
Identification des paramètres hydromécaniques d'un sol non saturé par analyse inverse

Djenatte Mendjel* — Salah Messast*

* Département de Génie Civil, Laboratoire LMGHU, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Skikda, Algérie, rech_mendjel@yahoo.com, smessast@yahoo.fr

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

Dans cette communication on s'intéresse à l'identification de la perméabilité effective des sols non saturés. Le comportement du sol sera caractérisé par les déplacements horizontaux qui seront déterminés après un calcul en éléments finis au moyen de code de calcul plaxis, en supposant le sol à comportement hydromécanique. Ces déplacements horizontaux seront comparés aux mesures inclinométriques. Pour minimiser l'écart entre les mesures expérimentales et les résultats numériques une optimisation par algorithme génétique sera utilisée. Cette approche est appliquée pour l'identification de la perméabilité et l'analyse de la stabilité de la cite Ciloc à Constantine – Algérie.

ABSTRACT. The water has an important role in the analysis of slope stability. Hence it is necessary to characterise the soil by considering a coupled hydromechanics behaviour.

The aim of this study is the identification of the permeability of unsaturated soil. The behaviour of the soil will be characterised by horizontal displacements which is computed using Plaxis code based on finite element technique, and assuming a hydromechanical behaviour for the soil. These horizontal displacements will be compared with inclinometric measures. To minimise discrepancy between experimental measures and numerical results an optimisation by genetic algorithm is used. This approach is applied for the identification of permeability and analysis of stability of Ciloc Suburb Constantine – Algeria.

MOTS-CLÉS : Sol non saturé, Algorithme génétique, Plaxis, Ecoulement, Loi de comportement.

KEYWORDS: Unsaturated soil, Genetic algorithm, Plaxis, Flow, Behaviour Law.

1. Introduction

La mécanique des sols et des roches s'est généralement intéressée dans le passé à l'étude de matériaux totalement saturés en eau ou parfaitement secs. Or, en génie civil, en ingénierie de l'environnement ou en ingénierie des réservoirs, on rencontre fréquemment des problèmes qui impliquent des sols ou des roches sous saturation partielle.

Les ruptures dans les pentes et les talus sont souvent liées à des modifications du degré de saturation.

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 et le coefficient de perméabilité dépend de la saturation. D'où la nécessité de bien caractériser les sols en considérant un couplage hydromécanique, (Xiang-Ling LI, 1999).

Ce travail s'intéresse à identifier la perméabilité effective des sols non saturés par analyse inverse. Ce paramètre sera caractérisé par les déplacements horizontaux.

Le logiciel *Plaxflow* est utilisé pour la génération des pressions interstitielles en milieu non saturé et le logiciel *Plaxis* 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. Or, les erreurs de modélisation et les incertitudes de mesures sont importantes en géotechnique. Il n'existe donc 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.

2. Les logiciels utilisés

Le code de calcul par éléments finis *Plaxis* de la société Plaxis B.V. C'est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé en bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériciens de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, ce code est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. S'il est initialement développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, élastoviscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée. Le manuel d'utilisation du code Plaxis présente une description détaillée du logiciel.

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels. La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr - Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc.

Un programme *Plaxis* séparé pour les écoulements non saturés et transitoires, *PlaxFlow* est disponible en tant qu'extension de la version 8.

Bien que les écoulements transitoires ne donnent généralement pas de pressions interstitielles permanentes, les pressions interstitielles obtenues avec ce programme sont traitées comme si elles étaient permanentes dans une analyse en déformations.

Dans ce travail, on propose une modélisation hydromécanique couplée en milieu non saturé, en utilisant le logiciel PlaxFlow pour la génération des pressions interstitielles en milieu non saturé et le logiciel Plaxis pour l'analyse du problème en déformation plane pour le but d'identifier la perméabilité effective de ses sols .

Le modèle analytique de la sorption proposé par (*Van Genuchten, 1980*), 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 , on applique les équations suivantes :

$$q_x = -k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad q_y = -k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad [1]$$

Ces équations montrent que la vitesse d'écoulement q est fonction de la perméabilité effective K (qu'on peut la décomposer en k_x et k_y), et du gradient hydraulique ϕ qui est défini comme suit :

$$\phi = y - \frac{P}{\gamma_w} \quad \phi_p = -\frac{P}{\gamma_w} \quad [2]$$

Où y est la position verticale, P est la pression de fluide dans les vides, et γ_w est le poids volumique de l'eau. ϕ_p est le potentiel de pression des vides.

La perméabilité effective K est liée à la saturation comme suite :

$$K = k_{rel}(S) K_{sat} \quad [3]$$

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

$$S(\phi_p) = S_{residu} + (S_{sat} - S_{residu}) \left(1 + \left(g_a |\phi_p| \right)^{g_n} \right)^{\frac{1-g_n}{g_n}} \quad [4]$$

En général la condition de saturation des vides n'est pas complètement remplie par l'eau, l'air peut être piégé et la saturation devienne inférieure à un. Van Genuchten adopte une saturation résiduelle S_{residu} qui décrit à part le fluide dans les vides. Les paramètres g_a , g_n et g_i sont mesurés pour chaque matériau. La perméabilité relative est liée à la saturation effective :

$$S_e = \frac{S - S_{residu}}{S_{sat} - S_{residu}} \quad [5]$$

La perméabilité relative selon Van Genuchten (d'après le logiciel Plaxflow) est maintenant écrite comme suit :

$$k_{rel}(S) = (S_e)^{g_i} \left[1 - \left(1 - S_e \left(\frac{g_n}{g_n - 1} \right)^{\frac{g_n - 1}{g_n}} \right)^2 \right] \quad [6]$$

3. Optimisation par algorithme génétique

3.1. Définition de la fonction erreur

L'écart entre une courbe calculée numériquement (décrite par N points Uni) et une courbe de référence mesurée in situ (décrite par N points Uei) est évalué par la fonction d'écart type suivante notée $Ferr$:

$$Ferr = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Uei - Uni)^2 \right]^{1/2} \quad [7]$$

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 (Renders 1995) et (Goldberg 1991). L'algorithme d'optimisation utilisé pour la présente étude s'inspire de cette méthode. Ses principales étapes sont résumées par l'organigramme illustré la figure 1

On définit :

- *Espace de recherche.* Soit Np le nombre de paramètres à identifier pour le problème posé. La minimisation de la fonction erreur est effectuée dans un espace de recherche à Np dimension, borné par des valeurs $pmin$ et $pmax$ 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 Ni individus constitue une population.

- *Génération d'une population initiale.* Un ensemble de Ni individus est choisi aléatoirement sur l'espace de recherche. Le coût $Ferr$ 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 $Ni/3$ meilleurs individus d'une population (individus présentant le moindre coût $Ferr$) sont conservés pour la génération suivante. Ils constituent les individus parents.

- *Croisement et mutation.* Ces mécanismes sont appliqués aux individus parents 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 $2Ni/3$ nouveaux individus (Tableau 1). La mutation

fabrique des erreurs de recopie, pour diversifier les individus de la nouvelle population (inversion d'un bit d'un gène) (Tableau 2). Ces deux phases créent de nouveaux individus qui ont des chances d'être meilleurs. D'après (Davis, 1991), 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.

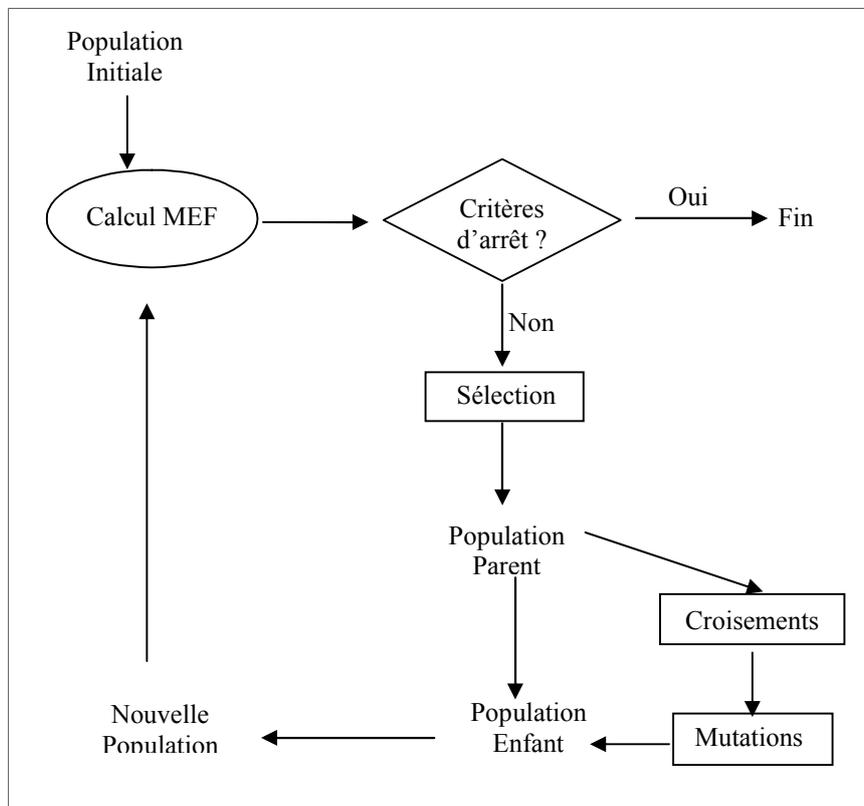


Figure 1. Principe d'optimisation par Algorithme génétique

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

Individu avant mutation	
Individu :	110000110 0 1110100111
Bit sélectionné:	
Individu après mutation	
Individu muté:	110000110 1 1110100111

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

(Simpson *et al.*, 1993) 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.*, 2002) utilisent quant à eux un algorithme génétique pour résoudre des problèmes de stabilité de pentes.

(Zolfaghari *et al.*, 2005) 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.*, 2009) utilisent un algorithme génétique pour l'identification de surfaces de rupture circulaire par la méthode des tranches.

(Pal *et al.*, 1996) tout comme (Samarajiva *et al.*, 2005) appliquent les algorithmes génétiques au calage de paramètres de modèles de comportement sur des essais de laboratoire.

(Levasseur, 2007) a montré l'efficacité de cette méthode d'optimisation pour identifier des paramètres mécaniques en se basant sur des mesures in situ.

4. Exemple d'application

L'étude présentée dans ce travail consiste à l'application de la technique sur site concernant l'estimation de la perméabilité effective des sols rencontrés dans un site bien connu est instrumenté par des inclinomètres pour la mesure des déplacements horizontaux. Ce site est la cité Ciloc à Constantine, Algérie.

La cité Ciloc à Constantine 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 présentes sur une épaisseur de 8m, auxquels succèdent des sables et graviers, probablement fortement imprégnés d'eau, qui reposent eux-mêmes sur des marnes.

Les données du Ciloc sont d'après (Mokhbi *et al.*, 2008). La géométrie du Ciloc est présentée par la figure 2, elle a une largeur de 272m, et une hauteur minimale de 23m et maximale de 49m. Le tableau 3 récapitule les caractéristiques physico-mécaniques de chaque couche, ces caractéristiques correspondent au modèle élasto-plastique avec écrouissage (HSM), choisis pour un calcul dans plaxis. En considérant les couches de sols non saturés avec un comportement hydromécanique.

Les positions S2, S3 et S9 représentent l'emplacement des sondages inclinométriques. Dans ce travail on s'intéresse des déplacements horizontaux donnés par l'inclinomètre S9.

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, en tenant compte des résultats fournis par le logiciel plaxflow.

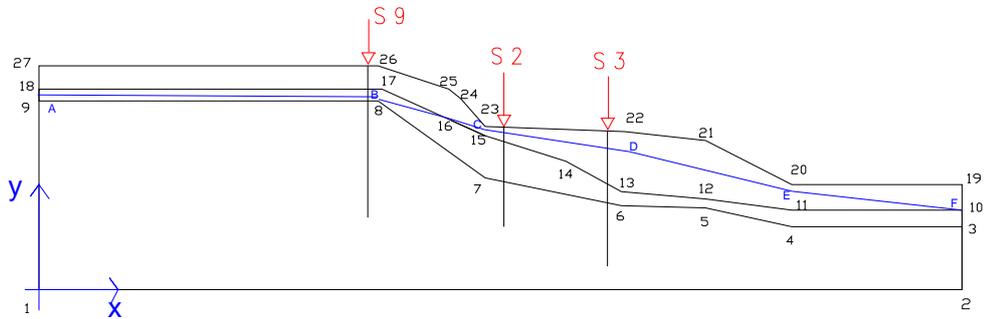


Figure 2. La coupe géométrique du modèle

Couche N°	γ_d kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	C' kN/m ²	φ' (°)	ψ (°)	E_{50}^{ref} kN/m ²	E_{oed}^{ref} kN/m ²	E_{ur}^{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

Tableau 3. Caractéristiques physico-mécaniques des sols

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

- Conditions aux limites mécaniques pour celles se basant les équations d'équilibre mécanique ;
- Conditions aux limites hydrauliques pour celles se basant 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 a 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.

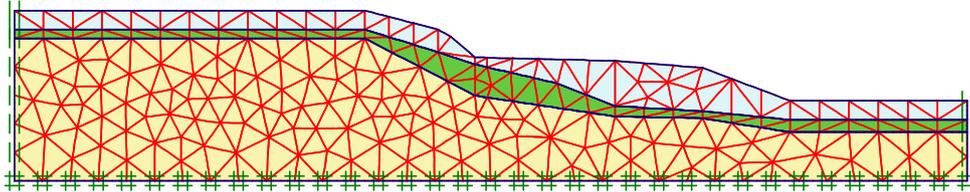


Figure 3. Maillage et conditions aux limites cinématiques par éléments finis.

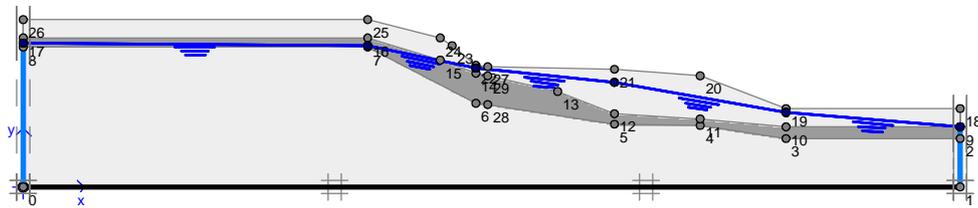


Figure 4. Conditions aux limites hydrauliques.

Pour identifier la perméabilité effective à l'état saturé (K) du sol en se basant sur les mesures inclinométriques. La formulation du principe d'optimisation schématisé par la figure 1 est écrite en langage Matlab. On choisit une génération initiale de 3 paramètres (K_1 , K_2 , K_3 , les indices 1,2 et 3 correspondent aux couches du sol), et de 30 individus. Puis on passe à un calcul par éléments finis dans Plaxis, la génération des pressions interstitielles se fait par le module Plaxflow pour prendre en considération la non saturation du sol. 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 on applique les trois mécanismes d'optimisation par algorithme génétique (sélection, croisement et mutation) pour former une nouvelle génération, ensuite on répète les mêmes étapes que la génération précédente jusqu'à ce que F_{err} soit minimale.

5. Résultats

Partant d'une population initiale de petite taille uniformément répartie sur l'espace de recherche, les individus évoluent dès la première génération du processus d'optimisation vers une zone de l'espace où $Ferr$ 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 $Ferr$ et d'un ordre de grandeur raisonnable pour les types de sol des trois couches (comparant à la perméabilité effective donnée par le système de classification internationale des sols USDA donné par Plaxflow).

Chaque individu représente la perméabilité effective (K) d'unité (m/jour)

Individu 1 : **individu 2 :**

Couche 1 : argiles de : $K_1=7.75*10^{-3}$ m/j ; $K_1=6.63*10^{-3}$ m/j

Couche 2 : sable graveleux de : $K_2=0.3$ m/j ; $K_2=0.3$ m/j

Couche 3 : marnes de : $K_3=6.34*10^{-3}$ m/j ; $K_3=3.75*10^{-2}$ m/j

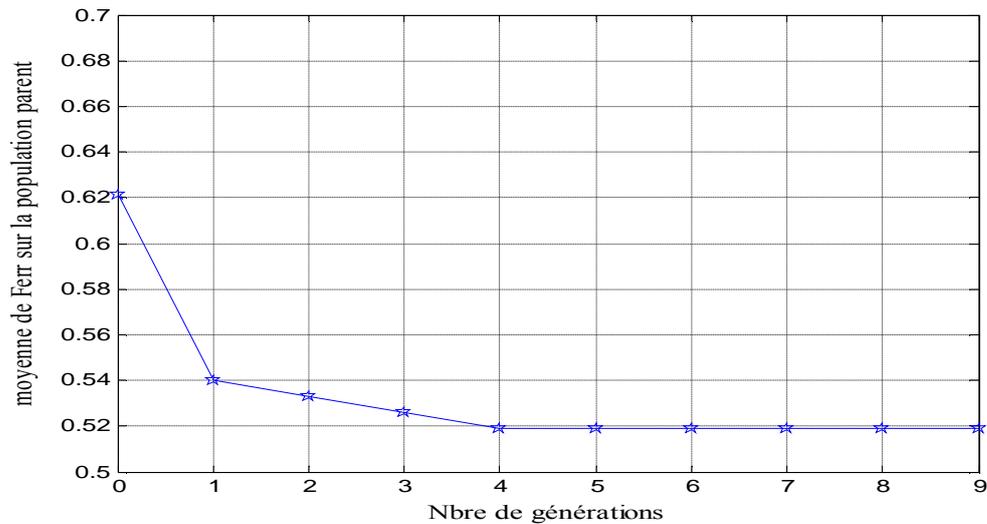


Figure 5. Evolution de la moyenne de $Ferr$ sur la population parent en fonction des générations.

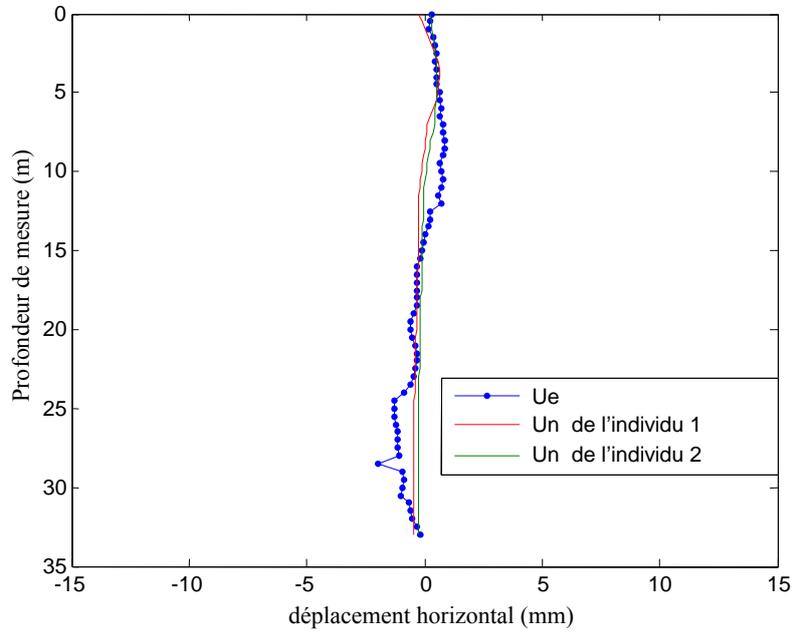


Figure 6. Déplacement horizontal numérique (U_n) de la dernière génération et expérimental (U_e) en fonction de la profondeur.

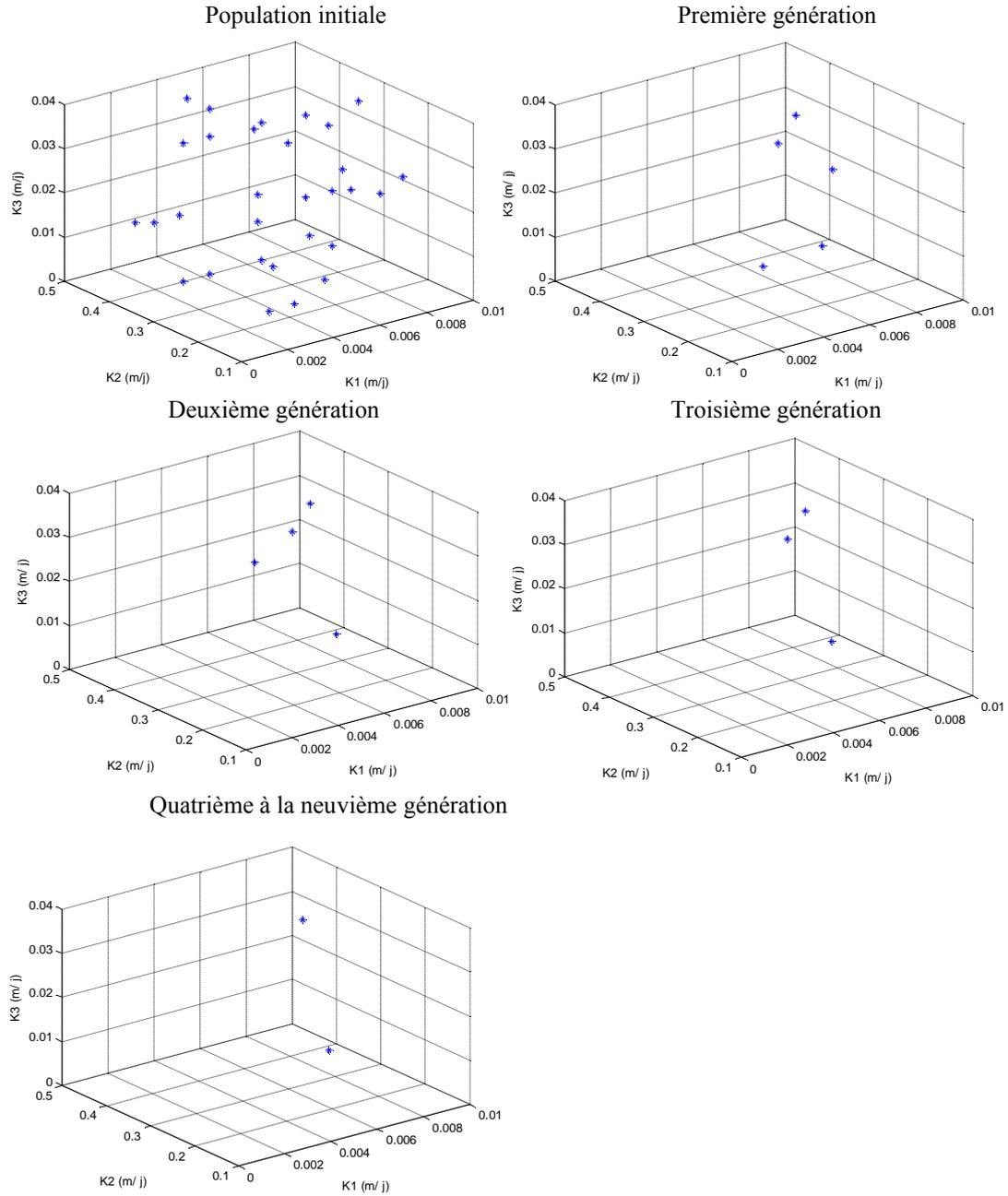


Figure 7. Identification de la perméabilité effective des trois couches de sol K_1 , K_2 et K_3 . Processus d'optimisation par algorithme génétique : évolution des individus parents sur l'espace de recherche à chaque génération.

6. Conclusion

La géotechnique, et plus généralement la physique, produisent 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.

Cette communication 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 effective des trois couches de sol. La perméabilité estimée est dans l'ordre de grandeur des valeurs données par le système de classification internationale des sols USDA 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.

7. Remerciement

Les auteurs expriment leurs remerciements au professeur Guenfoud Mohamed directeur du laboratoire LGCH de l'université de Guelma pour leur mise en disposition le logiciel Plaxis. Sans oublier le docteur Lafifi Brahim chercheur au même laboratoire pour ces conseils concernant l'utilisation de plaxflow.

8. Bibliographie

- Brinkgreve R.B.J., Plaxis v8 manuel de référence, *Delft University of Technology & PLAXIS bv, Pays-Bas*, 2003.
- Brinkgreve R.B.J., Plaxflow v1 scientific manuel , Delft University of Technology & PLAXIS bv, The Netherlands, 2003.
- Davis L., *Handbook of genetic algorithm*, Van Norstand Reinhold, New York, 1991.
- Goldberg D.E., *Algorithmes génétiques: exploration, optimisation et apprentissage automatique*, Ed. Adisson-Wesley, 1991.
- Levasseur S., Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode de base d'algorithmes génétiques, Thèse de doctorat, Université de Joseph Fourier, 2007.
- McCombie P., Wilkinson P., « The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis », *Computer and Geotechnics*, vol. 29, 2002, p. 699-714.

- Mendjel D., Hamami M., Messast S., « Identification de surfaces de rupture d'un talus par algorithme génétique », *1^{er} Symposium méditerranéen de géotechnique (SMGE'09)*, Alger, 20-21 juin 2009, p. 467-471.
- Mokhbi H., Hamami M. et Belhanachi T., « 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, 27-29 octobre 2008, p. 216-221.
- Pal S., Wathugala W., Kundu S., « Calibration of a constitutive model using genetic algorithms », *Computer and Geotechnics*, vol. 19, n° 4, 1996, p. 325-348.
- Renders J.M., *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones*, Hermès, 1995.
- Samarajiva P., Macari E.J., Wathugala W., « Genetic algorithms for the calibration of constitutive models of soils », *International Journal of Geomechanics*, vol. 5, n° 3, 2005, p. 206-217.
- Simpson A.R., Priest S.D., « The application of genetic algorithms to optimisation problems in geotechnics », *Computer and Geotechnics*, vol. 15, 1993, p. 1-19.
- Van Genuchten M.T., « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils », *J. of Soil Sci. Soc. Am.*, vol. 44., 1980, p. 892-898.
- Xiang-Ling LI, Comportement hydromécanique des sols fins : de l'état saturé à l'état non saturé, Thèse de doctorat, Université de Liège, 1999.
- Zolfaghari A.R., Heath A.C., McCombie P.F., « Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis », *Computer and Geotechnics*, vol. 32, 2005, p. 139-152.