

Références d'amélioration de sol par Biocalcis®

Biocalcis® soil improvement references

Annette ESNAULT FILET, Leslie SAPIN, Basile LECONTE, Memphis LOYGUE*, Régis LE GAL.

Soletanche Bachy, Rueil Malmaison, France

**memphis.loygue@soletanche-bachy.com*

RESUME : Le procédé Biocalcis® permet d'améliorer la résistance mécanique de terrains de manière pérenne selon un processus rapide et naturel de bio-calcification. Il est adapté à une large gamme de terrain notamment ceux de faible perméabilité dont la porosité n'est généralement pas accessible aux coulis de ciment mêmes ultrafins. Ce procédé, mis en œuvre par injection, permet d'augmenter la cohésion des terrains de plusieurs dizaines de kPa tout en maintenant leur perméabilité initiale, préservant ainsi l'hydraulique sous-terrain. Le procédé présente une large gamme d'applications : amélioration de massif de sol, traitement anti-liquéfaction/anti-érosion et renforcement d'ouvrages existants. L'article présente deux projets récemment réalisés par Soletanche Bachy mettant en œuvre le procédé Biocalcis®.

- Les travaux de renforcement de la culée du Pont René Thinat à Orléans.

Le procédé Biocalcis® a été mis en œuvre dans le but d'apporter de la cohésion aux remblais existants constitués d'un mur en remblais renforcés. Ce procédé est particulièrement adapté aux ouvrages fragilisés en raison de l'absence de risque de montée en pression lors des injections.

Une campagne d'injection Biocalcis® a été mise en œuvre en demi-chaussées par des forages sub-verticaux au travers des armatures en acier de l'ouvrage et au plus proche des écailles du mur. Les travaux, achevés avec succès en 2022, ont permis la sécurisation de cet ouvrage.

- Les travaux d'amélioration de sol pour le creusement du rameau du puits PTR du Métro de Toulouse.

Le procédé Biocalcis® a été mis en œuvre préalablement au creusement du rameau.

Une campagne d'injection Biocalcis® a été effectuée depuis le puits PTR afin d'apporter de la cohésion aux Molasses Grossières situées en voute du futur rameau et susceptibles d'être soumises à un gradient hydraulique et à des instabilités lors du creusement. Les travaux d'injection, réalisés à l'été 2025, ont permis le creusement du rameau en sécurité.

ABSTRACT: The Biocalcis® process improves the mechanical strength of soils in a sustainable way through a rapid and natural bio-calcification process. It is suitable for a wide range of soils, particularly those with low permeability whose porosity is generally inaccessible to cement grouts, even ultra-fine ones. This grouted-based process increases soil cohesion by several tens of kPa while keeping their initial permeability, thus preserving underground hydraulics. The process offers a wide range of applications: soil mass improvement, anti-liquefaction/anti-erosion treatment, and reinforcement of existing structures. This article presents two recent projects carried out by Soletanche Bachy implementing the Biocalcis® process.

- The René Thinat Bridge in Orléans (France) - Reinforcement works of bridge abutment.

The Biocalcis® process was implemented to provide cohesion to the existing embankments, which consisted of a reinforced backfill wall. This process is particularly well-suited for weakened structures thanks to the absence of pressure build-up risk during grouting.

A Biocalcis® grouting campaign was carried out in half-carriageways through sub-vertical drillings across the steel reinforcements of the structure and as close as possible to the wall panels. The works, successfully completed in 2022, ensured the safety of this structure.

- The PTR escape adit - Toulouse Metro Line C – Package 4 – Soil improvement for NATM mining works.

The Biocalcis® process was implemented prior to the PTR adit NATM mining works. Biocalcis® grouting works were carried out from the PTR escape shaft through sub-horizontal drillings under BOP in order to provide cohesion to the compact clean sand Molasse soil located at the adit crown, which could be subjected to hydraulic gradients and instabilities during excavation. The grouting works, carried out in the summer of 2025, enabled safe excavation of the adit.

Mots clés : Biocalcification; injection ; remblai renforcé ; Molasses ; Cohésion.

1 RAPPEL DES PRINCIPES DE BIOCALCIFICATION.

1.1 Principes généraux :

Le procédé Biocalcis® est un procédé d'injection par biominéralisation. On regroupe sous ce terme l'ensemble des processus conduisant à la formation de dépôts minéraux sous l'action d'organismes vivants tels que des bactéries, champignons, etc.

Dans le cas de la biocalcification et en fonction des conditions de réaction, le biominéral formé est généralement sous forme cristalline anhydre. Il en existe trois formes différentes, de stabilité thermodynamique croissante comme listées ci-après :

- La vaterite de structure hexagonale,
- L'aragonite de structure orthorhombique,
- La calcite de structure rhomboédrique.

La vaterite se forme souvent en premier, pour évoluer très rapidement vers la calcite. En revanche lorsqu'il s'agit d'aragonite, sa transformation en calcite est plus lente en raison de la faible différence de solubilité entre les deux phases.

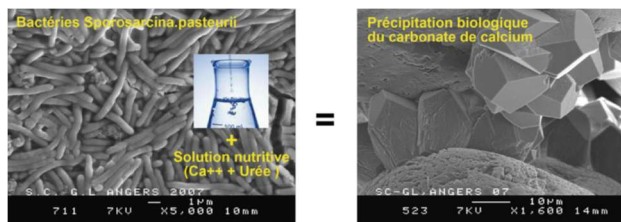


Figure 1. Principe général de la biocalcification (MEB)

La calcite peut être obtenue biologiquement selon différentes voies métaboliques, c'est-à-dire à partir de différentes familles de bactéries agissant selon des principes de réactions différents plus ou moins rapides.

Dans le cas du procédé Biocalcis®, la bactérie calcifiante utilisée est de nature uréolytique. Une seule souche *Sporosarcina pasteurii* que l'on trouve naturellement dans les sols est utilisée pour garantir une meilleure stabilité biologique. Elle est bien sûr non pathogène et agit en présence d'une solution calcifiante composée d'un mélange d'urée et d'un sel de calcium. La réaction de précipitation de la calcite est catalysée par une enzyme présente à l'intérieur même de la bactérie. (Figure 1)

Les cristaux de calcite, dont la taille peut atteindre plusieurs dizaines de microns, vont former des ponts calcifiés entre les grains du matériau traité et conduire ainsi à l'augmentation de sa cohésion et par conséquent, de sa résistance mécanique. À l'issue du traitement, la perméabilité du matériau n'est pas

réduite de façon significative du fait que la porosité n'est que faiblement diminuée. (Figure 2).

Par rapport à un homologue purement minéral obtenu par voie chimique, l'adhésion de la calcite sur le grain de sol est fortement augmentée grâce à la bactérie qui agit comme un site de nucléation. La qualité mécanique du biominéral formé repose donc également sur les propriétés et la stabilité des bactéries utilisées.

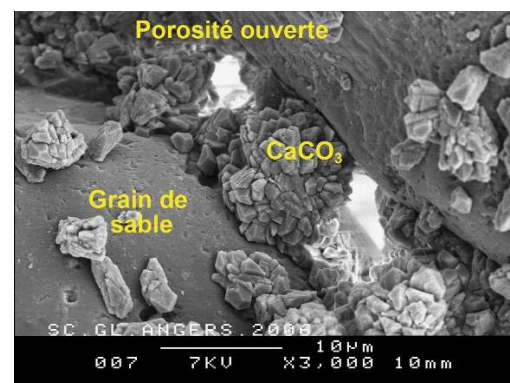


Figure 2. Pontage des grains par la calcite (MEB)

1.2 Principe de mise en œuvre :

Le procédé Biocalcis®, développé et breveté par Soletanche Bachy, est mis en œuvre pour des applications très variées telles que des traitements contre la liquéfaction, l'érosion interne, la réduction de poussée active (remblais renforcés, quais), la stabilisation de talus, l'amélioration de sol, la restauration de monuments historiques, etc.

En effet, de par la nature des réactions de biocalcification à l'œuvre, ce procédé peut être mis en œuvre dans des terrains sous nappe et hors nappe conduisant à une amélioration pérenne des matériaux injectés.

De plus, compte tenu de la taille micrométrique de la bactérie, l'injection se fait avec peu de pression et permet ainsi d'injecter des terrains très fins-typiquement jusqu'à 10^{-6} m/s de perméabilité - non injectables avec des traitements d'injection classiques à base de micro-ciments et dont le traitement via des produits chimiques s'évère souvent coûteux et de pérennité limitée.

Au moment de l'injection, les produits (bactéries et solution calcifiante) sont injectés en deux phases pour garantir une meilleure efficacité de la réaction :

- Dans un premier temps, les bactéries sont injectées à un débit spécifiquement choisi en fonction de la distance d'imprégnation à atteindre. Elles sont laissées au repos dans le

terrain pour quelques heures afin qu'elles se fixent physiquement au sol.

- Dans un deuxième temps, la solution calcifiante est injectée à un débit spécifiquement choisi en fonction des cinétiques de réaction recherchées.

Selon la quantité de calcite recherchée, le cycle d'injection de solution calcifiante et de bactéries peut être répété une nouvelle fois. Les propriétés physiques et mécaniques du sol traité sont atteintes en un ou deux jours à l'issue du traitement et n'évoluent plus dans le temps. En fonction des paramètres de traitement, des résistances mécaniques de quelques centaines de kPa (comme une argile dure) à plusieurs MPa (comme un béton) peuvent être obtenues. On soulignera cependant que ces très fortes résistances mécaniques sont obtenues en multipliant considérablement les cycles d'injections et que ces applications ne sont pas visées par le procédé Biocalcis®.

Le procédé est adapté spécifiquement pour chaque cas d'utilisation grâce au savoir-faire de l'entreprise qui s'appuie sur l'ensemble de ses experts techniques au niveau bureau d'études, service méthodes et de son laboratoire interne. La production des bactéries à l'échelle industrielle est assurée selon un protocole développé par ce dernier.

Soletanche Bachy dispose d'une expérience et d'un savoir-faire important dans le domaine de la biocalcification. Ainsi pour chaque projet, il est possible de s'appuyer sur une base de données constituées à partir d'essais de laboratoire et d'essais Pilote ainsi que des mises en œuvre sur sites réels.

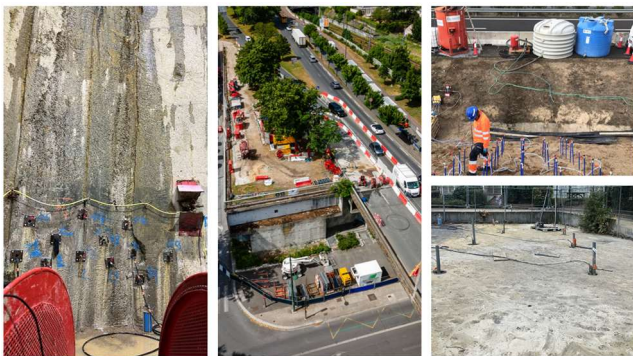


Figure 3. Chantiers Biocalcis®, Exemples de mises en œuvre sur différents sites

2 TRAITEMENT DU PONT THINAT, ORLEANS (45) – FRANCE.

2.1 Présentation générale :

Le pont René Thinat permet le franchissement de la Loire entre Orléans et Saint-Jean-le-Blanc (45). Construit en 1974, c'est un axe de circulation très important pour la ville avec deux voies de circulation dans chaque sens, complétées par une piste cyclable.

Sa culée nord, située à Orléans, est constituée d'un mur en remblai renforcé. La rampe est soutenue par deux murs en retour (murs n°1 et n°2, de plus de 100 m de longueur chacun), et un mur de front de l'ordre de 32 m.

En 2019, le pôle Ouvrages d'Art d'Orléans Métropole a mené une campagne de reconnaissance qui a mis en évidence une corrosion assez prononcée au niveau des renforcements en acier du remblai, ce qui est une pathologie classique pour des murs datant des années 70. Ainsi, des travaux de renforcement se font nécessaires pour sécuriser un des plus importants axes de circulation d'Orléans.

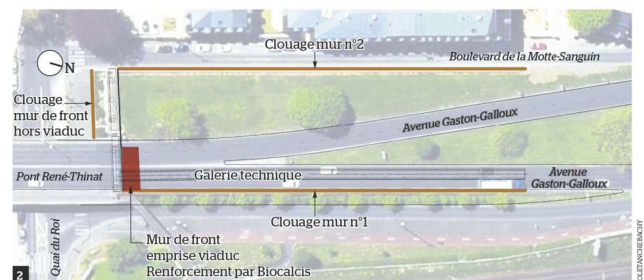


Figure 4. Pont Thinat – Implantation des travaux de réparation

2.2 Contexte géotechnique et solutions mises en œuvre :

Les travaux de réparation ont fait appel à deux techniques différentes, avec un renforcement par clouage sur les murs 1 et 2 et la moitié du mur de front tandis que sur l'autre moitié de ce mur, c'est un procédé d'injection qui devait être appliqué.

En effet, la présence du tablier de pont devant le mur de front est une zone particulièrement sensible car elle reprend les efforts liés à la circulation. L'exécution des clous dans cette zone aurait engendré la création d'ouvertures, ce qui n'était pas acceptable d'un point de vue stabilité.

La solution Biocalcis® a été retenue par le Maître d'Ouvrage comme technique complémentaire d'injection, en raison des garanties qu'elle offrait en matière de sécurité de mise en œuvre (sans pression), durabilité et bilan carbone, par rapport à d'autres procédés traditionnels à base de ciment ou de résine.

Le renforcement par clouage a consisté à installer un total de 350 clous forés en diamètre 115 mm constitués d'une barre en acier de 35 mm de diamètre avec une longueur maximale de 6,70 m dans le sol, mis en place au centre de chaque écaille.

Seuls les travaux Biocalcis® sont présentés plus en détails ci-après. Ils ont pu être exécutés en sécurité depuis les voies routières en gardant un itinéraire continu dans les deux sens de circulation pendant toute la durée du chantier.

2.3 Objectifs de traitement :

D'un point de vue mécanique, on recherche la création d'un massif cohésif autostable, qui conférera au remblai un comportement à la fois frottant et cohésif.

Deux approches de calcul ont été utilisées pour déterminer les dimensions de la zone de traitement et la valeur de cohésion à atteindre :

- d'une part, l'annulation de la poussée active sur les écailles du mur en Remblai renforcé,
- d'autre part, la vérification de la stabilité du massif traité par Biocalcis® en considérant ce massif comme un mur poids.

Les calculs ont permis de déterminer que le traitement Biocalcis® doit élever la cohésion des remblais en place originaires nulle, à 50 kPa.

C'est sur la base de cette valeur que le taux théorique de calcite à produire a été déterminé.

Un protocole de mise en œuvre a été déterminé impliquant le choix au niveau des dosages en bactéries et en solution calcifiante ainsi que les paramètres d'injection en termes de maillage, pressions et débits.

2.4 Plot d'essais chantier :

En raison de l'hétérogénéité des remblais et pour valider certains paramètres du protocole au niveau dosages, un plot d'essai in situ a été réalisé préalablement au démarrage de la phase travaux. Le but était de valider les caractéristiques mécaniques du terrain après les injections par rapport à l'objectif d'obtention d'une cohésion de 50 kPa en place.

Les contrôles retenus consistent en la réalisation d'un essai au pressiomètre et un essai CPT, sur la base de corrélations couramment pratiquées dans des sols analogues. On retiendra donc une pression limite supérieure à 1,4 MPa et un q_c de 12 MPa.

Le plot d'essais a été réalisé sur une surface de l'ordre de 25 m², avec 14 forages implantés à 5 m de profondeur et équipés de tubes à manchettes scellés au terrain par un coulis de gaine.

Les dispositions suivantes ont été choisies pour l'installation de chantier :

- Pour la préparation des bactéries, un cubitainer équipé d'une pompe et d'un bac de reprise permettant la réhydratation des bactéries par batch de 1 m³,
- Pour la préparation de la solution calcifiante, une centrale de préparation de type MP 1000 par dissolution des produits de base livrés en sacs de 25 kg,
- Pour les injections, l'utilisation du système d'injection automatisé Spice de Soletanche Bachy afin de piloter le traitement en matière de pression, volume et débit. L'injection des bactéries et des solutions calcifiantes a été réalisée à l'aide de pompes de type PH2x5 par passes remontantes de 1m.

Ce plot d'essai a permis de valider les critères d'injection retenus via des essais pressiométriques et au pénétromètre statique (CPT). Il a été constaté une nette amélioration des pressions limites du sol (PI*), avec une augmentation moyenne des PI* de 3 fois par rapport aux valeurs initiales avant injection, et une réduction de la profondeur de refus à l'essai CPT.

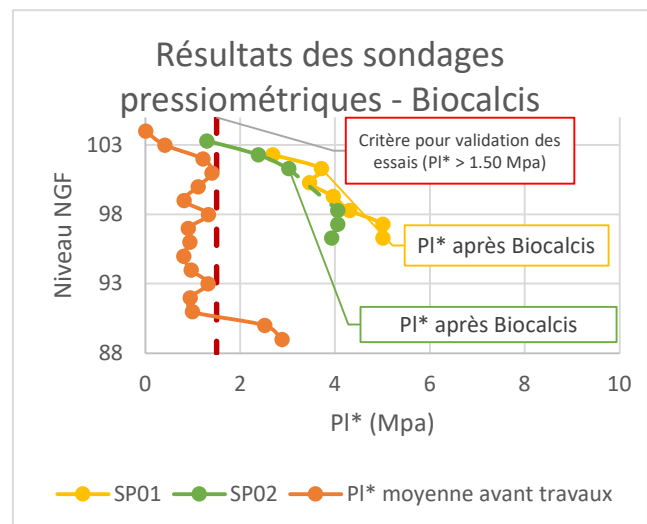


Figure 5. Pont Thinat – Résultats des sondages pressiométriques

2.5 Les travaux définitifs :

Les travaux définitifs ont nécessité la réalisation de 53 forages verticaux et inclinés.

Les forages ont été implantés selon une maille de 1m x 1m sur 4 lignes de forage disposés en quinconce sur la largeur du massif de sol à traiter. Ils ont été réalisés au moyen de tirs inclinés pour éviter les obstacles identifiés en raison de la présence d'une galerie technique et le réseau télécom. Ils ont tous été équipés de tubes à manchettes, scellés dans un coulis de gaine, jusqu'à la profondeur de 8,30 m qui correspond à la hauteur de traitement du massif de sol.

Un volume total de 170 m³ de bactéries *Sporosarcina pasteurii* et de solution calcifiante a été mis en œuvre. Les injections de bactéries et solution calcifiante ont été réalisées à l'aide d'une centrale automatisée permettant d'optimiser les volumes et d'avoir un contrôle en temps réel des pressions. Les paramètres d'injection ayant pu être affinés à l'issue du plot d'essais.

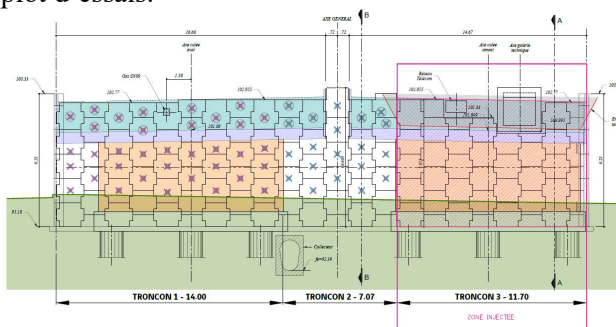


Figure 6. Zone injectée via la technique Biocalcis® au niveau du mur de front

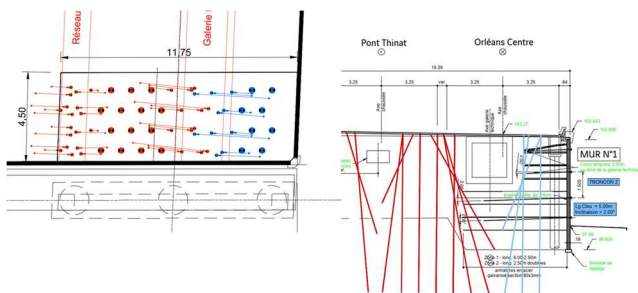


Figure 7. Vue en plan et coupe transversale des forages



Figure 8. Injection Biocalcis® en cours

Les travaux se sont déroulés conformément au planning initial, avec deux périodes d'injection de 11 et 7 jours.

Les contrôles post-traitement ont consisté en des essais pressiométriques, qui ont démontré que la pression limite de 1,50 MPa était bien atteinte, ce qui a permis de valider l'ensemble du traitement de bioconsolidation.

3 TOULOUSE LOT 4 - TRAVAUX D'INJECTION BIOCALCIS® POUR LE TRAITEMENT DE LA VOÛTE DU RAMEAU DU Puits TERRASSE.

3.1 Principe des travaux :

Les travaux s'inscrivent dans le cadre du projet du lot 4 de la ligne C du métro de Toulouse. Ils concernent plus particulièrement le creusement, en méthode traditionnelle, de la future galerie d'accès secours entre le Puits Terrasse (PTR) et le tunnel de la ligne C du métro. Ladite galerie fait 6m de long à l'axe et 30m² de section excavée maximale. Son creusement est à réaliser dans les molasses toulousaines sous 33m de couverture et 12m de charge hydrostatique en voute. Les constats faits lors du creusement du tunnel au tunnelier et de la réalisation du puits ont confirmé la présence d'une lentille de sables compacts propres et saturés en limite de voute du futur creusement. Afin d'adresser le risque d'instabilité de ces sables au creusement, les dispositions initiales suivantes ont été retenues :

- La mise en œuvre d'un réseau de drains subhorizontaux au plus proche du creusement traditionnel afin notamment de désaturer la lentille sableuse avant la réalisation du creusement traditionnel,
- La mise en place d'une ligne de boulons auto-foreurs divergente en voute du futur creusement traditionnel afin de prévenir les risques résiduels d'instabilité.

La réalisation des drains autour de la galerie a permis d'une part d'abaisser la pression hydrostatique en voute rameau à ~0.1 bar tout en mettant en évidence que la lentille de sable était réalimentée à raison d'environ 1m³/h par les terrains encaissants.

Un traitement complémentaire a donc été décidé dans le but d'apporter de la cohésion aux sables et ainsi traiter les risques d'instabilité associés à ce gradient hydraulique résiduel.

Le traitement de terrain mis en œuvre devait ainsi permettre :

- De créer une auréole de molasse sableuse cohésive en voute du rameau de 1 m d'épaisseur et développant une cohésion minimale de 15 kPa,
- D'être mis en œuvre de manière rapide et économique pour rester compatible avec les planning et budget du projet,
- De s'adapter aux contraintes du site et notamment de ne pas sur-solliciter les structures du puits et du tunnel réalisées avant le creusement du rameau.

Les Molasses sableuses présentant une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m/s, les solutions de traitement de terrain par injection de coulis de ciment même ultrafin étaient en limite de champ d'application et ont donc été rapidement écartées. De même pour les solutions du type jet grouting et congélation de sol qui, compte tenu de la configuration du rameau, apparaissaient trop lourdes et non sans risque.

Le traitement par injection Biocalcis® est ainsi rapidement apparu comme l'option la plus adaptée aux objectifs ciblés.

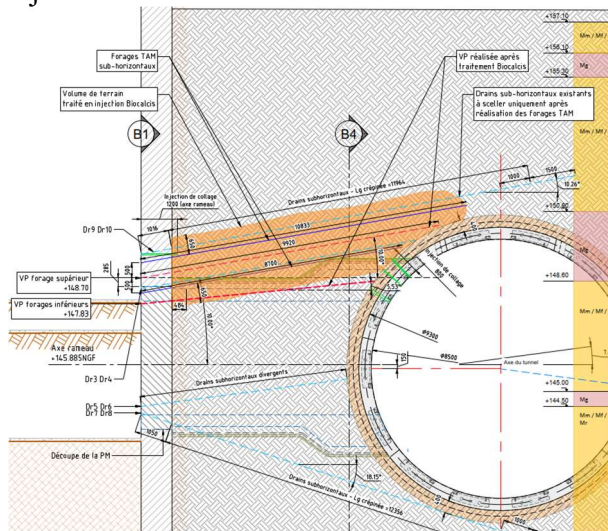


Figure 9. Profil en long Rameau et auréole injectée Biocalcis®

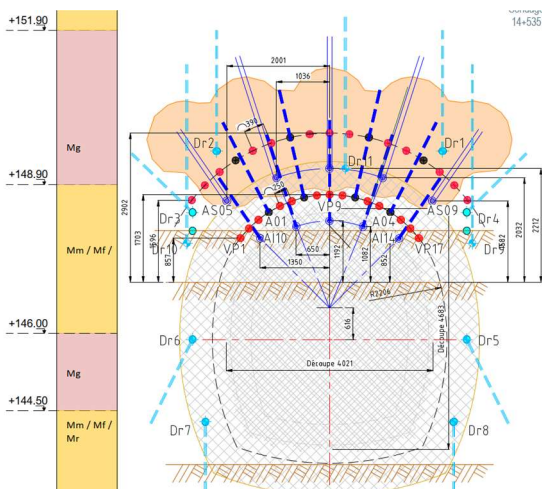


Figure 10. Profil en coupe Rameau et auréole injectée Biocalcis®

3.2 Description et phasage des travaux :

Le phasage des travaux a été le suivant :

- Réalisation du puits PTR (8,6 m de diamètre intérieur en paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur) et du tunnel du projet (9,3 m de diamètre extérieur réalisé au tunnelier),
- Terrassement du puits jusqu'en voute du futur rameau (~33 m de profondeur),
- Réalisation depuis le puits et sous sas des drains subhorizontaux en voute rameau pour permettre la désaturation de la lentille de Molasse sableuse,
- Réalisation depuis le puits des forages subhorizontaux d'injection TAM en prévision de l'injection,
- Scellement au coulis de ciment des drains subhorizontaux dans la zone d'influence de l'injection pour une meilleure maîtrise du traitement,
- Injection des forages TAM à l'obturateur double selon le protocole d'injection Biocalcis® :
 - o Injection de la solution de bactérie,
 - o Injection de la solution calcifiante.
- Réalisation de nouveaux drains subhorizontaux en voute rameau pour restituer le drainage des Molasses sableuses,
- Réalisation de la ligne de boulons autoforeurs à cœur de l'auréole de Molasse sableuse injectée Biocalcis®,
- Fin du terrassement du puits (~40 m de profondeur) et réalisation des drains subhorizontaux en reins et radier du futur rameau.

Afin de créer l'auréole cohésive de 1 m d'épaisseur cible en voute du futur Rameau, 14 forages d'injection ont été forés, organisés selon trois lignes et équipés de 3 manchettes au mètre.

Les dosages des solutions de bactéries et calcifiantes ainsi que les paramètres d'injection ont été établis dans l'objectif d'obtenir une teneur moyenne en CaCO₃ des sables injectés de 2% gage de l'obtention d'une de la cohésion ciblée.

Les produits injectés étant de viscosité similaire à celle de l'eau, les injections ont été réalisées sans montée en pression significative permettant ainsi :

- De ne pas sursolliciter les ouvrages existants,
- De maintenir une cadence d'injection compatible avec le planning travaux.

A l'issue des travaux d'injection Biocalcis®, les volumes cibles d'injection ont été passés sans observer de nette disparité entre manchettes. Ces constats ont été retenus pour en déduire que le critère de cohésion était atteint.

Au final, les travaux de forages et d'injections se sont étalés sur 5 semaines mobilisant des équipes et moyens réduits adaptés aux conditions du site.

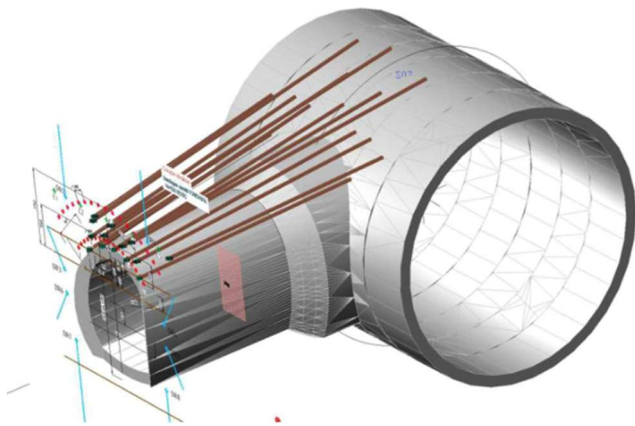


Figure 11. Modèle 3D revêtement Rameau, tunnel et forages d'injection Biocalcis®

3.3 Résultats :

3.3.1 Déroulement excavation rameau :

Les travaux de creusement du rameau ont été exécutés en méthode traditionnelle pleine section en 6 pas d'avance de 1,2 m successifs.

Les travaux ont été réalisés en 3 postes et se sont étalés sur 2 semaines.

Les travaux se sont déroulés sans aléas.

Lors du creusement, les évidences du traitement Biocalcis® suivantes ont pu être observées :

- Dans les molasses situées au front (principalement limono-sableuses) situées dans la zone d'influence de l'injection : des traces blanchâtres signe d'une calcification des terrains à l'injection,
- Dans les molasses sableuses cible principale du traitement (découvertes sur les deux derniers pas d'avancement à la jonction avec le tunnel) : ces molasses se sont présentées comme un banc de sable cohésif stable bien que soumis à un gouste à gouste significatif confirmant l'efficacité du traitement de terrain.

3.3.2 Analyses des prélèvements :

Des prélèvements ont été réalisés lors des travaux d'excavation traditionnelle. Deux blocs de limons biocalcifiés de grande taille ainsi que plusieurs blocs de sables biocalcifiés de tailles plus réduites ont été collectés, comme illustré en figures 10 et 11.

Les observations macroscopiques montrent que les limons présentent une cohésion élevée, se maintenant sous forme de blocs compacts. Les sables biocalcifiés présentent eux aussi une bonne tenue mécanique, confirmant une cimentation effective des grains.



Figure 12. Blocs de limons calcifiés



Figure 13. Blocs de sables calcifiés

Des mesures de la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) ont été réalisées sur les deux types d'échantillons. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Les résultats montrent une teneur moyenne en CaCO_3 des limons d'environ 1,2 % dont une partie provient de l'injection Biocalcis® et l'autre de la nature propre des limons. Bien que n'étant pas la cible du traitement, ces Molasses limoneuses ont été pénétrées à l'injection illustrant la capacité du traitement à agir sur des terrains de faible perméabilité.

Les mesures faites dans les sables présentent quant à elles des valeurs de teneur en CaCO_3 nettement plus élevées, comprises entre 1,1 % et 7,4 %, pour une valeur moyenne de 3,8 %. Cette variabilité peut s'expliquer par une distribution hétérogène des

solutions de traitement, liée à la perméabilité plus élevée du sable, favorisant des écoulements préférentiels et une précipitation localement plus importante du carbonate de calcium.

Tableau 1. Dosage CaCO_3

CaCO_3 (g/kg)	Limon + Biocalcis®	Sable + Biocalcis®
Essai 1	10	74
Essai 2	13	11
Essai 3	-	31

Des observations en microscopie électronique à balayage (MEB) ont été réalisées sur les deux types d'échantillons (Figures 12 et 13). Dans les deux cas, la présence de cristaux de carbonate de calcium a été mise en évidence. Ces cristaux apparaissent plus nombreux dans l'échantillon de sable biocalcifié, en cohérence avec les teneurs plus élevées mesurées lors des dosages de CaCO_3 .

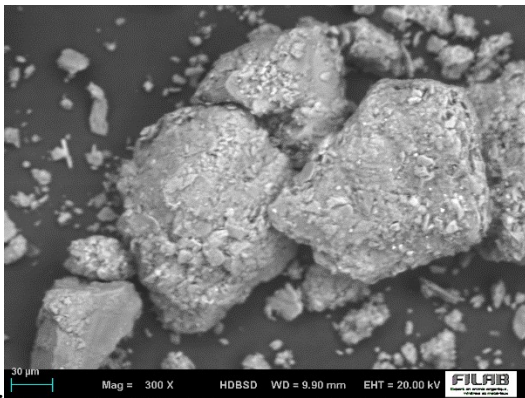


Figure 14. Observations MEB limon calcifié

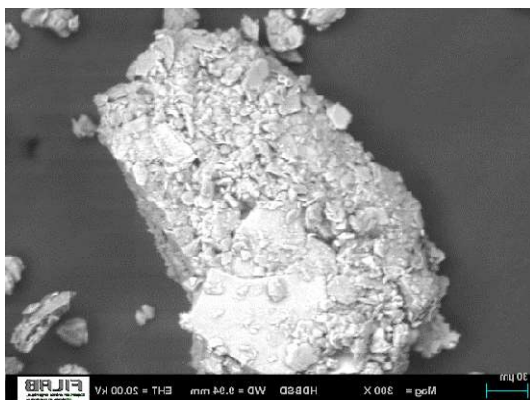


Figure 15. Observations MEB sable calcifié

4 CONCLUSION.

Le procédé Biocalcis® constitue une solution innovante pour le renforcement des terrains sableux, notamment dans les zones sensibles aux montées en pression. Sa réaction rapide permet d'effectuer les

contrôles dans des délais très courts, dès les jours suivant la fin du traitement.

Biocalcis® s'intègre parfaitement à la gamme de procédés proposés par Soletanche Bachy pour l'injection des sols à faible perméabilité. Il offre une excellente efficacité dans les sables fins en augmentant leur cohésion sans en altérer la perméabilité, tout en étant adapté à des matériaux présentant des granulométries plus variées, sous réserve du respect des critères d'injectabilité.

Aujourd'hui, ce procédé est déployé à l'échelle industrielle sur plusieurs chantiers en France et sera prochainement utilisé à l'international.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- Sarkis, M., Abbas, M., Naillon, A., Emeriault, F., Geindreau, C., Esnault-Filet, A. (2022). D.E.M. modeling of biocemented sand: Influence of the cohesive contact surface area distribution and the percentage of cohesive contacts. In *Computers and geotechnics* Volume 149, September 2022, 104860 <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104860>
- Garcia de Oliviera, V., Esnault Filet, A., (2022). De la biominéralisation pour sécuriser le Pont René Thinat à Orléans. *Revue Travaux N°962*, pp. 66-70
- Cardoso, R., Oliveira, M., Cruz, M., ; Gonzalez, I., Rodrigues, A.T., Anjos, B., Sapin, L., Esnault-Filet, A. (2024). Biocementation treatment of a Portuguese motorway slope to prevent ravine formation. *Proceedings of 18th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE2024)*
- San Pablo, A., DeJong, J.T., Carey, T.J. (2024). Influence of biocementation treatment extent on dynamic system performance: A centrifuge liquefaction study. (2024). In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 183*, August 2024, 108792 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108792>
- Yu, T., Fleureau, J.M., Souli, H., Kong, X. (2024) The improved cyclic resistance of bio-treated sands with various gradations for liquefaction mitigation: Density increase and/or cementation? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 185, October 2024, 108894 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108894>