

DIGUES EN LIMONS TRAITÉS À LA CHAUX : ETAT DES MATERIAUX 6 ANS APRES LA MISE EN ŒUVRE

LIME-TREATED SILT DIKES: STATE OF MATERIALS 6 YEARS AFTER IMPLEMENTATION

Federica BERTOLA¹, Fabien KLOTZ¹, Sylvie NICAISE², Bertrand FRANÇOIS³, Pierre GERARD⁴

¹ *Lhoist, Nivelles, Belgique*

² *INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France*

³ *Department of Urban and Environmental Engineering, Université de Liège, Belgique*

⁴ *BATir Department, GeoMechanics Laboratory (LGM), Université libre de Bruxelles (ULB), Belgique*

RÉSUMÉ – Deux digues expérimentales ont été construites avec des sols traités à la chaux dans le sud de la France. L'article expose les résultats de campagnes de surveillance à long terme menées pour estimer les propriétés des matériaux en place. Les paramètres physico-chimiques, la perméabilité et les propriétés mécaniques sont présentés et discutés en fonction de la profondeur d'échantillonnage au sein de l'ouvrage.

ABSTRACT – Two experimental dikes were built using lime-treated soils in the south of France. The paper discusses the results of long-term monitoring campaigns conducted to assess the properties of the materials in place. Physico-chemical parameters, permeability, and mechanical properties are presented and discussed as function of the depth of sampling inside the structure.

1. Introduction

Le traitement des sols à la chaux est une technique largement utilisée en terrassement pour améliorer les propriétés des sols contenant une fraction argileuse. Le traitement des sols argilo-limoneux fins à la chaux entraîne des effets à courts terme et des effets à long terme. A court terme, l'ajout de chaux permet d'améliorer les caractéristiques physiques du sol et son comportement au compactage. Ensuite, l'ajout de chaux en quantité suffisante permet de développer des propriétés géotechniques améliorées par rapport aux sols non traités, notamment en termes de résistance à la compression et au cisaillement (Bell, 1996 ; Little, 1995). Cet effet de stabilisation se poursuit dans le temps (effet à long terme). Plusieurs programmes de recherche ont démontré l'intérêt du traitement pour les ouvrages hydrauliques : augmentation de la résistance à l'érosion et obtention de valeurs de perméabilité limitées grâce à des procédures de mise en œuvre spécifiques (Nerincx et al., 2018). De nouvelles conceptions économes en ressources par rapport aux techniques de renforcement classiques sont alors possibles.

L'efficacité du traitement de sols à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques a été largement étudiée au niveau laboratoire, mais seules quelques structures réelles ont été caractérisées plusieurs années après leur construction pour vérifier la pérennité de leurs propriétés. Cependant, il s'agit généralement de remblais traités à la chaux sans réelle vocation hydraulique (Das et al., 2021 ; Chabrat et al., 2023).

Les résultats présents dans la littérature démontrent dans certains cas que les performances des structures en sol traité à la chaux ne sont pas affectées par l'exposition environnementale : c'est le cas du canal Friant-Kern en Californie où il a été montré que la stabilité améliorée de la structure est maintenue après 40 ans de contact permanent avec l'eau (Akula et al., 2020). Haas et Ritter (Haas et Ritter, 2019) ont évalué l'effet de la

carbonatation après des années d'exposition environnementale, confirmant que 34 ans après la construction de la structure, la quantité de chaux disponible reste suffisante pour les réactions pouzzolaniques et l'augmentation de la résistance mécanique du sol traité à la chaux. D'autres, cependant, ont observé l'altération de certaines propriétés mécaniques et physiques sur la partie superficielle de structures en sol traité à la chaux, exposées aux agents atmosphériques durant plusieurs années (Chabrat et al., 2023).

Dans ce contexte, l'étude présentée dans cet article a pour but d'étudier les propriétés de deux digues expérimentales, traitées à la chaux, construites dans le sud de la France après 6 ans d'exposition à l'environnement. Des campagnes ont été menées pour collecter les échantillons nécessaires à la caractérisation en laboratoire afin d'évaluer l'évolution des paramètres physico-chimiques, de la perméabilité et des résistances mécaniques. Après une présentation des ouvrages, les méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons sont décrites. Les résultats des tests de laboratoire sont présentés et discutés. Un article complémentaire sera présenté lors du colloque Dignes 2024. Davantage axé sur la résistance à l'érosion et son évolution, il compare les résultats obtenus à court et moyen terme avec ceux obtenus après des années d'exposition (Nicaise et al, 2024).

2. Les ouvrages hydrauliques expérimentaux

Le premier site étudié est une digue expérimentale du programme de recherche DigueELITE construite en juillet 2015. Située en bordure de la rivière Vidourle dans le Sud de la France, le démonstrateur se caractérise par une longueur de 50 mètres, une hauteur de crête de 3,5 m et des pentes de 1,5H/1V ; il comprend une section de sol traité à la chaux et une section de sol non traité (figure 1). Le sol utilisé pour la construction est un limon extrait localement avec un indice de plasticité I_p égal à 5, traité en centrale à 2% de chaux vive. Les talus n'étaient pas recouverts de terre végétale, le sol est donc directement exposé à l'environnement. Le remblai concerné par les expérimentations est orienté plein sud et est donc soumis à de fortes variations de température. Il n'est pas en contact direct avec le Vidourle, qui se trouve plusieurs mètres en contrebas. La nappe phréatique est située 2 à 3 mètres sous la base de l'ouvrage.

Le projet a tout d'abord permis de confirmer les procédures d'utilisation et mise en place des sols traités pour la construction d'ouvrages hydrauliques, qui diffèrent des modalités de traitement conventionnel. Grâce à son historique de construction bien connu (Nerincx et al., 2018), la structure peut désormais être utilisée pour réaliser des tests visant à évaluer la durabilité de la solution de traitement à la chaux.



Figure 1. Digue expérimentale du Vidourle (photo DigueELITE)



Figure 2. Remblais expérimentaux des Salin de Giraud

Pour le deuxième site construit en novembre 2017 lors du programme de construction des remblais expérimentaux mené par le SYMADREM (Syndicat mixte interrégional d'aménagement des digues du delta du Rhône et de la mer) dans les Bouches du Rhône, le traitement à la chaux a été une des solutions prises en considération pour obtenir des

digues résistantes à la surverse. Deux remblais ont été construits avec les sols locaux (un mélange d'un sol limoneux et d'un sol argileux a conduit à obtenir un sol limoneux à faible teneur en argile avec un indice de plasticité I_P égal à 9). Les remblais ont une hauteur en crête de 2 m et une pente de 2.5H/1V. Un remblai a été traité à la chaux (traitement en place, 2% de chaux vive) avec une section couverte par de la terre végétale (30 cm d'épaisseur) et une section directement exposée à l'environnement. L'autre remblai a été construit avec du sol non traité. La figure 2 montre la vue aérienne des deux remblais ; l'exposition des talus étudiés est au sud pour la partie traitée et au nord pour celle non traitée, donc davantage protégée des amplitudes de température que le remblai traité.

Les remblais ne sont pas en contact direct avec le Rhône, mais la nappe du fleuve est proche des remblais. Pendant la période humide, la plate-forme est impactée par les remontées de la nappe. La nappe du Rhône est à cet endroit légèrement salée par les remontées marines (concentrations en sel de l'ordre de 12 g.l⁻¹).

Les démonstrateurs construits lors des deux projets décrits ci-dessus ont été exposés aux conditions environnementales des deux sites pendant 6 ans. Dans les deux cas, il s'agit d'une exposition à un climat méditerranéen avec des températures comprises entre 0 et 38°C, de longues périodes de sécheresse (3 à 4 mois), sans gel, avec des épisodes de vents violents et d'orages.

3. Prélèvement et préparation d'échantillons

Deux campagnes de prélèvement ont été menées en juin 2021 sur la digue du Vidourle et en février 2023 pour Salin de Giraud, au cours desquelles de nombreux échantillons ont été prélevés dans les corps des remblais traités à la chaux.

Sur la digue du Vidourle, des blocs ont été extraits à la pelle mécanique : deux tranchées étroites distantes d'un mètre ont été creusées dans un premier temps. Les blocs ont ensuite été retirés du remblai entre les deux tranchées au moyen d'un godet large. Les blocs extraits ont été découpés sur place à l'aide d'une scie de sol pour obtenir des pièces d'une taille d'environ 40 x 40 x 30 cm (certaines phases d'échantillonnage sont illustrées dans la figure 3a et b). Les matériaux ont été prélevés à plusieurs endroits et sur 2 couches de la plate-forme limoneuse traitée à la chaux, une plus superficielle (couche 7 de 30 à 60 cm) et une plus en profondeur (couche 6 de 60 à 90 cm). Pour finir, les éprouvettes ont été obtenues au laboratoire par carottage sec des blocs avec un carottier diamanté de diamètre intérieur de 10 cm (pour les tests directs de cisaillement et de perméabilité : diamètre de 10 cm et hauteur d'environ 10 cm ; pour les tests de compression uniaxiale : rapport longueur/diamètre des échantillons entre 1 et 1,6).

Dans la digue de Salin de Giraud les échantillons ont été prélevés par des forages carottés à partir de la crête de digue (figure 3c). Les carottes ont été extraites du cœur de la digue sur une profondeur de 2 mètres à l'aide d'une carotteuse triple tube en utilisant l'appareil en mode battage jusqu'à échec de pénétration, puis en terminant par un carottage triple enveloppe avec de l'eau avec un taux de pénétration plus rapide pour éviter un lessivage trop important. Les carottes ont ensuite été sectionnées en laboratoire pour obtenir des échantillons d'une hauteur adéquate pour les tests.

Pour les analyses physico-chimiques, les échantillons de sol traité sur les deux digues ont été collectés manuellement à l'aide d'un ciseau de maçon. Ils ont été excavés par couches d'environ 2 à 4 cm d'épaisseur jusqu'à une profondeur de 30 cm, stockés en sacs plastiques étanches et référencés selon leur profondeur perpendiculaire à la surface (figure 3d). Une différenciation a été faite entre les sections protégées par une couverture de terre végétale et les sections non protégées dans le cas de Salin de Giraud.



Figure 3. Pelle mécanique pour creuser les tranchées (a), sciage d'un bloc après extraction (b), carotteuse triple tube (c) et point d'échantillonnage manuel (d).

4. Propriétés géomécaniques après 6 ans

4.1. Paramètres physico-chimiques

Les propriétés physico-chimiques ont été mesurées sur les échantillons de sol traité prélevés manuellement, ainsi que, pour les échantillons de Salin de Giraud uniquement, sur les carottes afin de disposer de données à plus grande profondeur (jusqu'à 2 mètres).

La teneur en eau massique, le pH et la teneur en chaux disponible (mesurée conformément à la norme EN 459-2) sont représentés dans la figure 4 en fonction de la profondeur de prélèvement.

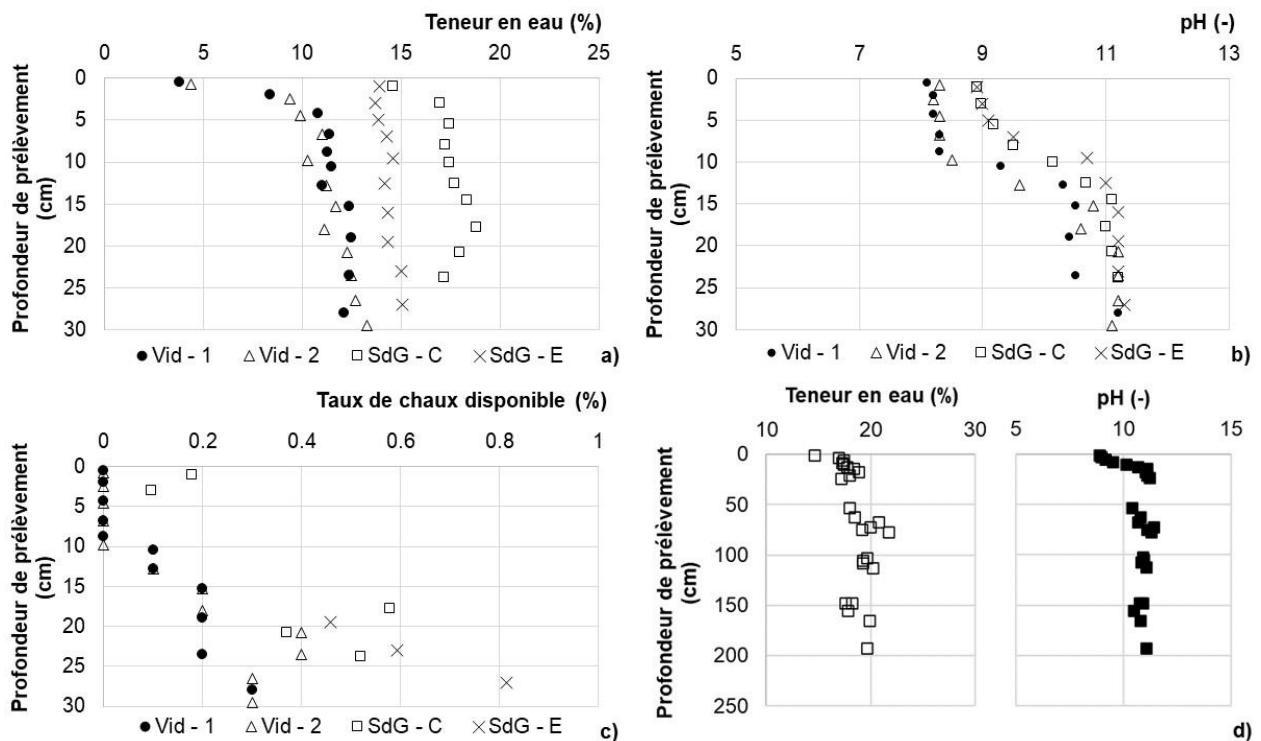


Figure 4. Teneur en eau (a), pH (b) et taux de chaux disponible (c) en fonction de la profondeur, teneur en eau et pH mesurés jusqu'à 2 m pour Salin de Giraud d) (Vid - 1 et Vid - 2 : deux points de prélèvement sur Vidourle, SdG - C et SdG - E : deux points de prélèvement sur Salin de Giraud, avec et sans terre végétale respectivement)

La teneur en eau en fonction de la profondeur apporte des informations sur l'état de conservation du sol traité. La période de prélèvements influence les résultats : la campagne sur le démonstrateur de Vidourle a été conduite au mois de juin en période sèche et chaude, ce qui explique la très faible teneur en eau des 5 premiers centimètres (dans les deux points

de prélèvement manuel différents pour la répétabilité des mesures, Vid – 1 et Vid – 2). Au contraire, la campagne de Salin de Giraud a été conduite au mois de février en période humide ; on peut noter la différence en présence (SdG – C) ou non (SdG – E) de couverture végétale : le sol superficiel est préservé de l'assèchement sous la terre végétale. La figure 4d montre les résultats obtenus sur les carottes prélevées dans le cœur de l'ouvrage de Salin de Giraud : les teneurs en eau sont proches de celles de mise en œuvre (autour de 20%).

La mesure du pH permet de comprendre si les produits pouzzolaniques sont encore stables et si la réaction pouzzolanique est toujours en cours (milieu alcalin, pH supérieur à 9) ou si l'exposition climatique ainsi que le phénomène de carbonatation ont provoqué une dégradation de la surface de la structure. Pour les deux démonstrateurs, on peut noter que la dégradation (pH < 9) est limitée à une très faible épaisseur (premiers 10 cm) ; on peut également apprécier la forte augmentation au-delà de 20 cm de profondeur, avec des pH autour de 11. Comme le souligne la figure 4d, le pH dans le remblai de Salin de Giraud, après les premiers centimètres dégradés où la couverture en sol ne fait aucune différence, est ensuite stable et s'installe autour de 11 pour toute la profondeur (2 m).

La mesure du taux de chaux disponible permet de déterminer la quantité de chaux encore disponible pour la réaction pouzzolanique (sachant que la quantité de chaux ajoutée initialement est de 2 %), et d'estimer le taux de carbonatation. La figure 4c démontre que dans les premiers 10 cm d'épaisseur, la chaux disponible n'est plus présente ou en quantité très limitée. Cependant, on remarque une inflexion autour de 10 cm de profondeur avec des valeurs progressivement plus élevées en accord avec les mesures de pH.

Dans le cas du Vidourle en plus des paramètres physico-chimiques, une analyse a été réalisée pour estimer le taux de carbonatation. Cela n'a pas été possible sur les échantillons prélevés à Salin de Giraud en raison du taux de carbonates de calcium très élevé dans le sol initial. Le taux de carbonatation de la chaux ajoutée via le traitement peut être calculé comme indiqué dans la formule (1) :

$$\%Carbonatation = \frac{(PAF_{950^{\circ}C \text{ sol traité}} - PAF_{950^{\circ}C \text{ sol non traité}}) \frac{M_{CaO}}{M_{CO_2}}}{\%CaO_{ajouté \text{ via le traitement}}} \times 100 \quad (1)$$

où *PAF* est la différence entre la masse avant et après calcination à 950°C

Pour le calcul du taux de carbonatation (illustré dans la figure 5) le pourcentage de CaO ajouté a été considéré égal à 1,8 % (2 % de chaux vive CL-90 ajouté lors de la construction). Une bande de carbonatation peut être observée entre 0 et 15 cm ; le taux de carbonatation de la chaux introduite diminue ensuite considérablement en dessous de 15 cm. Il faut considérer que le sol non traité contient naturellement beaucoup de carbonates, plus de 10 fois la quantité de chaux ajoutée, ce qui rend difficile un calcul précis et l'estimation du carbonate effectivement formé lors du processus de carbonatation. Cela dit, les valeurs mesurées mettent en évidence la présence d'un front d'environ 10 cm où entre 20 et 40 % de la chaux ajoutée a été consommée par le phénomène de carbonatation. Les mesures sont en accord avec celles de pH et de chaux disponible. Au-delà des 15 cm de profondeur, le taux de carbonatation est probablement contenu entre 0 et 10 %.

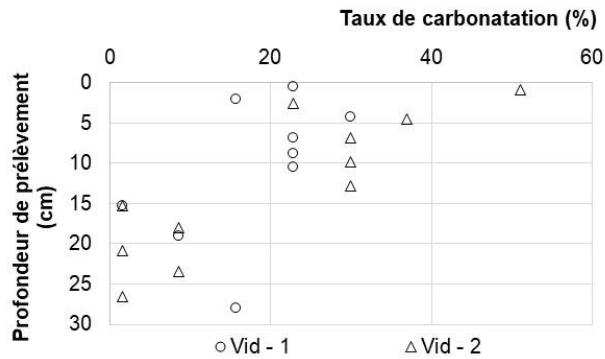


Figure 5. Taux de carbonatation en fonction de la profondeur mesuré sur Vidourle

4.2. Perméabilité

La mesure de la perméabilité a été réalisée en cellule triaxiale sous une contrainte de confinement de 200 kPa.

Les valeurs de perméabilité mesurées sont faibles pour les deux démonstrateurs ; dans le cas de Vidourle, au sein d'un même bloc, les résultats sont assez reproductibles pour la couche plus profonde (entre $3 \cdot 10^{-8}$ et $2 \cdot 10^{-9}$ m.s⁻¹, obtenus sur 6 échantillons) ; le bloc extrait de la couche plus superficielle montre des valeurs avec deux ordres de grandeur de variation (entre $1 \cdot 10^{-8}$ et $1 \cdot 10^{-10}$ m.s⁻¹, obtenus sur 3 échantillons). Les mesures effectuées sur la digue de Salin de Giraud montrent des valeurs très stables pour toute la profondeur étudiée (2 m) entre $4 \cdot 10^{-10}$ et $7 \cdot 10^{-11}$ m.s⁻¹, obtenus sur 12 échantillons. L'ensemble des valeurs mesurées de perméabilité, tant sur la digue de Vidourle que de Salin de Giraud, sont acceptables puisqu'elles sont généralement inférieures à 10^{-8} m.s⁻¹. Cela s'explique en partie par la mise en œuvre par compactage de la digue, qui s'est faite du côté humide de l'optimum et par pétrissage (Herrier et al., 2012).

4.3. Essais de cisaillement direct

Après la réalisation des essais de perméabilité, les échantillons cylindriques saturés en eau ont été installés dans une cellule de cisaillement afin d'y réaliser des cisaillements en conditions consolidées non-drainées (CU), avec des contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa.

D'une manière générale, les résultats de résistance au pic montrent une cohésion (c) allant de 126 kPa à 230 kPa et un angle de frottement (ϕ) de 18° à 43° pour la digue de Vidourle et une cohésion de 112 kPa à 337 kPa et un angle de frottement de 13° à 59° pour la digue de Salin de Giraud. Ces résultats en termes de cohésion et d'angle de frottement sont difficilement interprétables, car les valeurs obtenues sont assez sensibles à l'hétérogénéité du matériau, puisqu'un couple (c, ϕ) est obtenu à partir de 3 essais sur 3 échantillons distincts. Il est ainsi plus représentatif de suivre la tendance des résistances au cisaillement en fonction de la profondeur aux différentes contraintes normales (figure 6). On observe ainsi clairement une tendance à l'augmentation de la résistance au cisaillement avec la profondeur, tant pour la digue de Vidourle que pour celle de Salin de Giraud, à l'exception des valeurs à 200 kPa de contrainte normale pour Salin de Giraud (qui peut certainement s'expliquer par une hétérogénéité locale). Malgré des résistances au cisaillement sensiblement plus faibles dans la partie plus superficielle des digues, les valeurs restent assez significatives puisque les cohésions obtenues sont toujours supérieures à 100 kPa, ce qui est bien supérieur aux valeurs des sols non-traités, démontrant ainsi l'effet du traitement.

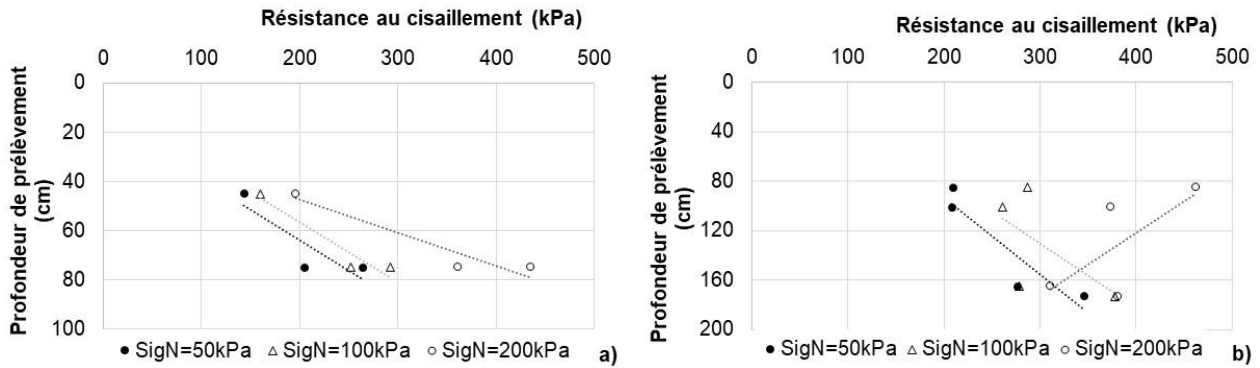


Figure 6. Evolution avec la profondeur de la résistance de pic au cisaillement direct sur les prélèvements de Vidourle (a) et Salin de Giraud (b) à 3 contraintes normales différentes (sigN).

4.4. Essais de compression uniaxiale

Des essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur des échantillons cylindriques d'environ 10 cm de diamètre ; l'élancement des échantillons (rapport H/D) étant systématiquement inférieur à 2 (condition normalisée), un facteur correctif sur la résistance mesurée a été appliqué, conformément aux recommandations de la norme ASTM C42. La résistance à la compression uniaxiale et le module de rigidité déduit de la pente de la courbe expérimentale (contrainte axiale en fonction de la déformation axiale) sont représentés à la figure 7.

Dans le cas du Vidourle, les valeurs sont plus reproductibles, mais plus faibles, pour la couche superficielle (couche 7), tant pour la résistance à la compression que pour le module de rigidité. Dans le cas de Salin de Giraud, le nombre d'échantillons testés et la variabilité des résultats ne permettent pas de tirer de conclusions. La résistance à la compression se situe entre 0,4 et 0,75 MPa, tandis que le module de rigidité varie entre 70 et 161 MPa.

Il existe un lien évident entre le module de rigidité et la résistance à la compression simple, la rigidité augmente lorsque la résistance à la compression augmente.

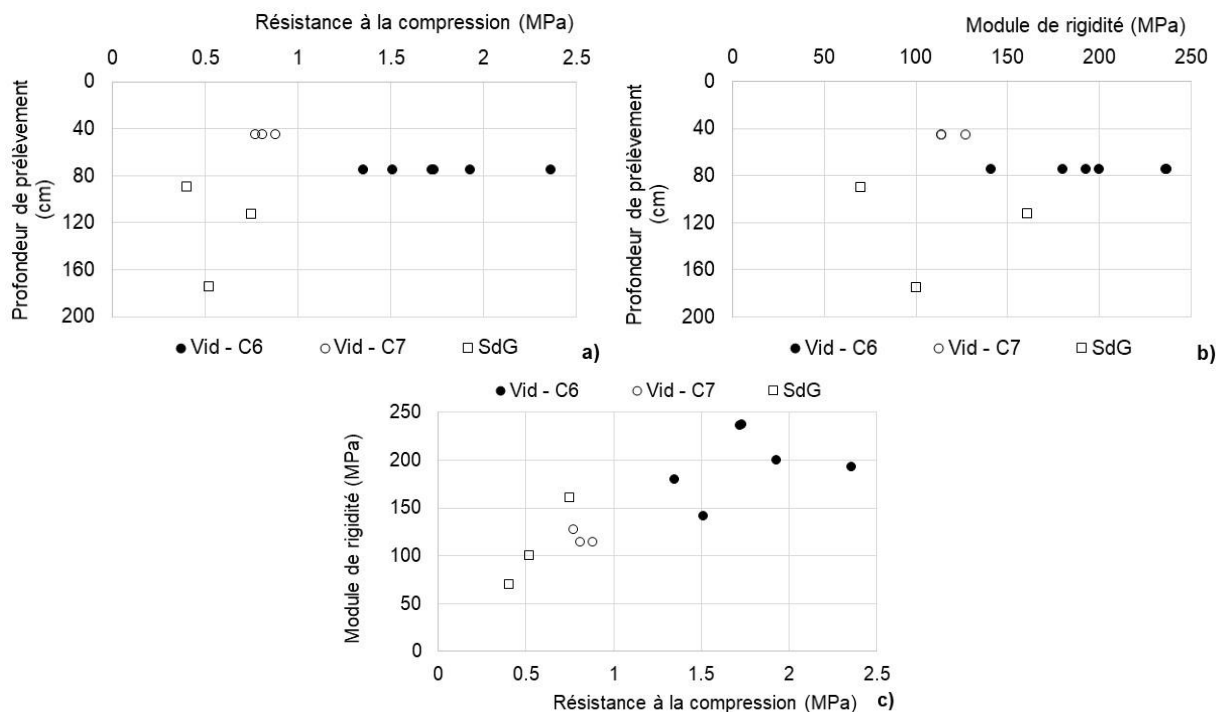


Figure 7. Résistance à la compression (a) et module de rigidité (b) en fonction de la profondeur, relation entre les 2 paramètres (c) (Vid - C6 et Vid - C7 : deux couches de prélèvement sur Vidourle, SdG : échantillons prélevés sur Salin de Giraud)

5. Conclusions

Deux digues expérimentales ont été construites dans le sud de la France afin d'éprouver la technique du traitement des sols à la chaux en ouvrages hydrauliques.

Après 6 ans d'exposition environnementale, certaines conclusions peuvent être tirées concernant la pérennité des propriétés des deux structures grâce à des campagnes de surveillance et des investigations en laboratoire :

- L'impact des conditions environnementales s'atténue à partir de 15 cm de profondeur : le taux de carbonatation de la chaux diminue en dessous de cette profondeur. Également, les mesures de pH et de chaux disponible montrent qu'au-delà de 15 cm, la chaux est encore en quantité suffisante pour que les réactions se poursuivent ;
- La perméabilité et les résistances mécaniques sont satisfaisantes. Malgré des difficultés expérimentales inhérentes aux tests sur échantillons intacts, une analyse globale montre une tendance à l'amélioration en profondeur, lorsque l'impact de l'environnement est moindre. Les performances sont quoi qu'il en soit, toujours nettement supérieures à celles du sol non traité.

La communication apporte des éléments complémentaires à ceux déjà publiés concernant la conservation des performances des sols traités à la chaux soumis à l'environnement. Il est important de continuer à collecter et comparer des données sur des structures construites en utilisant différents matériaux, exposées à diverses conditions atmosphériques et sur des périodes variées pour élargir l'expérience sur ce sujet.

C'est pourquoi une campagne sur la digue du Vidourle est prévue prochainement pour suivre d'éventuelles évolutions et prélever des échantillons en profondeur.

6. Références bibliographiques

- Akula P., Hariharan N., Little D., Lesueur D., Herrier G. (2020). Evaluating the Long-Term Durability of Lime Treatment in Hydraulic Structures: Case Study on the Friant-Kern Canal. *Transportation Research Record* 0361198120919404.
- Bell. F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, Volume 42, Issue 4, Pages 223–237.
- Chabrat N., Cuisinier O., Masroufi F. (2023), In Situ Alteration of the Hydro-Mechanical Behaviour of a Compacted Stabilised Expansive Soil. *Geotechnics*, 3(3), 921–936.
- Das G., Razakamanantsoa A., Herrier G., Saussaye L., Lesueur D., Deneele D. (2021). Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty soil embankment after seven years of atmospheric exposure: Mechanical, physicochemical, and microstructural studies. *Engineering Geology*, Volume 281.
- Deneele D., Dony A., Colin J., Herrier G., Lesueur D. (2021). The carbonation of a lime-treated soil: experimental approach. *Materials and Structures* 54.
- Haas S., Ritter H.-J. (2019). Soil improvement with quicklime – long-time behaviour and carbonation, *Road Materials & Pavement Design*, Volume 20, Issue 8, Pages 1941-1951.
- Herrier G., Lesueur D., Puiatti D., Auriol J.-C., Chevalier C., Haghighi I., Cuisinier O., Bonelli S., Fry, J.-J. (2012). Lime treated materials for embankment and hardfill dam. In *ICOLD 2012–International Symposium on Dams for a Changing World*, Kyoto, Japan.
- Little D.N. (1995). *Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. Dubuque (Iowa), Published by Kendall/Hunt Publishing Company.
- Nerincx N., Bonelli S., Nicaise S., Herrier G., Lesueur D., Tachker P., Puiatti D., Cornacchioli F. (2018). The DigueELITE project: lessons learned and impact on the design of levees with lime-treated soils, *Int. J. on Hydropower & Dams*, Volume 25, Issue 6.
- Nicaise S., Klotz F., Bertola F., Byron F., Chaouch N., Grémeaux Y., Aubriet J., Ozturk T., Doghmane A., Bonelli S. (2024). Evolution des performances de digues traitées à la chaux en climat méditerranéen, *Digues 2024*, Aix-en-Provence, France.