

Identification of the mechanical parameters of the formation of *la vallée de la Seine* by genetic algorithm

Identification des paramètres mécaniques de la formation de la vallée de la Seine par algorithme génétique

JASSIONNESSE, Christophe GEOS INGENIEURS CONSEILS, Archamps, France

MELKHALFIA, Billel, GEOS INGENIEURS CONSEILS, Archamps, France

CAHN, Martin, GEOS INGENIEURS CONSEILS, Archamps, France

ABSTRACT: The development of finite element modeling has allowed geotechnical engineers to size complex structures considering advanced behavioral laws. The practitioner is therefore led to estimate the representative parameters of the soil by performing dedicated tests. This practice is limited by the difficulty in obtaining all the representative parameters of the different soil layers.

This study is part of the work of the future line 15 South Grand Paris Express whose geological and hydrogeological context is characterized by the outcropping of the “Campanian Chalk” under low alluvial cover. The difficulty of carrying out laboratory tests on the materials of this formation penalizes the identification of all its mechanical parameters, hence the interest of exploiting the gross soil response provided by in-situ tests (mainly pressure meter tests).

This paper presents inverse modeling of pressure meter tests carried out using finite element software allowing the determination of the constitutive parameters of the Hardening Soil Model (HSM) for the chalk. This study is based on a genetic algorithm optimization process.

RÉSUMÉ : L’essor de la modélisation par éléments finis a permis aux ingénieurs géotechniciens de dimensionner des ouvrages complexes et en tenant compte de lois de comportements avancées. Le praticien est donc amené à estimer les paramètres représentatifs du sol en réalisant des essais dédiés. Cette pratique est limitée par la difficulté à obtenir l’ensemble des paramètres représentatifs des différentes couches de sol.

Cette étude s’inscrit dans le cadre des travaux de la future ligne 15 sud du Grand Paris Express dont le contexte géologique et hydrogéologique est caractérisé par l’affleurement de la Craie Campanienne sous faible couverture alluvionnaire. La difficulté d’exécuter des essais en laboratoire sur les matériaux de cette formation pénalise l’identification de l’ensemble de ses paramètres mécaniques, d’où l’intérêt d’exploiter la réponse brute du sol fournie par des essais in-situ (principalement les essais pressiométriques).

Cette communication présente les modélisations inverses d’essais pressiométriques menées à l’aide d’un logiciel aux éléments finis permettant la détermination des paramètres constitutifs de la loi de comportement HSM (Hardening Soil Model) de la craie. Cette étude est basée sur un processus d’optimisation par algorithme génétique.

Keywords: Craie campanienne, essai pressiométrique, HSM, optimisation, algorithme génétique.

1 INTRODUCTION

Comme tout ouvrage souterrain, la conception du projet de la ligne 15 sud- lot T3a- (tunnel monotube de 4,2 km) a débuté par des investigations géologiques, géotechniques, et hydrogéologiques afin d'identifier l'environnement souterrain. Ces investigations ont conduit à concevoir un ouvrage souterrain s'inscrivant majoritairement dans une formation ayant un comportement géomécanique très complexe. Il s'agit de la Craie Campanienne de la vallée de Seine.

La craie est une roche sédimentaire, constituée essentiellement de CaCO_3 à partir de micro-fossiles. Sa complexité réside à la fois dans sa porosité inter et intra-granulaire (oolithes micro-fossiles) qui se traduit par une thixotropie sous sollicitations mécaniques et en présence d'eau mais également dans ses faciès d'altérations. Le remaniement de la craie lors de la réalisation de forages carottés rend très délicat la réalisation des essais en laboratoire permettant d'identifier le comportement mécanique de cette dernière, notamment dans les franges altérées. Toutefois, l'analyse des essais in-situ de type pressiométrique a permis, en accord avec la littérature, d'identifier trois faciès d'altération notés Ca1, Ca2 et Cs (grade CIRIA Dm, Dc, C).

Le module d'élasticité E de ces formations a été calculé à partir du module pressiométrique E_m par la formule suivante : $E = k \cdot E_m / \alpha$, ou α est défini par Ménard comme étant le coefficient rhéologique ayant une valeur comprise entre 0 et 1. k est supposé égale à 2. En revanche, les paramètres de résistance des différents faciès d'altération ont été extrapolés à partir de quelques essais triaxiaux réalisés dans la frange saine.

Une autre tentative d'estimer le module d'élasticité E de cette formation a été faite en se basant, sur des essais in-situ de chargement à la plaque. Les résultats de cette étude seront examinés dans ce présent article.

Par ailleurs, les différentes interfaces du projet avec les existants et la complexité en elle-même des ouvrages étudiés nécessitent l'utilisation

d'une loi de comportement avancée. En l'occurrence, le modèle HSM (Hardenig Soil Model) a été choisi pour le dimensionnement des ouvrages du projet et pour l'estimation des mouvements de terrain autour de ces ouvrages.

Dans cet article, nous allons tenter de définir des paramètres constitutifs de la loi HSM par une méthode qui diffère des approches empiriques classiques. Il s'agit d'une analyse en inverse des essais in situ en utilisant un processus d'optimisation par algorithme génétique.

2 METHODOLOGIE

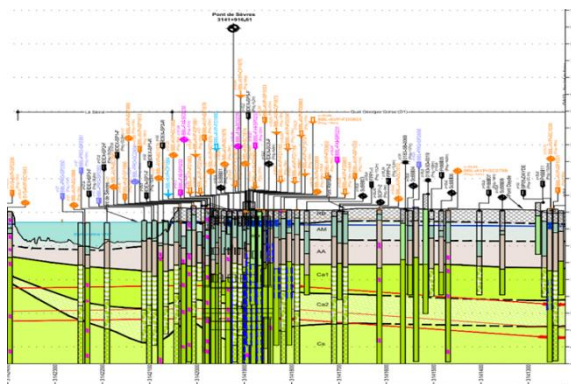


Figure 1. Coupe géologique de la zone d'étude

La démarche mise en place pour cette étude a débuté par la localisation de la zone d'étude. Seuls les essais pressiométriques réalisés sur la rive droite de la Seine, sur la commune de Boulogne, ont été exploités. De manière à comparer les résultats d'une précédente analyse en inverse d'un essai à la plaque effectué dans le puits d'essai de Boulogne (Jassionnesse et al. 2017) avec ceux des essais pressiométriques, présentés dans le présent article, seul le faciès altéré Ca1 a été ciblé dans cette étude. L'étendue de la zone d'étude et la stratification des couches géologiques sont données dans la **Figure 1**.

2.1 Construction de la courbe de référence

L'exploitation de la base de données des essais pressiométriques dans la zone d'étude a conduit à définir un fuseau des courbes pressiométriques, (Voir **Figure 2**) dans lequel une courbe moyenne a été définie pour représenter l'ensemble de la phase de relâchement des contraintes qui conduit à des valeurs de contrainte radiale σ_r faibles et donc à une mise en plasticité locale avec la contrainte verticale σ_z comme contrainte principale majeure. Le remaniement qui en résulte autour du forage, va influencer de façon importante sur le début de la courbe de rechargement (CAMBOU & BAHAR, 1993).

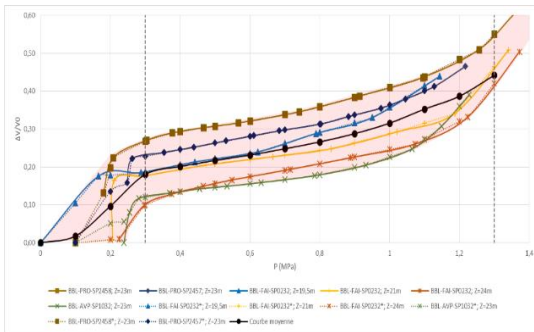


Figure 2. Enveloppe des essais pressiométriques réalisés dans le faciès Ca1

De manière à simplifier le calage de la simulation numérique de l'essai, nous avons opter pour l'élimination de la partie initiale de la courbe pressiométrique en acceptant la représentation finale de la courbe de référence, comme montré sur la **Figure 10**.

2.2 Hypothèses et modélisation

La simulation numérique retenue pour la modélisation de l'essai pressiométrique permet de prendre en compte les conditions réelles dans lesquelles l'essai in-situ a été réalisé. Toutefois, la mauvaise traduction de ces conditions conduit à des résultats inconsistants. On identifie deux types d'obstacles rencontrés dans cette étude, à savoir des obstacles pratiques et des obstacles méthodologiques :

En premier lieu, les principaux obstacles pratiques sont liés à la qualité des informations sur l'essai. Le manque de données fiables sur les caractéristiques géométriques de la sonde, sur la résistance propre de la membrane, sur la valeur exacte de la pression régnant dans les cellules de garde et sur volume initial de la sonde conduit à faire des hypothèses conséquentes. Étant donné que l'ensemble de ces éléments est indispensable pour la modélisation, il est alors nécessaire de se référer à des textes normatifs et à la pratique courante pour compléter certaines des données d'entrée. L'ensemble de ces données d'entrée est donné dans le **Tableau 1**.

Le principal obstacle méthodologique est lié directement à la nature complexe de la craie. En fait, l'impossibilité de réaliser des essais au laboratoire conduit à exploiter les seuls essais in-situ à disposition afin d'identifier numériquement l'ensemble des paramètres constitutifs de la loi de comportement, rendant la tâche fastidieuse. Une autre option serait de fixer arbitrairement quelques paramètres au préalable afin de diminuer l'ensemble de paramètres à identifier. Ceci nécessite une étude paramétrique de sensibilité. En l'occurrence, il convient de trouver une démarche adéquate avant de procéder l'identification des paramètres de comportement de la craie. L'ensemble de ces étapes est évoqué dans le paragraphe 3.

L'essai pressiométrique est modélisé à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis Plaxis 2D® (voir **Figure 3**). L'étude est menée sur un modèle axisymétrique en contraintes effectives et pour des paramètres de sol drainés. La loi de comportement HSM est choisie pour toutes les couches du modèle avec une indépendance de la raideur en fonction de la profondeur ($m=0$). La pression hydraulique régnant dans la cellule centrale est appliquée après l'étape d'initiation des contraintes et creusement du forage. Les déplacements résultant de cette phase de calcul sont alors remis à 0. La pression de gaz régnant dans les cellules de gardes est appliquée par paliers.

L'expansion de la sonde pressiométrique est calculée à chaque étape de pression. Numériquement, la variation globale de la sonde est calculée à partir des déplacements radiaux des nœuds à la surface de la cellule centrale en se basant sur l'étude menée par AL-HUSSEIN (2001).

2.3 Méthode inverse et Optimisation par algorithme génétique

Plusieurs auteurs ont montré l'efficacité des algorithmes génétiques à résoudre des problèmes d'optimisation dans différents domaines y compris le domaine de la géotechnique. LEVASSEUR (2007) a mis en application ce type d'algorithme sur des cas réels tel que l'essai pressiométrique réalisé dans les années 90 par Mokrani dans une chambre de calibrage, le rideau de palplanches expérimental réalisé par l'université de Karlsruhe sur le site de Hochstetten et l'excavation pour la réalisation du centre de recherche médicale de l'université de Northwestern à Chicago.

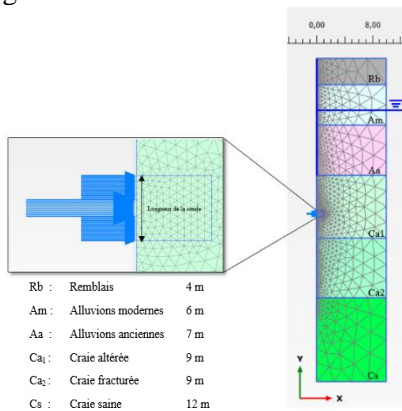


Figure 3. Maillage du modèle numérique axisymétrique

FAWAZ & MALECOT (2005) ont combinés la modélisation par éléments finis et les méthodes inverses pour interpréter les essais pressiométriques et déterminer les paramètres caractéristiques des sols. La méthode qui a été utilisée est celle dite « du gradient ». Elle consiste à générer un nombre important de modélisations pour représenter la fonction d'erreur. Cette dernière ne permet le calage des courbes que pour un seul

couple de variables (le module et l'angle de frottement dans les deux articles cités).

CAMBOU & BAHAR (1993) ont développé le logiciel PRESSIDENT qui est basé sur une technique d'optimisation afin d'identifier deux des paramètres (K_e et C ou ϕ) constitutifs du modèle de comportement DUNCAN-CHANG. Ce logiciel ne peut identifier qu'un couple de paramètre en disposant obligatoirement de plusieurs essais pressiométriques et en faisant l'hypothèse d'un matériau frottant ou cohérent. Dans le cas d'un sol à la fois frottant et cohérent, il n'est alors pas possible d'aboutir à l'identification des paramètres à partir d'un seul essai réalisé à une profondeur donnée. Par ailleurs, la craie ayant un comportement de sol induré ou de roche tendre, les méthodes citées précédemment ne sont pas a priori adaptées pour déterminer ses paramètres de résistance.

L'approche proposée par Biarez, (1998), bien que scientifiquement moins satisfaisante, a néanmoins l'avantage d'être plus directe et de pouvoir plus facilement être mise en œuvre.

Tableau 1. Caractéristiques de la sonde pressiométrique

Cellule pressiométrique	
Diamètre	$\Phi = 44 \text{ mm}$
Longueur totale	$L_{\text{tot}} = 84 \text{ cm}$
Longueur de la cellule centrale	$L_c = 21 \text{ cm}$
Longueur de la cellule de garde	$L_g = 31.5 \text{ cm}$
Diamètre du forage	$\Phi = 6.6 \text{ cm}$
Volume initiale de la sonde*	$V_0 = 718 \text{ cm}^3$
Résistance de la membrane*	$P_m = 360 \text{ Kpa}$

* valeurs conventionnelles

Les paramètres des modèles éléments finis y sont déterminés de manière à approcher au mieux les mesures : le module est fixé de manière que les valeurs des courbes expérimentales et numériques s'ajustent correctement à l'origine tandis que les paramètres de cisaillement sont calés dans

le domaine des plus grandes déformations. Le dispositif expérimental utilisé permet de s'affranchir du déconfinement et du remaniement du terrain lors du forage : déterminer le module d'Young à partir de la courbe à l'origine semble alors adapté.

L'analyse avantages-inconvénients des démarches antérieures nous a conduit à adopter une démarche d'identification par algorithme génétique, pour cinq paramètres HSM, E_{50}^{ref} , c' , φ' , Ψ et K_0 , attribuée à la craie fracturée Ca2 à une profondeur voisine de 20 m. Les autres paramètres constitutifs de la loi HSM font l'objet d'une étude paramétrique.

La construction de l'algorithme génétique est basée essentiellement sur la définition de E. GOLDBERG (1995) comme étant un exemple de procédure d'exploration-exploitation qui utilise un choix aléatoire comme outil pour guider une exploration efficace dans l'espace des paramètres codés. Son mécanisme est rappelé dans la **Figure 4**. Le choix de la valeur des différents opérateurs génétiques est basé sur les recommandations de LEVASSEUR (2007). Les formules 1, 2, rappellent ces valeurs.

Chaque paramètre, définissant un individu (Ex: Ind $i = f(c', \varphi', K_0)$) est codé en système binaire, en fonction de sa position dans l'intervalle de recherche. La taille N_{bit} de la chaîne de bit constituant un individu est choisie tel que :

$$N_{bit} = \sum_{i=a}^{N_{param\grave{e}tre}} N_{bit/param\grave{e}tre}(P_j) \quad (1)$$

La taille $N_{bit/param\grave{e}tre}$ est choisie en fonction de l'incertitude acceptée sur l'évaluation des paramètres :

$$\Delta P_j = \frac{P_{max_j} - P_{min_j}}{2^{N_{bit/param\grave{e}tre}(P_j)}} \quad (2)$$

La fonction d'erreur « de fitness » jugée la plus adaptée à notre cas d'étude est de type moindre carrée en supposant que la somme des erreurs tend à suivre une loi normale :

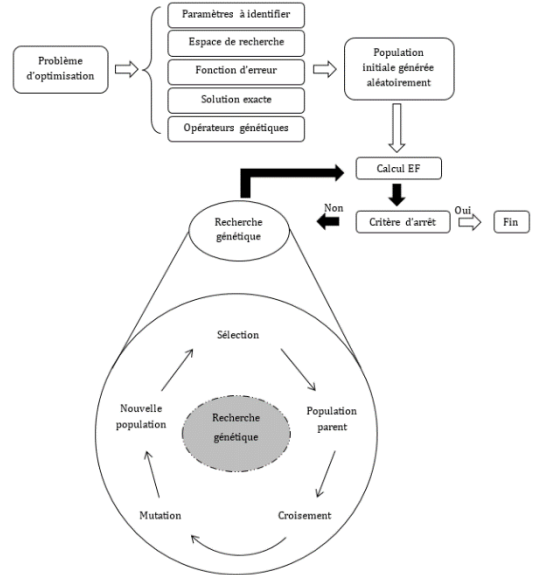


Figure 4. Processus d'optimisation par AG

$$F_{err} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(U_{e_i} - U_{n_i})^2}{\Delta U_i^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Où N est le nombre de points de mesure et ΔU_i est le poids attribué à l'écart entre les données expérimentales U_{e_i} et les résultats numériques U_{n_i} .

Une fois la population initiale générée aléatoirement dans l'espace de recherche, une sélection est effectuée sur les individus présentant une fonction d'erreur minimale ($F_{err} < 5\%$). Quant au taux de croisement P_c et le taux de mutation P_m , ils ont été choisis tel que $P_c = 60\%$ et $P_m = 2^{N_{param\grave{e}tre}} / N_{individus}$.

3 IDENTIFICATION DES TROIS PARAMETRES : E_{50}^{ref} , C' , Φ'

Les simulations de courbes $P(\Delta V/V)$, telle que celle présentée dans la **Figure 10**, sont réalisées

sur un espace de recherche pour chaque paramètre à identifier. L'espace de recherche (intervalle, pas) choisi, est le suivant :

$$20 \text{ MPa} < E_{50}^{ref} < 150 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$10 \text{ KPa} < c' < 65 \text{ KPa} \quad (5)$$

$$20^\circ < \varphi' < 45^\circ \quad (6)$$

$$\Delta E_{50}^{ref} = 2 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\Delta C = 1 \text{ KPa} \quad (8)$$

$$\Delta \varphi = 1^\circ \quad (9)$$

Les valeurs des autres paramètres constitutifs de la loi HSM sont fixés, tels que le module œdométrique E_{oed}^{ref} soit égal au module sécant de chargement E_{50}^{ref} , le module de déchargement E_{ur}^{ref} soit lié au module sécant de chargement E_{50}^{ref} par un rapport de 2.5, avec la puissance m valant 0, l'angle de dilatance Ψ valant 0 et le coefficient des terres au repos K_0 vérifiant la formule de Jaky ($K_0 = 1 - \sin \varphi'$) pour un sol normalement consolidé.

La **Figure 5** montre l'évolution de la fonction erreur moyenne en fonction des générations du processus d'optimisation.

La **Figure 6** présente également l'évolution génétique de la population initiale générée à la base de 300 individus.

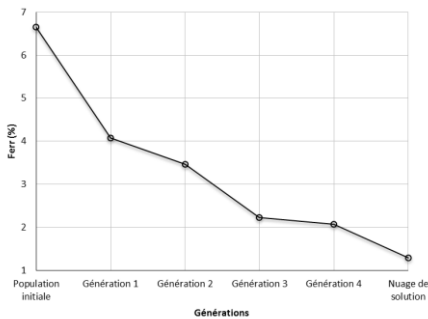


Figure 5: Evolution de la moyenne de la fonction erreur en fonction de chaque génération.

Après 508 simulations, on constate qu'à partir d'une population initiale uniformément répartie sur l'espace de recherche, les individus convergent vers une zone de l'espace de recherche où

F_{err} est faible. Le nuage des points retenus à la fin de l'optimisation génétique comporte une combinaison optimale des paramètres :

$$E_{50}^{ref} = 48 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$c' = 31 \text{ KPa} \quad (11)$$

$$\varphi = 43^\circ \quad (12)$$

Avec une répartition statistique des paramètres :

$$E_{50}^{ref} = 54 \text{ MPa} \pm 8 \text{ MPa} \quad (13)$$

$$c' = 34 \text{ KPa} \pm 12 \text{ KPa} \quad (14)$$

$$\varphi' = 34^\circ \pm 6^\circ \quad (15)$$

Le **Figure 8** montre une topographie de tous les individus en fonction de la fonction erreur F_{err} . Les zones rouges indiquent une valeur de F_{err} minimale. La **figure 8 (a)** représente l'angle de frottement φ' en fonction du module sécant de chargement E_{50}^{ref} , $\varphi' = f(E_{50}^{ref})$. Sur cette figure, la fonction erreur est caractérisée par une topographie ayant une orientation parallèle à l'axe des coordonnées au-dessus de la valeur $\varphi' = 25^\circ$. Cela signifie que le module d'élasticité a une influence prépondérante sur l'erreur, comparée à celles des paramètres de résistance. L'orientation diagonale en dessous de $\varphi' < 25^\circ$ signifie que les influences des paramètres se compensent entre elles mais sur une petite gamme de variation. Sur la **Figure 8 (b)**, $c' = f(E_{50}^{ref})$, la topographie est moins lisible à cause de l'influence de la valeur cachée de l'angle de frottement φ' de chaque individu, néanmoins une gamme de valeur de E_{50}^{ref} pertinentes est identifiable. Cela signifie que l'influence de la cohésion c' est moins importante que celle de l'angle de frottement φ' , l'influence du module E_{50}^{ref} restant primordiale. Sur la **Figure 8 (c)**, $\varphi' = f(c')$, la topographie apparaît chaotique à cause de l'influence significative de la valeur cachée de E_{50}^{ref} qui est dispersée sur tout l'espace de recherche.

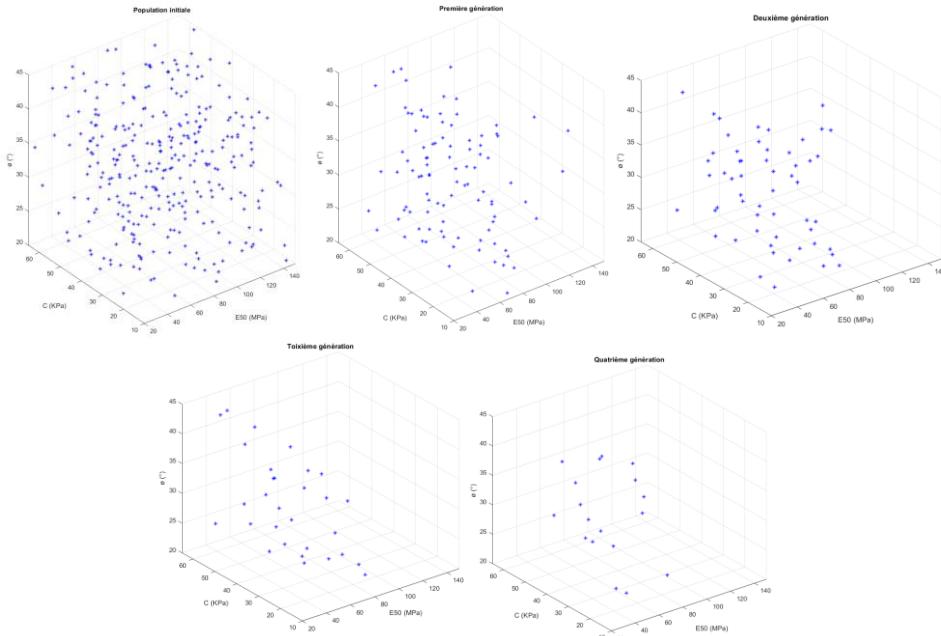


Figure 6. Évolution de la population initiale pendant le processus génétique-OPI

4 IDENTIFICATION DES TROIS PARAMETRES : Φ' , Ψ ET K_0

Dans cette optimisation, nous allons tenter d'identifier l'angle de frottement φ' , la dilataance Ψ et le coefficient des terres au repos K_0 en fixant le module sécant de chargement E_{50}^{ref} et la cohésion c' aux valeurs d'optimum mathématique soit respectivement 48 MPa et 31 KPa. Pour ce faire, l'espace de recherche de ces trois paramètres est fixé comme ci-contre :

Les autres paramètres constitutifs du modèle HSM sont fixés à l'identique de la première optimisation.

La **Figure 7** montre l'évolution de la fonction erreur moyenne en fonction des générations du processus d'optimisation.

La **Figure 9** présente l'évolution dans l'espace de recherche de la population initiale générée à la base de 150 individus.

Après 278 simulations, les individus convergent vers une zone de l'espace de recherche où F_{err} est faible. Le nuage des points retenus à la fin de l'optimisation génétique comporte une

$$20^\circ < \varphi < 50^\circ \quad (16)$$

$$0^\circ < \Psi < 40^\circ \quad (17)$$

$$0,3 < K_0 < 1 \quad (18)$$

$$\Delta\varphi = 1 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$\Delta\Psi = 1 \text{ KPa} \quad (20)$$

$$\Delta K_0 = 0,01 \quad (21)$$

combinaison optimale des paramètres :

$$\varphi' = 32^\circ \quad (22)$$

$$\Psi = 13^\circ \quad (23)$$

$$K_0 = 0,38 \quad (24)$$

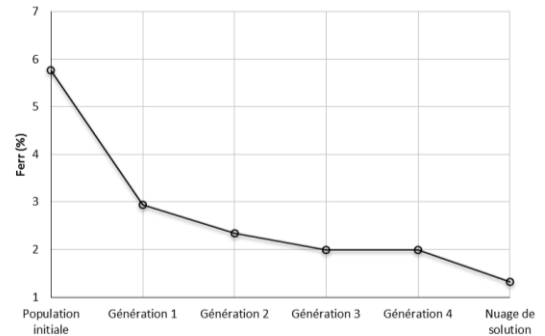


Figure 7. Evolution de la moyenne de la fonction erreur en fonction de chaque génération

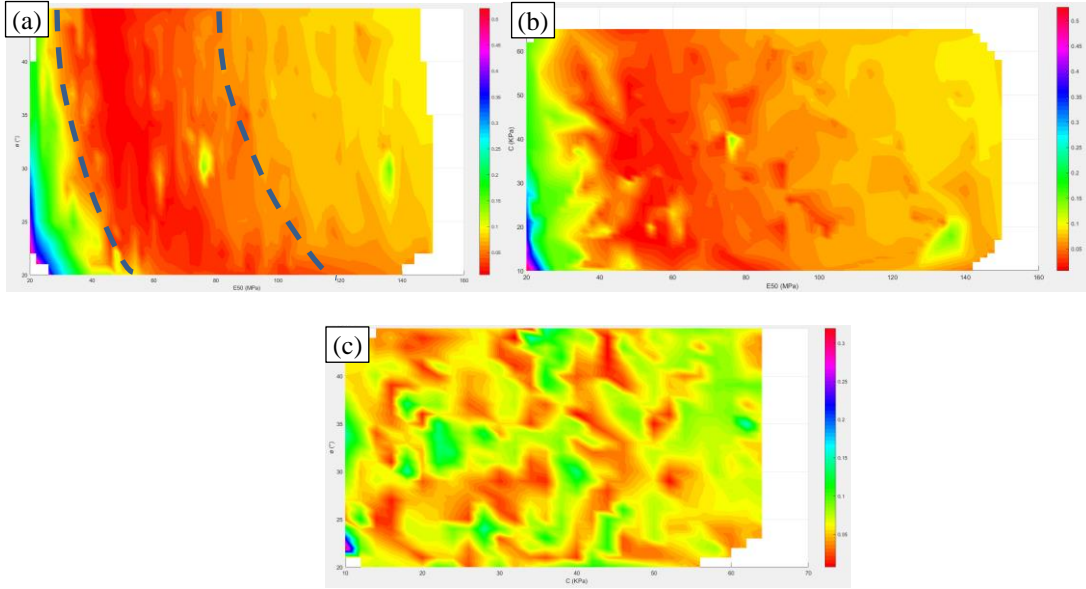


Figure 8. Présentation de l'ensemble des individus en fonction de la fonction erreur- $OP1$

Et une répartition statistique des paramètres :

$$\varphi' = 29^\circ \pm 4^\circ \quad (25)$$

$$\Psi = 11^\circ \pm 6^\circ \quad (26)$$

$$K_0 = 0,47 \pm 0,1 \quad (27)$$

À l'identique de la première optimisation, la topographie de la fonction erreur (F_{err}) de tous les individus a été établie afin de visualiser l'influence de chaque paramètre sur la courbe pressiométrique. La **Figure 11 (a)**, $\Psi=f(\varphi')$, montre une zone limitée entre $\varphi' < 40^\circ$ et $\Psi < 30^\circ$ au centre de laquelle F_{err} est minimale. La **Figure 11 (b)**, $K_0=f(\varphi')$, et la **Figure 11 (c)**, $K_0=f(\Psi)$, montrent des bandes de F_{err} minimale, parallèles à l'axe des ordonnées (K_0). Cela signifie que le coefficient K_0 n'a pas une influence prépondérante devant φ' et Ψ . Cela n'exclut pas le constat de l'analyse de sensibilité faite par AL-Husein selon laquelle l'angle de frottement φ' et le coefficient de terres K_0 jouent un rôle important dans l'interprétation d'essais pressiométriques.

La **Figure 10** montre les courbes pressiométriques numériques générées par les paramètres optimums dans les deux optimisations.

5 ESSAI A LA PLAQUE : INDENTIFICATION DES TROIS PARAMETRES E_{50}^{ref} , C' , Φ'

Des essais à la plaque réalisés sur le faciès de la craie altérée Ca1 ont été exploités suivant le processus d'optimisation décrit précédemment. Une étude paramétrique a été également réalisée afin de cerner l'influence des paramètres de la loi HSM sur la simulation numérique. L'analyse inverse des essais à la plaque a conduit aux résultats suivants :

$$E_{50}^{ref} = 195 \text{ MPa} \quad (28)$$

$$c' = 36 \text{ KPa} \quad (29)$$

$$\varphi' = 43^\circ \quad (30)$$

$$\Psi = 13^\circ \quad (31)$$

$$K_0 = 0,38 \quad (32)$$

La courbe numérique est donnée dans la **Figure 11**.

L'optimisation par Algorithme Génétique du calage sur la courbe de l'essai à la plaque conduit à des paramètres de résistances proches de ceux calés sur les essais pressiométriques, avec toutefois une valeur cinq fois plus élevée du module E_{50}^{ref} .

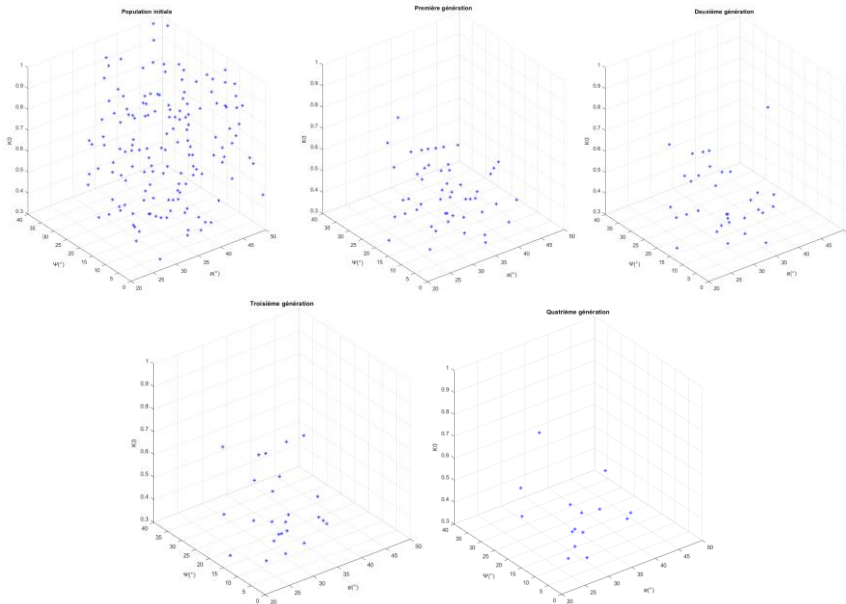


Figure 9. Evolution de la population initiale pendant le processus génétique-OP2.

La valeur élevée du module d'élasticité pourrait être attribuée à l'état hydrique plus sec de la craie, dans les conditions de l'essai. En effet, la diminution de l'état hydrique de la craie altérée conduit à un durcissement de la matrice (Ciantia, 2018), par ailleurs bien connu. Par ailleurs, les chemins de contraintes effectives des deux types d'essais diffèrent notablement jusqu'à la limite de rupture (Figure 13), bien que l'évolution du module de déformation en fonction du chemin des contraintes soit traduite, a priori, par la loi HSM. À cette fin, l'optimisation du paramètre m , pris arbitrairement égal à zéro, mérite une démarche complémentaire restant à entreprendre.

6 CONCLUSIONS

La démarche exposée dans le présent article nous a conduit à estimer des paramètres de résistance de la craie altérée plausibles, en exploitant différents essais in-situ. Par ailleurs, la démarche par l'analyse inverse et l'optimisation par Algorithme Génétique permet d'estimer un grand nombre de paramètres géotechniques à la fois, dans un temps raisonnable.

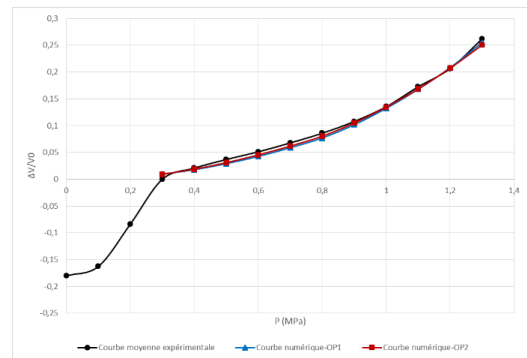


Figure 10. Courbe pressiométriques résultant des OPI et OP2

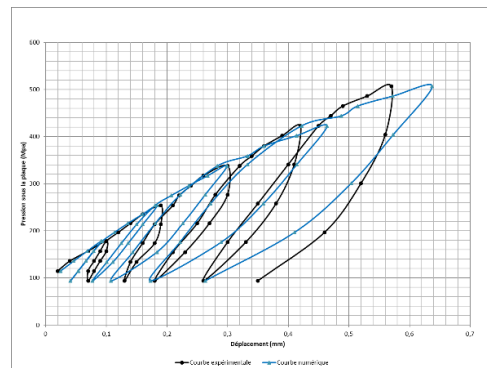


Figure 11. Courbe essai à la plaque- résultats de modélisation

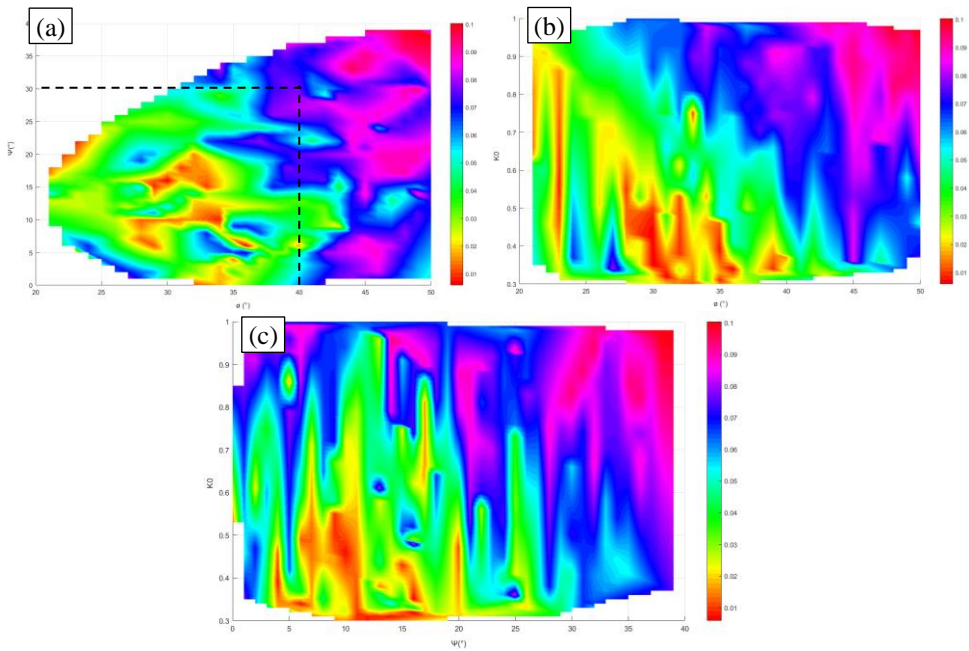


Figure 12. Présentation de l'ensemble des individus en fonction de la fonction erreur-OP

Ce qui, en l'absence d'essais de laboratoire de qualité en nombre suffisant, permettrait d'exploiter des essais in-situ disponibles en plus grand nombre.

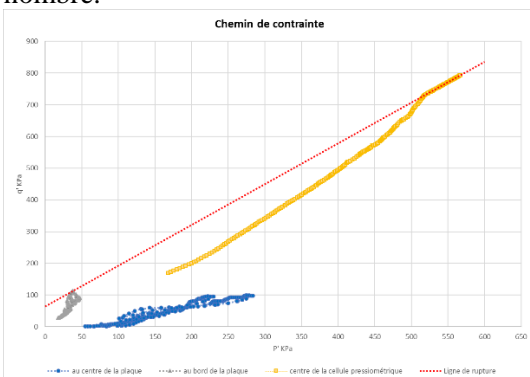


Figure 13. Chemin des contraintes effectives de l'essai à la plaque et l'essai pressiométrique

7 REFERENCES

A. Fawaz & al. 2005. Analyse inverse et modélisation d'essais pressiométriques réalisés sur un sol de Beyrouth, *Revue française de géotechnique* **112**, 43–48

Afnor. 2000. Essai pressiométrique Ménard, *Norme française*, NF P94-110-1

B. Cambou & R. Bahar. 1993. Utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification de paramètres intrinsèques du comportement d'un sol, *Revue française de géotechnique* **63**, 39–50.

David E. Goldberg. 1995. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, France, SA.

J. Biarez & al. 1998. Using pressuremeter to obtain parameters to elastic-plastic models for sands, *geotechnical site characterization*, Robertson & Mayne.

Jassionnesse & al. Puits et galerie de reconnaissance de Boulogne Billancourt pour le projet de la Ligne 15 sud du grand Paris Express et analyse en retour Congrès AFTES 2017

M. Al Husein. 2001. Etude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques, *PhD thesis*, Université Joseph Fourier, Grenoble.

M.O. Ciantia. 2018. Experimental study of the water weakening of carbonate rocks, *University of Dundee, Dundee, UK*

S. Levasseur. 2007. Analyse Inverse en Géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. *Thèse*, Université Joseph Fourier, Grenoble.