

ANALYSE STOCHASTIQUE DES PARAMETRES RELATIFS AUX SOLS GONFLANTS

STOCHASTIC ANALYSIS OF EXPANSIVE SOILS PARAMETERS

NawalDOUNANE¹, HabibTROUZINE², HachemiDJADOUNI³

^{1,2,3}Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université de Sidi Bel Abbès BP 89 DZ-22000 Algérie.

RÉSUMÉ –Les corrélations semi-empiriques ou purement empiriques ont toujours fait partie significative de la mécanique des sols. On présente dans ce travail plusieurs corrélations entre paramètres géotechniques mesurés en laboratoire afin d'estimer la pression et l'amplitude de gonflement des argiles expansives. Des régressions de types linéaires simples et multiples sont établies. Les correspondances entre paramètres proposés sont en très bonne concordance avec la littérature.

ABSTRACT–The semi-empirical or purely empirical correlations always formed significant part of the soil mechanics. One presents in this work several correlations between parameters geotechnics measured in laboratory in order to estimate the pressure and the amplitude of swelling of expansive soils. Regressions of the linear types simple and multiple are established. The correspondences between parameters suggested are in very good agreement with the literature.

1. Introduction

L'utilisation des statistiques et probabilités en géotechnique a débuté il y a une plus d'une vingtaine d'années et l'évolution est encore en cours. L'accent était d'abord mis sur l'analyse des relations entre paramètres, ce que l'on appelle couramment l'étude des corrélations ensuite viennent l'époque des travaux portant plus particulièrement sur l'analyse de la variabilité naturelle des sols et sur ses effets sur le dimensionnement des ouvrages de géotechnique.

L'utilisation de corrélations constitue une technique très utile pour le progrès des études géotechniques de terrain et son usage peut être recommandé, tant pour compléter des données que pour contrôler la vraisemblance des résultats des essais réalisés en place comme en laboratoire : les données conformes aux corrélations, tant générales qu'établies sur le site, sont en effet plus plausibles que celles qui en sont trop éloignées et pour lesquelles des vérifications complémentaires sont toujours souhaitables (Magnan, 1993 ;Dounaneet al., 2015).

Le gonflement des sols naturels, est un phénomène très complexe, il est spécifique à certains sols argileux. Ce phénomène de gonflement cause de nombreux dégâts aux niveaux des structures, ouvrages enterrés et trottoirs, partout dans le monde (Trouzineet al., 2012 ;Dounaneet al., 2015).L'amplitude et la pression de gonflement sont les deux paramètres les plus utilisés pour l'expression du gonflement des sols argileux à caractère expansif. L'expérience a montré que ces paramètres sont affectés par de nombreux facteurs environnants et intrinsèques.

L'étude du comportement des argiles gonflantes est donc un domaine important qui peut aboutir à améliorer la maîtrise de leur utilisation et à la réduction des effets indésirables qu'elles peuvent induire.

Beaucoup d'essais et méthodes ont été développés pour estimer l'amplitude et la pression de gonflement. Ceux-ci incluent des mesures directes et indirectes. Les méthodes directes fournissent des mesures physiques réelles du gonflement. Plusieurs méthodes de laboratoire ont été développées pour déterminer directement le gonflement qu'un sol subit pendant que le contenu d'humidité change. Les méthodes indirectes consistent à déterminer une corrélation entre le potentiel de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques d'un sol, l'emploi de formules empiriques permet de connaître rapidement le potentiel de gonflement de ce sol, c'est-à-dire estimer si ce potentiel est faible, moyen ou élevé et donc si le phénomène est à prendre en compte ou non (Ji *et al.*, 2006; Dounane *et al.*, 2015).

De nombreux chercheurs ont tenté de relier la pression de gonflement ou le potentiel de gonflement aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau initiale W_i , limite de plasticité I_p , le pourcentage des particules d'argiles C , ...) qui semblent être les facteurs les plus influents sur le gonflement des argiles. Plusieurs relations empiriques ont été proposées les principales équations sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Expressions mathématiques des modèles de prévision du gonflement (Seed *et al.*, 1962 ; Komornik et David 1969; Nayak et Christensen, 1970 ; Mrad, 2005; Azzouz, 2008)

Auteur (s)	Expressions mathématiques	Paramètre
Skempton (1953)	$A_c = I_p / C$	A_c : l'activité de Skempton C : teneur en particules de dimensions inférieures à $2 \mu m$ I_p : l'indice de plasticité
Seed <i>et al</i> (1962)	$G = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot A_c^{2,44} \cdot C^{3,44}$	G (%) A_c [-] C (%)
Seed <i>et al</i> (1962)	$G = 21,6 \cdot 10^{-5} \cdot I_p^{2,44}$	G (%) I_p (%)
Nayak et Christensen (1970)	$G = 2,29 \cdot 10^{-2} \cdot I_p^{1,45} (C/W_i) + 6,38$	W_i (%) : Teneur en eau initiale
Komornik et David (1969)	$G = 0,9 + 2,1 I_p$	G (%) I_p (%)
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\text{Log } G = 1/19,5 (\gamma_d + 0,65W_i - 130,5)$	G (%) W_i (%) γ_d (kg/m ³)
Komornik et David (1969)	$P_s = -2,132 + 0,0208 W_i + 6,66 \cdot 10^{-4} \gamma_{d0} - 0,0269 W_i$	P_s (kg/m ²) W_i (%) W_i (%) γ_d (kg/m ³)
Nayak et Christensen (1970)	$P_s = 3,5817 \cdot 10^{-2} \cdot I_p^{1,12} (C^2/W_i^2) + 3,7912$	W_i (%)
Chen (1988)	$G = 0,2558 \cdot e^{0,0838 I_p}$	

2. Méthodologie

Le présent travail comporte une analyse des régressions linaires simples et multiples d'une base de données que nous comparons avec les corrélations de la littérature, et consiste à déduire les effets des différents paramètres étudiés et choisir les meilleures régressions pouvant être appliquées pour notre cas.

La base de données est élaborée suite à une enquête auprès des laboratoires de la région de Sidi Bel Abbes en Algérie (Laboratoire des Travaux Publics d'Oran LTPO et Laboratoire National de l'Habitat et de Construction de Tlemcen LNHC). Le contexte géologique de la plaine de Sidi Bel Abbés, objet de cette étude, est selon (Bensejad,2011) une fosse d'effondrement qui a été comblé progressivement par des alluvions charriées par l'oued et qui se sont sédimentées, formées de terrains quaternaires et plio quaternaires et limitée au Nord et à l'Est par des terrains post crétacés, au sud par des terrains jurassiques et crétacés. Le fichier de données comporte une population de 39 échantillons étudiant 04 facteurs relatifs aux sols gonflants (fraction argileuse C (%) (Inférieure à $2 \mu m$), l'indice de plasticité I_p (%), le gonflement maximal libre G (%) et la pression de gonflement P_s (KPa)). Le tableau 2 représente la population globale étudiée.

Tableau 2. La population étudiée

N° de l'échantillon	C (%) < 2 μ m	I_p (%)	G(%)	P_s (kPa)
1	55,3	22	4,75	65
2	61,2	83	15,75	148
3	48	14	0,87	23
4	11	41,97	/	/
5	100	20,8	/	/
6	40	22,37	/	/
7	29	25,24	/	/
8	38	21,39	/	/
9	34	25,24	/	/
10	11	30,61	/	/
11	11	30,57	/	/
12	59,24	35,19	/	/
13	56,76	47,94	/	/
14	46,5	36	1,75	/
15	29,9	57	3,92	/
16	64,4	58	7,32	/
17	65	52	10,67	/
18	64,4	48	12,04	/
19	52	23	13,43	/
20	46,3	35	14	/
21	65,1	52	18,42	/
22	37,7	40	18,9	/
23	68	39	29	/
24	74	50	33,2	/
25	70	46	33,85	/
26	52	50,4	26,3	/
27	27	29	21,3	/
28	44	29,58	/	/
29	48	30	/	/
30	44,8	26,41	/	/
31	50	48,06	/	/
32	53	33	5,72	201,3
33	46	32,5	5,72	201,3
34	51	32	5,72	201,3
35	69	35	5,72	201,3

36	61	32	/	/
37	58	31	/	/
38	55	31	/	/
39	40	83,43	27,08	447

La régression linéaire se classe parmi les méthodes d'analyses multi-variées qui traitent des données quantitatives. C'est une méthode d'investigation sur données d'observations, ou d'expérimentations, où l'objectif principal est de rechercher une liaison linéaire entre une variable Y quantitative et une ou plusieurs variables X également quantitatives. C'est la méthode la plus utilisée pour deux raisons majeures :

- c'est une méthode ancienne,
- c'est l'outil de base de la plupart des modélisations plus sophistiquées comme la régression logistique, le modèle linéaire généralisé, les méthodes de traitement des séries temporelles, et surtout des modèles économétriques, etc.

3. Analyse de la régression linéaire simple

La régression linéaire simple examine la relation linéaire entre deux variables continues : une réponse (Y) et un prédicteur (X). Lorsqu'il existe une relation entre les deux variables, il est possible de prévoir une valeur de réponse à partir de la valeur du prédicteur avec une précision améliorée. Le prédicteur est une variable indépendante utilisée pour prévoir les valeurs de la variable dépendante (variable de réponse) dans une analyse de régression.

Nous proposons à partir de la base de données expérimentale (Tableau 2) des régressions de types linéaires simple, les résultats obtenus par cette analyse sont regroupées dans le tableau 3 :

Les mesures S , R^2 et $R^2_{ajusté}$ représentent successivement la variable de réponse (la distance standard entre les valeurs de données et la droite de régression), le pourcentage de la variation de la variable de réponse (plus la valeur R^2 est grande, plus le modèle est ajusté aux données. R^2 est toujours compris entre 0 et 100 %). et le pourcentage de la variation de la variable de réponse ajusté. Ces mesures évaluent l'ajustement du modèle aux données. Ils peuvent aider à sélectionner le modèle le mieux adapté.

Le graphique des valeurs résiduelles et valeurs ajustées présente une répartition aléatoire des valeurs résiduelles des deux côtés de 0. Si un point est éloigné de la majorité des points, il peut s'agir d'une valeur aberrante. Ce graphique ne devrait présenter aucune répartition reconnaissable. Par exemple, si la dispersion des valeurs résiduelles tend à augmenter lorsque les valeurs ajustées s'accroissent, cette situation peut contredire l'hypothèse d'une variance constante.

On définit la valeur résiduelle par la différence entre une valeur observée et sa valeur ajustée correspondante, et les valeurs résiduelles normalisées utiles pour la détection des valeurs aberrantes, elles sont égales à la valeur résiduelle divisée par une estimation de son écart type.

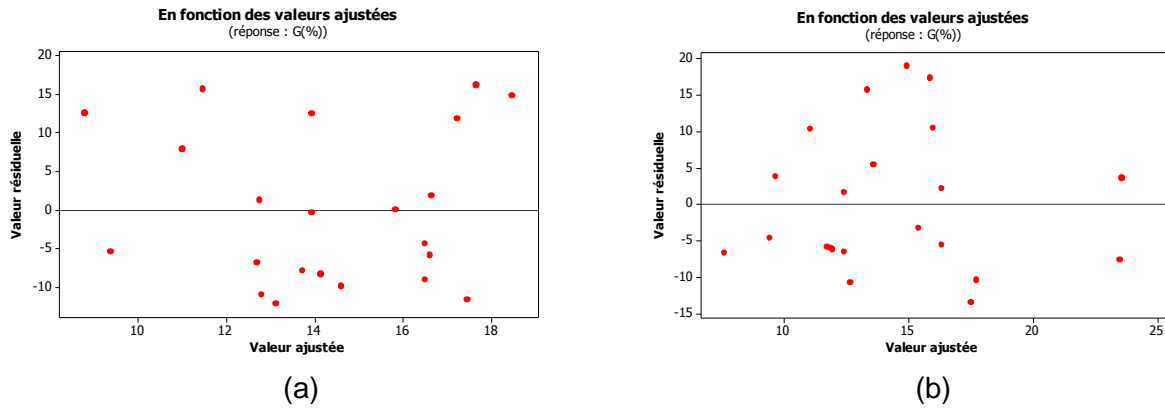


Figure 1. Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées
 (a) G en fonction de C ; (b) G en fonction de lp

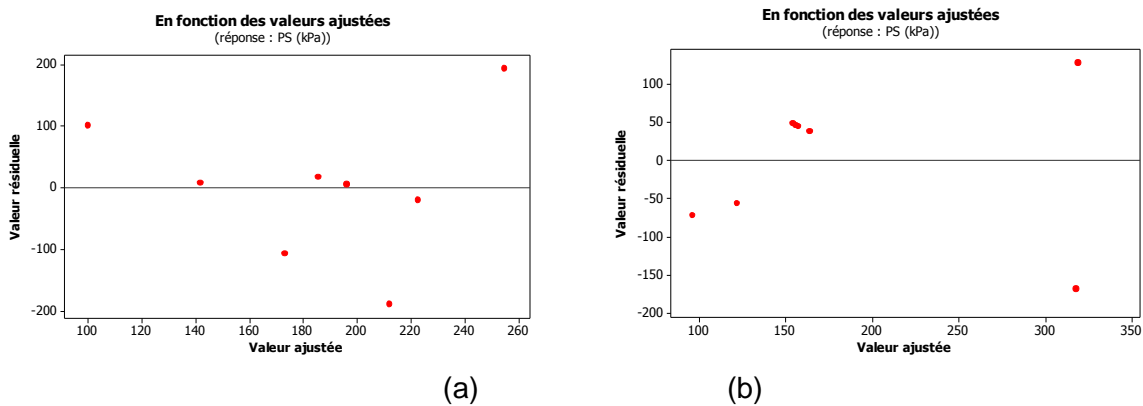


Figure 2. Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées
 (a) Ps en fonction de C ; (b) Ps en fonction de lp

Tableau 3. Résultats d'analyse de la régression linéaire simple

Formules	Résultats	
$G = 3,24 + 0,206 C$	$S = 10,24$ $R^2 = 6,8 \%$	$R^2_{ajust} = 2,1 \%$
$G = 4,41 + 0,230lp$	$S = 9,78$ $R^2 = 14,9 \%$	$R^2_{ajust} = 10,7 \%$
$P_S = 468 - 5,32 C$	$S = 126,11$ $R^2 = 14,6 \%$	$R^2_{ajust} = 0,3 \%$
$P_S = 52,0 + 3,20lp$	$S = 101,20$ $R^2 = 45,0 \%$	$R^2_{ajust} = 35,8 \%$
$P_S = 77,14 + 12,21 G$	$S = 78,74$ $R^2 = 66,7 \%$	$R^2_{ajust} = 61,1 \%$

L'écart type des valeurs résiduelles S dans le cas de la régression linéaire simple du G en fonction de C et de lp est petit, par contre dans les autres cas des régressions sont très grandes, alors que les valeurs inférieures à S suggèrent un meilleur ajustement, tandis que les valeurs supérieures à cette valeur suggèrent un ajustement de moindre qualité.

Les valeurs de R^2 et R^2_{ajust} sont grandes dans le cas de la régression linéaire simple du Ps en fonction de l'indice de plasticité lp et le gonflement maximal libre G, ce qui indique que le modèle est adapté aux données, par contre il est mal adapté dans les autres cas.

L'équation de la régression de G en fonction du C obtenue ($G = 3,24 + 0,206 C$) est bien linéaire sous forme ($y = a x + b$ avec $y = G$, la variable $x = C$). Pour chaque augmentation de 1% de C, le pourcentage de G devrait augmenter de 0,206 %. Par contre le modèle de Seed et al en 1962 présente une relation empirique de G en fonction du C non linéaire de type ($G = 3,6 \cdot 10^{-5} A_c^{2,44} C^{3,44}$).

L'équation de la régression de G en fonction de lp obtenue ($G = 4,41 + 0,230 lp$) est bien linéaire sous forme ($y = a x + b$ avec $y = G$, la variable $x = lp$), Cette équation est semblable à la relation trouvée par Komornik et David en 1969 ($G = 0,9 + 2,1 lp$).

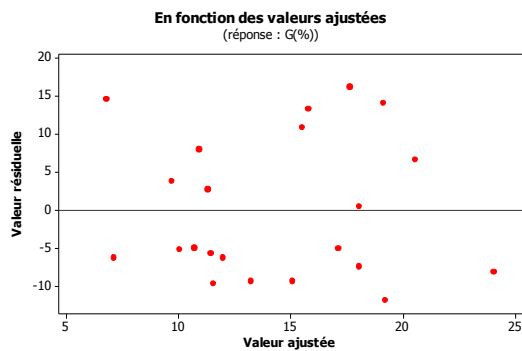
4. Analyse de la régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple examine les relations linéaires entre une réponse continue et deux prédicteurs ou plus.

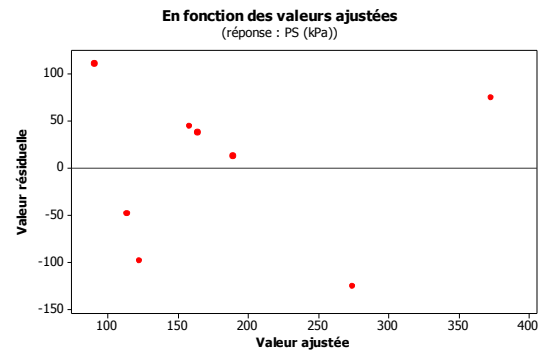
Nous proposons à partir de la base de données expérimentale (Tableau 2) des régressions de types linéaires multiples. Les résultats obtenus par cette analyse sont regroupés dans le tableau 4:

Tableau 4. Résultats d'analyse de la régression linéaire multiple

Formules	Résultats		
$G = -3,91 + 0,168 C + 0,213 lp$	$S = 9,77$	$R^2 = 19,4\%$	$R^2_{ajust} = 10,9\%$
$P_s = 301 - 4,60 C + 3,08 lp$	$S = 99,33$	$R^2 = 55,8\%$	$R^2_{ajust} = 38,2\%$
$P_s = 182 - 1,86 C + 11,6 G$	$S = 84,15$	$R^2 = 68,3\%$	$R^2_{ajust} = 55,6\%$
$P_s = 127 - 3,11 lp + 21,3 G$	$S = 78,43$	$R^2 = 72,5\%$	$R^2_{ajust} = 61,5\%$
$P_s = 99,9 + 0,57 C - 3,42 lp + 22,4 G$	$S = 87,54$	$R^2 = 72,6\%$	$R^2_{ajust} = 52,0\%$

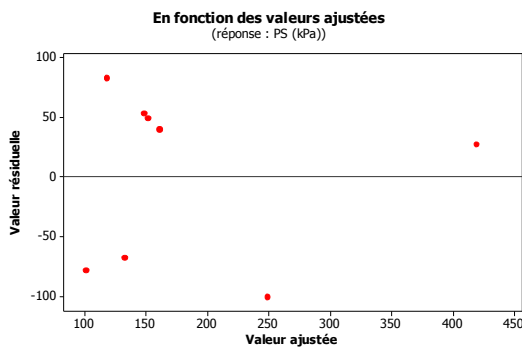


(a)

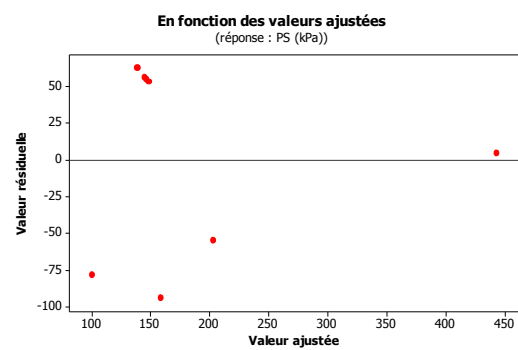


(b)

Figure 3. Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées
(a) G en fonction de C et lp ; (b) P_s en fonction de C et lp



(a)



(b)

Figure 3. Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées
(a) P_s en fonction de C et G ; (b) P_s en fonction de C , lp et G

Les deux valeurs de R^2 et R^2_{ajust} obtenues par la régression linéaire multiple du G en fonction de lp et de C sont petites, elles indiquent que le modèle est mal adapté aux données. Dans les autres cas, on trouve que ces deux valeurs sont grandes, donc ces modèles sont adaptés aux données.

Les équations de la régression de G et de P_s en fonction du C et lp sont bien linéaires sous forme ($y = a_1 x_1 + a_2 x_2 - b$ avec $y = G$ ou P_s , les deux variables $x_1 = C$ et $x_2 = lp$).

Par contre, Nayaket Christensen en 1970 montrent des relations non linéaires entre ces trois paramètres tel que $G = 2,29 \cdot 10^{-2} \cdot Ip^{1,45} (C/W_i) + 6,38$ et $P_s = 3,5817 \cdot 10^{-2} \cdot Ip^{1,12} (C^2/W_i^2) + 3,7912$

4. Conclusions

Cette recherche a montré qu'il est possible de définir des relations linéaires simple et multiple entre la fraction argileuse, l'indice de plasticité, le potentiel de gonflement et la pression de gonflement. Par contre, les valeurs de R^2 et R^2 ajustée des régressions linéaires simples sont très petites ce qui indique que le plan est non adapté aux données. Dans le cas des régressions linéaires multiples, les valeurs de R^2 et $R^2_{ajusté}$ sont plus grandes ce qui indique que le plan est mieux adapté.

Signalons enfin le grand intérêt d'utilisation de la régression linéaire multiple comme meilleure régression adoptée pour l'étude des sols gonflants.

5. Références bibliographiques

- Azzouz F. Z. (2008). Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de TLEMCEM. Mémoire de magister, Faculté des Sciences de l'Ingénieur de TLEMCEM.
- BENSEJAD A, 2011. Aptitude des eaux de la plaine de Sidi Bel Abbes des fins d'irrigation. Université de AbouBeker Bel Kaid-Tlemcen.
- Dounane N., H. Trouzine H., Hamhami H.(2015) . Application de la méthode de Taguchi pour l'étude des sols gonflants. 33èmes Rencontres de l'AUGC. Bayonne, France.
- Ji H., Mourad H., Fried E., Dolbow J. (2006). Kinetics of thermally induced swelling of hydrogels. International Journal of Solids and Structures, vol. 43, n° 7–8, 2006, p 1878–1907.
- Komornik A, David D. (1969). Prediction pressure of clays. Journal of the soil mechanics and Foundation Division, vol.95,n°SM1,pp.209-225.
- Magnan J.P. (1993). Corrélation entre les propriétés des sols. Techniques de l'Ingénieur, Article C219, Paris.
- Mrad M. (2005). Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés. Thèse de doctorat, Lorraine.
- Nayak N.V., Christensen R.W. (1970) .Swelling characteristics of compacted, expansive soils. Clays and Clay Minerals, Vol. 19,pp. 251-261.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. Journal of Soil Mechanics and Foundation division ASCE, vol. 88, n°3, 1962, p 53–87.
- Trouzine H., Bekhiti M., Asroun A. (2012). Effects of scrap tyre rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria. Geosynthetics International, vol. 19, n° 2, 2012, p 124-132.