

# Évaluation d'un traitement au sel potassique pour l'atténuation du gonflement des argiles au moyen d'essais d'indice de gonflement libre

## Evaluation of a potassium salt treatment for clay swelling mitigation via free swell index tests

Alan Ribeiro-Santos<sup>1\*</sup>, Benjamin Dardé<sup>1</sup>, Anh-Minh Tang<sup>2</sup>, Abdelkrim Bennabi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *École Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie (ESTP), Cachan, France*

<sup>2</sup> *École nationale des ponts et chaussées (ENPC), Champs-sur-Marne, France*

\**aribeirosantos@estp.fr*

**RÉSUMÉ :** Les cycles de retrait-gonflement des argiles (RGA) représentent un risque significatif pour les ouvrages fondés sur des sols argileux. Une stratégie de mitigation consiste à introduire un sel de potassium, capable de libérer des cations  $K^+$  susceptibles de contribuer à l'inhibition du gonflement. Afin d'évaluer la capacité d'inhibition du gonflement par un sel de potassium, des essais d'indice de gonflement libre (IGL) ont été réalisés en laboratoire sur des matériaux contenant différentes proportions de minéraux argileux gonflants : Argile Verte de Romainville (AVdR), Limon des Plateaux (LdP) et bentonite MX-80. Par ailleurs, différentes concentrations de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ), un composé inorganique couramment utilisé dans les engrais pour l'agriculture biologique, ont été testées. Les résultats ont montré que l'introduction de  $K_2SO_4$  a diminué le gonflement de tous les matériaux, selon des profils distincts principalement liés à la teneur en minéraux gonflants de chacun. Les résultats de cette étude confirment que les sels de potassium peuvent atténuer le gonflement des argiles et encouragent des investigations complémentaires dans des conditions représentatives du terrain, ainsi que des analyses prenant en compte les facteurs minéralogiques et la microstructure des matériaux.

**ABSTRACT:** Cycles of clay shrink-swell (CSS) represent a significant risk for structures founded on clayey soils. One mitigation strategy involves introducing a potassium-bearing salt capable of releasing  $K^+$  cations that may contribute to inhibiting swelling. To investigate the swelling inhibition capacity of a potassium salt, free swell index (FSI) tests were performed in the laboratory on materials containing different proportions of swelling clay minerals: Argile Verte de Romainville (AVdR), Limon des Plateaux (LdP) and MX-80 bentonite. Additionally, various concentrations of potassium sulphate ( $K_2SO_4$ ), an inorganic compound commonly used in organic fertilizers, were tested. Results showed that the introduction of  $K_2SO_4$  decreased the swelling behaviour of all materials, with distinct patterns mainly associated with the content of swelling clay minerals in each material. The findings in this study confirm that potassium salts can mitigate clay swelling and support further investigations under representative field conditions, as well as analyses that take into account the mineralogical and microstructural factors of the materials.

**Mots-clés:** retrait-gonflement des argiles (RGA) ; inhibition du gonflement ; indice de gonflement libre (IGL) ; sel de potassium.

## 1 INTRODUCTION

Les mouvements de terrain induits par les cycles de retrait-gonflement des argiles (RGA) peuvent imposer des charges structurelles supplémentaires significatives aux ouvrages fondés sur des sols argileux (Charpentier et al., 2022). Les mêmes auteurs expliquent que ce phénomène peut endommager les bâtiments et les infrastructures, entraînant des impacts économiques importants, aggravés par le changement climatique.

Parmi les facteurs influents, la teneur en minéraux argileux gonflants joue un rôle déterminant sur le

potentiel de gonflement et de retrait des sols. Ces minéraux sont constitués de smectites et de minéraux interstratifiés contenant des feuillets smectiques. Le gonflement minéralogique se produit selon deux mécanismes : (i) le gonflement cristallin, dû à l'attraction entre le dipôle négatif de l'eau et les cations interfoliaires, et (ii) le gonflement osmotique, qui suit l'affaiblissement des interactions électrostatiques par le gonflement cristallin, et est entraîné par le gradient de concentration entre l'espace interfoliaire et l'eau environnante (Madsen et Müller-Vonmoos, 1989; Christidis, 2011).

Parmi les stratégies de réduction du gonflement, l'introduction de sels de potassium, capables de libérer des ions  $K^+$ , constitue une approche prometteuse. Cette stratégie s'inspire de la structure de l'illite, un minéral argileux non gonflant à forte charge de feuillet, dont les interfoliaires contiennent naturellement du potassium (Camapum de Carvalho et al., 2015).

Les ions  $K^+$  sont considérés comme limitant le gonflement en raison de leur faible énergie d'hydratation (c'est-à-dire leur attraction électrostatique réduite avec l'eau), de leur tendance à former des complexes d'adsorption en sphère interne, de leur hydratation monomoléculaire, ainsi que de leur capacité à s'insérer dans les cavités hexagonales du feuillet tétraédrique et à rester ancrés près des surfaces chargées négativement des structures 2:1 (Liu et Lu, 2006; Behnsen et Faulkner, 2013; Huang et al., 2020).

Di Maio (1996) souligne qu'au-delà de l'échange cationique d'autres cations par les ions  $K^+$ , le contact d'électrolytes potassiques avec des matériaux riches en minéraux expansifs peut également entraîner une réduction de la double couche diffuse, effet qui dépend lui aussi de la concentration en électrolyte et du type de cation échangeable. Toutefois, malgré une littérature abondante sur l'effet du potassium, des incertitudes demeurent, notamment à l'échelle microstructurale et quant à la manière dont ces phénomènes se traduisent précisément à différentes échelles et dans divers contextes d'application.

Par ailleurs, l'introduction d'ions  $K^+$  en vue de réduire le gonflement des sols argileux apparaît comme une approche prometteuse pour la prévention des dommages structurels affectant des maisons individuelles soumises au risque de RGA. Cependant, l'application de cette stratégie dans une perspective de mitigation in situ à l'échelle de l'ouvrage reste encore peu documentée. L'exploration de ces potentialités et une meilleure compréhension des mécanismes associés motivent la conduite de cette étude.

Dans ce contexte, des essais d'indice de gonflement libre (IGL) ont été réalisés en laboratoire sur des matériaux contenant différentes proportions de minéraux argileux gonflants : l'Argile Verte de Romainville (AVdR), le Limon des Plateaux (LdP) et la bentonite MX-80. Différentes concentrations de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ), un composé inorganique couramment utilisé comme engrais, ont été testées.

Le présent travail vise à comprendre, dans un cadre expérimental simplifié, le rôle d'une solution potassique dans la réduction du gonflement de sols présentant différentes teneurs en minéraux expansifs. Cette approche constitue une base pour de futurs travaux intégrant des conditions plus représentatives du terrain, notamment pour l'étude conjointe de la

réduction du gonflement et des phénomènes de diffusion en fonction des variables testées.

## 2 MATERIAUX ET METHODES

### 2.1 Matériaux

Le programme expérimental a été réalisé sur trois matériaux présentant des teneurs variables en minéraux argileux gonflants : deux sols naturels, l'Argile Verte de Romainville (AVdR) et le Limon des Plateaux (LdP) ainsi qu'un matériau remanié, la bentonite MX-80.

L'AVdR utilisée dans cette étude a été prélevée dans la commune de Champs-sur-Marne, à l'est de la région parisienne. L'AVdR appartient à une formation tertiaire du Bassin parisien, issue d'une sédimentation argilo-carbonatée en milieu laguno-marin (Yigzaw, 2009). D'après Audiguier et al. (2007), cette argile est généralement classée comme modérément à fortement active. Les rapports du BRGM la considèrent comme très sensible aux phénomènes de retrait-gonflement, sur la base de ses caractéristiques lithologiques, minéralogiques et géotechniques (Donsimoni et al., 2007).

Le LdP a été prélevé dans la commune de Cachan, au sud de Paris. Il s'agit d'un limon éolien formé sous conditions périglaciaires au cours du Quaternaire (Cui et Delage, 1996; Delage et al., 2005; Muñoz-Castelblanco et al., 2012). Ce type de loess se caractérise par une structure ouverte et méta-stable, avec une porosité élevée, une plasticité faible et une densité faible. Ce matériau ne présente pas de comportement de gonflement significatif (Cui et Delage, 1996), et les rapports du BRGM le classent comme légèrement sensible.

Le Tableau 1 synthétise les propriétés des matériaux analysés.

Tableau 1. Propriétés des matériaux analysés

Matériau	% d'argile ( $< 2 \mu\text{m}$ )	LL (%)	LP (%)	VBS (mEq/ 100 g)
AVdR	71,1 <sup>1</sup>	55-95 <sup>2</sup>	29-43 <sup>2</sup>	10,2 <sup>1</sup>
LdP	47,1 <sup>1</sup>	26-50 <sup>3</sup>	19-29 <sup>3</sup>	4,3 <sup>1</sup>
MX-80	81,5-85 <sup>5</sup>	331-570 <sup>4</sup>	34-36 <sup>4</sup>	48- 110 <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Moyenne de trois essais effectués sur les matériaux étudiés

<sup>2</sup>Ta et al. (2008), Yigzaw (2009), Duc et al. (2013), Vuillaume et Jacquard (2018).

<sup>3</sup>Delage et al. (2005), Blanck et al. (2011), Muñoz-Castelblanco et al. (2012).

<sup>4</sup>Dixon et al. (2023), à partir de plusieurs travaux.

<sup>5</sup>Molera et al. (2003), De Bock et al. (2009), Zeng et al. (2019).

## 2.2 Méthodes

Les essais IGL permettent d'évaluer la capacité d'un sol à gonfler dans des conditions non consolidées et non structurées. Dans cette méthode, un échantillon pulvérisé et séché à l'étuve est versé dans une éprouvette graduée préremplie de liquide. Dans cette étude, le terme liquide désigne soit de l'eau purifiée par osmose inverse, soit des solutions de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ) à différentes concentrations, exprimées en moles d'ions potassium par litre (mol/L). La concentration maximale utilisée, 1,38 mol/L, correspond à la solubilité du  $K_2SO_4$  à 25 °C (120 g/L). Le volume final de gonflement, c'est-à-dire l'IGL, est mesuré une fois la stabilisation atteinte.

Les essais ont été réalisés conformément aux normes IS 2720-40, Part XL, (1977) et ASTM D5890-25 (2024). Les matériaux testés sont les suivants : AVdR (fractions de 2  $\mu m$ ), LdP (fraction de 400  $\mu m$ ) et MX-80 (fraction de 63  $\mu m$ ). La fraction de 2  $\mu m$  de l'AVdR a été obtenue par décantation, selon la méthode de Poppe et al. (2001), tandis que les autres fractions ont été préparées par broyage et tamisage à sec.

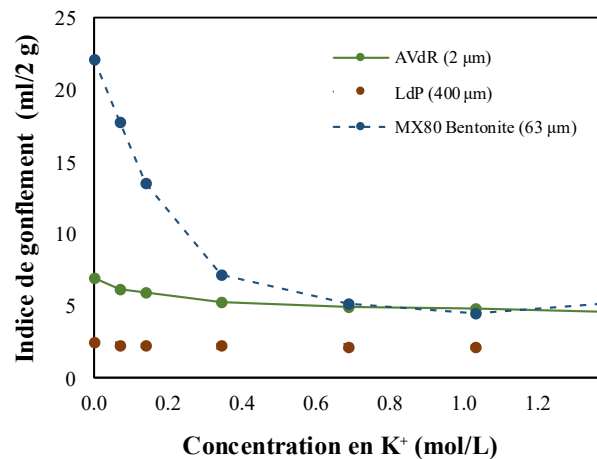
Compte tenu des capacités de gonflement variables des matériaux et des limites liées à la mesure du gonflement dans des éprouvettes graduées, 2 g d'échantillon ont été utilisés pour l'AVdR et la MX-80 (selon ASTM D5890-25, 2024), et 10 g pour le LdP (selon IS 2720-40, Part XL, 1977).

Avant les essais, tous les matériaux ont été séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 h, puis conservés dans des flacons hermétiques afin d'éviter l'humidification. La masse requise a été pesée puis versée dans des éprouvettes graduées de 100 mL. Le protocole de versement a suivi la norme ASTM pour la MX-80, et la norme IS pour les autres matériaux. Un film plastique a été placé sur le dessus des éprouvettes pour prévenir l'évaporation. Le volume final de gonflement a été mesuré 48 h après l'ajout de l'échantillon. Pour plus de précision, l'IGL a été calculé à l'aide d'un pied à coulisse (résolution de 0,02 mm) pour le diamètre et d'une règle (résolution de 0,5 mm) pour la hauteur. Les résultats obtenus avec des échantillons de 10 g ont été normalisés afin d'exprimer toutes les valeurs d'IGL en ml/2 g, conformément à l'unité prescrite par la norme ASTM.

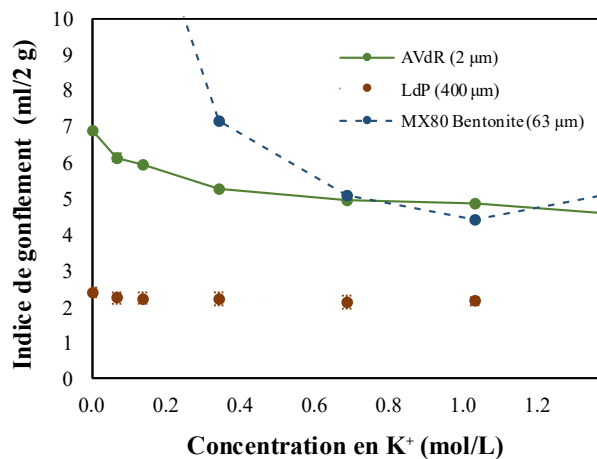
## 3 RESULTATS

La Figure 1 présente les résultats des essais d'IGL réalisés sur tous les matériaux étudiés. La Figure 2 montre un exemple d'essai réalisé avec la MX-80 dans l'eau pure. Lorsque plusieurs essais ont été réalisés pour un même matériau, les barres d'erreur indiquent

la différence entre les valeurs minimale et maximale, et les points représentent les valeurs moyennes correspondantes. Il convient néanmoins de noter que les essais répétés, sur l'AVdR et le LdP, n'ont montré aucune variation significative, ce qui se traduit par des barres d'erreur très faibles.



A)



B)

Figure 1. Indice de gonflement (ml/2 g) en fonction de la concentration en  $K^+$  (mol/L). A et B présentent les résultats à des échelles différentes.

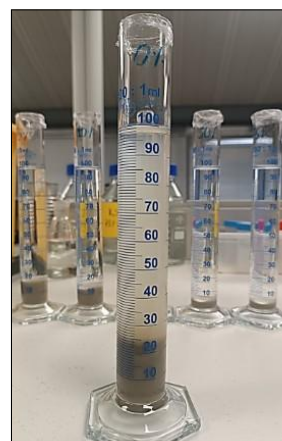


Figure 2. Exemple d'essai d'IGL avec la MX-80 dans l'eau pure.

À faibles concentrations en potassium, la bentonite MX-80 a montré le gonflement le plus élevé. En eau pure, son IGL a atteint 22,1 ml/2 g, valeur qui a diminué fortement avec l'augmentation de la concentration en  $K^+$ . L'IGL a diminué progressivement jusqu'à 0,69 mol/L, au-delà, seules de légères variations ont été observées. Une valeur minimale de 4,4 ml/2 g a été enregistrée à 1,03 mol/L, suivie d'une légère hausse à 1,38 mol/L. Il convient de noter qu'à concentrations élevées, la précision des mesures a diminué en raison du faible gonflement, rendant la lecture des hauteurs de colonne de matériau plus délicate. Au total, la réduction maximale du gonflement pour MX-80 a été de 80,1 %.

L'AVdR a présenté le deuxième IGL le plus élevé en eau pure, avec une valeur de 6,9 ml/2 g. L'IGL a ensuite diminué progressivement jusqu'à 4,6 ml/2 g à 1,38 mol/L, ce qui représente une réduction de 33,3 %.

Enfin, le LdP (400  $\mu$ m) a présenté le gonflement le plus faible en eau pure, avec un IGL de 2,40 ml/2 g. Le gonflement a diminué progressivement jusqu'à un minimum de 2,15 ml/2 g à 0,69 mol/L (réduction de 10,4 %), puis a augmenté à nouveau jusqu'à 2,25 ml/2 g à 1,38 mol/L, valeur identique à celle observée à 0,07 mol/L. Il convient de rappeler qu'en raison des faibles gonflements observés aux concentrations élevées, la mesure de la hauteur des colonnes de matériau est devenue plus difficile, avec un impact possible sur la précision des mesures.

## 4 DISCUSSION

La MX-80 a présenté l'IGL le plus élevé en eau pure. Ce résultat était attendu en raison de son potentiel de gonflement élevé, lié à sa teneur élevée en montmorillonite (minéral du groupe des smectites). Selon Dixon et al. (2023), qui ont résumé les résultats de quantification par DRX de la montmorillonite dans la MX-80, cette teneur peut varier considérablement, entre 61 % et 95 %, en fonction de la pureté de l'échantillon et de l'hétérogénéité intrinsèque du matériau naturel d'origine.

Cette forte teneur en montmorillonite peut également expliquer l'efficacité accrue du traitement au sel de potassium, la capacité d'échange cationique plus élevée favorisant les échanges avec les ions  $K^+$ , ce qui permet d'atténuer le comportement de gonflement cristallin et d'inhiber le gonflement osmotique (Liu et Lu, 2006; Behnsen et Faulkner, 2013). Par ailleurs, selon Di Maio (1996), l'épaisseur de la double couche diffuse est inversement proportionnelle à la force ionique, c'est-à-dire une force ionique plus élevée entraîne une couche plus fine, renforçant l'attraction interparticulaire et réduisant le volume. Cet effet est

particulièrement notable pour les matériaux fins et dans des tests non confinés sur matériau remanié comme l'IGL, où les forces électrostatiques dominent (Palomino et Santamarina, 2005).

La légère augmentation de l'IGL à la concentration de 1,38 mol/L pourrait être liée à plusieurs facteurs, tels que les incertitudes associées aux instruments de mesure, l'hétérogénéité entre les fractions testées d'un même matériau, mais aussi à des facteurs physico-chimiques (Van Oort, 2003; Al-Omari et al., 2010).

Ensuite, les deuxièmes valeurs d'IGL les plus élevées ont été observées dans les échantillons d'AVdR, ce qui confirme leur forte susceptibilité au gonflement, tout en indiquant une susceptibilité inférieure à celle de la MX-80, en raison d'une teneur plus faible en minéraux gonflants. Selon Yigzaw (2009) et Duc et al. (2013), dans la fraction 2  $\mu$ m, la teneur en minéraux gonflants de l'AVdR varie entre 15 % et 35 %, selon la localisation, la profondeur de prélèvement et la méthode de quantification. De plus, Yigzaw (2009) rapporte la présence de minéraux interstratifiés dans ce matériau, ce qui pourrait indiquer un potentiel de gonflement inférieur à celui des minéraux gonflants purs. L'effet de réduction de la double couche dû à l'augmentation de la force ionique pourrait également contribuer à la diminution du gonflement avec la concentration croissante en sel.

Enfin, les valeurs d'IGL les plus faibles ont été observées pour les échantillons de LdP, ce qui est cohérent avec leur faible potentiel de gonflement, lié à une faible teneur en minéraux gonflants (Cui et Delage, 1996; Donsimoni et al., 2007). Cela explique également la faible variation observée après l'introduction du sel. La diminution suivie d'une augmentation du gonflement au-delà de 0,69 mol/L pourrait également être attribuée aux mêmes facteurs que ceux évoqués précédemment.

## 5 CONCLUSIONS

Les essais d'IGL réalisés dans cette étude ont démontré la capacité du  $K_2SO_4$  à atténuer le gonflement des matériaux argileux. Sur la base des valeurs minimales et maximales d'IGL, des réductions de gonflement de 80,1 %, 33,3 % et 10,4 % ont été observées pour la MX-80 (63  $\mu$ m), l'AVdR (2  $\mu$ m) et le LdP (400  $\mu$ m), respectivement. Les valeurs minimales d'IGL ont été observées à des concentrations inférieures aux concentrations maximales testées.

Toutefois, plusieurs incertitudes demeurent, liées aux essais et aux mesures. Il convient notamment de rappeler que les essais IGL ont été réalisés sur trois sols, remaniés, en conditions non confinées, et

uniquement sur des fractions granulométriques spécifiques, ce qui limite l'extrapolation directe des résultats à des conditions représentatives in situ.

Les résultats soulignent néanmoins le potentiel des sels de potassium pour limiter le gonflement et encouragent des recherches complémentaires en conditions représentatives du terrain, ainsi que des analyses minéralogiques et microstructurales approfondies.

## REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par l'État dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Omari, R., Ibrahim, S., Al-Bayati, I. (2010). Effect of potassium chloride on cyclic behavior of expansive clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4, pp. 231–239. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.02.231-239>
- ASTM International (2024). ASTM D5890-25 - Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Audiguier, M., Geremew, Z., Laribi, S., Cojean, R. (2007). Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux, *Rev. Fr. Geotech*, pp. 67–82, <https://doi.org/10.1051/geotech/2007120067>.
- Behnsen, J., Faulkner, D.R. (2013). Permeability and frictional strength of cation-exchanged montmorillonite, *JGR Solid Earth*, 118, pp. 2788–2798, <https://doi.org/10.1002/jgrb.50226>.
- Blanck, G., Cuisinier, O., Masrouri, F. (2011). Traitement de sols à l'aide d'un produit alternatif acide contenant du limonène sulfonate, dans : *Innovation dans le génie civil au service de la construction durable* (GC'2011), Cachan, France.
- Camapum de Carvalho, J., Gitirana Junior, G., Machado, S., Mascarenha, M., Silva Filho, F. (2015). *Solos não saturados no contexto geotécnico, Solos não saturados no contexto geotécnico*, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS, São Paulo, Brésil (en portugais).
- Charpentier, A., James, M., Ali, H. (2022). Predicting drought and subsidence risks in France, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, pp. 2401–2418, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2401-2022>.
- Christidis, G.E. (2011). The concept of layer charge of smectites and its implications for important smectite-water properties, dans : *Layered Mineral Structures and Their Application in Advanced Technologies*, Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, UK, pp. 237–258, <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.11.6>.
- Cui, Y.J., Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46, pp. 291–311, <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.291>.
- De Bock, C., Bosgiraud, J.-M., Breen, B., Johnson, M., Rothfuchs, T., Weber, H., Van Marcke, P. (2009). Mod1-WP6-D6 – Module 1 Final Report, ESDRED Consortium.
- Delage, P., Cui, Y.J., Antoine, P. (2005). Geotechnical problems related with loess deposits in Northern France, dans : *International Conference on Problematic Soils*, Famagusta, North Cyprus, Cyprus, pp. 517–540, hal-00261645f.
- Di Maio, C., 1996. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Géotechnique* 46, 695–707. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.4.695>.
- Dixon, D.A., Birch, K., Stone, J., Kim, C.S., Barone, F. (2023). Measured swelling, hydraulic and thermal properties of MX-80 bentonite: Distinguishing between material variability and measurement limitations, *Applied Clay Science*, 241, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106998>.
- Donsimoni, M., Trouillard-Perrot, C., Plat, E. (2007). Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Hauts-de-Seine, BRGM, Orléans, France, Rep. BRGM/RP-53867-FR.
- Duc, M., Maloula, A., Makki, L. (2013). Effet du séchage sur la déformation de l'argile verte de Romainville traitées à la chaux, dans : *Actes du Colloque TerDOUEST 2013*, Marne-la-Vallée, France.
- Huang, D., Xie, G., Hu, P., Hu, S., Zhao, Z., Li, W., Deng, M., Luo, P. (2020). Improved analysis methods to study the behavior of potassium ions in the interlayer of montmorillonite, *Journal of Materials Research and Technology*, 9, pp. 7754–7761, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.046>.
- Bureau of Indian Standards (1977). IS 2720-40, Part XL - Methods of test for soils, Determination of free swell index of soils, New Delhi, India.
- Liu, X., Lu, X. (2006). A Thermodynamic Understanding of Clay-Swelling Inhibition by Potassium Ion, *Angew Chem Int*, 45<sup>ème</sup> éd, pp. 6300–6303, <https://doi.org/10.1002/anie.200601740>.
- Madsen, F.T., Müller-Vonmoos, M. (1989). The swelling behaviour of clays, *Applied Clay Science*,

- 4, pp. 143–156, [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0169-1317(89)90005-7).
- Molera, M., Eriksen, T., Jansson, M. (2003). Anion diffusion pathways in bentonite clay compacted to different dry densities. *Applied Clay Science*, 23, pp. 69–76, [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(03\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(03)00088-7).
- Muñoz-Castelblanco, J.A., Pereira, J.M., Delage, P., Cui, Y.J. (2012). The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France, *Géotechnique*, 62, pp. 95–106, <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.084>
- Palomino, A.M., Santamarina, J.C. (2005). Fabric Map for Kaolinite: Effects of pH and Ionic Concentration on Behavior. *Clays and clay miner.*, 53, 211–223, <https://doi.org/10.1346/CCMN.2005.0530302>.
- Poppe, L., Paskevich, V., Hathaway, J., Blackwood, D. (2001). U.S. Geological Survey Open-File Report 01-041, U.S. Geological Survey (USGS), Reston, VA, United States, [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/>, consulté le : 20/11/2025.
- Ta, A.-N., Tang, A.-M., Cui, Y.-J., Mantho, A., Cui, K. (2008). Propriétés de rétention et de compressibilité d'une argile naturelle gonflante, dans : 4<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2008), Nantes, France, pp. 619–626.
- Van Oort, E. (2003). On the physical and chemical stability of shales, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38, pp. 213–235, [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(03\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(03)00034-2).
- Vuillaume, B., Jacquard, C. (2018). Caractérisation des paramètres de déformabilité des argiles vertes de la région parisienne, dans : 9<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2018), Champs-sur-Marne, France, pp. 1–8.
- Yigzaw, Z.G. (2009). *Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques: rôle de la microstructure*, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/pastel-00005865/>, consulté le : 20/11/2025.
- Zeng, Z., Cui, Y.-J., Zhang, F., Conil, N., Talandier, J. (2019). Investigation of swelling pressure of bentonite/claystone mixture in the full range of bentonite fraction, *Applied Clay Science*, 178, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105137>.