

Identification des paramètres hydromécaniques de sols de la cité Ciloc à Constantine par analyse inverse

Djenatte Mendjel & Salah Messast

Département de Génie Civil, Laboratoire de Matériaux, Géotechnique, Habita et Urbanisme (LMGHU), Faculté de Technologie, Université du 20 Août 1955, Skikda, Algérie

Révisé le : 14.06.2013

Accepté le : 11.12.2013

للماء دور كبير في دراسة استقرار المنحدرات. و بالتالي من الضروري تشخيص التربة بدقة مع اعتبار السلوك الهيدروميكانيكي. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد نفاذية التربة غير المشبعة. يشخص سلوك التربة بالإزاحات الأفقية التي يتم حسابها باستخدام برنامج Plaxis V.8.2 الذي يستند على تقنية العناصر المحدودة و مع افتراض السلوك الهيدروميكانيكي للتربة. هذه الإزاحات الأفقية يتم مقارنتها مع الإزاحات المقاسة بجهاز inclinomètre لتقليص الارتياح بين القياسات التجريبية و النتائج العددية للإزاحة نستخدم أمثلة الخوارزمية الجينية يتم تطبيق هذا النهج لتحديد نفاذية منطقة Ciloc بقسنطينة الجزائر - النتائج المحصل عليها لإيجاد نفاذية التربة أثبتت نجاعة هذه التقنية .

الكلمات المفتاحية: تربة غير مشبعة - الخوارزمية الوراثية - *plaxis* - تدفق - قانون السلوك.

Résumé

L'eau joue un rôle important dans l'analyse de la stabilité des pentes, d'où la nécessité de caractériser finement les sols en considérant un comportement hydromécanique couplé.

Dans cet article, on s'intéresse à l'identification de la perméabilité des sols non saturés. Le comportement du sol est caractérisé par les déplacements horizontaux qui seront déterminés après un calcul en éléments finis au moyen du code de calcul Plaxis V.8.2, en considérant un comportement hydromécanique du sol. Ces déplacements horizontaux sont comparés aux mesures inclinométriques.

Pour minimiser l'écart entre les mesures expérimentales et les résultats numériques une optimisation par algorithme génétique est utilisée. Cette approche est appliquée pour l'identification de la perméabilité des sols de la cité Ciloc à Constantine - Algérie. Les résultats de cette application ont montré l'intérêt de cette approche à l'estimation de ce paramètre.

Mots clés: Sol non saturé - Algorithme génétique – Plaxis – Ecoulement - Loi de comportement.

Abstract

The water has an important role in slope stability analysis, hence it is necessary to characterize the soil by considering a coupled hydromechanics behavior.

This study is done to identify the permeability of unsaturated soils. These soils are characterized by hydromechanical behavior. Using Plaxis V.8.2 code based on finite element technique, the horizontal displacements are calculated for compare them with inclinometer measurements.

The discrepancy between experimental measures and numerical results is decreased by inverse analysis using genetic algorithm method. This approach is applied for identification of the soil permeability of Ciloc suburb at Constantine – Algeria. The results of this application have shown the advantage of this approach to estimate this parameter.

Keywords: Unsaturated soil - Genetic algorithm - Plaxis - Flow - Behaviour Law.

Auteur correspondant : rech_mendjel@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'interaction air – eau – solide rend le comportement mécanique ainsi que les aspects hydriques beaucoup plus compliqués que dans un sol saturé. En outre, la pression d'eau est toujours inférieure à la pression d'air dans un sol non saturé. Cette différence de pression entre l'air et l'eau, appelée succion, est à l'origine de certains comportements hydromécaniques particuliers du sol non saturé. En effet, plusieurs sources de non linéarité sont introduites lors de la formulation d'un problème (la saturation varie lorsque la succion varie). D'où la nécessité de bien caractériser les sols en considérant un couplage hydromécanique [1].

Dans les sols non saturés, les propriétés de déformabilité et de rupture sont variables en fonction de la teneur en eau. Il en résulte des couplages complexes entre les mouvements d'eau, la redistribution des contraintes internes et la réponse des massifs en termes de déformations [2].

De nombreux modèles constitutifs de sols existent pour représenter la plupart des comportements de sols réels, ces modèles approchés peuvent être utilisés avec une certaine confiance dans les calculs, à condition de bien choisir les valeurs des paramètres. Le problème du choix des paramètres de sol est donc une tâche délicate pour l'ingénieur [3]. Pour résoudre ce problème, des méthodes d'identification de paramètres, basées sur le principe d'analyse inverse ont été proposées par plusieurs auteurs.

Parmi ces auteurs, Tsai *et al.* [4], et Morshed et Kaluarachichi [5], se sont intéressés à l'identification des paramètres hydrologiques dans l'étude d'écoulements souterrains. Pintado *et al.* [6] montrent que la procédure d'identification des paramètres permet également de mettre en évidence certains couplages entre paramètres à partir de résultats d'essais thermohydrauliques de laboratoire.

Hicher et Rangeard [7] ont développé une procédure d'analyse inverse basée sur l'utilisation conjointe d'un code de calcul par éléments finis et d'un logiciel d'optimisation. La procédure d'identification permet d'aboutir à la détermination simultanée des paramètres mécaniques, correspondant au modèle Cam-Clay, et de la perméabilité des sols fins saturés. L'objectif de ce travail est d'identifier la perméabilité des sols non saturés de la cité Ciloc à Constantine (Algérie) par analyse inverse.

Ce paramètre sera caractérisé par les déplacements horizontaux.

Le logiciel Plaxflow V.8.2 est utilisé pour la génération des pressions interstitielles en milieu non saturé et le logiciel Plaxis V.8.2 pour l'analyse du problème en déformation plane, dans le but d'identifier la perméabilité du sol.

Une méthode directe de résolution du problème inverse est développée. Des valeurs a priori sont données au paramètre inconnu pour simuler le problème direct associé, à l'aide des logiciels Plaxflow et Plaxis jusqu'à ce que l'écart entre les résultats du calcul numérique et les mesures inclinométriques soit minimal.

Les principales approches utilisées dans la littérature pour résoudre des problèmes d'optimisation sont basées sur des méthodes de gradient. Ces méthodes supposent l'unicité de la solution du problème inverse et souvent nécessitent beaucoup d'informations auxiliaires pour fonctionner. Or, les erreurs de modélisation et les incertitudes de mesures sont importantes en géotechnique. Donc, il n'existe pas de solution exacte pour le problème inverse mais plutôt une infinité de solutions approchées. Pour cela, nous avons choisi de baser la procédure d'analyse inverse sur un processus d'optimisation par *algorithme génétique*. Cette méthode, robuste et efficace, est connue pour sa capacité de résoudre des problèmes complexes. Les algorithmes génétiques n'ont aucun besoin d'informations auxiliaires : ils sont dit aveugles. Pour effectuer une recherche de plus en plus performante de solutions intéressantes, ils n'ont besoin que des valeurs de la fonction à optimiser associée à chaque individu.

2. MODELISATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE

Plaxis [8] est généralement utilisé pour des analyses en contraintes effectives dans lesquelles une distinction claire est faite entre les pressions interstitielles et les contraintes effectives. Le module d'écoulement permanent dans Plaxis n'est pas destiné aux analyses d'écoulement dans les sols partiellement saturés. Ces analyses nécessitent des relations plus complexes entre la perméabilité du sol, le degré de saturation et les contraintes de succion, de telles relations sont incluses dans le module d'extension de Plaxis V.8.2 sur les écoulements Plaxflow [9]. Le logiciel de calcul Plaxflow n'est qu'un module d'extension de Plaxis v8,

séparé mais compatible. Donc le problème traité par les deux codes est couplé.

Le modèle analytique de la sorption proposé par Van Genuchten [10], permet de prendre en compte l'effet d'une variation de succion sur la saturation en eau du matériau. La modélisation des écoulements dans les sols non saturés est essentiellement basée sur ce modèle. Il propose une fonction reliant le degré de saturation effectif et la succion.

On présente la théorie utilisée dans Plaxflow pour l'écoulement d'eau. Initialement, l'écoulement dans un milieu poreux est décrit par la loi de Darcy. Considérant l'écoulement dans le plan vertical x, y , décrit par les équations suivantes :

$$q_x = -k_x \frac{\partial W}{\partial x} \tag{1}$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial W}{\partial y} \tag{2}$$

Ces équations montrent que le débit d'écoulement q est fonction de la perméabilité effective K (qui est décomposée en k_x et k_y), et du gradient hydraulique Φ qui est défini comme suit :

$$W = y - \frac{p}{\gamma_w} \tag{3}$$

$$W_p = -\frac{p}{\gamma_w} \tag{4}$$

Où y est la position verticale, p est le potentiel de pression, et γ_w est le poids volumique de l'eau. Φ_p est la charge de pression.

La perméabilité effective K est reliée à la saturation par l'équation suivante :

$$K = k_{rel}(S) K_{sat} \tag{5}$$

Le modèle d'écoulement non saturé est généralement basé sur la description de Van Genuchten. Suivant ce modèle, la saturation dépend de la pression effective Φ_p :

$$S(W_p) = S_{residu} + (S_{sat} - S_{residu}) \left(1 + \left(g_a |W_p| \right)^{g_n} \right)^{\frac{1-g_n}{g_n}} \tag{6}$$

En général, dans la condition de saturation, les pores ne sont pas complètement remplis par

l'eau, l'air peut être piégé et la saturation devient inférieure à un. Van Genuchten adopte une saturation résiduelle S_{residu} qui décrit une partie de fluide qui reste dans les pores. g_a, g_n et g_l sont des paramètres empiriques de sols qui doivent être mesurés. Dans le code de calcul Plaxisflow, ces paramètres peuvent être directement spécifiés ou choisis en utilisant la base de données des propriétés des sols. g_a est un paramètre lié à la valeur d'entrée de l'air du sol (air entry value AEV), g_n est un paramètre fonction du taux d'extraction de l'eau du sol une fois l'AEV a été dépassé. La perméabilité relative est liée à la saturation effective :

$$S_e = \frac{S - S_{residu}}{S_{sat} - S_{residu}} \tag{7}$$

La perméabilité relative selon Van Genuchten, est maintenant écrite comme suit :

$$k_{rel}(S) = (S_e)^{g_l} \left(1 - \left(1 - S_e \left(\frac{g_n}{g_n - 1} \right) \right)^{\frac{g_n - 1}{g_n}} \right)^2 \tag{8}$$

3. OPTIMISATION PAR ALGORITHME GENETIQUE

3.1 Définition de la fonction erreur

L'écart entre une courbe calculée numériquement (décrite par N points U_{ni}) et une courbe de référence mesurée in situ (décrite par N points U_{ei}) est évalué par la fonction d'écart type suivante notée F_{err} :

$$F_{err} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{ei} - U_{ni})^2 \right]^{1/2} \tag{9}$$

3.2 Principe de l'algorithme d'optimisation

Un algorithme génétique est une méthode d'optimisation qui s'inspire de la théorie de l'évolution de Darwin. C'est un outil reconnu performant pour l'optimisation de fonctions erreurs à contraintes linéaires ou non linéaires et dont les principes de base ont été développés par Goldberg et Rendens [11, 12]. L'algorithme d'optimisation utilisé pour la présente étude s'inspire de cette méthode. Ses principales étapes sont résumées par l'organigramme illustré sur la figure 1.

Ainsi, on définit :

– *Espace de recherche* : Soit N_p le nombre de paramètres à identifier pour le problème posé.

La minimisation de la fonction erreur est effectuée dans un espace de recherche à N_p dimensions, borné par des valeurs p_{min} et p_{max} propres à chaque paramètre p .

– *Codage, individu et population* : Chaque paramètre codé sous forme binaire constitue un gène. La concaténation de plusieurs gènes forme un individu. Chaque individu correspond à un point de l'espace de recherche. Un ensemble de N_i individus constitue une population.

– *Génération d'une population initiale* : Un ensemble de N_i individus est choisi aléatoirement sur l'espace de recherche. Le coût F_{err} de chaque individu de cette population initiale est évalué. Les mécanismes de sélection, de croisement et de mutation font ensuite évoluer, au fil des générations, la population vers les individus de l'espace de recherche les mieux adaptés.

– *Sélection* : Seuls les $N_i/3$ meilleurs individus d'une population (individus présentant le moindre coût F_{err}) sont conservés pour la génération suivante. Ils constituent les individus parents.

– *Croisement et mutation* : Ces mécanismes sont appliqués aux individus parent pour former une population enfant. Le croisement caractérise la phase d'échange d'informations entre deux individus parents sélectionnés aléatoirement. Ils sont croisés entre eux pour former $2 N_i / 3$ nouveaux individus (Tab. 1). La mutation fabrique des erreurs de recopie, pour diversifier les individus de la nouvelle population (inversion d'un bit d'un gène) (Tab. 2). Ces deux phases créent de nouveaux individus qui ont des chances d'être meilleurs. D'après Davis [13], la combinaison des deux mécanismes de croisement et de mutation pour générer de nouvelles combinaisons de paramètres permet de mieux converger vers une solution que l'utilisation d'un seul de ces mécanismes. La phase de croisement est une étape très importante de l'algorithme génétique. C'est elle qui caractérise la méthode, la rend différente des autres algorithmes d'optimisation. En combinant des blocs de bonnes solutions sur divers individus, le croisement accélère le processus de recherche. La phase de mutation sert à introduire de la diversité dans une population d'individus. Ce mécanisme évite à l'algorithme de converger prématurément vers un minimum local.

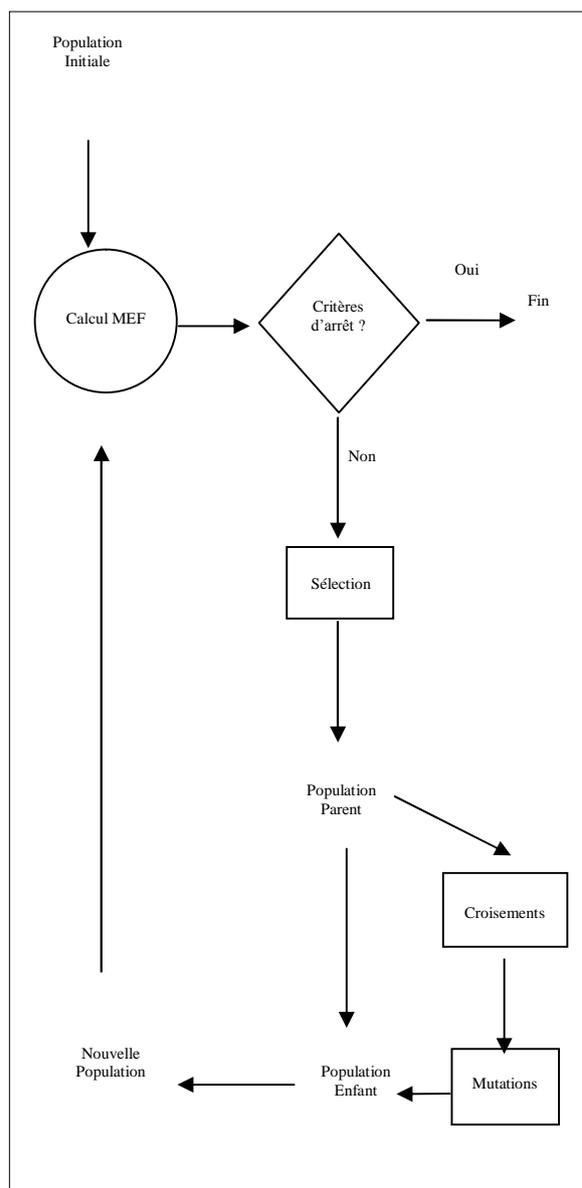


Figure 1. Principe d'optimisation par algorithme génétique

Tableau 1. L'opérateur de croisement dans le codage binaire.

Individus Parents			
Parent A:	1100	110	10011101 11100
Points de croisement :			
Parent B:	0110	001	01111011 00111
Individus Enfants			
Enfant A' :	1100	001	10011101 00111
Points de croisement :			
Enfant B' :	0110	110	01111011 11100

Tableau 2. L'opérateur de mutation dans le codage binaire.

Individu avant mutation	
Individu :	110000110 01110100111
Bit sélectionné:	
Individu après mutation	
Individu muté:	110000110 1 1110100111

Plusieurs auteurs ont utilisé l'optimisation par algorithme génétique en géotechnique. Simpson *et al.* [14] sont parmi les premiers à avoir évoqué l'utilisation d'algorithmes génétiques pour l'optimisation de problèmes géotechniques. Ils appliquent notamment cette méthode à l'identification de la fréquence de discontinuité maximale dans des structures rocheuses complexes. Leur étude montre qu'une solution proche de l'optimum peut être déterminée après le calcul d'une petite fraction de l'espace de recherche. McCombie *et al.* [15] utilisent, quant à eux, un algorithme génétique pour résoudre des problèmes de stabilité de pentes. Zolfaghari *et al.* [16] étendent ces résultats aux surfaces de rupture non circulaires. Ils montrent que grâce à cet algorithme génétique, une surface de rupture non circulaire avec un coefficient de sécurité minimal est identifiable en un faible temps de calcul. Ils conseillent d'appliquer ce type d'approche aux problèmes de stabilité de barrages en terre, de pentes naturelles ou à tout autre problème géotechnique à une ou plusieurs couches. Mendjel *et al.* [17] utilisent un algorithme génétique pour l'identification de surfaces de rupture circulaire par la méthode des tranches. Pal *et al.* [18] tout comme Samarajiva *et al.* [19] appliquent les algorithmes génétiques au calage de paramètres de modèles de comportement sur des essais de laboratoire. Levasseur [3] a montré l'efficacité de cette méthode d'optimisation pour identifier des paramètres mécaniques en se basant sur des mesures *in situ*; elle a trouvé que l'augmentation du nombre de paramètres à identifier présente un problème majeur, qui est le temps de calcul.

L'optimisation par algorithme génétique s'avère être un outil puissant pour optimiser des problèmes variés de géotechnique. Il offre de nouvelles opportunités pour l'analyse

probabiliste par éléments finis d'ouvrages géotechniques. Pour Simpson *et al.* [14], un algorithme génétique est une méthode fortement probabiliste. Plus le problème est mal posé, plus le coût de calcul augmente, il est donc difficile de savoir à l'avance le nombre d'évaluations nécessaires à l'identification de l'optimum. Plus particulièrement, les algorithmes génétiques convergent rapidement vers les bonnes régions de l'espace et leurs performances s'améliorent avec la taille du problème. Il est important de bien choisir les paramètres caractérisant les algorithmes génétiques pour leur bonne utilisation. Dans ce travail une petite partie de l'espace de recherche a été examinée.

4. EXEMPLE D'APPLICATION

L'étude présentée dans ce travail consiste en l'application de la technique sur site concernant l'estimation de la perméabilité des sols rencontrée dans un site bien connu. Elle est instrumentée par des inclinomètres pour la mesure des déplacements horizontaux. Ce site est la cité Ciloc à Constantine, Algérie. La cité Ciloc à Constantine est située sur un versant à faible pente (10° à 15°) qui a subi un glissement en 1987 sur une centaine de mètres.

Une campagne de reconnaissance géophysique réalisée à la fin des années 80 et complétée par des sondages carottés a permis de préciser la nature du versant. En surface des argiles sont présents sur une épaisseur de 8 m, auxquels succèdent des sables et graviers, probablement fortement imprégnés d'eau, qui reposent eux-mêmes sur des marnes.

La géométrie (voir Fig. 2) et les caractéristiques mécaniques des sols constituant le versant du Ciloc se réfèrent au travail de Mokhbi *et al.* (voir Tab. 3) [20]. Les positions S2, S3 et S9 représentent l'emplacement des sondages inclinométriques. Dans ce travail, on s'intéresse aux déplacements horizontaux donnés par l'inclinomètre S9, en considérant les couches de sols non saturés avec un comportement hydromécanique. Pour simplifier la modélisation du problème on définit deux parties :

- Modélisation de la nappe phréatique dans le site en milieu non saturé, en considérant le niveau d'eau constant ;

- Modélisation du site en conditions de déformations planes par le logiciel Plaxis (comportement des sols élasto plastiques avec écrouissage -Hardening Soil Model (HSM)-), en tenant compte des résultats fournis par le

logiciel Plaxflow.

Les conditions aux limites dans un problème couplé seront qualifiées respectivement de :

- Conditions aux limites mécaniques basées sur les équations d'équilibre mécanique ;
- Conditions aux limites hydrauliques basées sur les équations d'écoulement.

Nous imposons des déplacements horizontaux nuls selon l'axe x, et verticaux nuls selon l'axe y sur le fond du massif.

Pour les conditions hydrauliques, on considère une nappe d'eau à niveau constant, avec un écoulement permanent, les parois verticales sont perméables par contre le substratum est considéré imperméable.

Les figures 3 et 4 représentent respectivement le maillage et les conditions aux limites du modèle numérique.

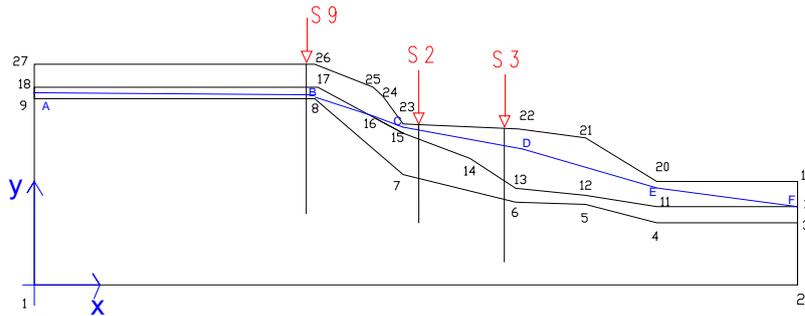


Figure 2. Profil en long du site de la cité Ciloc (Constantine)

Tableau 3. Caractéristiques physico-mécaniques des sols

Couche N°	γ_d kN/m^3	γ_{sat} kN/m^3	C' kN/m^2	ϕ' ($^\circ$)	ϵ ($^\circ$)	E_{50}^{ref} kN/m^2	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ kN/m^2	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ kN/m^2	ν
01	17	19.5	15	12	0	2100	2100	6300	0.33
02	15	17.5	8	21	0	2200	2200	6600	0.30
03	18	21.5	55	22	0	6600	6600	19800	0.30

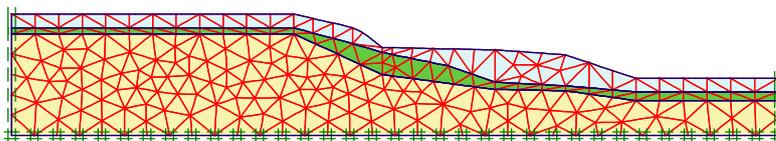


Figure 3. Maillage et conditions aux limites cinématiques par éléments finis.

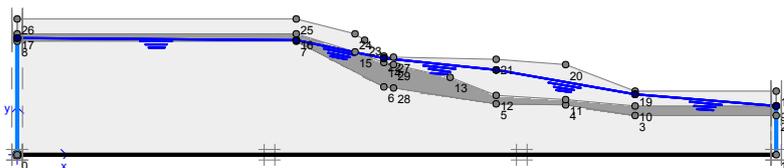


Figure 4. Conditions aux limites hydrauliques

Pour identifier la perméabilité à l'état saturé (K) du sol en se basant sur les mesures inclinométriques, le processus d'optimisation schématisé par la figure 1 a été écrit en langage Matlab.

Il a été choisi une génération initiale de 3 paramètres (K_1 , K_2 , K_3 , les indices 1,2 et 3 correspondants aux trois couches du sol), et de 30 individus. Puis, on passe à un calcul par éléments finis dans Plaxis et Plaxflow.

Les déplacements horizontaux sont ensuite intégrés dans le programme pour trouver la fonction erreur F_{err} ; si la condition d'arrêt n'est pas satisfaisante, les trois mécanismes d'optimisation par algorithme génétique (sélection, croisement et mutation) sont appliqués pour former une nouvelle génération. Ensuite, on répète les mêmes étapes que la génération précédente jusqu'à ce que F_{err} soit minimale.

5. RESULTATS

Partant d'une population initiale de petite taille uniformément répartie sur l'espace de recherche (Fig. 5) et (Fig. 6), les individus évoluent dès la première génération du processus d'optimisation vers une zone de l'espace où F_{err} est minimale. Ensuite, les individus parents évoluent progressivement entre la 1^{ère} et la 4^{ème} génération. Enfin, la population parent se stabilise dès la 4^{ème} génération pour donner dans la 9^{ème} génération un ensemble de deux individus de même F_{err} et d'un ordre de grandeur raisonnable pour les types de sol des trois couches (comparant à la perméabilité donnée par le système de classification des sols «*Staring*» donné par Plaxflow) Chaque individu représente la perméabilité effective (K) d'unité (m/jour) des trois couches de sols (Tab. 4).

Tableau 4. Perméabilité estimée de chaque couche de sol.

Couches des sols	Tenseur de perméabilité effective	Individu 1 (m/j)	Individu 2 (m/j)
Argiles	K_1	7.75×10^{-3}	6.63×10^{-3}
Sable graveleux	K_2	0.3	0.3
Marnes	K_3	6.34×10^{-3}	3.75×10^{-2}

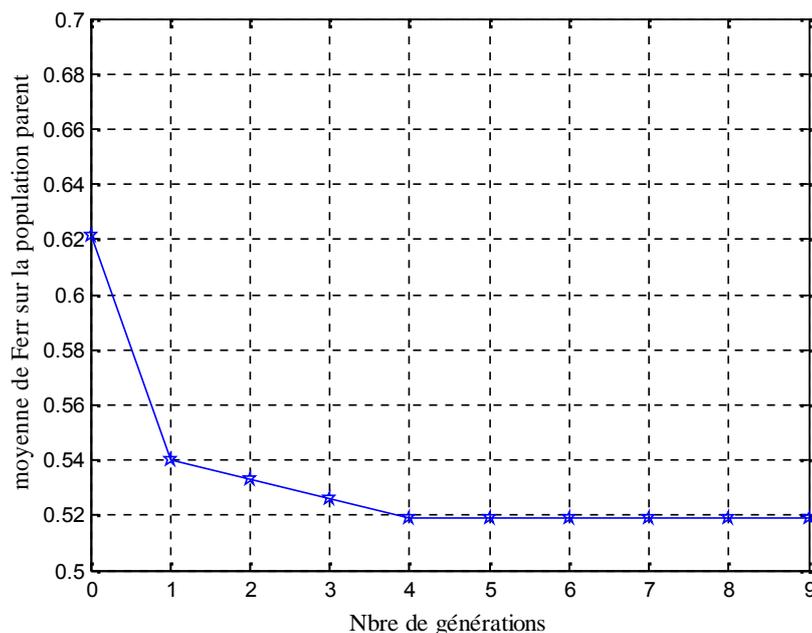


Figure 5. Evolution de la moyenne de F_{err} sur la population parent en fonction des générations

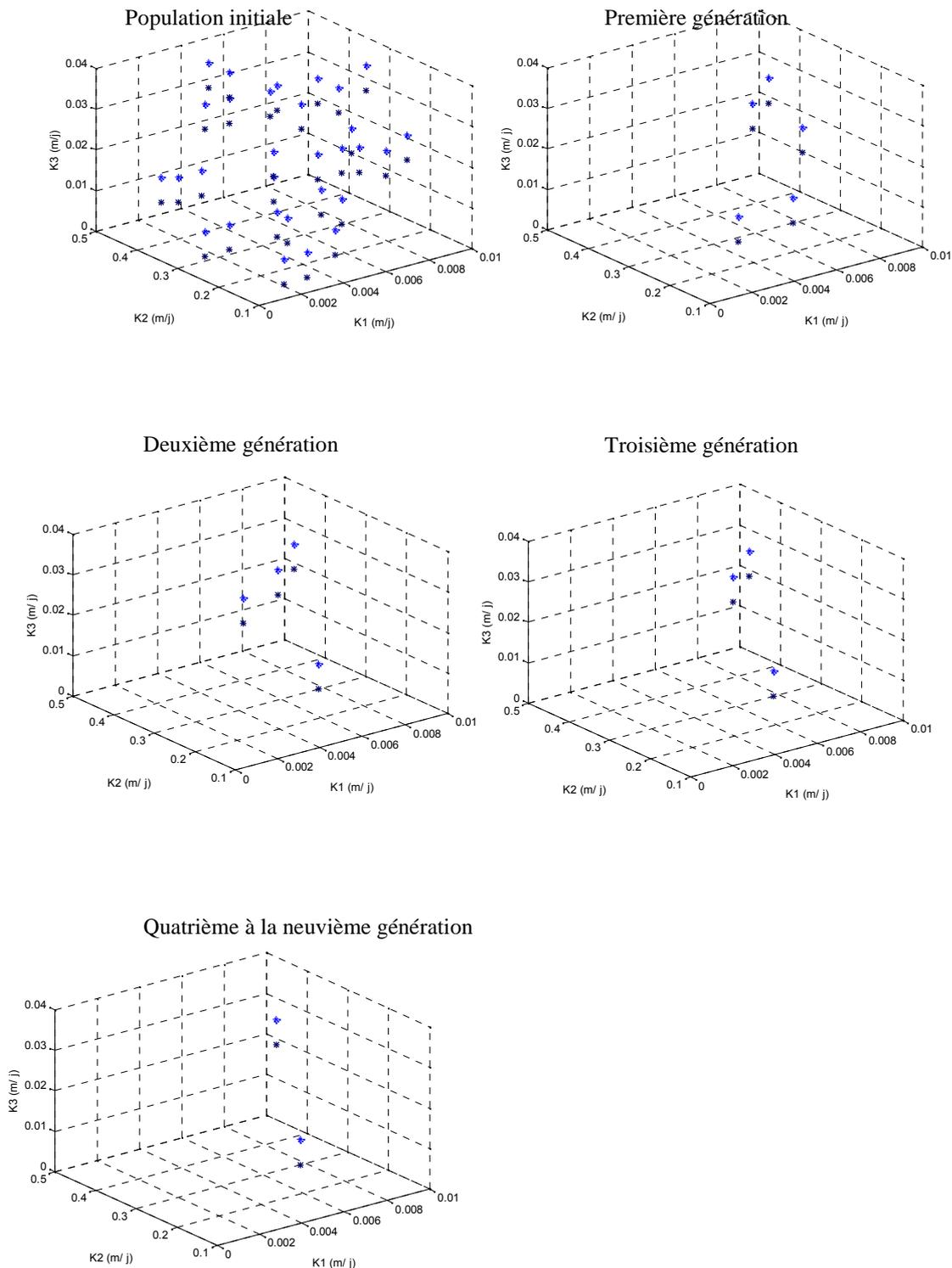


Figure 6. Identification de la perméabilité effective des trois couches de sol K_1 , K_2 et K_3 . Processus d'optimisation par algorithme génétique : évolution des individus parents sur l'espace de recherche à chaque génération.

La figure 7 présente la variation des déplacements horizontaux numériques et expérimentaux de la dernière génération en fonction de la profondeur. Elle montre que les valeurs des déplacements calculées

numériquement se rapprochent aux valeurs mesurées par l'inclinomètre. En effet, l'estimation faite par un seul inclinomètre ne tient pas compte de l'hétérogénéité du sol, ce qui ne traduit pas à coup sûr la réalité du terrain.

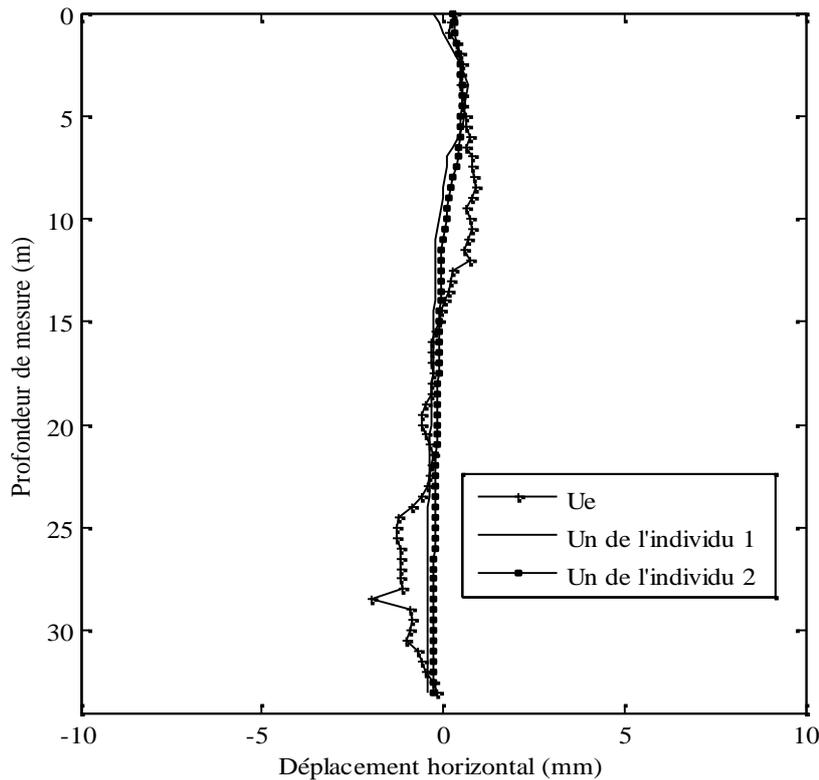


Figure 7. Déplacement horizontal numérique (U_n) de la dernière génération et expérimental (U_e) en fonction de la profondeur.

6. CONCLUSION

La géotechnique, produit des analyses et des prédictions faisant appel à des modèles basés sur un certain nombre de paramètres. La recherche des valeurs numériques de ces paramètres de manière à ce que les modèles rendent compte au mieux de la réalité observée, constitue la démarche d'analyse inverse. Ce travail présente une technique d'estimation de la perméabilité effective des sols non saturés basée sur l'analyse inverse en utilisant l'algorithme génétique. Les résultats de l'application faite sur le cas du site de Ciloc à Constantine avec le choix d'un modèle couplé hydromécanique pour des sols non saturés, montre que cette technique permet de bien identifier la perméabilité des trois couches de sol. La perméabilité estimée est dans l'ordre de grandeur des valeurs données par le système de classification des sols «*Staring*» donné par Plaxflow. Ces résultats basés sur la reproduction des mesures inclinométriques des déplacements horizontaux, montrent la bonne adaptation de cette approche pour le traitement

des problèmes de ce type. Par ailleurs, les résultats trouvés sont encourageant bien que le nombre de combinaisons de paramètres testés ne représente qu'une très faible proportion de l'ensemble des combinaisons de l'espace de recherche, ce qui montre le bon choix des paramètres génétiques. Le problème majeur dans l'utilisation de cette méthode d'identification est le temps de calcul, l'utilisation de plusieurs programmes a augmenté ce problème. Pour réduire le temps de calcul, plusieurs pistes sont envisageables. Ces premiers résultats devraient être complétés par des campagnes de mesures supplémentaires sur le versant.

Si les sites d'étude sont bien instrumentés, cette méthode d'optimisation peut être utilisée en se calant à plusieurs points de mesures simultanément. Il est très intéressant d'utiliser cette méthode en tenant compte des fluctuations des nappes d'eaux, la procédure d'identification des paramètres permet également de mettre en évidence certains couplages entre paramètres.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leurs remerciements au professeur Guenfoud Mohamed directeur du laboratoire LGCH de l'université de Guelma pour la mise à leurs dispositions du logiciel Plaxis. Sans oublier le docteur Lafifi Brahim chercheur au même laboratoire pour les conseils concernant l'utilisation de Plaxflow.

REFERENCES

- [1] Li X.L., 1999. Comportement hydromécanique des sols fins : de l'état saturé à l'état non saturé, Thèse de doctorat en sciences appliquées, Université de Liège, Belgique. 359p.
- [2] Cui Y.J. & Delage P., 2003. Sols non saturés - Applications au calcul des ouvrages, Techniques de l'ingénieur, Traité de construction. 27p.
- [3] Levasseur S., 2007. Analyse inverse en géotechnique: développement d'une méthode de base d'algorithmes génétiques, Thèse de doctorat, Université de Joseph Fourier, Grenoble. 209p.
- [4] Tsai F.T.C., Sun N.Z., & Yeh W.W.G., 2003. Global-local optimization for parameter structure identification in the three-dimensional groundwater modeling, *Water resources research*, Vol. 39(2),
- [5] Morshed J. & Kaluarachchi J.J., 1998. Parameter estimation using artificial neural network and genetic algorithm for free-product migration and recovery. *Water resources research*, Vol. 34 (5), 1101-1113.
- [6] Pintado X., Ledesma A., & Lloret A., 2002. Backanalysis of thermohydraulic bentonite properties from laboratory tests. *Engineering Geology*, Vol. 64, 91-115.
- [7] Hicher P.Y. & Rangeard D., 2004. Interprétation des essais pressiométriques. II. Détermination des caractéristiques hydromécaniques des sols fins saturés par analyse inverse, *Revue française de génie civil*, Vol. 8(7), 819-849.
- [8] Brinkgreve R.B.J., 2003. Plaxis v8 manuel de référence, Delft University of Technology & Paxis bv, Pays-Bas.
- [9] Brinkgreve R.B.J., 2003. Plaxflow v1 scientific manuel, Delft University of Technology & Plaxis bv, The Netherlands.
- [10] Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America journal*, Vol. 44, 892-898.
- [11] Goldberg D.E., 1991. Algorithmes génétiques: exploration, optimisation et apprentissage automatique, Ed. Adisson-Wesley, New York.
- [12] Renders J.M., 1995. Algorithmes génétiques et réseaux de neurones, Hermès, Paris. 336 p.
- [13] Davis L., 1991. Handbook of genetic algorithm, Van Norstand Reinhold, New York, 385p.

[14] Simpson A.R., & Priest S.D., 1993. The application of genetic algorithms to optimisation problems in geotechnics, *Computer and Geotechnics*, Vol. 15, 1-19.

[15] McCombie P., & Wilkinson P., 2002. The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis, *Computer and Geotechnics*, Vol. 29, 699-714.

[16] Zolfaghari A.R., Heath A.C., & McCombie P.F., 2005. Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis, *Computer and Geotechnics*, Vol. 32, 139-152.

[17] Mendjel D., Hamami M., & Messast S., 2009. Identification de surfaces de rupture d'un talus par algorithme génétique, 1^{er} Symposium méditerranéen de géotechnique (SMGE'09), Alger, Algérie, 467-471.

[18] Pal S., Wathugala W., & Kundu S., 1996. Calibration of a constitutive model using genetic algorithms, *Computer and Geotechnics*, Vol. 19 (4), 325-348.

[19] Samarajiva P., Macari E.J., & Wathugala W., 2005. Genetic algorithms for the calibration of constitutive models of soils, *International Journal of Geomechanics*, Vol. 5 (3), 206-217.

[20] Mokhbi H., Hamami M. & Belhanachi T., 2008. Etude paramétrique de la déformation d'un massif en pente par la méthode des éléments finis : application au glissement du Ciloc de Constantine, Proceedings of the International Conference on Numerical Computation in Geotechnical Engineering NUCGE'08, Skikda, Algérie, 216-221.

NOMENCLATURE

- Q débit d'écoulement
 k_x et k_y composantes de la perméabilité effective
 k_{re} perméabilité relative
 K tenseur de perméabilité effective
 K_{sat} tenseur de perméabilité à l'état de saturation
 S degré de saturation
 S_{residu} saturation résiduelle
 S_e degré de saturation effectif
 ϕ gradient hydraulique
 ϕ_p charge de pression
 Y position verticale
 P potentiel de pression
 γ_w poids volumique de l'eau
 g_w, g_n et g_l paramètres empiriques de sols pour le modèle d'écoulement de Van Genuchten
 N nombre de points de mesure
 U_{ni} déplacement horizontal calculé numériquement au point i
 U_{ei} déplacement horizontal mesuré expérimentalement au point i
 F_{er} fonction erreur
 N_p nombre de paramètres à identifier
 N_i nombre d'individus
 p_{min} et p_{max} borne inférieure et supérieure de chaque paramètre de la population.