conclusion . . . . .	31
2.	Méthodologie et protocoles analytiques . . . . .	32
2.1.	Introduction . . . . .	32
2.2.	Liquide de fixation . . . . .	33
2.2.1.	Préparation des Bactéries . . . . .	33
2.2.1.1.	Hydratation et culture des bacteries . . . . .	33
2.2.1.2.	Identification des colonies des bactéries isolées . . . . .	36
2.2.2.	Préparation des bactéries à l'injection . . . . .	37
2.2.2.1.	Courbe de croissance . . . . .	38
2.2.3.	Extraction des bactéries . . . . .	39
2.3.	Liquide de cimentation . . . . .	39
2.4.	Propriétés des matériaux utilisés . . . . .	40
2.4.1.	Analyse par microscopie électronique à balayage associée à la microanalyse par énergie dispersive de rayons X (MEB-EDS) . . . . .	40
2.4.2.	Analyse granulométrique sélective : . . . . .	41
2.4.3.	Calcul de volume des vides . . . . .	41
2.4.3.1.	Calculs . . . . .	42
2.4.4.	Saturation des échantillons avec de l'eau saline . . . . .	43
2.5.	Injection des échantillons . . . . .	44
2.5.1.	système d'injection . . . . .	44
2.5.2.	Injection discontinue des échantillons . . . . .	44
2.6.	Séchage des échantillons . . . . .	45

2.7. Analyses minéralogiques et physico-mécaniques des échantillons après la biosolidification . . . . .	46
2.7.1. Analyse Morphologique par Microscope Électronique à Balayage (MEB) . . . . .	46
2.7.2. Test de perméabilité . . . . .	46
2.7.3. Test de Résistance à la compression . . . . .	48
2.7.4. Diffraction des Rayons X (DRX) . . . . .	48
2.8. Conclusion . . . . .	49
3. Résultats et interprétations . . . . .	50
3.1. Introduction . . . . .	50
3.2. Caractérisation pré-traitement par MICP . . . . .	50
3.2.1. La courbe de croissance de <i>S.Pasteurii</i> dans un milieu NH <sub>4</sub> – Y E à 25°C . . . . .	50
3.2.2. Observation microscopique des bactéries après coloration Gram (x100) . . . . .	51
3.2.3. Microscopie électronique à balayage (MEB) associée à la spectroscopie par Énergie Dispersive de rayons X (EDS) de sable . . . . .	52
3.2.4. Analyse granulométrique : . . . . .	54
3.2.5. Test de perméabilité de sable pré-traité . . . . .	55
3.2.6. Analyse Diffractométrie de rayons X (DRX) de sable pré-traité . . . . .	55
3.3. Caractérisation durant le traitement MICP . . . . .	56
3.3.1. Observation visuelle . . . . .	56
3.3.2. Suivi de l'évaluation de PH du milieu lors le processus de MICP . . . . .	57
3.4. Caractérisation post- traitement MICP et rendement des essais . . . . .	58
3.4.1. Résultats visuelles . . . . .	58
3.4.2. Résultats minéralogiques . . . . .	59
3.4.3. Résultats des essais physico-mécaniques . . . . .	62
3.4.3.1.1. Résultats de l'essai de perméabilité . . . . .	62
3.4.3.1.2. Résultats de l'essai de résistance à la compression . . . . .	62
3.4.4. Comparaisons des résultats . . . . .	63
3.5. Conclusion . . . . .	64
Conclusion générale . . . . .	65
Bibliographie . . . . .	68

Confidentiel(le)