

Prédiction du gonflement des sols expansifs à partir de propriétés d'indices basiques

Predicting swelling of expansive soils based on basic index properties

Zahraa LEHAF^{1*}, Mathilde MORVAN¹, Pierre BREUL¹

¹ *Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France*

**Zahraa.LEHAF@doctorant.uca.fr*

RESUME : Les sols gonflants subissent des variations de volume, liées aux changements de teneur en eau, pouvant endommager fondations et chaussées. Cependant, les essais destinés à estimer ce phénomène sont souvent coûteux, longs à mettre en œuvre, et peu disponibles. Préalablement, plusieurs corrélations empiriques de la littérature ont été évaluées sur 14 sols bibliographiques ; elles montrent une fiabilité limitée ($R^2 \approx 0,6$), avec des erreurs pouvant atteindre 14 %. L'objectif est de proposer un outil rapide et économique permettant de prédire le gonflement, à partir de propriétés géotechniques simples. Pour mieux appréhender cette variabilité et maîtriser les paramètres expérimentaux, une campagne a été réalisée sur cinq sols : un sol naturellement gonflant (argile Aulnat), un sol artificiel (montmorillonite pure), et trois mélanges (95:5, 90:10, 85:15). Ces matériaux ont été caractérisés par des essais standards : limites d'Atterberg, analyse granulométrique, essai au bleu de méthylène, et essai de gonflement à l'œdomètre. La variation des résultats de ces essais en fonction de la teneur en argile est étudiée. Des régressions fondées sur la Limite de Liquidité (LL), la Limite de Plasticité (PL), l'Indice de Plasticité (IP), la teneur en argile (CL) et des termes d'interaction ont permis d'établir une équation prédictive calée sur un ensemble combiné de sols expérimentaux et de sols de la littérature, puis validée sur un jeu bibliographique indépendant. Les résultats indiquent une forte corrélation entre valeurs prédites et mesurées ($R^2 \approx 0,92$), des erreurs < 2 %, et une nette amélioration par rapport aux modèles empiriques conventionnels. L'intégration de la valeur au bleu de méthylène (VBS) améliore la prédiction et est recommandée pour les études futures. La prédiction proposée est adaptée au diagnostic préliminaire et au prédimensionnement en génie géotechnique.

ABSTRACT : Expansive soils undergo significant volume changes as their water content varies, which can lead to cracking and damage in foundations and pavements. Direct laboratory assessment of this behavior, especially by oedometer swelling tests, is reliable but often too slow and expensive for routine use. In this study, several empirical correlations from the literature are first re-examined on a set of 14 documented soils; they show limited predictive performance, with coefficients of determination around $R^2 \approx 0.6$ and swelling errors up to about 14 %. To develop a faster, index-based alternative, an experimental program is carried out on five materials: a natural expansive soil (argile Aulnat), a pure artificial montmorillonite, and three intermediate mixtures (95:5, 90:10, 85:15). These are characterized by standard tests (Atterberg limits, grain-size distribution, Methylene Blue value VBS, oedometer swelling), and the influence of clay content on the results is analyzed. Regression models based on Liquid Limit (LL), Plastic Limit (PL), Plasticity Index (PI), Clay Content (CL) and interaction terms are then calibrated on a combined dataset including both the experimental soils and additional published soils, and finally validated on an independent set of documented clays. The final equation shows a strong agreement between predicted and measured swelling ($R^2 \approx 0.92$), maximum errors below 2 %, and clearly outperforms the classical empirical models. Incorporating VBS further improves prediction and is recommended as a complement for future applications. The proposed correlations provide practical tools for preliminary diagnosis and preliminary design in geotechnical projects involving expansive clays.

Mots-clés : Gonflement des sols ; Caractéristiques géotechniques ; Modèles prédictifs.

1 INTRODUCTION

Certains sols argileux sont sensibles au retrait-gonflement, ils gonflent lors de l'humidification et se rétractent en période sèche, provoquant fissures, déformations et désordres sur les bâtiments et les infrastructures. En France, le phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA) est reconnu comme l'un des principaux aléas naturels pour l'habitat individuel : environ 20 % du territoire métropolitain se situe en aléa moyen ou fort et plusieurs millions de maisons sont concernées (Service des données et études statistiques (SDES) 2021, 2022; Ministère De La Transition Écologique Et De La Cohésion Des Territoires 2024). Des déplacements de quelques centimètres suffisent à endommager murs et

fondations, en particulier pour les structures faiblement chargées (Cerema 2022; Ministère De La Transition Écologique Et De La Cohésion Des Territoires 2024).

Sur le plan économique, le RGA représente une part importante des indemnités du régime « catastrophes naturelles ». Les données de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) et des organismes publics indiquent des pertes cumulées supérieures à 20 milliards d'euros sur les logements depuis la fin des années 1980, dont environ 3,5 milliards pour la seule année 2022, et des dommages annuels pouvant dépasser 1 milliard d'euros à l'horizon 2100 en l'absence d'adaptation (Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) 2009; Caisse Centrale de Réassurance 2021; Mission Risques

Naturels (MRN) 2023; Ministère De La Transition Écologique Et De La Cohésion Des Territoires 2024, 202).

D'un point de vue géotechnique, le potentiel de gonflement S_p dépend de la minéralogie, de la fraction argileuse, de la structure du sol, de la densité et de la teneur en eau initiales ainsi que des conditions de chargement et de drainage (Holtz and Gibbs 1956; Zumrawi, Abdelmarouf, and Gameil 2017; Mehta and Sachan 2017). L'essai œdométrique unidimensionnel est la méthode de référence pour caractériser l'intensité de ce potentiel, mais il reste long, coûteux et sensible à la préparation des éprouvettes (Elarabi 2005; Mishra, Dhawan, and Rao 2008; Putri, Prakoso, and Rahayu 2022). Pour analyser un grand nombre de sites, il est donc utile de disposer de modèles permettant d'estimer S_p à partir de résultats d'essais classiques de laboratoire (Limite de Liquidité, Limite de Plasticité, Indice de Plasticité, pourcentage de fines, et le cas échéant, la valeur au bleu de méthylène).

De nombreuses corrélations empiriques ont été proposées dans ce but, mais leur fiabilité diminue souvent lorsqu'elles sont appliquées à des sols différents de ceux utilisés lors de leur calage. Cette étude a donc un double objectif : réévaluer quatre équations classiques (Seed, Woodward, and Lundgren 1962; Nayak and Christensen 1971; Schneider and Poor 1974; Chen 1975) sur un ensemble combinant sols naturels et sols expérimentaux, puis proposer de nouveaux modèles fondés sur des paramètres classiques de caractérisations géotechniques, incluant la valeur au bleu de méthylène (VBS), afin de mieux prédire le potentiel de gonflement œdométrique.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les descriptions empiriques des sols gonflants se répartissent en classifications qualitatives et équations quantitatives. Les systèmes qualitatifs s'appuient sur des seuils en Indice de plasticité IP, Limite de Liquidité LL et Limite de Retrait SL (Ibrahim and Hummadi 2025). Par exemple, Holtz et Gibbs (1956) associent un gonflement « très élevé » à $IP > 35\%$ (Holtz and Gibbs 1956) alors que Chen (1975) retient $LL > 60\%$ comme seuil de très fort potentiel. Seed et al. (1962) introduisent l'Indice de Retrait $SI = LL - SL$, avec $SI > 60\%$ comme indicateur d'aléa élevé. D'autres critères combinent IP et SL, par exemple $IP > 30\%$ et $SL < 10\%$ (Sowers and Sowers 1970) ou $IP > 20\%$ et $SL < 12\%$ (Raman 1967), et (Komornik and David 1969) proposent des abaques pour la classification rapide. Ces approches conviennent au dépistage, mais ne donnent pas d'estimation quantitative de S_p .

Pour estimer directement le gonflement, plusieurs équations empiriques ont été développées. Quatre modèles classiques sont retenus ici. (Seed, Woodward, and Lundgren 1962) proposent une loi de puissance en fonction de IP :

$$S_p = 2.16 \times 10^{-3} (IP)^{2.44} \quad \text{Équation 1}$$

principalement valable pour des sols de plasticité moyenne et pouvant conduire à des surestimations pour les argiles très plastiques (Elarabi 2005).

(Chen 1975) propose une loi exponentielle, toujours basée sur IP :

$$S_p = 0.2558e^{0.08381IP} \quad \text{Équation 2}$$

qui tend à sous-estimer le gonflement pour de nombreux sols expansifs (Elarabi 2005).

Pour tenir compte d'autres paramètres, (Nayak and Christensen 1971) introduisent une équation multivariable dépendant de IP, de la teneur en argiles CL et de la teneur en eau initiale W_i :

$$S_p = 0.0229 \times IP^{1.45} \times \left(\frac{CL}{W_i}\right) + 6.3 \quad \text{Équation 3}$$

(Schneider and Poor 1974) proposent une relation log-linéaire basée sur IP et W_i :

$$S_p = 0.66 \times 10^{(0.9 \frac{IP}{W_i} - 1.19)} \quad \text{Équation 4}$$

Ces quatre équations utilisent des indices courants (LL, IP, CL, W_i) et sont donc cohérentes avec le niveau d'information visé par les nouveaux modèles développés dans cette étude.

L'applicabilité de ces équations a été testée sur huit sols naturels expansifs issus de (Elarabi 2005; Pedarla et al. 2016; Zamin et al. 2021) : Karak, DI Khan, AlGadarif, Alnishishiba, Colorado, Burleson, San Diego et Keller. Les limites d'Atterberg, la teneur en argiles CL et le gonflement mesuré S_p sont résumés dans le Tableau 1, qui couvre une large gamme de plasticités et de fractions argileuses.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques et gonflement de sols expansifs issus de la littérature

Reference	Soil Name	LL %	PL %	IP %	CL %	Sp %
Zamin et al. (2021)	Karak	60	23	37	28	12,5
	DI Khan	34	11	23	17	6,45
Elarabi, H. (2005)	AlGadarif	47	26	21	34	2,5
	Alnishishiba	64	31	33	27	12,5
Pedarla et al. (2016)	Colorado	63	21	42	46	12
	Burleson	55	18	37	52	8,8
	San Diego	42	14	28	23	4,4
	Keller	25	14	11	34	7,9

Sur ces sols, le modèle de Seed surestime généralement le gonflement (écarts jusqu'à environ 8 %), celui de Chen le sous-estime (jusqu'à 8,5 %), et les modèles multivariables présentent des erreurs pouvant atteindre 11–14,5 % lorsque W_i est

disponible. Les points prédits/mesurés sont fortement dispersés autour de la droite 1:1, avec des coefficients de détermination R^2 faibles ($\approx 0,02-0,5$) (Figure 1). Ces résultats justifient le développement de corrélations plus robustes, toujours fondées sur des indices simples.

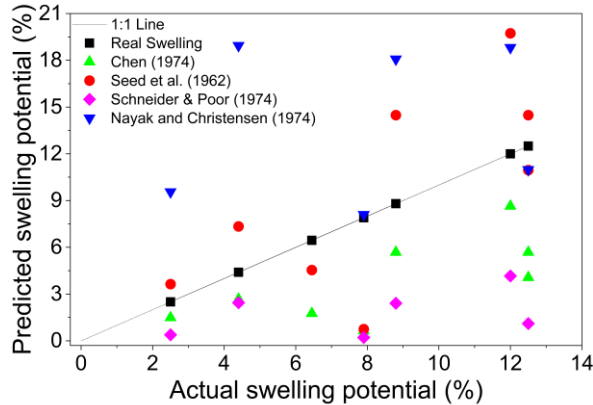


Figure 1. Comparaison entre les gonflements mesurés et ceux prédits par les modèles de Seed et al. (1962), Chen (1975), Nayak et Christensen (1971) et Schneider et Poor (1974) pour huit sols issus de la littérature.

3 MATERIAUX ET METHODES

3.1 Matériaux

Pour analyser l'effet de la composition minéralogique sur le gonflement, un sol argileux expansif naturel, l'Argile d'Aulnat (prélevée près d'Aulnat, France), est utilisé comme matériau de base. Il est mélangé à une montmorillonite artificielle très active pour obtenir trois mélanges 95:5, 90:10 et 85:15 (sol naturel : montmorillonite, en masse sèche), en plus d'un échantillon de montmorillonite pure.

Au total, cinq matériaux (sol d'Aulnat, trois mélanges, argile artificielle pure) sont étudiés. Ils sont tous soumis à la même campagne de caractérisation géotechnique et d'essais œdométriques, constituant une base expérimentale contrôlée pour analyser l'effet progressif de la teneur en argiles gonflantes et pour calibrer les modèles empiriques développés ensuite.

3.2 Méthodes

Les limites d'Atterberg LL et PL sont déterminées selon la norme NF EN ISO 17892-12 ; l'indice de plasticité est calculé par $IP = LL - PL$. La teneur en argiles CL ($< 2 \mu\text{m}$) est obtenue par lavage à $80 \mu\text{m}$ puis sédimentation selon NF P94-057. L'activité minéralogique est évaluée par l'essai au bleu de méthylène (VBS) suivant NF P94-068, qui fournit un indicateur de surface spécifique et de réactivité des argiles.

Le comportement de gonflement est mesuré à l'œdomètre unidimensionnel conformément à ASTM

D4546-21, Méthode A (gonflement sous contrainte verticale constante). Pour chaque matériau, les éprouvettes sont préparées à une teneur en eau proche de l'optimum (environ 18 % pour le sol naturel, augmentée d'environ 0,5 % par tranche de 5 % de montmorillonite), compactées directement dans l'anneau en trois couches puis préconsolidées à 127 kPa pendant 90 minutes par couche. Cette procédure conduit à une densité sèche voisine de 95 % de la densité maximale et à un état initial reproductible. La contrainte verticale est ensuite ramenée à 2,5 kPa, l'échantillon est humidifié par sa face inférieure et supérieure et laissé en gonflement en conditions unidimensionnelles. Le déplacement vertical est enregistré en fonction du temps et le potentiel de gonflement est calculé comme l'augmentation relative de hauteur. Au moins deux essais sont effectués pour chaque matériau, avec des écarts finaux inférieurs à 0,5 point de pourcentage, ce qui confirme la bonne répétabilité de la méthode.

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Résultats des essais

La caractérisation géotechnique des sols testés confirme une augmentation progressive de la plasticité et de l'activité argileuse à mesure que l'argile artificielle est introduite dans la matrice du sol naturel. Les propriétés des indices LL, PL, IP, CL ($< 2 \mu\text{m}$) et la valeur du bleu de méthylène (VBS) sont résumées dans le tableau 2. Ces résultats reflètent clairement la présence et l'activité accrues des minéraux argileux à mesure que les proportions d'argile artificielle augmentent.

Tableau 2. Propriétés géotechniques de l'Argile d'Aulnat, des mélanges sol-montmorillonite et de l'argile artificielle

Sol	LL (%)	PL (%)	IP (%)	CL (%)	VBS (g/100g de sol)
Sol naturel	42	23	19	43,7	4,4
95:5	60	26	34	46,5	4,9
90:10	70	29	41	49,3	6,1
85:15	80	31	49	52,2	8,8
Argile artificielle	540	85	455	94	28

Le suivi œdométrique montre que le sol naturel présente un gonflement modéré et relativement lent, tandis que les mélanges 95:5, 90:10 et 85:15 présentent des gonflements de plus en plus importants et une cinétique plus rapide (Figure 2). Le mélange 85:15 affiche la courbe la plus raide et le potentiel de gonflement le plus élevé, ce qui illustre l'impact significatif d'une augmentation modérée de la teneur en argile active. La Figure 3, relative à la

montmorillonite pure, montre un gonflement dépassant 300 % avec une phase de dilatation très rapide au début, ce qui confirme son caractère extrêmement expansif.

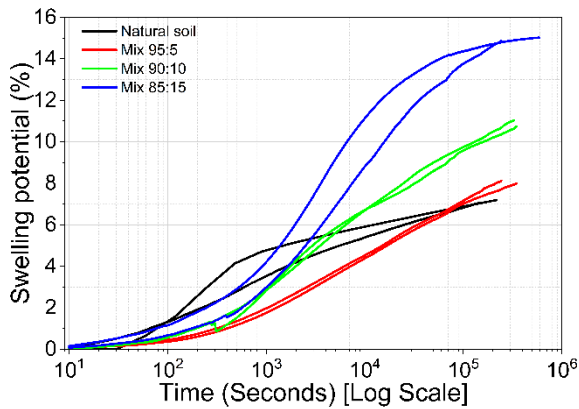


Figure 2. Potentiel de gonflement en fonction du temps (échelle logarithmique) pour le sol naturel et les mélanges 95:5, 90:10 et 85:15.

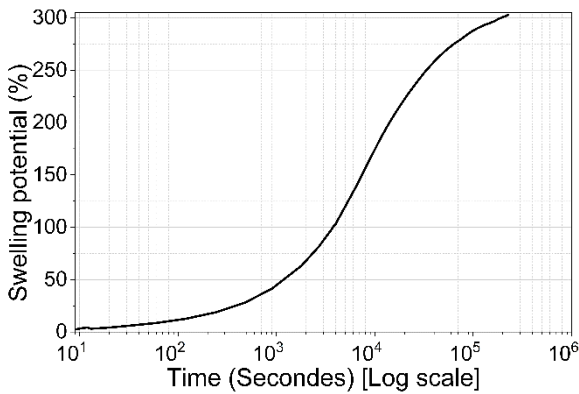


Figure 3. Potentiel de gonflement en fonction du temps pour l'argile artificielle pure.

Les résultats obtenus pour les mélanges montrent que la réponse n'est pas simplement proportionnelle à la quantité d'argile ajoutée : si tel était le cas, le mélange 95:5 atteindrait un gonflement d'environ 15 %, alors qu'il ne dépasse pas 8 %, et des écarts similaires sont observés pour les mélanges 90:10 et 85:15. Par conséquent, la structure du sol et les interactions entre particules jouent également un rôle déterminant.

Les essais ont été poursuivis pendant au moins 48 h après l'inondation, conformément à la norme ASTM D4546-21, et jusqu'à ce que la variation de gonflement devienne négligeable. Les courbes sont représentées en fonction du logarithme du temps pour comparer les cinétiques à court et moyen terme ; en échelle de temps linéaire, un plateau net est observé, montrant que le gonflement atteint un état quasi stationnaire sur la durée de l'essai.

4.2 Évaluation des équations existantes et développement d'un modèle global

Les équations classiques de Seed et al. (1962), Chen (1975), Nayak et Christensen (1971) et Schneider et Poor (1974) ont d'abord été appliquées à l'Argile d'Aulnat, aux mélanges 95:5, 90:10, 85:15 et à l'argile artificielle. Pour ces sols très expansifs, les écarts entre gonflements prédits et mesurés restent importants : le modèle de Seed tend à surestimer le gonflement avec des erreurs ponctuelles pouvant atteindre environ 14 %, celui de Chen le sous-estime jusqu'à environ 6 %, tandis que les équations de Nayak et Christensen et de Schneider et Poor produisent respectivement des surestimations et des sous-estimations de l'ordre de 8–10 %. Dans tous les cas, les points prédits/mesurés restent éloignés de la droite 1:1 (Figure 4), ce qui confirme que ces relations ne reproduisent pas correctement le comportement des sols d'Aulnat.

Parallèlement, la section consacrée aux sols issus de la littérature (Tableau 1, Figure 1) a montré que ces mêmes équations restent peu performantes sur huit sols naturels, avec des écarts pouvant atteindre 11–14,5 % et des coefficients de détermination R^2 faibles ($<0,6$). L'ensemble de ces résultats justifie la recherche d'un modèle unique plus robuste, fondé sur des paramètres d'indice de routine.

Dans cette optique, un modèle global a été calé directement sur un ensemble de douze sols : le sol naturel d'Aulnat et ses trois mélanges (95:5, 90:10, 85:15), auxquels s'ajoutent les huit sols de la littérature de Zamin et al. (2021), Elarabi (2005) et Pedarla et al. (2016). Ce jeu couvre une large plage de limites d'Atterberg, de teneurs en argiles et de potentiels de gonflement, tout en excluant l'argile artificielle pure, considérée comme en dehors du domaine d'application visé.

Le potentiel de gonflement S_p est considéré comme une fonction régulière des indices LL, PL, IP et CL, et plusieurs formes de régression (linéaire, puissance, exponentielle, polynomiale, avec et sans interactions) ont été testées. Le modèle retenu, qui offre le meilleur compromis entre qualité d'ajustement, compacité et interprétation physique, est donné par :

$$S_p = 0.5657 + 0.0179 \times CL^2 + 0.0193 \times (LL \times IP) - 0.0334 \times (LL \times CL) + 0.0185 \times (PL \times CL) \quad \text{Équation 5}$$

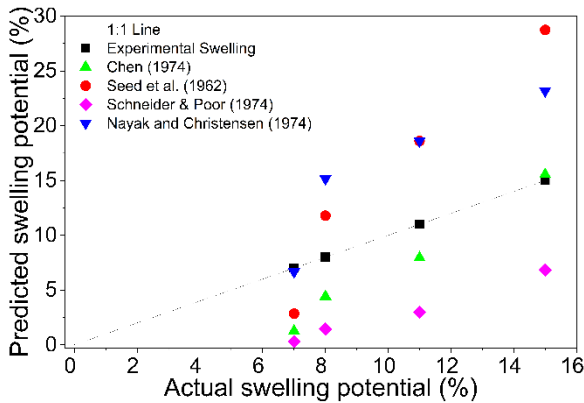


Figure 4. Comparaison entre les gonflements mesurés et ceux prédits par les modèles de Seed et al. (1962), Chen (1975), Nayak et Christensen (1971) et Schneider et Poor (1974) pour les sols expérimentaux.

Sur les douze sols de calage, les valeurs prédites sont proches des mesures, avec un coefficient de détermination $R^2 \approx 0,92$ et des erreurs ponctuelles inférieures à environ 2 % (Figure 5). À titre de comparaison, les équations de Seed, Chen, Nayak et Christensen et Schneider et Poor présentent, sur le même ensemble, des écarts nettement plus élevés, souvent compris entre 8 et 14,5 %. Le modèle global (Équation 5) fournit ainsi des prédictions beaucoup plus cohérentes pour des sols d'origines diverses, tout en ne mobilisant que des paramètres d'indice usuels.

L'argile artificielle pure n'a pas été prise en compte dans l'étalonnage, et l'équation (5) n'est pas destinée à prédire son gonflement. Ce modèle est destiné aux sols naturels et aux mélanges sol-argile présentant un comportement de gonflement réaliste ; la montmorillonite pure est considérée comme hors du domaine de validité.

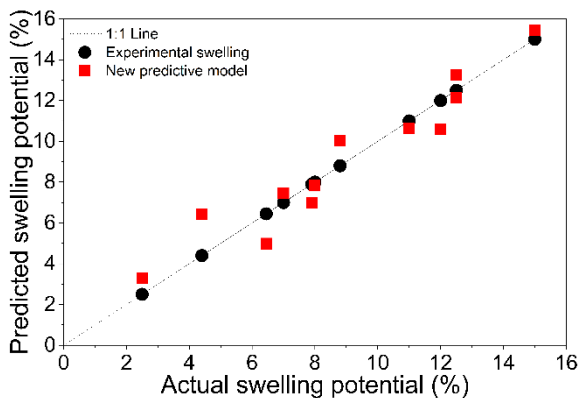


Figure 5. Comparaison entre les gonflements mesurés et ceux prédits par le modèle global (Équation 5) pour douze sols (expérimentaux et issus de la littérature).

Les termes de l'Équation 5 restent cohérents avec l'interprétation physique des sols gonflants. La teneur en argiles CL joue le rôle de fraction argileuse efficace, le terme CL^2 reflète le caractère plus que proportionnel du gonflement lorsqu'une matrice

argileuse continue se forme (Komine and Ogata 1994; Villar and Lloret 2008). Les termes d'interaction $LL \times CL$ et $PL \times CL$ représentent l'effet conjoint de la quantité d'argile et des limites de consistance : l'influence de LL et PL augmente lorsque CL est élevé. Cela est compatible avec la notion d'activité de Skempton $A = IP/CL$ (Skempton 1953), selon laquelle les argiles les plus gonflantes sont à la fois riches en fraction fine et fortement plastiques. Les combinaisons CL avec LL et PL jouent ainsi le rôle de proxys reliant indirectement la quantité d'argile, son activité et sa capacité de rétention d'eau (Fredlund and Xing 1994; Zhou and Lu 2021; Kocaman et al. 2022).

4.3 Validation du modèle sur des sols supplémentaires

La robustesse de l'Équation 5 a été vérifiée sur six sols de validation indépendants, non utilisés pour le calage : Kohat (Zamin et al., 2021), Malakal (Elarabi, 2005), San Antonio, Grayson, Anthem et Oklahoma (Pedarla et al., 2016). Leurs caractéristiques géotechniques et leurs gonflements mesurés sont résumés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Propriétés géotechniques et potentiel de gonflement de six sols de validation

Sol	LL (%)	PL (%)	IP (%)	CL (%)	(Sp) (%)
Kohat	50,5	20	30,5	23	10,5
Malakal	58	24	34	44	7,6
San Antonio	67	24	43	52	10,2
Grayson	75	26	49	55	14,2
Anthem	48	21	27	32	5,8
Oklahoma	41	20	21	30	4,8

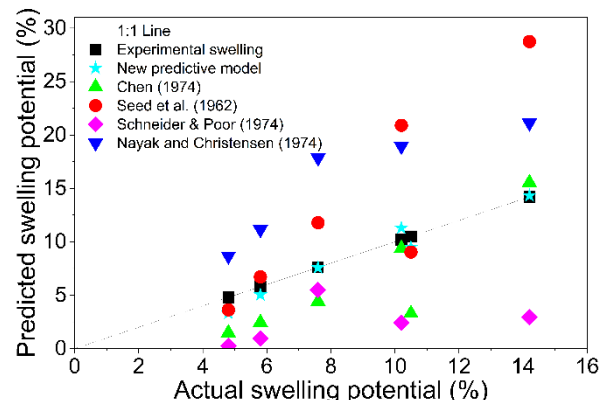


Figure 6. Comparaison entre les gonflements mesurés et ceux prédits pour les six sols de validation par le modèle global (Équation 5) et par les modèles de Seed et al. (1962), Chen (1975), Nayak et Christensen (1971) et Schneider et Poor (1974).

Pour ces six sols, les gonflements prédits par l'Équation 5 restent très proches des valeurs

expérimentales, avec des erreurs maximales de l'ordre de 1,5 % (Figure 6), comparables à celles observées sur le jeu de calage. À titre de comparaison, les équations classiques appliquées au même ensemble présentent des écarts nettement plus élevés : jusqu'à environ 14,5 % pour Seed et al. (1962), autour de 8,5 % pour Chen (1975) et de l'ordre de 10–11 % pour Nayak et Christensen (1971) et Schneider et Poor (1974). Le nouveau modèle global fournit ainsi des prédictions nettement plus cohérentes sur des sols d'origines diverses, tout en restant fondé sur des paramètres classiques.

4.4 Modèle utilisant la valeur au bleu de méthylène (VBS)

Pour mieux représenter l'influence de l'activité argileuse sur le gonflement, la valeur au bleu de méthylène VBS a été introduite comme variable supplémentaire. La VBS est un indice simple de surface spécifique et de réactivité des argiles, donc un bon reflet de leur propension à gonfler en présence d'eau.

Dans ce cadre, un mélange 75:25 (75 % Argile d'Aulnat, 25 % montmorillonite artificielle en masse sèche) a été spécialement étudié afin d'explorer des teneurs plus élevées en argiles actives. Ce matériau présente LL = 100 %, PL = 38 %, IP = 62 %, CL = 56,5 %, VBS = 10, et un potentiel de gonflement mesuré de 28 % (Figure 7). Pour ce même sol, le modèle sans VBS (Équation 5) prédit un gonflement de 28,3 %, ce qui confirme la cohérence de l'équation. En combinant CL, IP et VBS, un modèle complémentaire a été établi :

$$S_p = 305.4111 + 0.1602 \times CL^2 - 0.0008 \times IP^2 - 0.0659 \times VBS^2 - 13.7944 \times CL \quad \text{Équation 6}$$

Pour les sols disposant de mesures VBS, la comparaison entre gonflements mesurés et prédits par l'Équation 6 (Figure 8) montre un excellent accord sur l'ensemble de la plage étudiée. L'essai VBS apparaît ainsi comme un complément efficace aux indices classiques pour intégrer explicitement l'activité minéralogique dans la prédiction du gonflement.

Même si le modèle global fondé sur LL, PL, IP et CL (Équation 5) montre de très bonnes performances sur les sols étudiés, il reste une corrélation empirique construite sur un jeu de données limité. Il est donc probable que certains sols, présentant des minéralogies ou des microstructures différentes, ne soient pas décrits avec la même précision par ces seuls indices. Dans cette optique, l'introduction de la valeur au bleu de méthylène (VBS) ne vise pas à remplacer

l'Équation 5 mais à compléter le cadre prédictif : combinée à LL, PL, IP et CL, VBS apporte une information directe sur l'activité minéralogique et la surface spécifique des argiles, et permet ainsi de mieux prendre en compte des comportements de gonflement plus variés. L'équation intégrant VBS peut donc être vue comme une recommandation pour les études où l'on souhaite disposer d'une vision plus complète des caractéristiques des sols, afin de limiter les limitations potentielles d'un modèle basé uniquement sur les indices classiques.

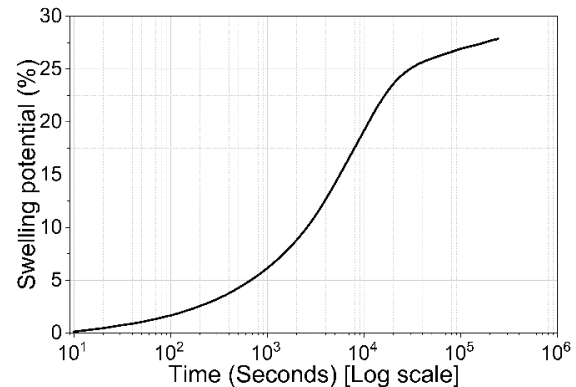


Figure 7. Potentiel de gonflement en fonction du temps pour le mélange 75:25 (Argile d'Aulnat–montmorillonite).

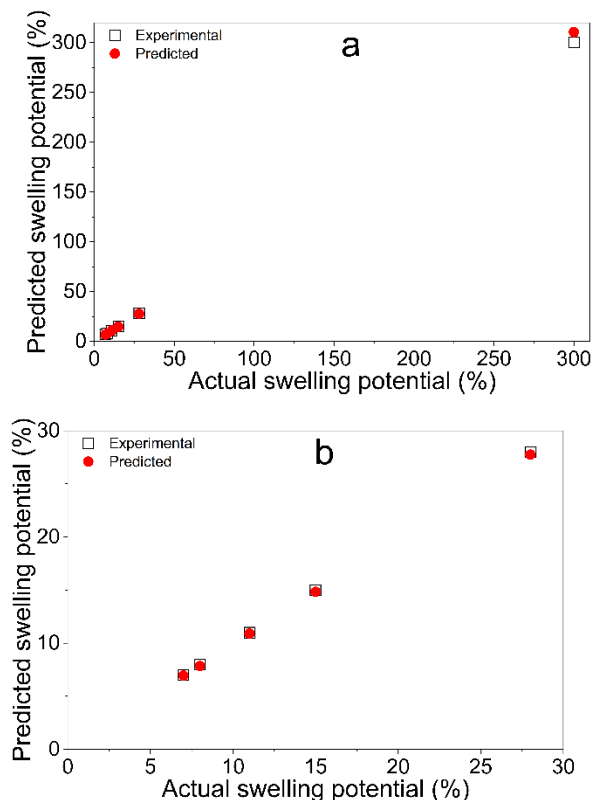


Figure 8. Comparaison entre gonflements mesurés et gonflements prédits par le modèle intégrant VBS (Équation 6).

5 CONCLUSION

Les sols gonflants constituent un enjeu géotechnique majeur, en particulier dans le contexte français du retrait-gonflement des argiles où de nombreuses habitations sont exposées. Les essais œdométriques fournissent une mesure de référence du potentiel de gonflement, mais leur mise en œuvre systématique reste difficile à grande échelle. Les corrélations empiriques classiques de Seed et al. (1962), Chen (1975), Nayak et Christensen (1971) et Schneider et Poor (1974), bien que simples et largement utilisées, présentent des écarts importants lorsqu'elles sont appliquées à un ensemble varié de sols naturels et de sols expérimentaux, avec des erreurs normalisées souvent comprises entre environ 45 % et plus de 80 % et des erreurs ponctuelles pouvant atteindre 14,5 %.

L'étude montre qu'il est possible d'améliorer nettement ces performances en s'appuyant uniquement sur des paramètres d'indice courants (LL, PL, IP, CL). Un modèle global fondé sur LL, PL, IP et CL (Équation 5), calé sur douze sols (Argile d'Aulnat et ses mélanges, ainsi que huit sols naturels issus de la littérature), reproduit les potentiels de gonflement œdométriques avec un coefficient de détermination $R^2 \approx 0,92$ et des erreurs ponctuelles généralement inférieures à 2 %. Testé ensuite sur six sols de validation indépendants, il conserve des écarts maximaux de l'ordre de 1,5 %, tout en restant compatible avec les interprétations physiques usuelles des sols gonflants (rôle de la fraction argileuse efficace, activité au sens de Skempton, effets d'interaction entre plasticité et teneur en argiles).

L'introduction explicite de la valeur au bleu de méthylène dans une équation dédiée (Équation 6) permet encore d'affiner la description des sols testés, en montrant que la prise en compte directe de l'activité argileuse améliore la capacité de prédiction.

Ces modèles restent néanmoins calibrés sur des essais œdométriques unidimensionnels sous contrainte verticale constante et humidification. Ils doivent donc être interprétés comme des outils d'estimation du gonflement en laboratoire, particulièrement utiles pour les études préliminaires : tri et classement des sols, repérage des horizons les plus sensibles, et fourniture de valeurs d'entrée pour des analyses plus détaillées. La prédiction du gonflement in situ nécessite toujours de considérer explicitement les conditions hydriques et mécaniques réelles (variations de succion, stratigraphie, végétation, évolution des contraintes avec la profondeur). Dans ce cadre, les équations proposées constituent des briques de base qui peuvent être intégrées dans des démarches plus complètes de diagnostic et de gestion de l'aléa RGA.

6 REFERENCES

- Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) (2009). Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France – Retrait-gonflement des sols argileux. BRGM.
- Caisse Centrale de Réassurance (2021). CCR augmente significativement son résultat et sa capacité de couverture des catastrophes naturelles. .
- Cerema (2022). Phénomène de retrait-gonflement des sols argileux (RGA): définitions et enjeux. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/phenomene-retrait-gonflement-sols-argileux-rga-definitions>.
- Chen, F.H. (1975). *Foundations on expansive soils*. Elsevier Scientific Pub. Co. Amsterdam New York.
- Elarabi, H. (2005). Evaluation of predicted equations for swelling potential.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4): 521–532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>.
- Holtz, W.G. and Gibbs, H.J. (1956). Engineering properties of expansive clays.
- Ibrahim, H. and Hummadi, R. (2025). Swelling potential and swelling pressure calculation methods: A comprehensive review. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 9(2): 172–192. <https://doi.org/10.55214/25768484.v9i2.4442>.
- Kocaman, K., Ozocak, A., Edil, T.B., Bol, E., Sert, S., Onturk, K. and Ozsagir, M. (2022). Evaluation of Soil-Water Characteristic Curve and Pore-Size Distribution of Fine-Grained Soils. *Water*, 14(21): 3445. <https://doi.org/10.3390/w14213445>.
- Komine, H. and Ogata, N. (1994). Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4): 478–490. <https://doi.org/10.1139/t94-057>.
- Komornik, A. and David, D. (1969). Prediction of Swelling Pressure of Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95(1): 209–226. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001218>.
- Mehta, B. and Sachan, A. (2017). Effect of Mineralogical Properties of Expansive Soil on Its Mechanical Behavior. *Geotechnical and Geological*

- Engineering*, 35(6): 2923–2934.
<https://doi.org/10.1007/s10706-017-0289-6>.
- Ministère De La Transition Écologique Et De La Cohésion Des Territoires (2024). Retrait-gonflement des argiles.
<https://www.georisques.gouv.fr/minformer-sur-un-risque/retrait-gonflement-des-argiles>.
- Mishra, A.K., Dhawan, S. and Rao, S.M. (2008). Analysis of Swelling and Shrinkage Behavior of Compacted Clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(3): 289–298.
<https://doi.org/10.1007/s10706-007-9165-0>.
- Mission Risques Naturels (MRN) (2023). Diagnostic pour l'adaptation des habitations au retrait-gonflement des argiles (RGA) avant dommages. Rapport méthodologique. Mission Risques Naturels.
- Nayak, N.V. and Christensen, R.W. (1971). Swelling Characteristics of Compacted, Expansive Soils. *Clays and Clay Minerals*, 19(4): 251–261.
<https://doi.org/10.1346/CCMN.1971.0190406>.
- Pedarla, A., Puppala, A.J., Hoyos, L.R. and Chittoori, B. (2016). Evaluation of Swell Behavior of Expansive Clays from Internal Specific Surface and Pore Size Distribution. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2): 04015080.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001412](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001412).
- Putri, A.C., Prakoso, A.W. and Rahayu, W. (2022). Review of classification methods to determine expansion degree of expansive soils in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 347: 03006.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234703006>.
- Raman, V. (1967). Identification of expansive soils from the plasticity index and the shrinkage index data. *The Indian Engineer*, 11(1): 17–22.
- Schneider, G.L. and Poor, A.R. (1974). The prediction of soil heave and swell pressures developed by an expansive clay. *The prediction of soil heave and swell pressures developed by an expansive clay*, : .
- Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R. (1962). Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 88(3): 53–87.
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000431>.
- Service des données et études statistiques (SDES) (2021). Nouveau zonage d'exposition au retrait-gonflement des argiles : plus de 10,4 millions de maisons individuelles potentiellement très exposées. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/nouveau-zonage-dexposition-au-retrait-gonflement-des-argiles-plus-de-104-millions-de-maisons>.
- Service des données et études statistiques (SDES) (2022). Retrait-gonflement des sols argileux : un risque majeur pour les habitations. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/retrait-gonflement-des-sols-argileux-un-risque-majeur-pour-les-habitations>.
- Skempton, A.W. (1953). *The Colloidal Activity of Clays*. Thomas Telford Publishing.
<https://doi.org/10.1680/sposm.02050>.
- Sowers, G.B. and Sowers, G.F. (1970). *Introductory soil mechanics and foundations*. 3 ed., Macmillan.
- Villar, M.V. and Lloret, A. (2008). Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 39(1–2): 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.04.007>.
- Zamin, B., Nasir, H., Mehmood, K., Iqbal, Q., Farooq, A. and Tufail, M. (2021). An Experimental Study on the Geotechnical, Mineralogical, and Swelling Behavior of KPK Expansive Soils. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1): .
<https://doi.org/10.1155/2021/8493091>.
- Zhou, B. and Lu, N. (2021). Correlation between Atterberg Limits and Soil Adsorptive Water. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(2): 04020162.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002463).
- Zumrawi, M.M.E., Abdelmarouf, A.O. and Gameil, A.E.A. (2017). Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance. *International Journal of Multidisciplinary and Scientific Emerging Research*, 6(2): 108–116.