

BIOCALCIS[®], LE RENFORCEMENT DES SOLS PAR CIMENTATION BIOLOGIQUE

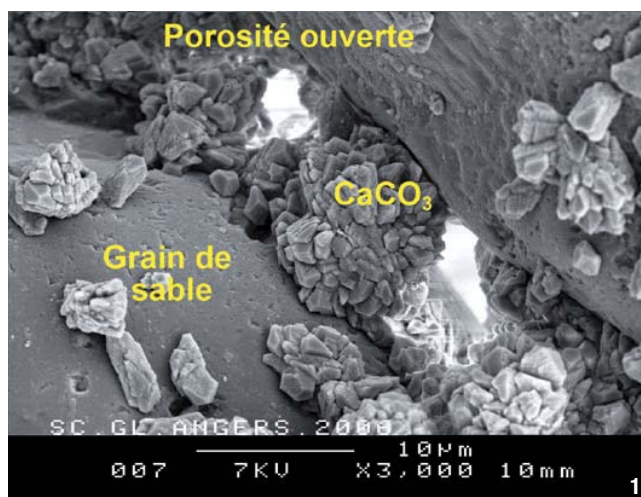
AUTEURS : ANNETTE ESNAULT FILET, CHEF DE PROJET R&D, SOLETANCHE BACHY - IRA GUTJAHR, CHEF DE PROJET BE, SOLETANCHE BACHY - LESLIE SAPIN, INGÉNIEUR PROCÉDÉ, SOLETANCHE BACHY - LOUIS LÉPINE, INGÉNIEUR BE, SOLETANCHE BACHY

LE BIOMIMÉTISME DANS LE DOMAINE DE LA GÉOTECHNIQUE ENTRAÎNE UN CHANGEMENT DE PARADIGME ET DES INNOVATIONS DE RUPTURE DANS LES TRAVAUX PUBLICS. LE BIOMIMÉTISME EST SOURCE D'INSPIRATION ET D'AMÉLIORATION DANS DES DOMAINES AUSSI VARIÉS QUE L'AÉRONAUTIQUE, LE MÉDICAL OU ENCORE LA MICROMÉCANIQUE. QUI AURAIT IMAGINÉ, IL Y A ENCORE 10 ANS, QUE LE SECTEUR DE LA GÉOTECHNIQUE SERAIT LUI AUSSI CONCERNÉ UN JOUR PAR CETTE NOUVELLE APPROCHE ? ET QU'UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE PROCÉDÉS ET DE SOLUTIONS BIO GÉOTECHNIQUES INSPIRÉS PAR LA NATURE TRANSFORMERAIT LA CONCEPTION, LA CONSTRUCTION, LA MISE EN ŒUVRE OU ENCORE LA MAINTENANCE D'INFRASTRUCTURES DURABLE ET RÉSILIENTES ? LE PROCÉDÉ BIOCALCIS[®] EST PRÉCURSEUR DANS CE DOMAINE ET SE DISTINGUE PAR LE RECOURS À DES BIOTECHNOLOGIES POUR CONSOLIDER LE SOL PAR VOIE BIOLOGIQUE.

GÉNÉRALITÉS

La biocimentation est un nouveau principe d'injection utilisé pour le renforcement des sols. Soletanche Bachy détient plusieurs brevets sur la mise en œuvre industrielle du procédé basé sur l'utilisation de bactéries non pathogènes extraites du milieu naturel. Ces bactéries vont agir sur une solution calcifiante et conduire à la formation de calcite - une forme minéralisée de carbonate de calcium - qui agira in situ comme un ciment biologique stable et pérenne.

Les fluides injectés, suspension bactérienne et solution calcifiante, sont injectés sans pression en raison de leur viscosité proche de celle de l'eau.



1- Image de la calcite CaCO_3 au Microscope Électronique à Balayage.

1- Image of calcite CaCO_3 by Scanning Electron Microscope.

En créant des ponts de calcite entre les grains, Biocalcis[®] apporte une cohésion à un sol granulaire initialement meuble sans changement significatif de sa porosité initiale, comme montré sur

l'image au microscope électronique à balayage (MEB) de la figure 1. Le résultat final se traduit par la transformation du sol en un massif cohérent de type grès-calcaire. Différents niveaux de calcification peuvent être obtenus en fon-

tion des dosages utilisés, les gammes de Rc les plus courantes étant comprises entre 100 et 500 kPa environ. Une caractéristique très intéressante du procédé est qu'il permet de garder la porosité ouverte sans modification

significative de la perméabilité du milieu après traitement, à la différence des autres procédés d'injection dont les principes sont illustrés en figure 2. Comme montré dans la figure 3, Biocalcis® peut être utilisé pour une

large gamme de granulométries de sols, y compris pour des granulométries hétérogènes incorporant une partie de graviers et/ou de silts.

Le procédé Biocalcis® couvre l'ensemble des étapes de mise en œuvre, depuis la phase de culture des bactéries, leur injection sur chantier, la gestion et le contrôle de l'ensemble des fluides de calcification.

Un outil de modélisation a été spécialement développé à l'aide du logiciel Comsol, pour optimiser le dimensionnement en fonction des caractéristiques du site et des objectifs de traitement. Un exemple est donné figure 4, pour une mise en œuvre sous nappe par circulation à l'aide d'un réseau de puits d'injection et d'extraction. Le recours à un outil numérique permettant de modéliser le procédé de bio-calcification est un élément important afin de définir un protocole de traitement adapté au site.

Le modèle permet de coupler l'écoulement poreux, le transport des réactifs et leurs produits de réaction, la fixation et désactivation des bactéries, le profil de calcification.

Les paramètres de mise en œuvre peuvent ainsi être optimisés : maillage des forages, débits d'injection, concentration de la suspension bactérienne, concentration des solutions calcifiantes, extraction des fluides, etc.

Une représentation des résultats d'une modélisation est illustrée figure 5, montrant les contours d'un traitement de biocalcification obtenus à partir de deux forages et une injection sous flux continu. ▽

2- Différents principes d'injection.

3- Domaines d'applications du Biocalcis®.

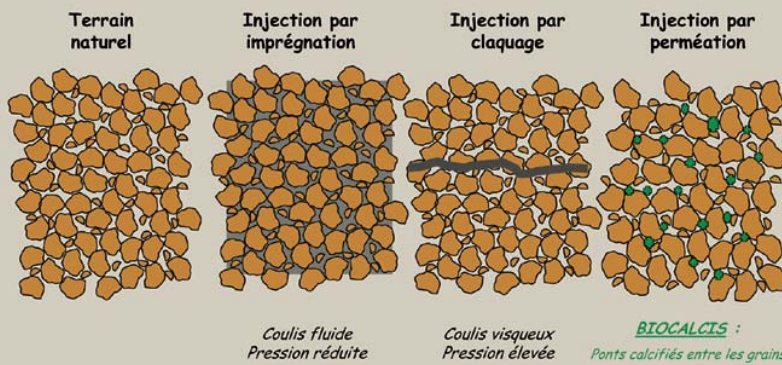
4- Principe de mise en œuvre sous nappe par injection & extraction.

2- Various injection techniques.

3- Fields of application of Biocalcis®.

4- Technique of application under groundwater by injection & extraction.

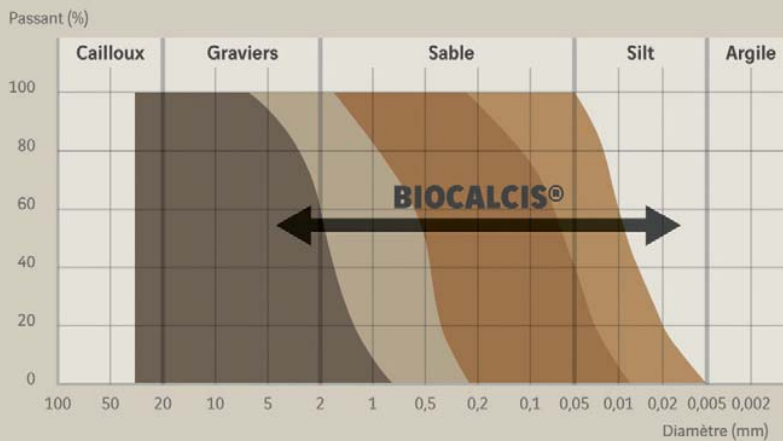
DIFFÉRENTS PRINCIPES D'INJECTION



© SOLETANCHE BACHY

2

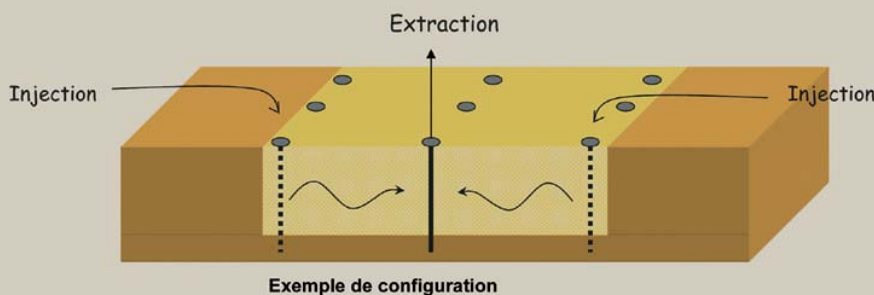
DOMAINES D'APPLICATIONS DU BIOCALCIS®



© SOLETANCHE BACHY

3

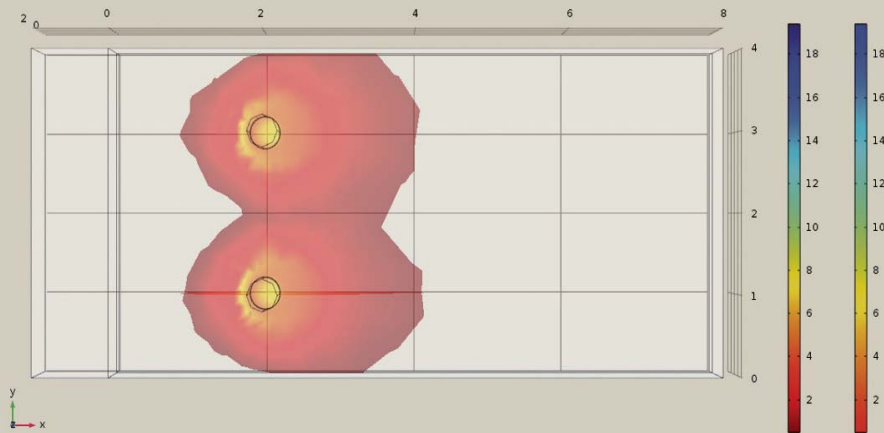
PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE SOUS NAPPE PAR INJECTION & EXTRACTION



© SOLETANCHE BACHY

4

MODÉLISATION COMSOL, EXEMPLE DE CAS HOMOGÈNE AVEC COMPÉTITION ENTRE ÉCOULEMENT D'INJECTION ET ÉCOULEMENT NATUREL



5
© SOLEFANCHÉ BACHY

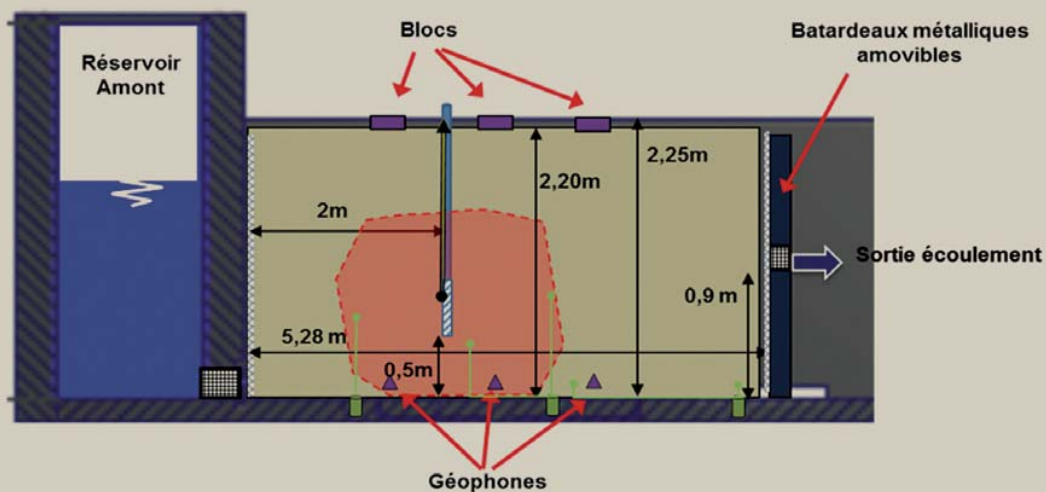
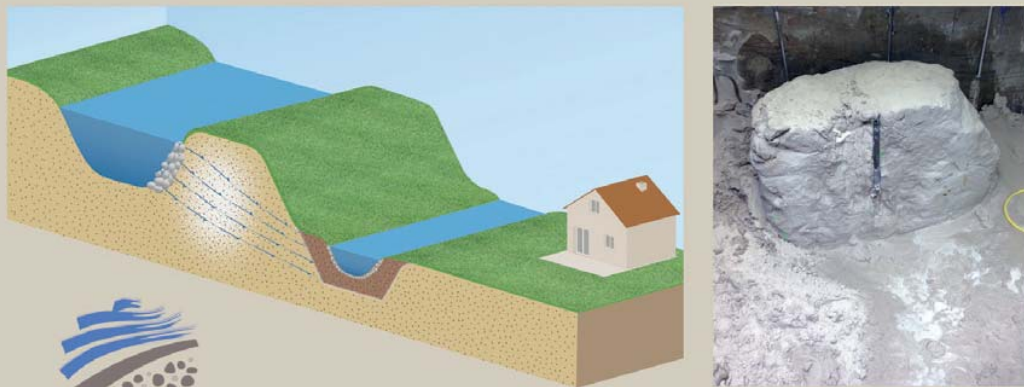
5- Modélisation Comsol, exemple de cas homogène avec compétition entre écoulement d'injection et écoulement naturel.

6- Projet BORÉAL pour le renforcement des digues en charge - Essais modèle physique échelle 1 (CNR - CACOH) sous flux continu.

5- Comsol model, an example of a homogeneous case with competition between injection flow and natural flow.

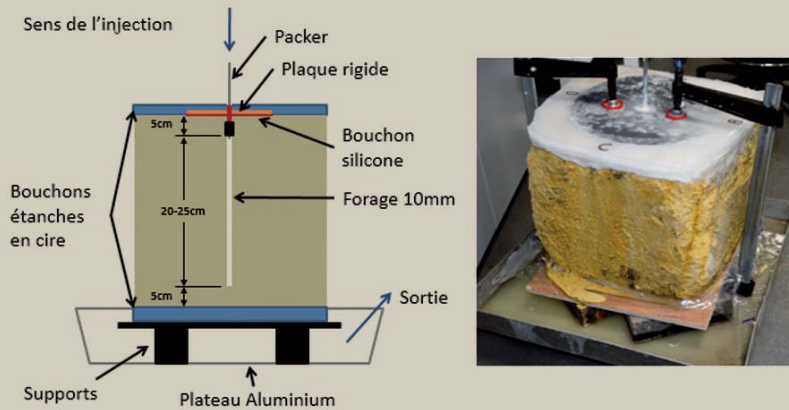
6- BORÉAL project for reinforcement of dykes under pressure - Full-scale physical model tests (CNR - CACOH) under continuous flow.

PROJET BORÉAL POUR LE RENFORCEMENT DES DIGUES EN CHARGE - ESSAIS MODÈLE PHYSIQUE ÉCHELLE 1 (CNR - CACOH) SOUS FLUX CONTINU



6
© SOLEFANCHÉ BACHY / © SITE GEOPHYCONSULT

DISPOSITIF D'INJECTION DU BLOC CALCAIRE



© SOLETANCHE BACHY

7

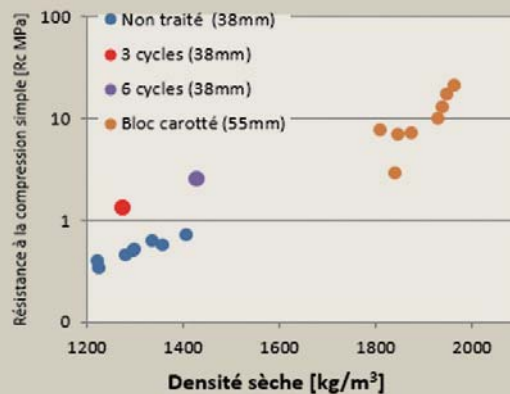
7- Dispositif d'injection du bloc calcaire.

8- Résistance mécanique des échantillons avant et après traitement, en fonction de la densité sèche.

7- Limestone block injection device.

8- Mechanical strength of samples before and after treatment, according to the dry density.

RÉSISTANCE MÉCANIQUE DES ÉCHANTILLONS AVANT ET APRÈS TRAITEMENT, EN FONCTION DE LA DENSITÉ SÈCHE



© SOLETANCHE BACHY

8

APPLICATIONS TYPIQUES

Les applications typiques du procédé concernent principalement :

→ Les traitements contre la liquéfaction des sols : il est possible de réduire les risques de liquéfaction de sables lâches en augmentant leur résistance au cisaillement grâce à la création de ponts de calcite entre les grains qui transforment le sol granulaire en un massif de sol cohérent caractérisé par sa résistance à la compression simple et sa cohésion C_u . Pour cette application, des C_u de quelques dizaines de kPa sont suffisants et ces valeurs sont facilement atteignables par biocalcification. La perméabilité étant inchangée à l'issue du traitement,

il n'y a pas d'obstacle à la dissipation des pressions interstitielles en cas de séisme.

→ Les traitements contre les risques d'érosion dans des digues ou leur fondation. Le lessivage de fines particules entraînant l'érosion interne (entre des silts et des graviers par exemple) ou les problèmes de suffusion (érosion sélective de fines particules dans une matrice plus grossière) pourraient être évités car les fines particules seront fixées entre elles ou sur des particules plus grossières. Dans les deux cas de figure, en raison de gradients hydrauliques potentiellement importants, il est nécessaire de procéder à des adaptations du procédé pour le rendre efficace sous écoulement

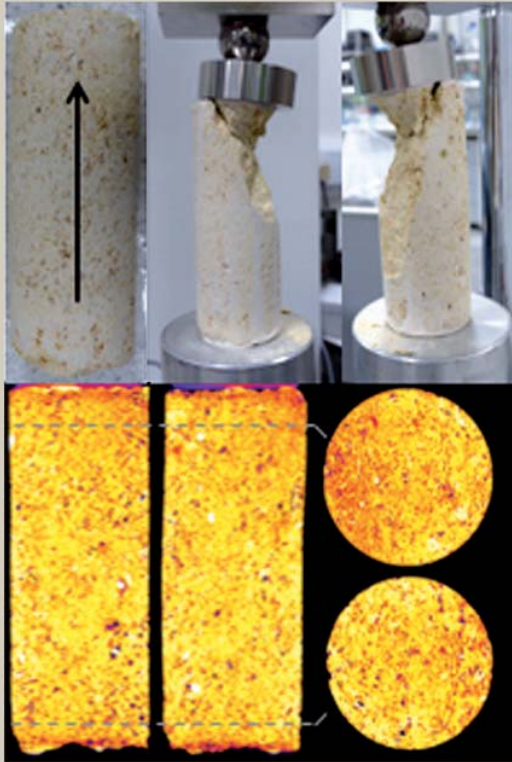
hydraulique continu. C'est l'un des thèmes abordés dans le cadre du projet de recherche FUI BORÉAL coordonné par Soletanche Bachy et réalisé en partenariat avec EDF, CNR, geophyConsult, Enoveo et des laboratoires académiques des universités d'Angers (laboratoire de MicroBioGéologie) et de Grenoble (LTHE, 3SR) au cours duquel des essais à l'échelle 1 sont réalisés. La figure 6 illustre la thématique du projet sur les digues et montre une coupe du modèle physique installé au laboratoire CACOH de la CNR à Lyon, ainsi que la photo d'un bulbe de sable biocalcifié de 2 m de diamètre obtenu dans ce dispositif suite aux premiers essais d'injection.

→ L'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols, afin de réduire la poussée des terres ou d'augmenter la butée, ou pour toute autre application de renforcement nécessitant le traitement de sols fins. Par exemple, pour l'approfondissement des murs de quai existants, la biocalcification est une alternative intéressante de traitements, notamment dans des zones difficiles d'accès ou en présence de réseaux enterrés. Il s'agira de créer un massif de sol pour lequel les valeurs de cohésion/résistance à la compression simple à atteindre seront plus faibles que pour les traitements en soil-mixing par exemple. De plus, pour l'amélioration de la butée devant un ouvrage existant, un traitement par biocalcification permettra, de par sa nature, de s'affranchir de l'ajout d'éléments structurels (profilés, dalles, ...).

→ Les résultats obtenus pour ces applications en géotechnique ont amené l'entreprise à tester l'efficacité du Biocalcis® dans un tout autre domaine, celui du renforcement mécanique de piliers en calcaire d'un monument historique. Des essais ont été réalisés dans un bloc de 90 kg injecté à cœur à l'aide d'un forage de 10 mm selon un assemblage expérimental montré sur la figure 7. La précipitation de calcite in situ par voie biologique permet en effet d'accroître considérablement la résistance mécanique de cette roche calcaire altérée, en passant d'une R_c de l'ordre de 1 MPa avant traitement à une valeur supérieure à 10 MPa. La figure 8 montre la relation entre la résistance mécanique et la densité sèche du matériau et illustre l'évolution de la résistance avant et après traitement. En complément, les propriétés microstructurales du matériau avant et après traitement ont été étudiées par micro-tomographie RX, technique d'imagerie par absorption de rayons X. Comme montré dans l'exemple de la figure 9, en reconstituant l'image 3D d'un échantillon, on peut mettre en évidence l'évolution de sa microporosité et de sa densité avant et après calcification.

Cette solution, encore en phase d'optimisation, permettrait de garantir une solution pérenne dans le temps en régénérant le calcaire dans la masse. Elle est de plus respectueuse de l'environnement architectural du site car elle n'altère pas l'aspect de la pierre. ▷

TOMOGRAPHIE RX D'UN ÉCHANTILLON
APRÈS BIOCALCIFICATION



9

© SOLETANCHE BACHY



10
© SOLETANCHE BACHY

**REINFORCEMENT D'UN MUR
EN REMBLAI RENFORCÉ**

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 en sol renforcé, construit dans les années 70, constitué d'un mur en remblai compacté et renforcé par des armatures subhorizontales en acier. Le parement de ce mur est constitué d'écaillés 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.



11
© SOLETANCHE BACHY

9- Tomographie RX d'un échantillon après biocalcification.

10- Chantier Biocalcis®, vue générale de l'implantation.

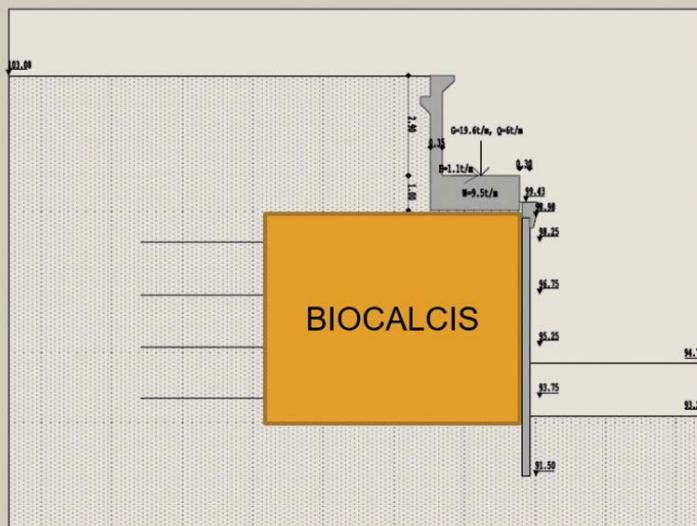
11- Bloc calcifié de Biocalcis®, issu d'un carottage en grand diamètre.

9- X-ray tomography of a sample after biocalcification.

10- Biocalcis® project, general view of the layout.

11- Calcified block of Biocalcis®, coming from large-diameter core sampling.

PRINCIPE DU RENFORCEMENT, MUR POIDS BIOCALCIS®



© SOLETANCHE BACHY

12

La technique de renforcement par clouage n'est pas applicable car l'emprise devant le parement n'est pas suffisante pour y installer la foreuse.

L'utilisation du jet-grouting est écartée en raison des risques sur la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des pressions d'injection trop fortes.

Le remblai étant constitué d'un matériau compacté de très faible perméabilité (matrice sablo-limoneuse et galets centimétriques à décimétriques ; K inférieure à 10^{-6} m/s), il n'est pas injectable avec les procédés classiques.

Le procédé Biocalcis® a été étudié pour effectuer ce renforcement, la faisabilité du procédé ayant préalablement été vérifiée à différentes échelles - labora-

12- Principe du renforcement, mur poids Biocalcis®.

12- Renforcement technique, Biocalcis® gravity wall.

toire 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.

Les essais ont consisté en l'implantation de 23 forages horizontaux de 5 m de profondeur, répartis sur trois lignes d'injection, avec une ligne de drainage à la base de la zone injectée (figure 10).

Un volume de l'ordre de 100 m^3 a ainsi été biocalcifié, sur une bande de 3 m de hauteur et 6 m de longueur.

Pour contrôler la qualité du résultat final, une campagne de reconnaissance a été organisée avec la réalisation de carottages (figure 11) et d'essais pressiométriques.

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 fabri-

quer un bloc biocalcifié qui fonctionnera en mur poids selon le principe de la figure 12.

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 écotecnologie 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'ouvrage, 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.

Le procédé présente un bilan carbone favorable comparé aux techniques existantes nécessitant de grandes quantités de ciment. □

ABSTRACT

BIOCALCIS®, SOIL REINFORCEMENT BY BIOLOGICAL CEMENTATION

ANNETTE ESNAULT FILET, SOLETANCHE BACHY - IRA GUTJAHR, SOLETANCHE BACHY - LESLIE SAPIN, SOLETANCHE BACHY - LOUIS LÉPINE, SOLETANCHE BACHY

The rapid development of biotechnologies and the appearance of new environmental constraints have led scientists to draw inspiration from natural biological phenomena to design new processes to replace existing materials with a large carbon footprint. Biological soil cementation is a concrete example of these recent developments. Soletanche Bachy has developed a new biocementation injection process called Biocalcis®, tested and validated on an industrial scale on site. This process provides new solutions, notably in the area of prevention of soil liquefaction or internal erosion and for any consolidation application in fine ground which cannot be treated with conventional processes. □

BIOCALCIS®, REFUERZO DE SUELOS POR CIMENTACIÓN BIOLÓGICA

ANNETTE ESNAULT FILET, SOLETANCHE BACHY - IRA GUTJAHR, SOLETANCHE BACHY - LESLIE SAPIN, SOLETANCHE BACHY - LOUIS LÉPINE, SOLETANCHE BACHY

El auge de las biotecnologías y la aparición de nuevas limitaciones medioambientales han llevado a los científicos a inspirarse en fenómenos biológicos naturales para diseñar nuevos procedimientos de sustitución de los materiales existentes con una fuerte huella de carbono. La cimentación de suelos por vía biológica es un ejemplo concreto de estos recientes avances. Soletanche Bachy ha creado un nuevo procedimiento de inyección de biocimentación, denominado Biocalcis®, probado y validado a escala industrial in-situ. Esta técnica aporta nuevas soluciones, en especial en el ámbito de la prevención de la licuefacción o la erosión interna de los suelos, y para cualquier aplicación de consolidación en terrenos finos que no pueda tratarse con los procedimientos convencionales. □