

Expérimentation de la biocimentation des sols argileux sous chaussée pour l'adaptation des routes exposées au RGA Field-scale biocementation of clayey subgrade soils for mitigating shrink–swell hazards

Lamine IGHIL AMEUR^{1*}, Dimitrios TERZIS^{2,3}, Ziad SAHLAB³, Lyesse LALOUF³

1 Cerema, GéoCoD, France

2 Medusoil SA, Suisse

3 Laboratoire de Mécanique des Sols, EPFL, Suisse

**lamine.ighil-ameur@cerema.fr*

RESUME : Depuis 2015, la France métropolitaine connaît des sécheresses de plus en plus intenses, fréquentes sur des périodes plus longues, imputables au changement climatique dont la sécheresse exceptionnelle de 2022. Si jusqu'ici les routes exposées au phénomène de RGA « retrait-gonflement des sols argileux » sont pour l'essentiel des routes départementales, cela peut désormais concerner les routes nationales et les autoroutes dans certaines configurations. De nombreux travaux de recherche visent à développer de nouvelles solutions de prévention et d'adaptation des maisons et des routes face au changement climatique (Ighil Ameur, 2022).

Dans le département du Loiret, une expérimentation de la biocimentation a été réalisée en 2023 sur une portion de 230 m de la route départementale RD151. Le procédé mis en œuvre repose sur des injections à basse pression d'une solution enzymatique visant à précipiter du carbonate de calcium (CaCO_3) à la surface des argiles plastiques. L'objectif est double : réduire la capacité d'absorption d'eau et donc le potentiel d'évaporation à l'origine du RGA, tout en augmentant la cohésion et la valeur d'entrée d'air du sol.

Un suivi de 24 mois, combinant observations de surface et instrumentation in situ a permis de comparer plusieurs zones traitées et non traitées par biocimentation. Les résultats montrent des comportements différenciés, liés à la profondeur d'injection, à la présence d'arbres induisant une forte variabilité hydrique, ainsi qu'à l'exposition solaire, générant des conditions de séchage plus sévères. Ces facteurs expliquent l'hétérogénéité des performances et permettent de dégager des critères pour l'optimisation des futures applications. Ce projet constitue une première dans un contexte géologique complexe sur un terrain en pente. Ce premier retour d'expérience à 2 ans ouvre de nouvelles perspectives pour l'utilisation de la biocimentation dans les stratégies de gestion des risques liés aux sols argileux sensibles aux variations hydriques.

ABSTRACT: Since 2015, France has experienced increasingly severe and frequent droughts over longer durations, attributed to climate change, including the exceptional drought of 2022. While road infrastructures exposed to the phenomenon of shrink–swell of clay soils have so far mainly consisted of departmental roads, national roads and motorways may now also be affected under certain conditions. Numerous research initiatives aim to develop new preventive and adaptive solutions for buildings and road infrastructures in response to climate change (Ighil Ameur, 2022).

In the Loiret department, a biocementation field trial was conducted in 2023 along a 230 m section of the RD151 departmental road. The implemented process involved low-pressure injections of an enzymatic solution designed to induce calcium carbonate (CaCO_3) precipitation at the surface of plastic clay particles. The objective was twofold: to reduce the soil water absorption capacity and, consequently, the evaporation potential responsible for shrink–swell behaviour, while simultaneously increasing soil cohesion and air-entry value.

A 24-month monitoring programme, combining surface observations and in situ instrumentation, enabled a comparison between biocemented and untreated sections. The results highlight differentiated responses related to injection depth, the presence of trees inducing strong hydric variability, and solar exposure leading to more severe drying conditions. These factors account for the observed heterogeneity in performance and provide criteria for optimizing future applications. This project represents a first implementation in a complex geological context on a sloping site. This initial two-year feedback offers new perspectives for the use of biocementation as part of risk management strategies for clayey soils sensitive to moisture variations.

Mots-clés : routes ; biocimentation ; RGA ; argiles ; changement climatique.

1 INTRODUCTION

En 2022, la France a connu, pour la sixième fois en dix ans, une sécheresse de grande ampleur. Cette sécheresse, dont le coût est aujourd'hui estimé à plus de 3,5 milliards d'euros, a battu tous les records depuis 1989. La récurrence de telles sécheresses extrêmes accroît la vulnérabilité des routes, notamment due au phénomène de RGA, avec des dégâts qui se cumulent dans le temps. Ces derniers nécessitent alors des travaux de remédiation plus lourds et plus coûteux.

La biocimentation, principalement mise en œuvre par la précipitation microbienne de carbonate de calcium ou "Microbially Induced Carbonate Precipitation" (MICP), s'est imposée au cours de la dernière décennie comme une technique de stabilisation des sols à faible empreinte carbone (Cardoso et al., 2023a ; Harran et al., 2023). Les travaux existants portent majoritairement sur les sols grossiers, pour lesquels la biocimentation a démontré des améliorations significatives de la résistance mécanique, de la rigidité et de la durabilité. Des études existantes (Cardoso et al., 2023b), incluant des expérimentations menées en conditions proches du terrain et des applications sur des pentes naturelles (Terzis et al., 2020), suggèrent que, dans les sols argileux, la biominéralisation ne conduit pas à une liaison intergranulaire, telle qu'on observe dans les sables, mais plutôt à une précipitation localisée à l'échelle des agrégats, des interfaces argile-pore et des discontinuités de dessiccation. Dans ce contexte, une hypothèse structurante émerge dans l'état de l'art récent : la précipitation de particules de carbonate de calcium à la surface des feuillets argileux pourrait conduire à un enrobage partiel de ces derniers, réduisant leur surface réactive et modifiant les interactions physico-chimiques responsables de la plasticité et du gonflement. Un tel enrobage carbonaté serait susceptible d'augmenter la cohésion interparticulaire, de limiter l'adsorption d'eau et de réduire la sensibilité des argiles aux variations hydriques. Cette hypothèse implique que les effets les plus pertinents de la biocimentation dans les sols plastiques se manifestent prioritairement par une modification du comportement volumique et des propriétés de rétention d'eau.

Dans cette étude, une première expérimentation à l'échelle 1 a été réalisée en France en 2023 pour tester une solution de biocimentation (BCEM) des sols argileux sous chaussée. Cela a été mené dans le département du Loiret (45), sur une portion de la RD 151 près de Saint-Loup-des-Vignes. Une instrumentation de suivi a été mise en place afin de quantifier l'apport de cette technique dont les résultats sont exposés dans cet article.

2 ANALYSE EXPERIMENTALE EN LABORATOIRE

2.1 Principe et objectifs

La motivation principale de ce travail expérimental est d'évaluer, en conditions contrôlées de laboratoire, dans quelle mesure la biocimentation par précipitation de calcite induite microbiologiquement (MICP) permet d'améliorer la résistance des argiles à la dessiccation, en particulier en augmentant la valeur d'entrée d'air (air entry value, AEV) et en limitant les déformations et dommages associés (Figure 1).

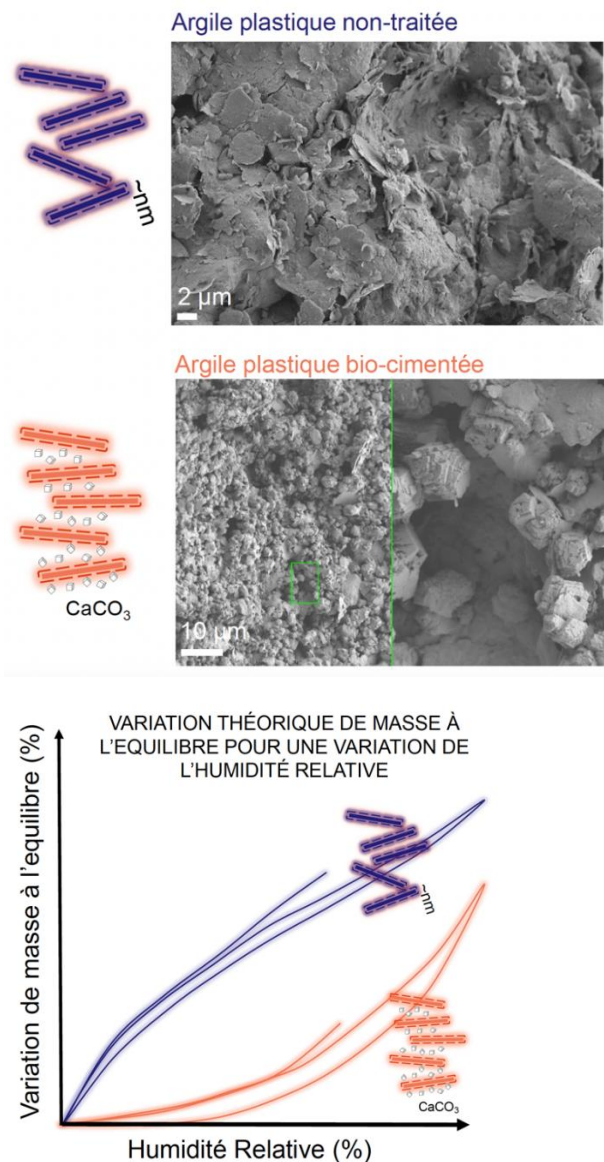


Figure 1. Observation microscopique d'une argile plastique traitée et représentation schématique, basée sur ces observations, du mécanisme supposé de biocimentation à l'échelle des particules. Le schéma illustre de manière conceptuelle le comportement volumique hypothétique associé au traitement.

Le lien direct entre ces modifications hydromécaniques et la fissuration par dessiccation restait insuffisamment documenté, en particulier sous conditions de retrait contraint, représentatives de nombreuses situations de terrain (couches superficielles confinées, interfaces sol–structure, ouvrages linéaires). L’objectif du programme expérimental présenté ici est donc double : (i) quantifier l’effet de la biocimentation sur la cinétique de séchage et la déformation des argiles, et (ii) corrélérer ces effets à l’augmentation de la succion et de l’AEV, facteurs d’initiation des dommages.

2.2 Propriétés des matériaux

Deux argiles contrastées ont été retenues afin de couvrir une gamme de plasticité représentative des sols rencontrés en pratique : une argile de plasticité moyenne à faible et une argile à forte plasticité. Ce choix permet d’évaluer si les mécanismes induits par la biocimentation sont dépendants de la minéralogie et de la plasticité, ou s’ils relèvent de processus plus génériques. L’objectif de l’étude en laboratoire était d’analyser l’effet générique de la biocimentation sur le comportement hydromécanique, indépendamment d’une minéralogie spécifique de site. Le tableau 1 présente une synthèse des caractéristiques physiques des deux argiles retenues.

Tableau 1. Caractéristiques physiques des sols testés

Caractéristiques physiques	Faible plasticité	Forte plasticité
Masse volumique des particules ρ_s [g/cm³]	2,63	2,76
Perméabilité à l’eau k_w mesurée [m/s]	$1,34 \times 10^{-9}$	$2,85 \times 10^{-11}$
Limites d’Atterberg		
Limite de liquidité [%]	38,45	54,49
Indice de plasticité [%]	16,61	23,45
Minéralogie		
Illite [%]	77	–
Kaolinite [%]	10	100
Calcite [%]	13	–

2.3 Matériels et méthodes

Les solutions de biocimentation est basée sur l’hydrolyse enzymatique de l’urée catalysée par l’uréase, suivie de la production d’ions carbonate et de la précipitation de CaCO₃ en présence de calcium. Les

sous-produits azotés sont recyclés et concentrés sous forme d’engrais, et la méthode de mélange utilisées sont identiques à celles employées pour la détermination préalable des courbes de rétention d’eau, garantissant une cohérence méthodologique entre les campagnes. Deux niveaux de traitement ont été ciblés, correspondant à des teneurs en calcite de 5 % et 10 %, afin de couvrir un spectre suffisamment large tout en restant réaliste du point de vue applicatif. La biocimentation est intégrée directement lors du mélange sol–solution, ce qui favorise une distribution relativement homogène de la calcite précipitée à l’échelle de l’échantillon (Walrave et al., 2026). Les éprouvettes sont préparées à une teneur en eau initiale contrôlée, puis compactées dans un moule rectangulaire solidaire d’un dispositif de contraintes unidimensionnelles. Cette géométrie et ce mode de préparation visent à reproduire des conditions de retrait partiellement empêché, propices au développement de fissures orientées, tout en assurant une bonne répétabilité des essais.

La dessiccation est réalisée de manière continue dans une enceinte climatique (Figure 2) à température et humidité relative contrôlées. Le choix d’un séchage lent et maîtrisé répond à une motivation scientifique claire : dissocier autant que possible les effets cinétiques (vitesse d’évaporation) des effets structuraux liés à la biocimentation. Le suivi simultané de la masse et de l’imagerie de surface permet de relier précisément la perte d’eau, les déformations induites et le moment d’initiation des dommages.



Figure 2. Dispositif de dessiccation

Une hypothèse clé est l’amélioration attendue de la valeur d’entrée d’air (AEV) par la biocimentation. En augmentant l’AEV, le sol est capable de rester saturé – ou quasi saturé – à des succions plus élevées, retardant ainsi la transition vers un régime fortement capillaire où les contraintes de traction augmentent rapidement. Grâce aux courbes de rétention d’eau déterminées indépendamment, il est possible de convertir la teneur en eau au moment de l’apparition des fissures en une valeur de succion critique.

2.4 Résultats

Les résultats (Figure 3) montrent que la biocimentation permet aux échantillons de sécher davantage avant l'initiation des dommages, atteignant des degrés de saturation plus faibles et surtout des succions nettement plus élevées. La succion à l'endommagement augmente de manière quasi linéaire avec la teneur en calcite, atteignant environ le double de la valeur initiale pour un traitement à 10 %. Cette observation constitue un résultat central du programme, car elle établit un lien direct entre un paramètre de la mécanique des sols non saturés (AEV/succion) et un mécanisme de dégradation macroscopique (fissuration) (Li, 2003, Peron et al, 2009).

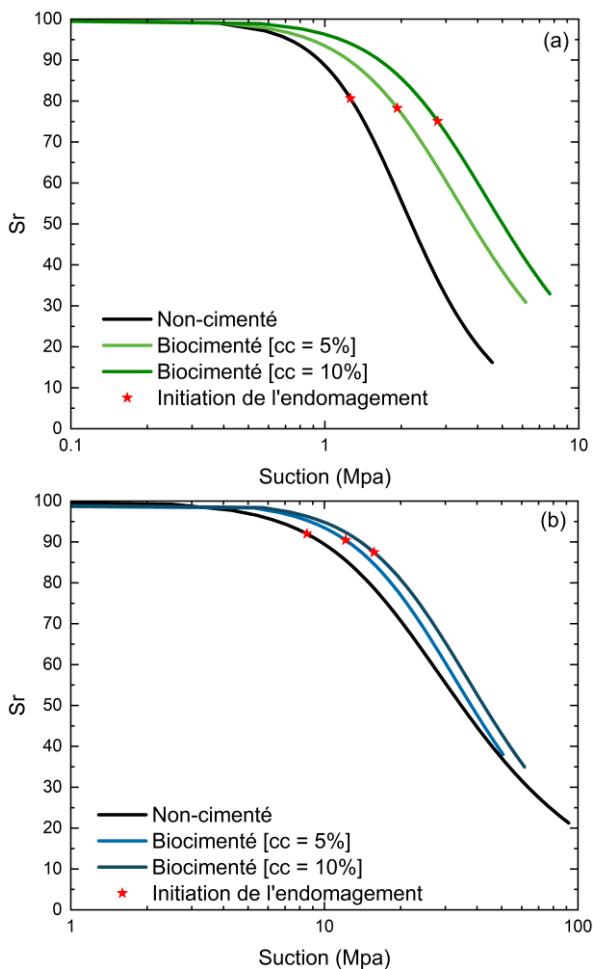


Figure 3. Courbes de rétention d'eau (WRC) des argiles à faible plasticité (LPC) (a) et à forte plasticité (HPC) (b), avec indication des valeurs à l'initiation des dommages

3 EXPERIMENTATION IN SITU

3.1 Transition du laboratoire au terrain

Le passage à l'échelle terrain impose en effet de répondre simultanément à des contraintes

environnementales, réglementaires et logistiques, tout en conservant les mécanismes hydromécaniques identifiés en conditions contrôlées. La transition vers l'application in situ s'inscrit ainsi dans une logique de maturité technologique progressive, reliant les observations fondamentales aux performances mesurables à l'échelle de l'ouvrage.

Un verrou historique de la biocimentation par MICP réside dans la gestion des sous-produits azotés, en particulier l'ammoniac issu de l'hydrolyse de l'urée. Dans le cadre du passage à l'échelle industrielle, la filière de production des solutions de biocimentation a été profondément adaptée afin d'éliminer l'ammoniac libre et de le transformer en un fertilisant azoté stabilisé. Ce sous-produit est aujourd'hui homologué par l'Office fédéral suisse de l'agriculture, garantissant une compatibilité réglementaire et environnementale complète du procédé. Cette évolution, documentée notamment par Terzis et Laloui (2023), permet de lever un frein majeur à l'acceptabilité de la technologie et constitue un prérequis essentiel à son déploiement sur des infrastructures linéaires sensibles telles que les routes départementales.

Sur le plan opérationnel, cette mise à l'échelle s'accompagne d'une formulation de solutions de biocimentation à faible viscosité, compatibles avec des équipements d'injection standards, et d'une production sans génération de déchets liquides. L'enjeu n'est plus uniquement l'amélioration mécanique du sol, mais bien l'optimisation conjointe de son comportement hydrique, de son empreinte environnementale et de son intégration dans les cadres normatifs existants.

3.2 Mise en œuvre in situ

Le traitement repose sur l'injection sous accotements de solutions de biocimentation BSEM à base de carbonate et de calcium, favorisant la précipitation progressive de calcite au contact des particules argileuses. Une évaluation environnementale, conformément au protocole HP14, a montré l'absence d'impact écotoxique mesurable, tandis qu'une analyse sanitaire conclut à l'absence de risque pour la santé humaine. Le protocole HP14 appliqué est désormais décrit plus précisément, en indiquant les paramètres analysés conformément au guide INERIS (Version 3, novembre 2024), notamment les essais d'écotoxicité sur lixiviats et la caractérisation des fractions solubles pertinentes au regard du procédé testé.



Figure 4. Vue aérienne de l'injection des solutions de biocimentation BCEM (© Medusoil SA)

Les injections ont été réalisées selon un calepinage précis, sur des profondeurs cibles comprises entre 1,5 et 2,0 m. Les contraintes géologiques locales, marquées par la présence d'anciennes canalisations et de matériaux hétérogènes, ont conduit à privilégier des forages à sec avec tête rotative et injection d'air, plutôt que des techniques de battage. Ce choix méthodologique vise à garantir une bonne pénétration des solutions tout en minimisant les perturbations mécaniques du sol en place.

3.3 Description du site de la RD 151

La figure 5 montre la localisation du site d'étude RD 151 situé dans la commune de Saint-Loup-des-Vignes dans le département du Loiret (45). Il s'agit d'un terrain en pente, de 4% d'après les informations de *Géoportail.fr*, localisé sur une zone en exposition RGA forte, selon la cartographie de *Géorisques.fr*. Il s'agit d'une portion de 230 m avec deux configurations : (1) une partie bordée des deux côtés par des zones boisées très denses et (2) une partie bordée d'un côté par un champ de maïs et de l'autre par une zone boisée très dense.

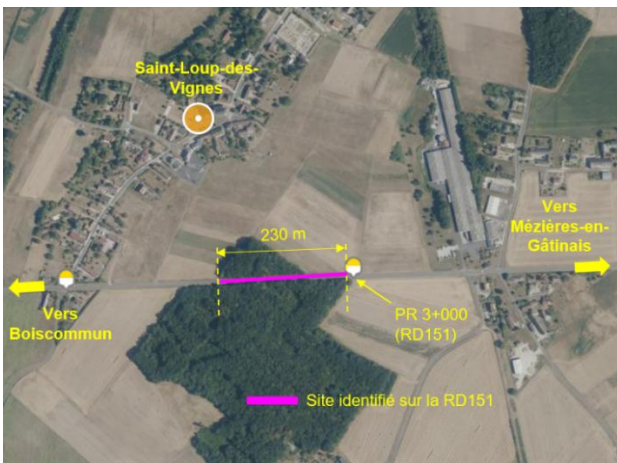


Figure 5. Localisation du site d'étude RD 151 (©IGN)

Ce site présente des fissures de sécheresse récentes apparues suite à la sécheresse 2020. A noter que la portion identifiée pour ce chantier test a été rénovée fin 2019 après d'importants dommages sécheresse.

3.4 Reconnaissances géotechniques initiales

Afin d'identifier les profondeurs à traiter, des essais de mécanique des sols ont été réalisés sur des prélèvements de sol sur la RD 151, qui ont permis d'identifier des sols argileux de nature très plastique (indice de plasticité I_p compris entre 24 et 40%) jusqu'à 2 m de profondeur (Figure 6). Il convient de souligner qu'il existe de nombreuses incertitudes liées aux propriétés intrinsèques des matériaux naturels. Chaque site peut en effet introduire des paramètres supplémentaires à investiguer, tels que la minéralogie, la teneur en matière organique, la distribution granulométrique fine, ou encore la présence d'argiles agrégées ou présentant un degré de structuration plus marqué. Ces facteurs peuvent influencer significativement la réponse hydromécanique observée. Parmi les essais réalisés, des échantillons prélevés à 1 m de profondeur au niveau de 3 sondages à la pelle mécanique SPM ont été soumis à des cycles de séchage-humidification via le DVS « Dynamic Vapor Sorption », un analyseur de sorption de vapeur (Ighil Ameur, 2023).

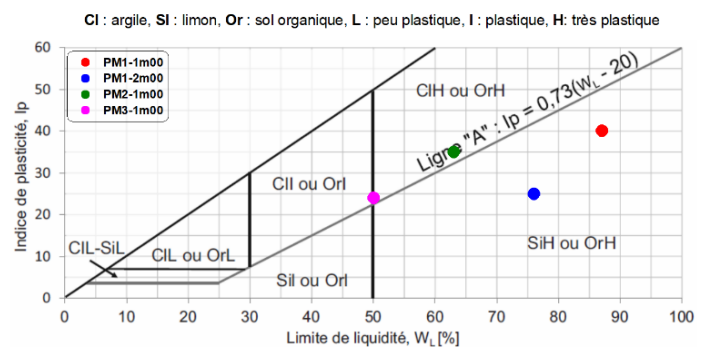


Figure 6. Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins

Les résultats de l'essai DVS, synthétisés sur la Figure 7, montrent que la répétabilité est vérifiée pour les sols de chaque SPM entre les échantillons (a) et (b). L'écart au niveau du chemin d'humidification maximal ($HR = 80\%$ et $s = 30$ MPa) est d'environ 1,0% pour SPM1, 0,3% pour SPM2 et 0,6% pour SPM3.

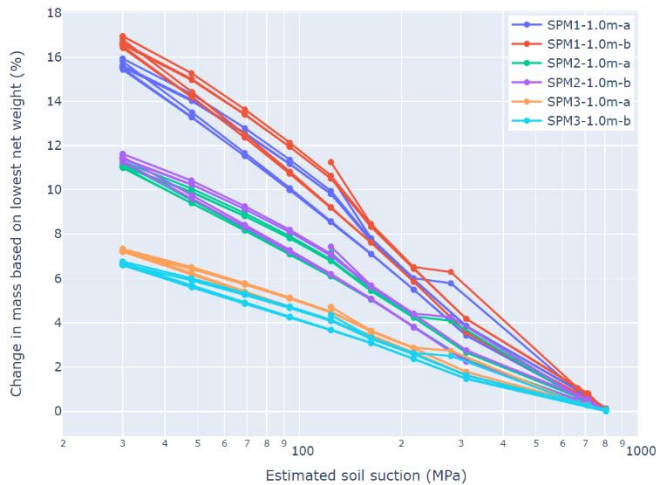


Figure 7. Variation de la masse en fonction de la succion estimée (Ighil Ameer, 2023). La succion minimale de 3 MPa correspond à la limite opérationnelle inférieure du protocole expérimental DVS utilisé

En considérant que la teneur en eau des échantillons testés varie en fonction des changements de masse au cours des cycles de séchage-humidification, respectivement par retrait et gonflement, il apparaît que la réponse hydromécanique du sol évolue. La variation totale moyenne de masse est d'environ 16,2% pour les échantillons SPM1, 11,3% pour les échantillons SPM2 et 7,0% pour les échantillons SPM3. Cela signifie que l'état initial du matériau influence la variation de sa teneur en eau au cours des cycles de séchage-humidification. Il convient de souligner que cette réponse hydromécanique globale, caractérisée ici par l'amplitude des variations de masse, doit être distinguée du phénomène de fissuration. Ce dernier relève d'un mécanisme complémentaire, lié notamment aux gradients de succion et aux contraintes de traction induites, et fait l'objet d'une analyse spécifique dans la suite de l'article.

3.5 Plan d'implantation des injections

L'injection des solutions de biocimentation BCEM ont été réalisés à l'aide d'une foreuse. Les injections sont appliquées dans le sol uniquement sous accotements suivant 2 lignes à différentes profondeurs (1,5 m et 2,0 m). Ainsi, 2 planches d'essais de 230 m au total ont été définies (Figure 8) :

- PL1 : une première planche de 80 m confortée des deux côtés (C1 et C2) ;
- PL2 : une deuxième planche de 150 m confortée d'un côté (C3) et non confortée de l'autre (témoin C4).

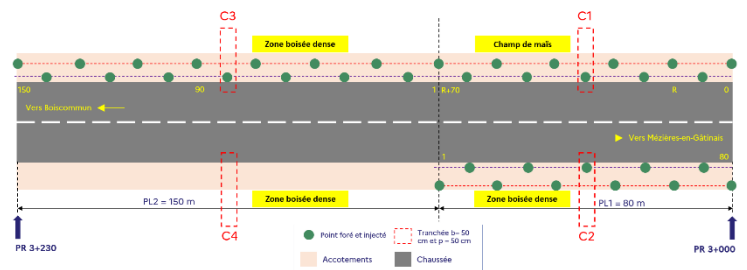


Figure 8. Plan d'injection des deux planches PL1 et PL2

L'objectif n'était pas de déterminer une configuration théoriquement optimale, mais de mettre en œuvre une solution techniquement réalisable et permettant une comparaison entre différentes configurations (traitement bilatéral versus unilatéral).

3.6 Instrumentation de suivi

3.6.1 Capteurs et équipements utilisés

L'instrumentation in situ mise en place dans le cadre de cette étude est composée de 20 capteurs de teneur en eau volumique TEROS 12, une station météo ATMOS 41 ainsi que 4 datalogger ZL6 dotés chacun d'un abonnement de suivi des données à distance pendant 3 ans via l'application ZentraCloud.

Ces équipements ont été répartis sur deux profils instrumentés au milieu de chaque planche d'essais PL1 et PL2. Les zones d'instrumentations sont illustrées sur le plan de la Figure 8 avec : C1 et C2 au milieu de PL1 puis C3 et C4 au milieu de PL2. C1 est dotée d'un datalogger ZL6, la station météo ATMOS 41 et 5 TEROS 12. C2, C3 et C4 sont chacune dotées d'un datalogger ZL6 et 5 TEROS 12. Cette instrumentation permettra de suivre l'évolution de la teneur en eau du sol dans la zone d'étude et les corrélérer avec les données météo. Un suivi visuel basé sur l'observation de l'état de la chaussée et la détection de fissures complète ce suivi.

3.6.2 Schémas d'implantation de l'instrumentation

La figure 9 présente les schémas d'implantation de l'instrumentation au milieu des planches PL1 (Figure 9a) et PL2 (Figure 9b) ainsi que les injections des solutions de biocimentation BCEM. Ces schémas représentent une coupe transversale de la chaussée et permet d'observer la profondeur de chaque capteur TEROS 12 et sa distance par rapport aux bordures.

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Variations de la teneur en eau volumique du sol

La figure 10 synthétise le bilan de suivi de la teneur en eau volumique du sol de 2023 à 2025 au niveau de la zone C2 de la planche PL1 (côté traité avec deux lignes d'injection et bordé de bois très dense).

Les données collectées durant les sécheresses 2024 et 2025 montrent une dessiccation faible en 2024 et une dessiccation à la fois précoce et plus importante en 2025. Cette tendance peut être expliquée par l'intensité de la sécheresse. En 2024, la France n'a pas connu de sécheresse intense contrairement à 2025.

La Figure 10 (a) montrent des variations très limitées de la teneur en eau durant 2024 excepté le capteur T10 à 2,50 m de profondeur qui enregistre des périodes de dessiccation élevée et prolongée. La Figure 10 (b) montrent davantage de variations de la teneur en eau au niveau des 5 capteurs de juin à novembre 2025 de 0,50 à 2,50 m de profondeur. Le capteur T10 à 2,50 m montre un comportement similaire avec une dessiccation précoce (dès mai 2025) et plus intense en 2025.

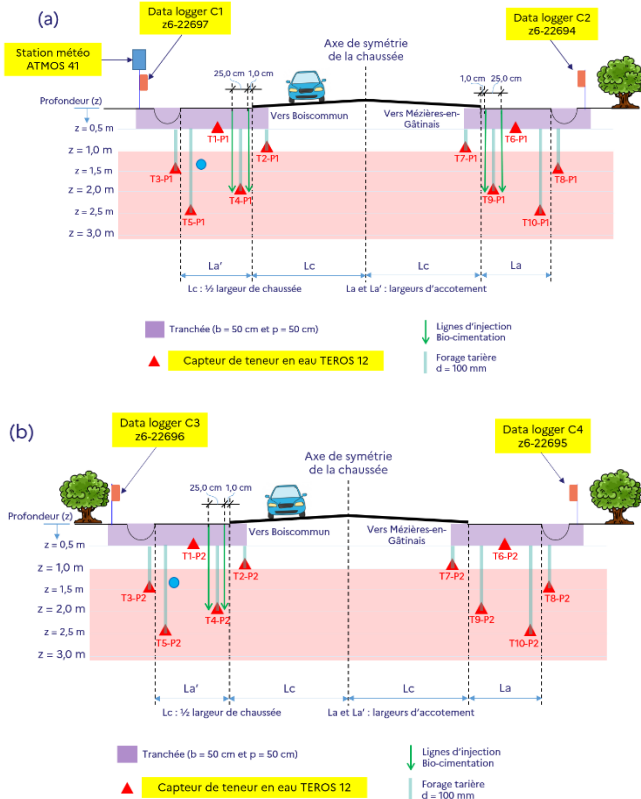


Figure 9. Schéma d'implantation de l'instrumentation au milieu de la planche PL1 (a) et de la planche PL2 (b)

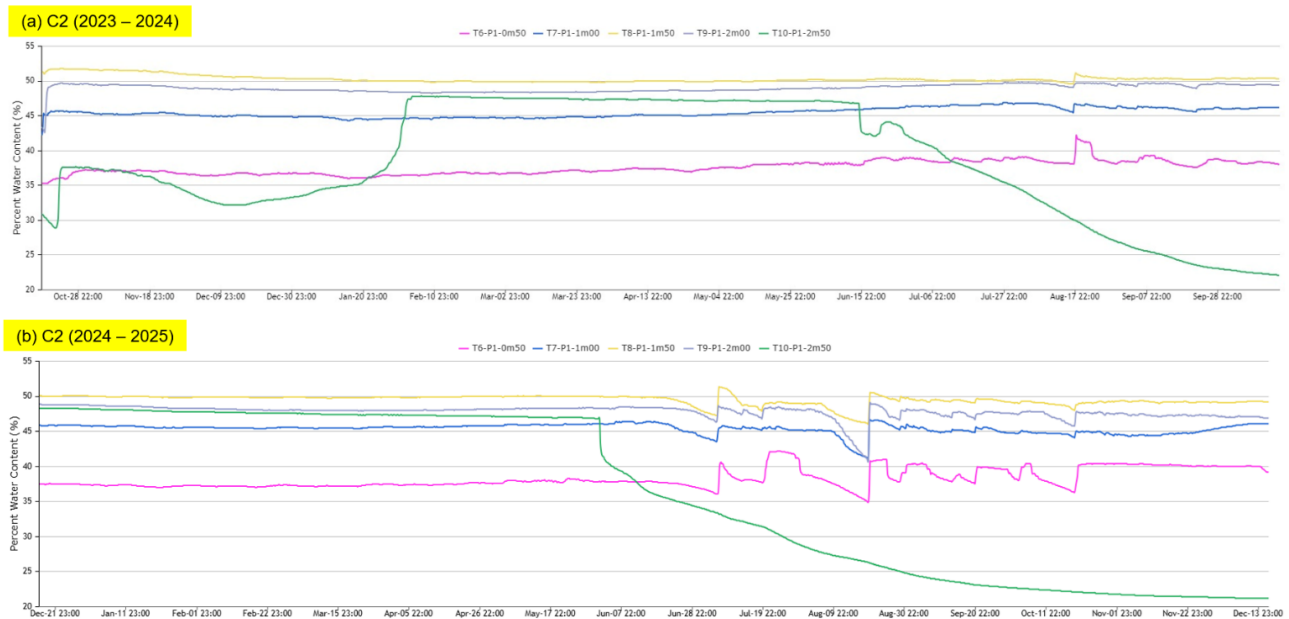


Figure 10. Suivi de la teneur en eau volumique au niveau de la zone C2 sur la période (a) 2023 – 2024 et (b) 2024 - 2025

4.2 Discussions

L'année 2025 a été marquée par une sécheresse intense conjuguée avec deux périodes de canicule caractérisée par de fortes températures. Cela peut expliquer le niveau de dessiccation plus élevé en 2025 comparé à celui enregistré en 2024. Au niveau du suivi visuel,

quelques microfissures ponctuelles ont été observées sur la chaussée au niveau de la zone C2. L'explication du comportement du capteur T10 à 2,50 m de profondeur peut venir de la présence de bois très denses de ce côté de la chaussée. La présence racinaire observée lors de la pose de l'instrumentation (Figure 11) illustre l'influence de la végétation sur le comportement hydromécanique du sol à ce niveau.



Figure 11. Photo illustrant la présence de racines au niveau des accotements bordés de bois très denses

5 CONCLUSIONS

Dans cette étude, les résultats de suivi d'une expérimentation in situ de la technique de stabilisation chimique des sols argileux par injection de solutions de biocimentation BCEM a été présentée et discutée.

Ce premier retour d'expérience 2 ans post-travaux durant deux périodes de sécheresse à intensité contrastée, met en évidence des comportements hydromécaniques différenciés selon la profondeur et les conditions locales d'exposition. L'analyse souligne notamment l'influence de la profondeur d'injection, appréciée à partir des zones instrumentées, sur la maîtrise des variations hydriques dans la zone active. Les résultats permettent ainsi d'identifier plusieurs critères d'optimisation pour les applications futures, tels que l'adaptation de la profondeur de traitement à l'épaisseur réellement sollicitée, ainsi que la prise en compte de la végétation et de l'exposition solaire, facteurs déterminants dans la dynamique hydrique.

Le site étudié présente par ailleurs un contexte géologiquement complexe, marqué par une hétérogénéité lithologique, une configuration en pente et une forte variabilité hydrique liée au couvert végétal. La méthode de mise en œuvre in situ doit essentiellement être étudiée et éprouvée car elle détermine l'efficacité et la durabilité du traitement.

Enfin, il est nécessaire de vérifier les conditions environnementales d'emploi de ces produits, notamment en ce qui concerne leur écotoxicité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le département du Loiret (45) pour son soutien financier et appui technique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cardoso, R., Vieira, J., Calheiros, F., Borges, I. (2023a). A simple model for the water retention curve of compressible biocemented sands using MIP results. *E3S Web of Conf.* 382, 09001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338209001>
- Cardoso, R., Vieira, J., Borges, I. (2023b). On the use of biocementation to treat collapsible soils. *Engineering Geology* 313, 106971. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106971>
- Ighil Ameer, L. (2023). Analysis of climate change impacts on the shrinkage-swelling phenomenon of clayey soils to adapt infrastructures. *8th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2023)*, E3S Web of Conf, Volume 382, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338201003>
- Ighil Ameer, L. (2022). Les maisons et les routes exposées au RGA à l'épreuve de l'adaptation au changement climatique. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Lyon - France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03720254/>
- Li, X.S., 2003. Effective stress in unsaturated soil: a microstructural analysis. *Géotechnique*, 53(2), pp.273-277.
- Harran, R., Terzis, D., Laloui, L. (2023). Mechanics, Modeling, and Upscaling of Biocemented Soils: A Review of Breakthroughs and Challenges. *International Journal of Geomechanics* 23, 03123004. <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-8446>
- Peron, H., Laloui, L., Hueckel, T. and Hu, L.B. (2009) 'Desiccation cracking of soils', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(7-8), pp. 869-888.
- Terzis, D. and Laloui, L. (2023). Method and system for producing a carbonate-containing species-rich, nitrogen-containing species-free solution. Us Patent Application. 17/925,960.
- Terzis, D., Laloui, L., Dornberger, S. and Harran, R. (2020). A full-scale application of slope stabilization via calcite bio-mineralization followed by long-term GIS surveillance. In *Geo-Congress* (pp. 65-73). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Walrave, N., Mirensky, L., Halter, W., Terzis, D. and Katterbach, M. (2026) 'Biocementation for sandy levee erosion protection: laboratory evaluation of ammonium-free biocementation', in *Proceedings of the 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vienna.