

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



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 CaCO₃ 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 ₄ 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 S.Pasteurii dans un milieu NH ₄ – 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)