

PRIX DE L'INNOVATION SOLSCOPE

BIOCALCIS

Mémoire Technique

PRESENTE PAR :
Annette ESNAULT FILET
Jean François MOSSER
Stéphane MONLEAU
Leslie SAPIN
Ira Gutjahr

BIOCALCIS

SOMMAIRE

1	L'amélioration des sols.....	3
1.1	Les techniques classiques.....	3
1.2	Les techniques d'injection.....	4
2	Un nouveau procede : la calcification des sols par voie biologique.....	6
2.1	La consolidation par voie biologique, un concept prometteur.....	6
2.2	Le principe de la biocalcification.....	8
2.3	Domaines d'application du procede.....	10
2.4	Le procédé BIOCALCIS.....	11
3	Validations du procédé BIOCALCIS	12
3.1	Papendrecht (NL), Essais en conteneur de sable	12
3.2	Essais en colonnes de 2,5 mètres.....	13
3.3	Essais de convenance, renforcement mur en terre armee.....	14
3.3.1	Contexte du projet.....	14
3.3.2	Principe et Résultats des essais de convenance (Février – Avril 2014)	14
4	CONCLUSION.....	17

1 L'AMELIORATION DES SOLS

Que ce soit pour limiter les tassements des sols sous des ouvrages, pour réduire les poussées sous des murs de soutènement ou par simple mesure de prévention des risques sismiques qui menacent les sols lâches en présence d'eau, l'amélioration des sols est un besoin de plus en plus fréquent auquel il faut faire face.

Améliorer un sol consiste à modifier ses caractéristiques, afin d'augmenter sa résistance au cisaillement, de réduire sa porosité (permet de limiter le tassement) ou de diminuer le risque de liquéfaction du sol dans les zones sismiques ou dans des zones soumises à de fortes vibrations.



Figure 1 Phénomène de liquéfaction

1.1 LES TECHNIQUES CLASSIQUES

Les techniques classiques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but :

- d'augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement,
- de diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer, de diminuer ou d'éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer, on peut classer les procédés comme suit :

Méthode	Types de sol					
	Matériaux évolutifs TOURBE	Argiles très molles	Argiles – limons compressibles	Remblais fins	Sables / graviers	Cailloux Remblais à blocs
Amélioration de sols dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples		COLONNES BALLASTÉES				
		PLOTS BALLASTÉES PILONNES (épaisseur < 5 m)				
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides	... DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT et JET GROUTING					
	... DE TYPE COLONNE DEEP SOIL MIXING					

Figure 2 Classement des techniques classiques selon le type de sol traité

La plupart de ces techniques sont très intrusives, rendant leur mise en œuvre très compliquée voire impossible sous des ouvrages existants :

- préchargement : requiert de libérer la plateforme pour installer un remblai
- vibrocompactage : génère des tassements importants
- compactage dynamique : fait appel à des grues lourdes pour porter les masses qui génèrent des tassements importants
- injection solide : risque de soulèvement du terrain
- colonnes ballastées et plots ballastés : incompatibles avec travail sous ouvrage existant
- Inclusions rigides et pieux : difficilement réalisables sous existants
- Jet grouting : grande quantité de déblais générés et risque de tassement sous ouvrages existants.

1.2 LES TECHNIQUES D'INJECTION

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.

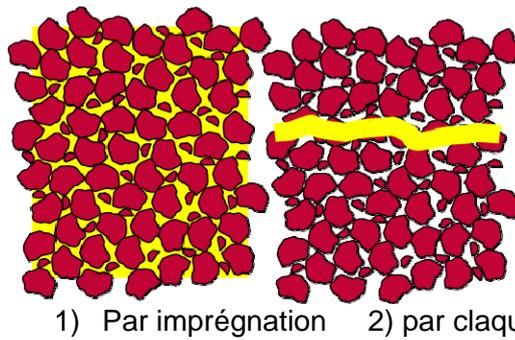


Figure 3 Principe de répartition du coulis dans le sol :

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.

Malgré la flexibilité et la variété des traitements qui permettent de traiter une large gamme de sols, l'injection se heurte à plusieurs problèmes. D'un point de vue technique, le champ d'action est limité à un rayon proche de la zone de forage. Par ailleurs, la viscosité élevée et le temps de prise rapide du coulis (quelques heures seulement) obligent à multiplier les points d'injections et compliquent le contrôle de l'homogénéité du traitement. Il est donc nécessaire de déployer d'importants moyens matériels pour traiter un grand volume de sol.

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.

Ainsi, il n'existe pas à l'heure actuelle de technique d'amélioration de sols peu intrusive, qui permette de traiter des sols fins sous des ouvrages en service tout en conservant les propriétés hydrauliques initiales du sol et en respectant l'environnement.

2 UN NOUVEAU PROCEDE : LA CALCIFICATION DES SOLS PAR VOIE BIOLOGIQUE

2.1 LA CONSOLIDATION PAR VOIE BIOLOGIQUE, UN CONCEPT PROMETTEUR

Le recours à la bio-minéralisation 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.^{1 2}



Figure 4 : Stromatolithes calcifiés, formés par l'activité microbienne dans un environnement riche en calcium et bicarbonate. Lac Clifton, Parc national de Yalgorup (Australie)

C'est en observant ces phénomènes que l'idée d'amélioration des sols par biocalcification 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. Le mécanisme est connu sous le terme de Microbially Induced Carbonate Precipitation (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.³ 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, tout d'abord avec l'institut de recherche Deltares aux Pays Bas dans le cadre d'un projet européen, puis dans le cadre du projet BIOCALCIS (ANR RIB 2005) associant notamment l'université d'Angers dans le cadre

¹ WALTER, M.R. (1972); Stromatolites and the biostratigraphy of the Australian Precambrian and Cambrian. Spec. Pap. Paleontology, 11, 190 p

² RIDING, R. (2000) Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. Sedimentology, 47, 179-214

³ Whiffin, W.S., (2004). Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement. Science and Engineering, School of Biological Sciences and Biotechnology, Perth, Western Australia, Murdoch University. PhD thesis : 154

d'une thèse sur les aspects microbiologiques⁴. Ce dernier projet a permis de passer progressivement le procédé BIOCALCIS du stade des validations en laboratoire (volume de sol traité de l'ordre de quelques litres) jusqu'au stade des essais Pilote, qui ont pu calcifier des volumes de sol couvrant des distances de plusieurs mètres.

De 2009 à 2010, ces efforts de développement se sont poursuivis par la réalisation d'essais Pilote de plus grande envergure, avec notamment deux essais de bio-calcification sur des volumes d'environ 100 m³ 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.^{5 6}



Figure 5 Changements d'échelle successifs de 2005 à 2008

Une première validation du procédé à l'échelle industrielle a été réalisée sur un chantier aux Pays-Bas (Beuningen - VSF 2011)⁷ dans le cadre d'un transfert technologique entre Soletanche-Bachy et la société VSF, à l'occasion du franchissement d'une rivière d'un gazoduc de diamètre 1,50m au moyen d'un Forage Horizontal Dirigé (FHD). L'objectif était de stabiliser le forage par bio-calcification sur une zone présentant des risques d'instabilité au passage du FHD, lors du franchissement de lentilles de sables grossiers et de graviers situées à l'interface avec du sable. Un volume d'environ 2 fois 1000m³ a ainsi été traité avec succès, à une profondeur d'environ 3 à 5m sur un linéaire de l'ordre de 400m au total.

Plusieurs autres applications industrielles ont été étudiées depuis cette date par Soletanche Bachy. L'application du procédé de biocalcification pour le renforcement d'un mur en Terre Armée en 2014 fait l'objet du présent dossier pour le prix de l'innovation Solscope.

Le principe et la démarche adoptée pour la mise en œuvre du procédé sont décrits dans les paragraphes ci-après ainsi que ses avantages technologiques et les applications dans le domaine de l'amélioration des sols qui en découlent.

⁴ Girinski, O. (2009) Pré-industrialisation d'un procédé de consolidation de sol par bio-calcification in-situ, Thèse de Doctorat Microbiologie, Université d'Angers UFR Sciences.

⁵ Esnault Filet, A. Gadret, JP. Borel, S. Biocalcis, un nouveau procédé de consolidation de sols par voie biologique, Travaux 877, Décembre 2010 Janvier 2011, pp 62-65

⁶ Esnault Filet, A. Gadret, JP. Loygue, M. Borel, S. (2012). Biocalcis and its application for the consolidation of sands. In grouting and deep-mixing 2012, Geotechnical Special Publication 288, vol. 2, pp 1767-1780.

⁷ Van der Star, W. Van Wijngaarden, W.K. van Paassen, L. Van Baalen, L.R. van Zwieten, G. (2011). Stabilization of gravel deposits using microorganisms, Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp 85-90

2.2 LE PRINCIPE DE LA BIOCALCIFICATION

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

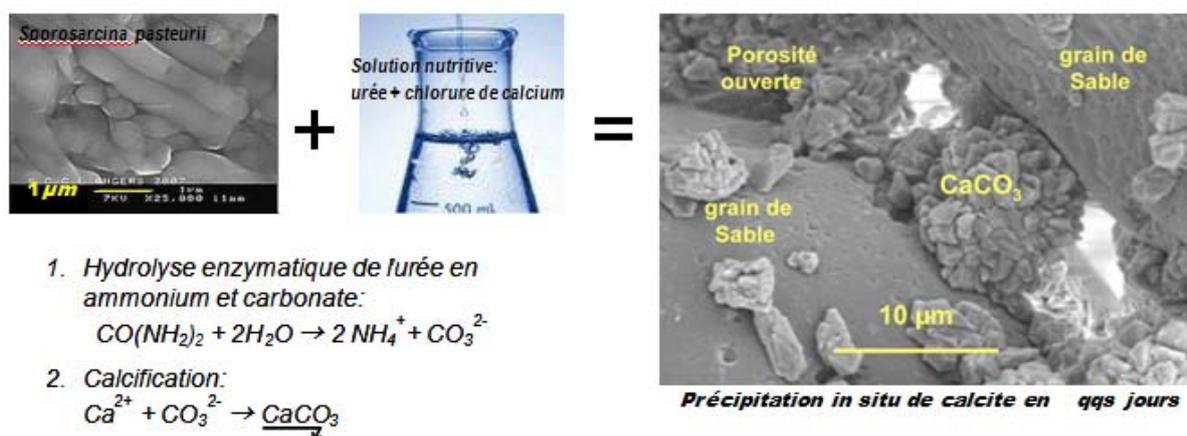
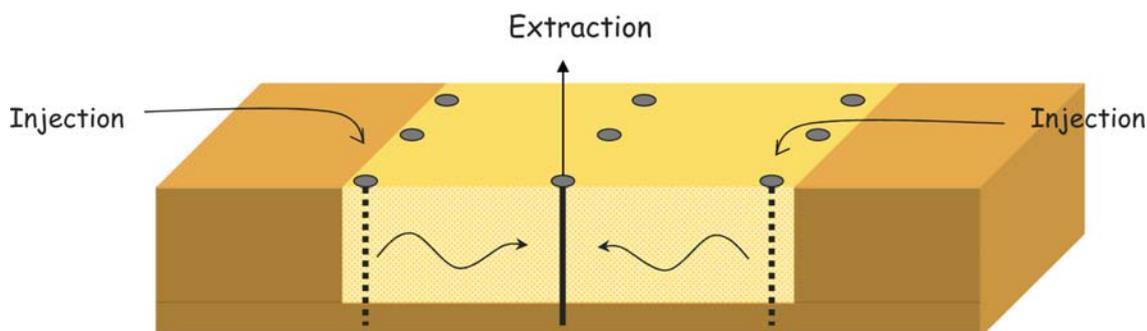


Figure 6 : Principe de la bio-calcification par voie uréolytique

Lors de la mise en œuvre dans un massif de sol, une solution de bactéries est dans un premier temps injectée dans le sol, dans lequel elles se fixent en quelques heures. Une solution calcifiante composée d'urée et de chlorure de calcium est injectée dans un deuxième temps. La précipitation de calcite est alors obtenue en moins de 24h. Selon le taux de bio-calcification recherché, le cycle d'injection de solution calcifiante peut être répété plusieurs fois, le traitement complet étant terminé en moins d'une semaine.



1. Injection des bactéries.
2. Temps de repos de quelques heures pour la fixation des bactéries sur le sol.
3. Injection du milieu calcifiant Urée / CaCl_2 .
4. Temps de repos nécessaire à la réaction de bio-calcification (de 24 à 48 h).

Figure 7 : Principe de mise en œuvre du Biocalcis

Le procédé permet d'atteindre des résistances mécaniques entre 0,1 et quelques MPa. De plus, pour un taux de calcite formé correspondant à cette gamme de résistance, le traitement de bio-calcification ne modifie pas de façon significative les écoulements souterrains car le volume poreux du sol n'est pas rempli contrairement à d'autres procédés d'injection de coulis cimentaire ou chimique.

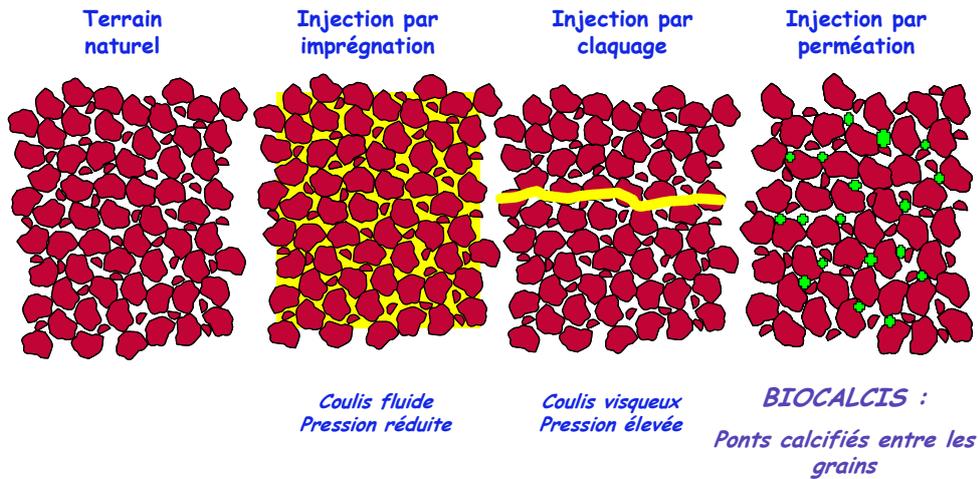


Figure 8 : Principe de fonctionnement de différents procédés d'injection

La mise en œuvre du procédé BIOCALCIS ne nécessite qu'un nombre réduit de points d'injection car les solutions injectées sont fortement pénétrantes. En fonction du type de terrain, des espacements entre forages de l'ordre de 3 à 5 mètres sont envisageables, alors que les procédés classiques d'injection de coulis nécessitent des mailles beaucoup plus serrées, de l'ordre du mètre.

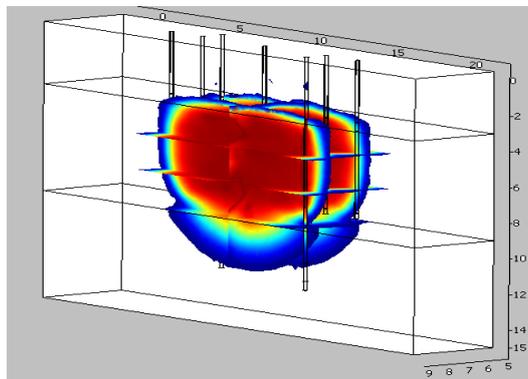


Figure 9. Modélisation d'une injection avec un maillage de 4mx4m

Les bactéries *Sporosarcina pasteurii* sont non pathogènes (classe 1). A l'origine extraites du sol et classées dans différentes banques de souches en France (Institut Pasteur) et à l'international (DSMZ en Allemagne, ATCC aux USA, etc.), leur production en grand volume est assurée par Soletanche Bachy selon un protocole rigoureusement élaboré. L'impact environnemental global du procédé biologique est fortement réduit par rapport à d'autres procédés, en raison de la nature des produits mis en œuvre, de son caractère beaucoup moins intrusif et de sa rapidité d'application.

2.3 DOMAINES D'APPLICATION DU PROCÉDE

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 ceci près que :

- 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 fixées 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.

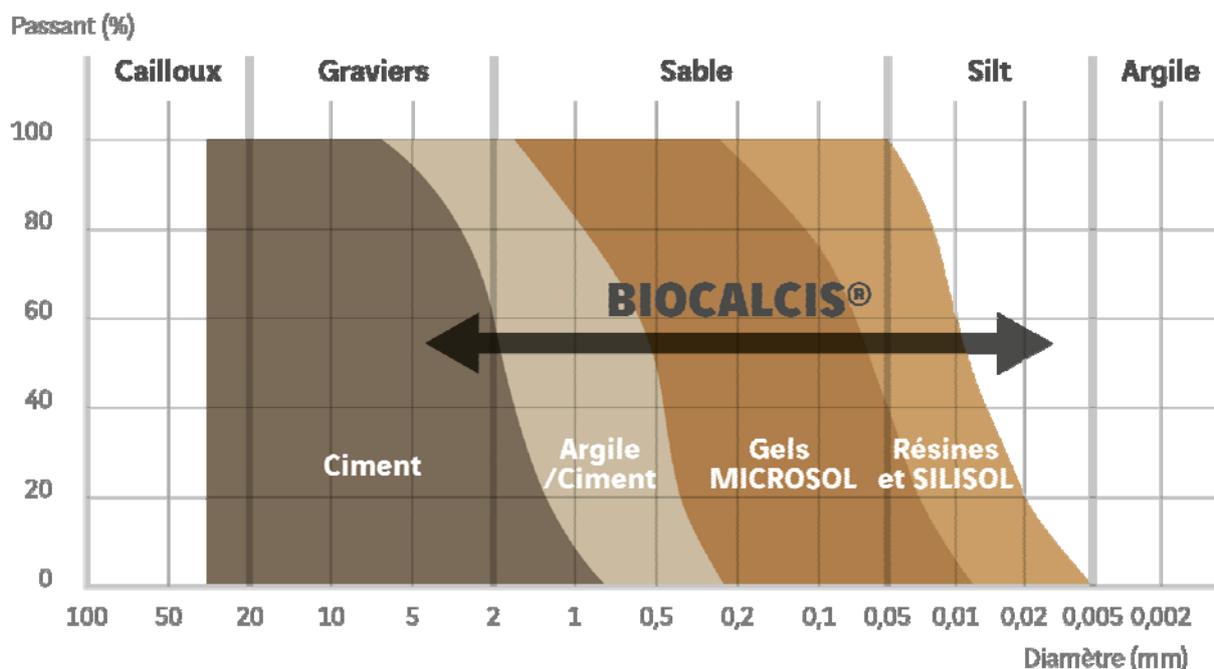


Figure 10 Classification granulométrique des sols et domaine d'utilisation du Biocalcis

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 résistance leur 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.

2.4 LE PROCÉDE BIOCALCIS

En résumé, le procédé BIOCALCIS combine :

- **Un procédé d'injection pour l'amélioration de sols fins**, applicable sans montée en pression dans des terrains non injectables avec des procédés classiques; les bactéries et les solutions calcifiantes peuvent imprégner le terrain sur de longues distances ; ainsi le maillage d'injection est considérablement élargi comparé à celui nécessaire pour injecter des ciments ultrafins ou des produits chimiques dont la propagation est limitée par leur viscosité et leur phénomène de prise chimique ou hydraulique.
- **Un procédé biotechnologique de calcification**, qui permet de cimenter les grains de sol sans modification substantielle de la perméabilité de départ ; en reproduisant in-situ un phénomène naturel de bio-cimentation, la calcite formée dans la matrice du sol permet de considérablement améliorer la cohésion du terrain en place ; ce procédé innovant offre des applications géotechniques très variées, notamment pour la prévention des risques de liquéfaction, le traitement contre l'érosion interne, la réduction de la poussée sur des écrans de soutènement, etc;
- **Les avantages inhérents de la technique d'injection** : grâce à sa grande souplesse d'adaptation, le traitement peut être mis en œuvre dans des temps très courts, dans des zones d'accès difficiles - par exemple sous des bâtiments – et en ciblant spécifiquement les zones de fragilité à traiter.

Tous ces caractères font du procédé BIOCALCIS un procédé innovant et une véritable alternative pour le traitement des sols fins. Le recours à un procédé biotechnologique dans le domaine des Travaux Publics ouvre également de très nombreuses et nouvelles perspectives d'un point de vue écologique, technique et économique.

3 VALIDATIONS DU PROCEDE BIOCALCIS

A l'issue d'une période d'étude et de développement en laboratoire, le procédé BIOCALCIS a fait l'objet de plusieurs essais à l'échelle 1 en maquette et sur site.

Ces essais avaient pour but, à différents niveaux, de valider :

- le protocole de mise en œuvre ;
- la préparation des bactéries à l'échelle industrielle et sur site ;
- la qualité du résultat final en termes des propriétés mécaniques.

et cela grâce aux essais suivants :

- en 2009, des essais d'injection aux Pays-Bas à Papendrecht dans un conteneur d'environ 80 m³,
- en 2013 à Montereau (77), des essais en colonnes de 2,5 m de hauteur,
- en 2014 dans le sud de la France, des essais de convenance sur un site réel, pour le renforcement d'un Mur en Terre Armée.

3.1 PAPENDRECHT (NL), ESSAIS EN CONTENEUR DE SABLE



Figure 11 Essais Conteneur Papendrecht (NL) – vue du massif calcifié après ouverture du plot

Cet essai a été réalisé dans un conteneur rempli d'un volume de l'ordre de 80 m³ de sable saturé sur environ 2 mètres de hauteur, dans lequel 3 lignes d'injection et d'extraction ont été placées.

A l'issue du traitement, le massif calcifié a été découvert et a fait l'objet de nombreux prélèvements pour évaluer l'efficacité de la calcification.

On a ainsi validé la préparation des bactéries, et vérifié leur stabilité dans le temps à l'échelle du chantier. On a également démontré qu'il était possible d'atteindre des distances d'imprégnation de 5 mètres avec un système de circulation par injection extraction.

3.2 ESSAIS EN COLONNES DE 2,5 METRES

Cet essai avait pour but de tester l'injection de biocalcification en condition purement gravitaire sur une hauteur de 2,5 mètres. Il avait également pour objectif de vérifier la faisabilité de méthodes électriques pour le suivi des paramètres de biocalcification en cours d'injection et de méthodes sismiques pour l'évaluation de la résistance finale.

L'objectif de cette colonne était d'atteindre une valeur de résistance à la compression minimale de 500 kPa et une valeur de résistance à la compression moyenne de 1 MPa.

La colonne d'un diamètre de 400 était constituée de 5 éléments tubulaires, centrés les uns par rapport aux autres et maintenus en position par 4 tubes comportant des éléments filetés en partie supérieure et inférieure.



Figure 12 Essais Colonne 2,5 mètres – dispositif et colonne calcifiée après ouverture

A l'issue de l'injection, la colonne a été démoulée et les blocs calcifiés ont été découpés en tronçons qui ont ensuite été carottés pour pouvoir procéder aux essais d'écrasements.

On a ainsi démontré que les objectifs en matière de résistance mécanique ont été atteints et on a déterminé le profil de calcification le long de la colonne.

Il a également été possible de confirmer que le suivi des caractéristiques du traitement pouvait être assuré par des méthodes géophysiques (suivi de la conductivité pour la diffusion des produits – mesures des ondes S pour la résistance mécanique).

3.3 ESSAIS DE CONVENANCE, RENFORCEMENT MUR EN TERRE ARMEE

3.3.1 Contexte du projet

Le projet concerne le renforcement d'un mur de soutènement situé sous la culée du pont d'un échangeur autoroutier, dans le sud de la France. Il s'agit d'un ouvrage construit dans les années 70, constitué d'un mur en remblai compacté et renforcé par des armatures sub-horizontales en acier. Le parement de ce mur est constitué d'écailles en béton, dans lesquelles passent une ou plusieurs épingles en acier connectées aux armatures.

En raison de risques de corrosion des armatures, il est nécessaire d'engager des travaux de renforcement de ce mur en terre armée.

Le site se trouve en zone urbaine, particulièrement difficile d'accès sous la culée du pont, avec le passage d'un tramway en dessous et la présence d'immeubles d'habitation à proximité immédiate. De plus, les travaux doivent être exécutés sans interrompre la circulation de l'autoroute ni celle du tramway.

Le contexte particulier du site ne permet pas le recours à des techniques traditionnelles de traitement :

- La technique de renforcement par clouage n'est pas applicable car l'emprise n'est pas suffisante devant le parement pour y installer la foreuse.
- L'utilisation du jet-grouting est écartée en raison des risques sur la stabilité de l'ouvrage en cas de pression trop forte.
- Le remblai étant constitué d'un matériau compacté de très faible perméabilité (matrice sablo-limoneuse et galets centimétriques à décimétriques ; K inférieure à 10-6m/s), il n'est pas injectable.

Le procédé Biocalcis a été étudié pour effectuer ce renforcement, la faisabilité du procédé ayant préalablement été vérifiée à différentes échelles – laboratoire et colonne pilote - sur le matériau prélevé sur le site.

Des essais de convenance ont ensuite été réalisés sur le terrain en vue de confirmer le dimensionnement final pour les futurs travaux.

3.3.2 Principe et Résultats des essais de convenance (Février – Avril 2014)

Les essais ont consisté en l'implantation de 23 forages horizontaux de 5 mètres de profondeur, répartis sur trois lignes d'injection, avec une ligne de drainage à la base de la zone injectée. Un volume de l'ordre de 100 m³ a ainsi été biocalcifié, sur une bande de 3 mètres de hauteur et 6 mètres de longueur.



Figure 13 Chantier Biocalcis, vue générale de l'implantation

Pour contrôler la qualité du résultat final, une campagne de reconnaissance a été organisée avec la réalisation de carottages et d'essais pressiométriques.



Figure 14 : Bloc calcifié de Biocalcis, issu d'un carottage en grand diamètre

Ces essais ont permis de conclure à la faisabilité du procédé Biocalcis pour le renforcement du mur et à proposer la solution finale qui consistera à fabriquer un bloc en Biocalcis qui fonctionnera en mur poids selon le principe de la figure ci-après.

4 CONCLUSION

La consolidation de sols par voie biologique offre une alternative très intéressante par rapport aux procédés existants, et plus particulièrement dans l'injection des sols fins à très fins.

Cette écotechnologie innovante imite les processus naturels de calcification pour cimenter le sol en place tout en laissant la porosité ouverte. **Les développements récents ont permis de mettre au point et de valider le procédé pour des applications sous nappe en équilibre hydrostatique et hors nappe.**

Pour les maîtres d'ouvrages, il s'agit d'étendre considérablement le champ des possibilités en matière par exemple de lutte contre la liquéfaction des sols dans des zones difficilement accessibles comme à l'intérieur ou sous des bâtiments existants ou pour contrôler efficacement les phénomènes d'érosion interne sur différents types d'ouvrages comme des digues, avec un procédé à la fois durable, efficace, non intrusif, qui permet de traiter les points singuliers.

C'est un **procédé qui offre un large champ d'application** pour toutes applications réclamant une augmentation de la résistance du sol.

Le renforcement par Biocalcis ne perturbe pas le régime hydraulique au niveau de la zone traitée alors que les méthodes classiques, comme la paroi étanche ou l'injection bloquent tous les écoulements, y compris ceux de l'aquifère sous-jacent.

C'est un **procédé respectueux de l'environnement**. Biocalcis présente un bilan carbone favorable comparé aux techniques existantes. On va substituer à d'importants volumes de ciment (fabrication : 0,60 kg éq. CO₂/kg de produit) un mélange de bactéries calcifiantes et de carbonates de calcium.

Soletanche Bachy poursuit la recherche pour étendre le domaine d'application aux digues en charge, dans le cadre du projet BOREAL (FUI 16), réalisé en collaboration avec EDF, CNR, GéoPhyconsult, Enoveo, et les universités d'Angers (laboratoire de Microbiogéologie) et de Grenoble (LTHE – 3SR).

L'entreprise participe également à différents groupes de travail européens et internationaux dans le domaine de l'utilisation des biotechnologies pour des applications en géotechnique. Ce thème va au-delà de la seule application de la biocalcification car il englobe aussi tous les autres principes de bio-cimentation et d'étanchéité.

Soletanche Bachy est la seule entreprise de TP à maîtriser ces connaissances qui vont se développer à l'avenir dans notre secteur d'activité sous l'impulsion de ces réseaux.

Le procédé a fait l'objet d'un dépôt de brevet en France (FR2985746) et à l'international (WO2013107977).