

Zeitschrift:	Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology
Herausgeber:	Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie
Band:	26 (2021)
Heft:	2
Artikel:	L'amélioration des sols à base de bio-cimentation
Autor:	Terzis, Dimitrios
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-977328

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'Amélioration des sols à base de bio-cimentation

Dimitrios Terzis, PhD^{1,2}

Abstrait

Alors que la sensibilisation à l'impact environnemental des matériaux de coulis et des liants chimiques augmente rapidement, les biotechnologies gagnent en popularité en tant qu'alternatives durables dans les opérations d'amélioration des sols. L'article présente les principes et les méthodes d'application de la bio-cimentation. Le terme est utilisé pour décrire un système basé sur des enzymes du sol ou des eaux souterraines capables de catalyser la production de calcite. Le résultat final du système sont des ponts cristallins minéraux qui agissent comme des liants pour améliorer les propriétés géotechniques des sols. Avec leur rhéologie proche de l'eau, les bio-coulis ont une large gamme d'applications et sont peu invasifs, ne nécessitant que des pressions d'injection très faibles. L'équipement est le même que celui utilisé dans d'autres opérations de mélange coulis-sol, et les composants réactifs sont disponibles dans le monde entier ou facilement livrables, ce qui explique pourquoi la bio-cimentation est devenue aujourd'hui une alternative précieuse et durable vers un traitement efficace des sols. Les développements récents au cours des dernières années ont permis d'augmenter encore l'applicabilité et l'efficacité des bio-coulis pour finalement combler le fossé entre la recherche et la pratique.

1 Introduction

Les mesures d'atténuation des risques jouent un rôle de catalyseur dans la sauvegarde des infrastructures et la protection de l'environnement bâti contre les aléas naturels. De telles mesures sont largement appliquées pour cibler des problèmes géotechniques ou géo-environnementaux tels que les

glissements de terrain, la réhabilitation des fondations, l'érosion de surface, la protection contre les séismes et la liquéfaction et le renforcement des remblais ou des routes. Beaucoup de ces ouvrages sont aujourd'hui réalisés sur la base de techniques de mélange des sols pour modifier la composition du sol et améliorer ses propriétés. Parmi les matériaux les plus utilisés figurent les mélanges cimentaires, les silicates et les résines à base de pétrole. Pour toutes les solutions à base d'adjuvants, les systèmes souhaités doivent minimiser les pressions d'injection ou de mélange requises ainsi que l'impact sur le milieu environnant tout en maximisant le comportement mécanique des sols et des roches. Un inconvénient majeur des fluides susmentionnés concerne leur viscosité élevée qui nécessite soit l'application de pressions élevées, soit, le cas échéant, des températures élevées, pour augmenter leur injectabilité. Alternativement, l'injection de fluides industriels supplémentaires tels que des plastifiants et des floculants est largement utilisée pour modifier les propriétés de mélange des coulis et adapter le système aux besoins spécifiques des travaux complexes. Par conséquent, un paramètre critique à considérer lorsqu'il s'agit de la conception et de l'application des techniques de mélange est la porosité et la perméabilité du sol ciblé et la gamme de pressions applicables. Ce dernier est d'un intérêt particulier puisque de nombreux ouvrages ne supportent pas l'application de hautes pressions en raison des risques liés à la stabilité de la zone ciblée ou des formations et structures adjacentes. De plus, l'impact durable des fluides industriels sur la qualité des eaux souterraines et de l'écosystème souterrain

¹ École Polytechnique Fédéral de Lausanne (EPFL) EPFL IIC ENAC LMS Station 18

² MeduSoil AG, EPFL Innovation Park Bâtiment A, CH-1015, Lausanne Suisse, dimitrios@medusoil.com

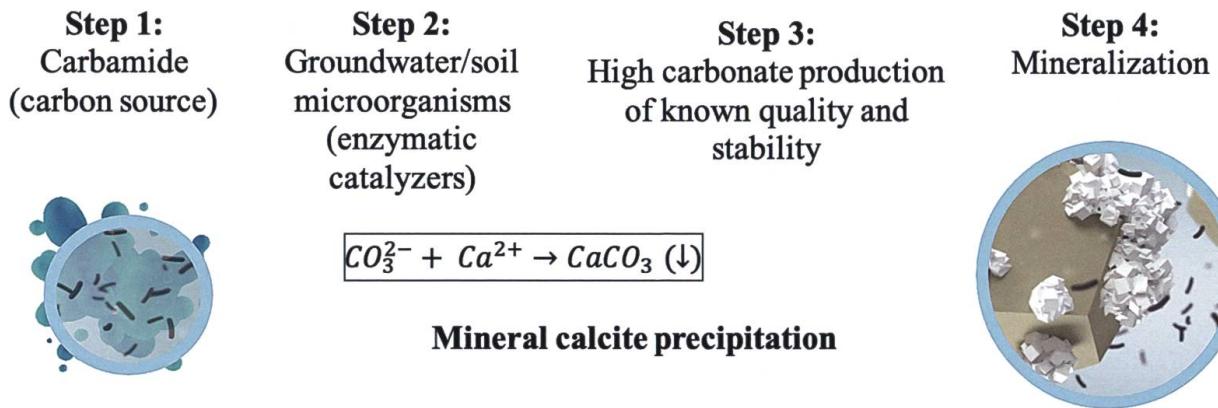


Fig. 1 : Processus de stimulation en quatre étapes de la réaction organique sous-jacente.

lève encore plus de barrières à l'adoption de certains coulis et additifs de sol dans certaines zones. Les fluides à base de ciment ou de chaux sont connus pour augmenter le pH de l'environnement du sol au-dessus de 12 tandis que les produits chimiques à base de pétrole, tels que les polyuréthanes, ont été largement étudiés sur leur potentiel de pollution microplastique. Compte tenu de ce qui précède, de la prise de conscience croissante des effets environnementaux et des réglementations plus strictes, il existe un fort besoin de solutions pour réaliser un renforcement des sols à travers des méthodes alternatives qui minimisent les pressions d'application et sont compatibles dans un cadre en constante évolution régi par les normes et directives de protection de l'environnement.

La bio-cimentation fait référence à un type spécial de cimentation du sol utilisant de la calcite ($CaCO_3$) agissant comme liant. Le mécanisme sous-jacent est la conversion du carbonate, par l'activité catalytique de certains micro-organismes du sol ou de l'eau. Dans l'ensemble, malgré des progrès significatifs signalés, la technologie est largement considérée comme une solution à un stade précoce qui doit faire ses preuves avant de devenir la norme. Cette perception est attribuée principalement à la preuve de concept limitée fournie en dehors des laboratoires, à une échelle pertinente pour les travaux géotechniques. Un autre facteur limitant

est l'absence de moyen durable pour traiter les sous-produits nitreux indésirables et résiduels, résultat de l'activité métabolique des micro-organismes, rapporté par des dizaines de chercheurs. Cet article présente un système à grande échelle pour fournir une bio-cimentation qui extrait complètement les sous-produits indésirables et les recycle de manière efficace, pour réduire les coûts d'application et finalement laisser un sol riche en calcite, exempt de sous-produits résiduels.

2 La technologie

Le concept de bio-cimentation est basé sur des micro-organismes qui peuvent être natifs des sols et des eaux souterraines et qui génèrent des solutions carbonatées stables. Ces micro-organismes agissent comme des agents de minéralisation et sont utilisés pour générer des conditions qui favorisent la création de ponts minéraux, sous forme de calcite. Les différentes étapes du mécanisme adopté sont montrées dans la figure 1. Plus précisément, lorsque ces micro-organismes sont nourris avec du carbamide (connu commercialement sous le nom d'urée), ils libèrent du carbonate dissous à haute concentration qui, en présence des solutés de calcium de l'eau courante, forment des agrégats minéraux du $CaCO_3$. Souvent, la *Sporosarcina Pasteurii*, non pathogène et omniprésente dans la na-

ture, agit comme la souche enzymatique en raison de son rendement élevé et rapide en carbonate. Alternativement, des concepts similaires ont été rapportés pour réaliser la minéralisation de la calcite en utilisant soit des enzymes extraites de plantes, qui jouent le rôle de catalyseurs pour décomposer l'urée en carbonate, soit des bactéries nitrifiantes et dénitrifiantes, qui entraînent la transformation du CaCO₃ par l'apport de CO₂ et d'azote.

Le carbamide (CH₄N₂O) est utilisé depuis des décennies en agriculture pour augmenter le rendement des cultures. Pour sa production, l'azote, sous forme d'ammoniac, est combiné au CO₂. Dans les applications agricoles, l'azote alimente les cultures tandis que le CO₂ est libéré dans l'atmosphère. Pour fournir une solution respectueuse de l'environnement, la présence et la manipulation d'azote doivent être correctement traitées dans les travaux de bio-cimentation. Il y a eu des tentatives pour résoudre ce problème en lavant le sol avec de l'eau ou par dilution. Cependant, pour diluer correctement l'azote jusqu'à des limites acceptables, un volume équivalent au moins dix fois le volume des pores du sol doit être injecté tandis que l'azote dilué reste toujours résiduel dans le sol environnant ou les eaux souterraines. Nous avons donc développé une solution biotech valorisante et durable pour à terme briser la barrière de l'azote dans les travaux de bio-cimentation. Cela se fait en introduisant un système de capture d'ammoniac ex-situ pour séparer le carbonate de l'azote, et éventuellement conduire le carbonate dans le sol tout en recyclant l'azote sous forme d'autres produits industriels. Ce modèle circulaire d'approvisionnement-réutilisation des matières premières permet des travaux de bio-cimentation économiques et durables. Grâce à ce système, le sol ciblé reste riche en minéraux carbonatés et exempt d'azote.

À ce stade, il faut considérer que dans les travaux de bio-cimentation, le sol n'est pas cimenté au sens strict, c'est-à-dire que ses

vides/fissures ne sont pas complètement remplis avec du coulis. La cristallisation du CaCO₃ utilise et nécessite des grains de sol comme points de noyau de cristallisation. Au fur et à mesure que la bio-calcification progresse, ces cristaux formés créent des ponts entre les grains, ce qui conduit à une augmentation de la résistance et de la rigidité, tandis que la perméabilité est généralement maintenue. Ce dernier aspect est important dans la mesure où il permet une réinjection en cas de besoin. Globalement, la cristallisation se fait en quelques heures ou quelques jours selon le degré de bio-cémentation souhaité et est indépendante des phénomènes d'hydratation ou de vieillissement. Une fois que la réaction a lieu, elle est irréversible et les cristaux restent en place, offrant une structure de grains « verrouillé ».

3 Gamme d'Application

Un facteur important lors du choix d'un coulis approprié pour une application de renforcement du sol est sa pénétrabilité, donc la capacité du coulis à pénétrer dans le sol ou la roche à traiter. De manière optimale, la rhéologie du coulis doit permettre de pénétrer dans les vides les plus petits, tout en permettant de contrôler et de limiter l'étalement du coulis dans la zone ciblée. La viscosité du coulis doit donc être soigneusement conçue pour chaque projet. À côté de la viscosité, pour les coulis particulaires, c'est la taille de grain maximale (pour les différents coulis illustrés à titre indicatif dans la figure 2 ci-dessous) par rapport à l'ouverture de la fissure ou du vide, qui détermine la pénétrabilité. Au sens strict, le bio-ciment appartient à la catégorie des coulis particulaires. Cependant, en raison des tailles de particules limitées, c'est-à-dire des enzymes de l'ordre de 1 micromètre, les solutions sont considérées, d'un point de vue rhéologique, comme des fluides aqueux avec des propriétés newtoniennes lors de l'injection. Cela permet au bio-ciment de pénétrer même dans les plus

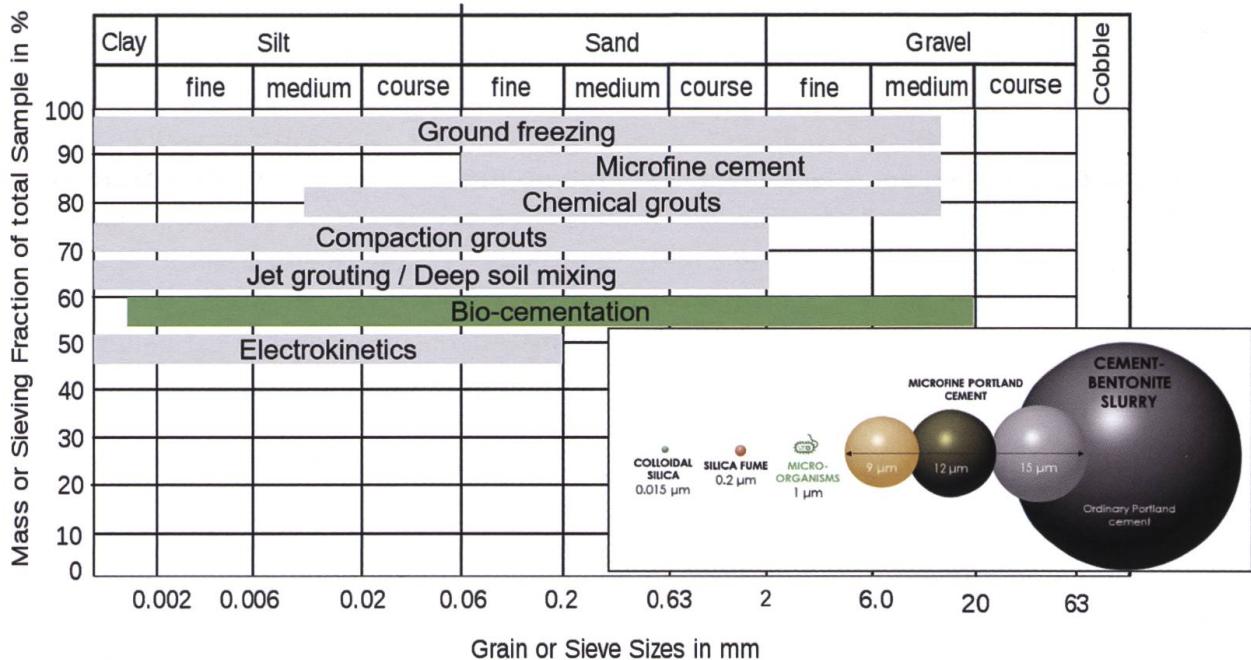


Fig. 2 : Gamme de types de sols où le bio-coulis est applicable. Indication de la taille des grains d'une série de matériaux de coulis (indication).

petites fissures / vides avec des ouvertures jusqu'à 3 micromètres (Fig. 3).

La conception spécifique du bio-coulis en fonction du temps de réaction total, donc du taux de croissance du liant, permet de limiter davantage la diffusion du coulis hors de la zone souhaitée. Les types de sols typiques qui peuvent être traités efficacement par le bio-coulis vont des limons aux graviers

(Fig. 2). Les sols très fins et cohésifs peuvent être traités grâce à l'utilisation couplée de l'électro-osmose et de la bio-cimentation, la solution étant entraînée sous l'application d'un faible champ électrique.

La gamme de température pour rendre l'application de la bio-cimentation faisable se situe entre 5 et 45 °C (278-318 K). Pour des températures légèrement inférieures, les solutions

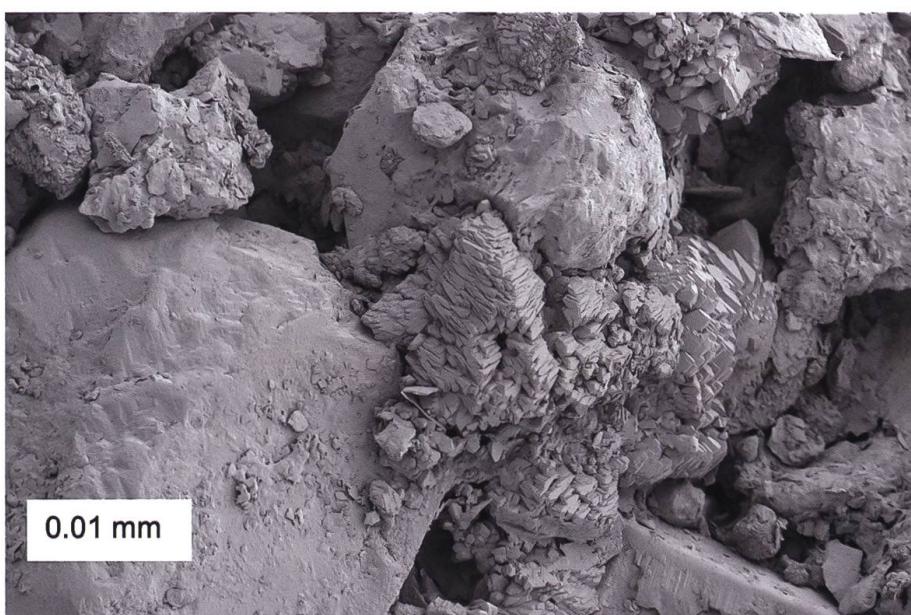


Fig. 3 : La bio-calcite et son rôle de liant pour de grains du sol.

de bio-coulis peuvent être légèrement réchauffées dans un agitateur assurant leur état liquide pour le processus d'injection. Le pH du sol doit idéalement être compris entre $7 < \text{pH} < 10$. Par conséquent, les sols contaminés nécessitent des considérations de conception particulières. Un aspect important de la bio-cimentation par rapport à d'autres matériaux de coulis est qu'il peut être appliqué à la fois dans des conditions non saturées et saturées. Les injections sous le niveau de la nappe phréatique offrent plusieurs avantages, notamment en mobilisant des pompes d' extraction, similaires à celles utilisées pour abaisser le niveau d'eau dans les fosses d'excavation, pour mieux guider un champ d'écoulement qui transporte les réactifs de la bio-cimentation. Cela rend également possibles les applications sous-marines.

4 Mise en place et Procédure d'injection

Généralement, l'équipement pour le bio-coulis est le même que pour le coulis de ciment conventionnel. La capacité de la pompe doit être comprise entre 0,2 et 2 bar, alors qu'une pompe à vis excentrique est souvent utilisée. La seule pièce d'équipement spéciale requise est un bioréacteur, dans lequel les enzymes et le carbamide sont mélangés pour permettre la génération de la solution de carbonate dans des conditions contrôlées. La suspension est ensuite agitée jusqu'au début de l'injection, afin de maintenir les enzymes également dispersées. Contrairement aux coulis de ciment avec leur rhéologie Bingham, la viscosité des bio-coulis ne

changerait pas, en cas d'arrêt de l'agitateur, mais elle reste liquide. Concernant la boucle de recyclage, comme mentionné ci-dessus, celle-ci est ajoutée entre le bioréacteur et le tube d'injection pour extraire l'azote et guider le carbonate dans le sol. Cet équipement s'adapte à un conteneur typique de 8 pieds comme ceux que l'on trouve sur tous les chantiers de construction.

Pour le coulis lui-même, de l'eau locale peut être utilisée et le calcium ou le carbamide réactif peuvent être obtenus auprès d'un fournisseur local. Ils sont généralement conditionnés en sacs de 25 à 50 kg. Les enzymes spécifiquement conçues pour les besoins du projet sont fournies sous forme de poudre sèche ou de liquide dans des sacs de 0,5 à 10 kg. L'équipement comprend des conteneurs liquides de 1 à 3 tonnes de réactifs hautement concentrés pour une utilisation directe. Des tubes et des manchettes typiques sont utilisés avec un diamètre compris entre 20 et 50 mm et une distance entre les trous de forage comprise entre 1,5 et 5 mètres.

Généralement, pour le bio-injection, la fondation ou la masse de sol à traiter est dans un premier temps injecté avec de l'eau riche en calcium. Ceci est important pour assurer une bonne fixation du prochain lot de carbonate sur les points de contact grain à grain. La solution enzymatique et riche en carbonates est injectée en plusieurs cycles, en fonction du résultat souhaité en termes de résistance, cohésion et rigidité. Une réinjection est à tout moment possible, puisqu'une certaine perméabilité est toujours maintenue.

Paramètre	Pré-injection	Post-injection
Cohésion, c [kPa]	0-10	40-150
Angle de frottement - ϕ [°]	27-32	up to 43
Module E [MPa]	150-500	500-2'000
Résistance à la compression non confinée [MPa]	0	up to 10
Vitesse de l'onde de cisaillement, V_s , [m/s]	300-600	up to 2'000
Conductivité hydraulique [cm/sec]	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-7} - 10^{-3}$

Tab. 1: Amélioration typique des paramètres géotechniques par injection de bio coulis.

5 Résultats de la biocimentation

Les résultats du coulis dépendent essentiellement des exigences du projet et des paramètres géotechniques initiaux du matériau à traiter. Conformément aux prescriptions du projet, le bio-coulis et son schéma d'injection peuvent être conçus en fonction de chaque site et application. Les paramètres clés pour la conception sont le pourcentage d'enzymes/Ca²⁺ d'une part et les cycles d'injection d'autre part. Dans le tableau suivant, quelques plages types de paramètres géotechniques avant et après injection sont indiquées.

6 Évaluation et contrôle de la qualité

Des mesures in-situ peuvent aider les entrepreneurs à exécuter et à surveiller le processus de consolidation. Les méthodes d'évaluation de la qualité et de contrôle de la qualité sont généralement comparables aux méthodes de caractérisation in-situ des sols. Au moyen de puits d'extraction/forages, la teneur en CaCO₃ peut être facilement déterminée sur site, donnant une indication de l'avancement de la réaction/cristallisation.

Les autres tests courants qui pourraient être envisagés sont :

Essais in situ

- Surveillance de la conductivité du fluide (par exemple, prélèvement de la pompe d'extraction)
- Test de pénétromètre
- Géophysique
- Essais de compactage du sol
- Radar de pénétration au sol

Essais en laboratoire

- Essais géotechniques
- Digestion de calcite sur échantillons carottés

7 Résumé et conclusions

Cet article offre un aperçu de la bio-cimentation, couvrant ses origines dans l'ingénierie géotechnique et géo-environnementale ainsi que les facteurs qui ont à la fois favorisé ou empêché son adoption dans les travaux géotechniques. Les divers avantages offerts par la technique sont présentés et un moyen de surmonter la manipulation de l'azote, qui représente l'ultime barrière de la bio-cimentation, est illustré. Le poids est mis sur la description des détails pratiques et moins connus de la bio-cimentation, tels que la grande disponibilité des éléments requis ou le fait que la perméabilité est préservée donc la capacité de drainage des sols est assurée. L'approche présentée de la bio-cimentation a atteint le niveau de maturité nécessaire pour franchir le pas ultime dans le domaine du jointoient vers l'offre de solutions de bio-cimentation qui combinent :

- Injections qui sont peu invasives
- Sols améliorés avec rétention de perméabilité
- Rentabilité (100-550 CHF/m³ de sol stabilisé)
- Faibles pressions d'application (1-3 bar), vibrations minimales
- Application rapide et facile (4-8 jours)
- Haute performance structurelle
- Applications carbone négatif: carbamide comme additif, CO₂ piégé dans CaCO₃