

Réduction du gonflement des sols argileux par injection de cations : Évaluation géotechnique et physico-chimique

Reduction of swelling in clay soils by cation injection: Geotechnical and physico-chemical evaluation.

Serge Lambert^{1*}, Laurent Briançon², Stéphane Vacherie²
1 Keller Fondations Spéciales, 2 rue Denis Papin, 67120 Duttlenheim, France
2 GEOMAS, Université de Lyon, INSA Lyon
*serge.lambert@keller.com

RESUME : Cette étude examine l'efficacité et les mécanismes d'action d'une injection saline brevetée Keller (RemediaClay), riche en potassium, destinée à modifier le complexe d'échange cationique des argiles et à réduire leur affinité pour l'eau. Les travaux expérimentaux, menés par le laboratoire GEOMAS (INSA Lyon) à la demande de Keller, ont porté sur des sols naturels et des matériaux traités *in situ*, complétés par des essais de laboratoire. Les caractérisations géotechniques et physico-chimiques ont inclus la valeur au bleu de méthylène, les limites d'Atterberg et la capacité d'échange cationique (CEC). Les résultats montrent que les sols naturels présentent des indices de plasticité élevés ($IP > 30$) et des valeurs de CEC > 35 méq/100 g, typiques d'argiles gonflantes. Après traitement, la valeur au bleu de méthylène diminue d'environ 30 %, l'indice de plasticité d'environ 20 %, et la CEC passe de 40 à moins de 30 méq/100 g. Les essais de gonflement confirment une diminution moyenne de 50 %. Le traitement agit principalement par échange cationique et réorganisation structurale du réseau argileux, entraînant une réduction significative de la plasticité, de la CEC et du potentiel de gonflement. Ces résultats apportent un éclairage nouveau sur les mécanismes de stabilisation des sols argileux gonflants et confirment la pertinence de cette approche pour la durabilité des ouvrages géotechniques sur ces sols.

ABSTRACT: This study examines the effectiveness and mechanisms of action of a patented saline injection by Keller (RemediaClay), rich in potassium, designed to modify the cation exchange complex of clays and reduce their affinity for water. The experimental work, carried out by the GEOMAS laboratory (INSA Lyon) at the request of Keller, focused on natural soils and *in situ* treated materials, complemented by laboratory tests. Geotechnical and physico-chemical characterizations included the methylene blue value, Atterberg limits, and cation exchange capacity (CEC). The results show that natural soils have high plasticity indices ($PI > 30$) and CEC values > 35 meq/100 g, typical of swelling clays. After treatment, the methylene blue value decreases by about 30%, the plasticity index by about 20%, and the CEC drops from 40 to less than 30 meq/100 g. Swelling tests confirm an average reduction of 50%. The treatment acts mainly through cation exchange and structural reorganization of the clay network, leading to a significant reduction in plasticity, CEC, and swelling potential. These results provide new insights into the stabilization mechanisms of swelling clay soils and confirm the relevance of this approach for the durability of geotechnical structures on such soils.

Mots-clés: Argile gonflante ; RemediaClay ; échange cationique ; injection saline ; essais géotechniques

1 INTRODUCTION

Le comportement vis-à-vis du gonflement des sols argileux représente un enjeu majeur pour la stabilité et la durabilité des ouvrages géotechniques. Les argiles fortement expansives, notamment celles riches en smectites ou en montmorillonites, se caractérisent par une capacité importante d'absorption d'eau, induisant des variations volumétriques susceptibles de générer des déformations différentielles au sein des fondations et des infrastructures.

Dans ce contexte, un protocole de traitement basé sur l'injection d'une solution cationique enrichie en potassium a été étudié afin de réduire le potentiel de

gonflement des sols argileux. L'évaluation expérimentale, menée en collaboration avec le laboratoire GEOMAS (INSA Lyon), vise à caractériser les mécanismes physico-chimiques associés à ce traitement et à quantifier ses effets sur les propriétés des matériaux.

La campagne d'essais avait pour objectifs :

- d'examiner la pertinence d'essais d'identification simples et rapides pour évaluer l'efficacité du traitement *in situ* ;
- de déterminer l'efficacité intrinsèque de la solution injectée sur les paramètres géotechniques et physico-chimiques du sol ;

- d'estimer la proportion réelle de produit diffusé dans le sol traité par comparaison avec le taux d'injection théorique.
- examiner si la teneur en potassium retenue dans la formulation assure un niveau d'efficacité optimal.

2 PRESENTATION DE REMEDIACLAY

La solution RemediaClay, constituée d'ions potassium et ammonium en solution aqueuse et associée à un polymère naturel, est ensuite injectée à faible pression par passes successives de 30 à 40 cm en remontée de forage. Ce protocole a été mis en œuvre sur une planche d'essai de 80 ml de voie ferrée à partir de points d'injection disposés selon un maillage triangulaire homogène de 0,80 m par 0,80 m et descendu jusqu'à 2,5 m de profondeur. Ce maillage favorise une diffusion entre la solution et les feuillets argileux, condition essentielle à la substitution des cations natifs hautement hydratés par des cations faiblement hydratés, responsables de la réduction des pressions de gonflement. Du point de vue environnemental et d'efficacité des échanges, on veille à ce que la solution reste toujours neutre, quitte à ajouter légèrement de la soude caustique lorsque l'eau utilisée présente une tendance acide. Si l'effet des cations de potassium et d'ammonium sont connus pour réduire la réduction de potentielle de gonflement (Katti et al., 1966, Petry et Armstrong, 1989, Hachichi, 2007), la mise en œuvre par imprégnation posait des problèmes en termes de diffusion de manière homogène dans les argiles. La solution RemediaClay est innovante par l'addition d'un polymère naturel qui favorise la diffusion des cations dans le sol. La formulation utilisée contient 30 % de KCl en masse. Une analyse complémentaire a été menée afin d'évaluer l'influence de concentrations différentes sur le comportement du matériau.

3 METHODOLOGIE

3.1 Echantillonnage

Sur un site traité par des injections de cette solution, 7 échantillons ont été prélevés à 2 m de profondeur : trois dans la zone traitée (échantillons n°1 et 3 aux extrémités et n° 2 au centre) et quatre dans des zones naturelles distantes d'une dizaine de mètres (échantillons 4 à 7) de la planche d'essais. Les prélèvements ont été réalisés selon un plan de sondage précis, permettant de comparer les propriétés des sols avant et après traitement.

3.2 Protocoles expérimentaux

Différents essais en laboratoire ont été réalisés pour caractériser les propriétés des sols argileux, notamment la granulométrie, l'argilosité au bleu de méthylène, la capacité d'échange cationique (CEC) et les limites d'Atterberg.

La détermination de l'argilosité au bleu de méthylène (VBS), selon la norme NF P 94-068, permet de quantifier la fraction argileuse d'un sol en fonction de la quantité et de la nature minéralogique des argiles présentes. L'essai consiste à introduire progressivement une solution de bleu de méthylène de concentration fixée dans un mélange de sol, la VBS étant exprimée comme le rapport entre la masse de colorant utilisée et celle de l'échantillon testé.

L'essai de capacité d'échange cationique (CEC), réalisé conformément à la norme NF EN ISO 23470, mesure la faculté de l'argile à fixer les cations de l'environnement par échange avec des ions cobaltihexammine. La CEC est déterminée par spectrophotométrie, une valeur élevée en général supérieure à 35 méq/100g indiquant un fort potentiel de gonflement du sol.

Enfin, les limites d'Atterberg (liquidité, plasticité, indice de plasticité) sont évaluées sur la fraction fine du sol (< 400 µm) selon la norme NF EN ISO 17892-12 : la limite de liquidité est obtenue par la méthode du cône tombant, la limite de plasticité par roulage en fils, et l'indice de plasticité correspond à la différence entre ces deux teneurs en eau. Ces paramètres sont essentiels pour caractériser le comportement mécanique des sols argileux.

L'essai de gonflement, central dans l'évaluation du comportement expansif des sols, a été mené selon un protocole strict et reproductible. L'ensemble des échantillons est confectionné dans des conditions identiques : après passage à l'étuve (maximum 50 °C, 24 h) chaque échantillon est compacté dans une bague œdométrique de 70 mm de diamètre et 20 mm de hauteur, la quantité de matière étant ajustée puis compactée à l'aide d'une presse pour garantir une densité sèche constante, proche de 1,6.

Lors de chaque essai, l'échantillon est soumis à une contrainte verticale de 36 kPa (correspondant à la profondeur de prélèvement) pendant 30 à 60 minutes. Ensuite, la phase d'hydratation est initiée avec de l'eau déminéralisée.

3 types de matériaux ont été testés :

- des matériaux prélevés in situ mais non traités, principalement l'échantillon 6,
- des matériaux traités in situ par les injections de cations principalement l'échantillon 2,

- des matériaux traités en laboratoire par les injections de cations principalement l'échantillon 6.

Pour les essais traités en laboratoire, l'échantillon non traité (ech-6) est d'abord prélevé à sa teneur en eau naturelle (28,5 %), puis traité avec la solution à trois dosages (3 %, 6 % et 9 % en masse de sol humide). Après malaxage, chaque mélange est stocké hermétiquement pendant trois jours, puis la réaction est stoppée par un passage à l'étuve (maximum 50 °C, 24 h). Les échantillons séchés sont soit testés en l'état soit humidifiés à 12 %. Chaque échantillon est alors monté dans l'œdomètre selon la densité sèche cible, puis hydraté à l'eau déminéralisée. Le suivi du gonflement permet de quantifier précisément la réponse volumique des sols en fonction du traitement appliqué. Ce protocole rigoureux assure la comparabilité des résultats et permet d'évaluer de façon fiable l'efficacité des différents dosages sur la réduction du potentiel de gonflement des argiles.

4 RESULTATS

4.1 Caractérisation des sols naturels

La caractérisation des sols argileux non traités repose sur une série d'essais physico-chimiques permettant d'évaluer leur comportement mécanique et leur potentiel de gonflement (Tableau 1).

Les échantillons prélevés durant la période des travaux d'injection sont dans l'ensemble humides à très humides (teneur en eau variable de 27 à 30 %).

Les analyses granulométriques montrent que ces sols présentent une forte proportion de particules fines (< 80 µm), confirmant leur nature argileuse.

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène (VBS), comprises entre 5,7 et 6,3 pour les échantillons naturels, traduisent une argilosité élevée, tandis que les limites d'Atterberg révèlent des indices de plasticité (IP) supérieures ou égales à 34,7, classant ces matériaux parmi les argiles très plastiques à fort aléa de retrait-gonflement selon la classification GTR (argile A3/F3) et l'abaque de Casagrande.

La capacité d'échange cationique (CEC), atteignant en moyenne 37 méq/100g, indique la présence de minéraux gonflants de type smectite ou montmorillonite.

Les essais œdométriques mettent en évidence un potentiel de gonflement significatif, avec des taux dépassant 12 % pour les échantillons secs, ce potentiel

Tableau 1. Récapitulatif des résultats de laboratoire sur les échantillons de sol prélevés en zone traitée (n°1 à 3) et non traitée (n° 4 à 7).

N°	W _{nat} (%)	VBS	W _L (%)	W _P (%)	I _P	CEC (meq/100g)
1	30,3	4,7	51,0	19,9	31,1	30,6
2	27,0	4	52,4	20,1	32,3	26,6
3	32,9	3,7	50,8	20	30,8	18,5
4	32,9	6,3	72,5	37,8	34,7	39,6
5	27,8	5,1	58,3	23,0	35,3	29,1
6	29,4	5,9	61,9	25,0	36,9	39,5
7	30,6	5,7	65,0	22,3	42,7	39,6

diminuant fortement avec l'augmentation de la teneur en eau initiale (Figure 1). Le gonflement de 12,1 % d'un échantillon sec diminue à 10,7% avec une teneur en eau de 13%, de 9,2% avec une teneur en eau de 15 % et enfin de 0,2 % pour une teneur en eau de 25 %.

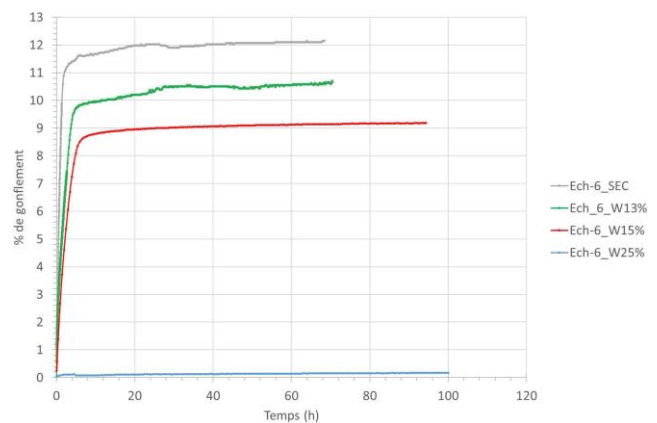


Figure 1. Gonflement de l'échantillon 6 non traité sous différentes configurations de teneur en eau.

La teneur en eau de 25 % est une valeur inférieure à celles mesurées pour l'humidité naturelle.

Il est notable que le gonflement de l'argile de type A3 étudiée cesse dès que le matériau atteint un état humide correspondant à $W_{nat} = 25\%$, soit un degré de saturation d'environ 74 %, bien avant d'atteindre la saturation complète.

A l'état humide selon la classification GTR, l'échantillon ne présente plus de gonflement (Figure 2).

Tous ces essais ont pu montrer que l'argile située à environ 2 m de profondeur dans la zone de

prélèvement est relativement homogène.

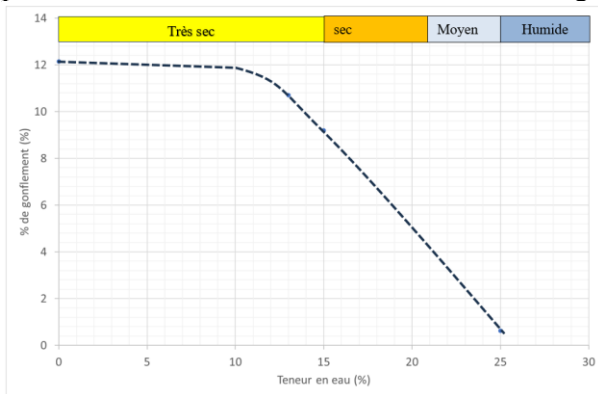


Figure 2. Evolution du gonflement en fonction de la teneur en eau initiale W_{nat} (état d'humidité selon GTR).

4.2 Effets des injections cationiques sur la structure physique de l'argile

Après traitement (Tableau 1), on observe :

- Une diminution de la valeur au bleu de méthylène d'environ 30 %.
- Une réduction de l'indice de plasticité de 15 à 20 %.
- Une baisse de la CEC sous 30 méq/100g.

Il est important de souligner que l'efficacité du traitement peut être vérifiée rapidement et simplement grâce à des essais physiques de laboratoire tels que la mesure de la valeur au bleu de méthylène, de l'indice de plasticité et de la capacité d'échange cationique. Ces tests, faciles à mettre en œuvre, permettent un contrôle efficace et immédiat de la performance du traitement.

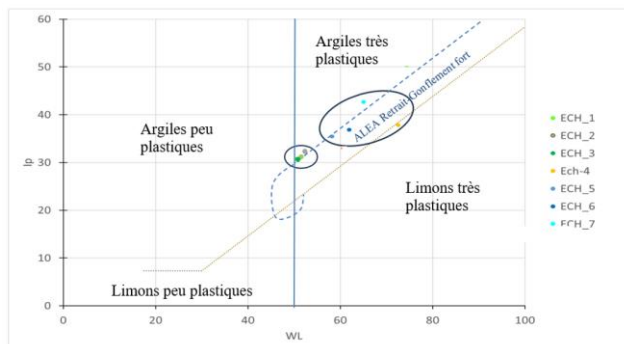


Figure 3. représentation des résultats sur le diagramme de Casagrande du sol traité (n°1 à 3) et du sol non traité (n°4 à 7).

4.3 Quantification de l'effet des injections cationiques sur le gonflement

L'impact des injections de cations a été évalué à partir des essais de gonflement sur une argile totalement desséchée après passage à l'étuve — une condition rarement rencontrée dans la nature — (Figure 4) ainsi que sur une argile préalablement humidifiée à 11 %, (Figure 5) représentant un niveau d'humidité plus représentatif des conditions réelles.

L'échantillon sec sorti de l'étuve et traité a un gonflement de l'ordre de 7,8 % là où l'échantillon non traité également sec sorti de l'étuve a un gonflement de 12 % (voir Figure 4). La réduction de gonflement dans cet état hydrique est de 35 %.

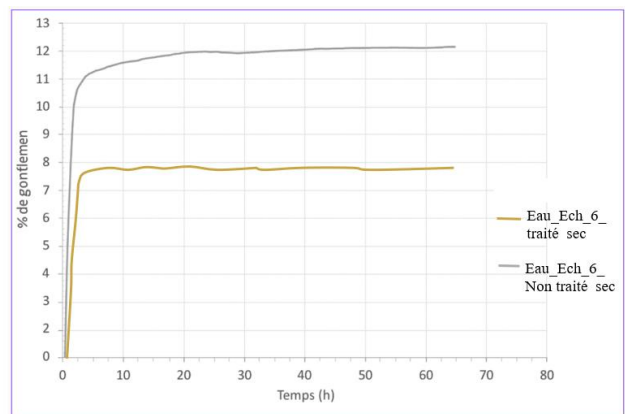


Figure 4. comparaison du gonflement de l'argile traitée avec une argile non traitée secs sortie étuve.

L'échantillon traité réhydraté à 11% a un gonflement de l'ordre de 6.2% là où l'échantillon non traité hydraté à 13% a un gonflement de 10,5% (voir Figure 5). Afin de confirmer la fiabilité des résultats, deux essais de gonflement ont été effectués sur l'échantillon traité. Ils aboutissent à des résultats similaires, avec un taux de gonflement compris entre 6 et 6,5 %.

Si l'on se réfère à la figure 2, l'argile (échantillon 6) à une teneur en eau équivalente de 11 % se caractérise par un gonflement toujours maximal de 12 %, soit une réduction du gonflement de l'ordre de 50 %.

Il convient ainsi de souligner que le pourcentage de réduction du potentiel de gonflement est plus élevé

lorsque l'on compare un échantillon totalement sec en début d'essai à un échantillon légèrement humide.

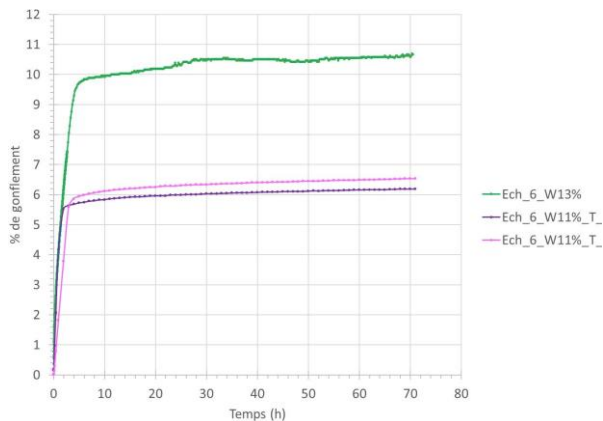


Figure 5. comparaison de gonflement de l'argile traitée et humidifiée à 11 % avec une argile non traitée de quasiment la même valeur d'humidité.

4.4 Validation de l'efficacité du traitement sur la planche d'essais

L'expérimentation a été conduite au printemps, sous des conditions d'humidité particulièrement élevées, ce qui constitue un facteur défavorable à la diffusion homogène et efficace de la solution injectée. Afin de quantifier la proportion réelle de produit incorporé dans le sol après l'opération d'injection, la cinétique de gonflement de l'échantillon traité in situ a été comparée à celle obtenue en laboratoire pour un dosage de 6 et 9 % du poids du sol.

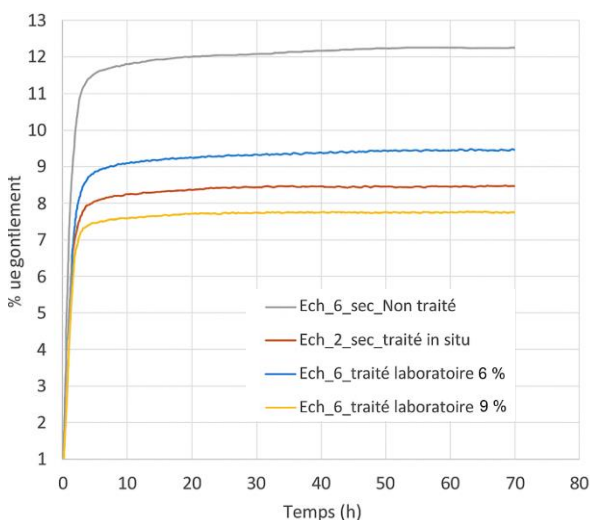


Figure 6. Cinétique de gonflement de l'argile non traitée et traitée par injection in situ et en laboratoire.

L'analyse des courbes de la figure 6 révèle un pourcentage réellement injecté qui peut être estimé de l'ordre de 8 % pour un taux d'injection sur site de 10 %

pondéral du sol traité. Ces résultats démontrent que, malgré une humidité naturelle élevée du sol, l'injection réalisée sur le terrain s'est avérée efficace.

4.5 Analyse de la formulation injectée

La solution brevetée employée pour le traitement des sols argileux résulte d'un programme de recherche initié par Keller États-Unis en 1995. Sa composition et son dosage ont été spécifiquement conçus pour non seulement réduire efficacement le gonflement des argiles, mais aussi optimiser l'imprégnation et la diffusion du produit dans le sol. La formulation RemediaClay intègre une proportion massique de 30 % de KCl.

Nous avons voulu à partir de cette formulation connaître les conséquences d'une réduction du dosage de potassium. La formulation d'origine (Full) a donc été réduite de 20 % (Medium) et de 50 % (Low).

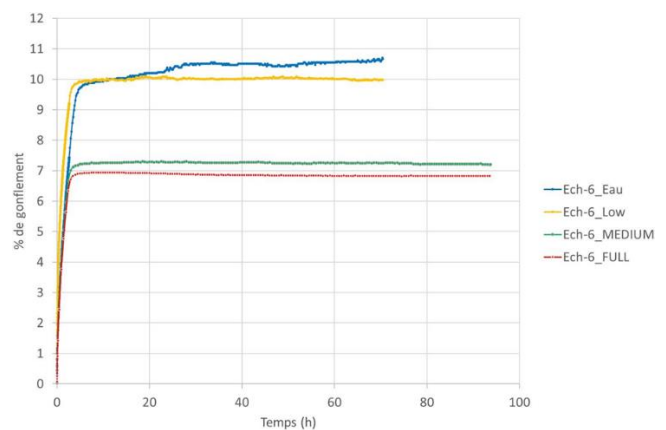


Figure 7. Cinétique de gonflement pour les 3 échantillons ECH_6 hydratés à l'eau, solutions Full, Medium et Low.

Le protocole de test a été simplifié en hydratant dans un bati oedométrique un échantillon naturel directement avec les 3 solutions FULL, MEDIUM et LOW (Figure 7). L'échantillon naturel (n°6) se caractérise avec une teneur en eau initiale de 13 % et une densité sèche de 1,6.

La comparaison des courbes des 3 solutions avec la courbe de gonflement d'un sol naturel montre qu'une réduction d'environ 20 % de la teneur en potassium (formulation MEDIUM) ne semble pas altérer l'efficacité du traitement, tandis qu'une réduction de 50 % (formulation LOW) conduit à une perte notable d'efficacité. Cette étude montre que la solution doit comporter une quantité minimale de KCl pour être efficace. Un dosage plus important n'a pas de conséquence sur la performance du produit. En revanche, lorsque le dosage descend en-dessous de cette valeur minimale, l'efficacité du traitement décroît très rapidement. Les différents ingrédients et

leur dosage de la recette sont déterminants pour permettre une efficacité optimale avec une diffusion facilitée surtout dans un sol caractérisé par une très faible perméabilité.

5 CONCLUSIONS

L'analyse menée montre que les essais d'identification simples — notamment la valeur au bleu de méthylène, les limites d'Atterberg et la capacité d'échange cationique — constituent des indicateurs pertinents pour évaluer rapidement l'efficacité du traitement *in situ*, leurs variations reflétant fidèlement les modifications physico-chimiques induites dans le sol. Par ailleurs, l'efficacité intrinsèque de la solution cationique a été démontrée par la diminution significative de la plasticité, de la CEC et des déformations de gonflement, confirmant le rôle central des mécanismes d'échange ionique dans la réduction du comportement expansif.

La comparaison entre les comportements des matériaux traités en laboratoire et ceux prélevés sur site a permis d'estimer la proportion réelle de produit effectivement diffusée dans le sol, montrant une cohérence satisfaisante avec le taux théorique d'injection malgré les conditions hydriques défavorables rencontrées. Enfin, l'étude de différentes teneurs en potassium au sein de la formulation a mis en évidence que la concentration initialement retenue assure un niveau d'efficacité optimal, tandis qu'une réduction trop importante du dosage entraîne une perte notable de performance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hachichi. (2007). Stabilisation chimique de deux sols gonflants de la région d'Oran. *Revue Française de géotechnique*, Vol. 118, pp. 3-11.
- Katti, R. K., Kulkarni R, R., & Radhakrishnan. (1966). Research on Expansive soils without and with Inorganic Additives. *IRC Road Research Bulletin*, Vol. 10, pp. 1-97.
- Guide des terrassements des remblais et des couches de forme – Fascicule 1 : Principes généraux, CEREMA, Collection Références.
- NF P 94-050 Sols : Reconnaissance et essai – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage, AFNOR, Septembre 1995.
- NF EN 17542-3 Terrassements – Essais géotechniques en laboratoire - Partie 3 : Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche, AFNOR, Juin 2022.
- NF EN ISO 17892-12 Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité, AFNOR, Juillet 2018.
- NF EN ISO 23470 Qualité du sol – Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) effective et des cations échangeables à l'aide d'une solution de trichlorure de cobaltihexamine, AFNOR, Octobre 2018.
- Petry, T., & Armstrong, C. (1989). Stabilization of Expansive Clay Soils. *Transportation research record*, pp. 103-112.