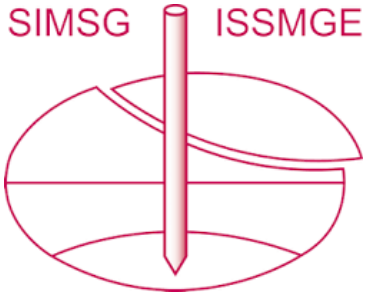
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Utilisation du pressiomètre auto-foreur dans le processus de calibrage de l'analyse régressive d'un essai de chargement

Use of Self-boring Pressuremeter in the Calibration Process of the Back-analysis of a Load Test

N. Lambert & K. Remeysen
Tractebel Engineering, Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ : Dans le cadre d'un projet de stockage de déchets faiblement et moyennement radioactifs de catégorie A dans un dépôt de surface, il a été décidé de réaliser un essai de chargement à grande échelle afin de déterminer finement les caractéristiques géomécaniques du sous-sol encaissant et de pouvoir garantir la maîtrise des phénomènes de tassements. Les paramètres géomécaniques, prédéterminés par essais in situ et en laboratoire, ont été affinés au moyen d'un processus de calibration de modèles aux éléments finis du dispositif d'essai, par ailleurs instrumenté. Le pressiomètre autoforeur a été utilisé au cours de ce processus pour déterminer les premières valeurs des paramètres de petites déformations des différentes couches de sol. Le processus de calibration ayant été jugé satisfaisant, les paramètres optimisés ont ensuite été utilisés pour les calculs de tassements de la structure de stockage.

ABSTRACT : In the frame of a project of surface storage of category-A low- and medium-level radioactive wastes, a large-scale loading test has been performed in order to determine accurately the subsoil geomechanical characteristics, guaranteeing the control of settlement phenomena. The geotechnical parameters had been predetermined from field and laboratory tests and have been refined through the calibration process of finite-element models of the monitored testing dispositive. Self-boring pressuremeter has been used during this process for a first determination of the small-strain characteristics of the soil layers. Since the calibration process was deemed satisfactory, the optimised parameters have been used for settlement assessment of the storage structure.

MOTS-CLÉS : analyse régressive ; calibrage ; essai de chargement ; tassements ; éléments finis.

KEYWORDS : back analysis; calibration; loading test; settlements; finite elements.

1 INTRODUCTION

En 2006, il a été décidé par le gouvernement belge d'assurer le stockage des déchets faiblement radioactifs de catégorie A dans un dépôt de surface. Le développement de la conception de ce stockage se focalise sur les aspects de sûreté, avec pour objectif principal d'assurer la sûreté à long terme par des moyens passifs uniquement (caractéristiques des déchets, barrières techniques et naturelles), sans dépendre de moyens de surveillance de longue durée ; la sûreté de l'installation va donc évoluer d'un système de type actif sur le court terme, vers un système passif.

La structure de stockage comprend deux doubles rangées de modules de stockage en béton, scellés et comprenant des monolithes qui sont eux-mêmes des conteneurs en béton remplis de déchets et d'un matériau à base de ciment. Chacune des doubles rangées de modules sera protégée, en fin de phase d'exploitation, contre la pénétration d'eau de pluie, l'intrusion d'êtres humains ou d'animaux, ainsi que contre l'érosion, par une couverture multicouche de sol, de plusieurs mètres d'épaisseur (Figure 1). Cette couverture remplacera la structure en acier placée au sommet des modules en phase de remplissage. Les modules seront graduellement remplis de monolithes grâce à un pont roulant (Figure 2).

Plusieurs des composants du centre de stockage sont sensibles aux tassements différentiels, parmi lesquels le pont roulant, le toit en acier et la galerie centrale d'inspection. Il est par conséquent nécessaire d'obtenir une estimation très précise des tassements pouvant se produire en phase d'exploitation. C'est dans ce contexte qu'il a été décidé de réaliser un essai de chargement à grande échelle, à proximité immédiate du futur site de stockage.

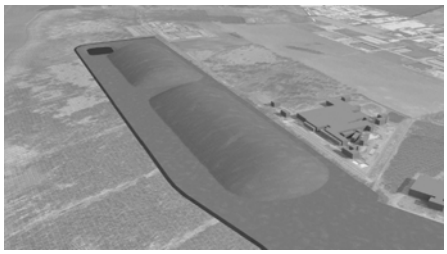


Figure 1 – Vue d'artiste du stockage, aspect définitif

L'essai proprement dit a consisté en la mesure des tassements dus à l'installation d'un tumulus de sable. Le site a été instrumenté de façon à pouvoir contrôler à la fois les déplacements sous le tumulus, ainsi que les pressions exercées par celui-ci sur le sol en cours de chargement et par après ; ces mesures continuent encore à l'heure actuelle, pendant la phase de démantèlement du tumulus.

Figure 2 – Vue d'artiste du stockage, phase d'exploitation

Les paramètres géomécaniques et géotechniques globaux des différentes couches du site ont été déterminés au moyen de plusieurs campagnes de reconnaissances géotechniques (essais de pénétration au cône – CPT, forages pour prises d'échantillons remaniés et non remaniés, sondages pressiométriques, reconnaissances géophysiques, essais de laboratoire). Une campagne complémentaire d'essais CPT a enfin permis de préciser la stratigraphie et de confirmer les ordres de grandeur des autres paramètres obtenus globalement pour le site.

L'essai de chargement a été modélisé, de façon prédictive, avec les logiciels FLAC 3D et Plaxis 3D, au moyen de la loi de comportement de Mohr-Coulomb, en assignant aux différentes couches de sol les paramètres déduits des sondages pénétrométriques, des essais au pressiomètre Ménard, ainsi que des essais de laboratoire.

Les déplacements obtenus par calcul étant très nettement supérieurs aux valeurs mesurées, il a été décidé, d'une part, d'adopter une loi de comportement du sol plus sophistiquée (modèle de sol avec écrouissage et prise en compte des petites déformations - *Hardening Soil with small strain stiffness*), et d'autre part de calibrer les paramètres attribués aux différentes couches pour obtenir une meilleure correspondance entre les mesures et les calculs. C'est au cours de ce processus de calibration qu'ont été utilisés les résultats d'essais réalisés au pressiomètre autoforeur, notamment pour la détermination des paramètres relatifs aux petites déformations.

2 DISPOSITIF D'ESSAI

2.1 *Tumulus de chargement*

Le tumulus de chargement consiste en un tronc de pyramide à base carrée, de 60 m de côté à la base, 20 m au sommet, et de 20 m de haut, constitué de sable (Figure 3). Une rampe d'accès est installée sur une des arêtes. Après un décaissage de 1,20 m pour enlever la terre arable et les racines, et installer les appareils de mesure, le chargement a été réalisé en quatre phases (y compris un minimum de 3 jours de « repos » entre chaque phase) :

- Phase 1 : de 0 à 5 m (4/05/10 → 31/05) ;
- Phase 2 : de 5 à 10 m (31/05 → 14/06) ;
- Phase 3 : de 10 à 15 m (14/06 → 21/06) ;
- Phase 4 : de 15 à 20 m (21/06 → 5/07/10).

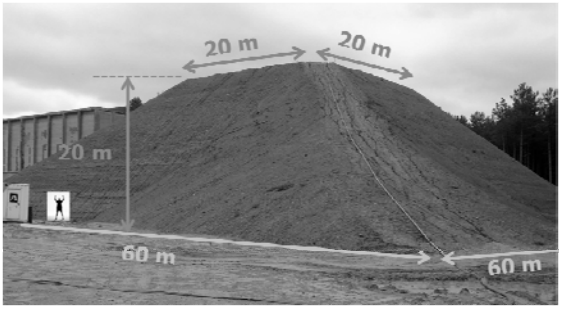


Figure 3 – Tumulus de chargement (rampe d'accès au premier plan)

2.2 *Instrumentation*

Les équipements de mesure ont été installés avant l'érection du tumulus. Ils comprennent :

- Cinq extensomètres de forages (E1 à E5), dont les données sont enregistrées sur base horaire, constitués de plusieurs tiges ancrées à des profondeurs différentes permettant de connaître les changements d'épaisseur de chacune des couches délimitées par ces ancrages (Figure 4 – la lecture de la tige A donne le tassement de la couche X, la lecture dans la tige B donne le tassement des couches X et Y).
- Sept capteurs de mesure des pressions totales, placés sous la base du remblai – mesures horaires.
- Cinq inclinomètres horizontaux (Z1 à Z5) sous la base du remblai – mesures discontinues.
- Vingt-six bornes topographiques placées en bordure du tumulus – mesures discontinues.
- Un piézomètre équipé d'un transducteur plongeur permettant le relevé horaire du niveau piézométrique.

La position de ces différents dispositifs est indiquée à la Figure 5

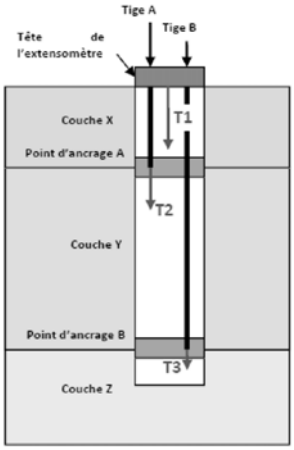


Figure 4 – Extensomètre de forage – principe

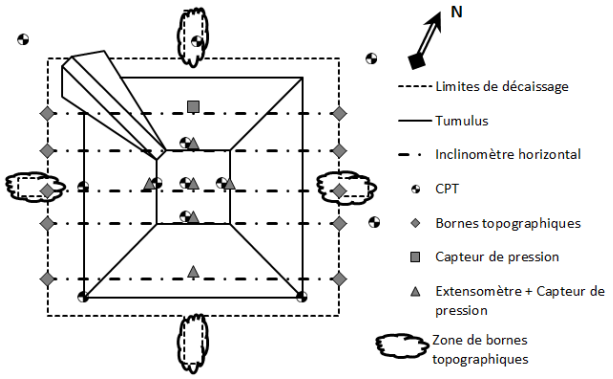


Figure 5 – Implantation des dispositifs de mesure et essais CPT complémentaires

3 CONDITIONS GEOTECHNIQUES

Les conditions géotechniques globales régnant au droit du site de stockage ont été déterminées au moyen de plusieurs campagnes géotechniques (Remeysen 2011), comprenant des essais de pénétration au cône, des essais au pressiomètre Ménard et au pressiomètre auto-foreur, des forages de reconnaissance, des essais géophysiques, ainsi que des essais de laboratoire.

Les couches typiquement rencontrées sous le site sont les suivantes (depuis la surface) :

- Sables quaternaires (QS – env. 1,2 m d'épaisseur) ;
- Sables tertiaires (MS, BS – env. 30,0 m d'épaisseur) ;
- Argiles sableuses tertiaires (TL – env. 4,2 m d'épaisseur) ;
- Sables glauconifères (DS – plus de 50 m d'épaisseur).

La stratigraphie locale a été précisée au moyen de douze essais CPT complémentaires répartis dans l'empreinte et autour du tumulus (Figure 5).

La nappe phréatique est affleurante à la surface, à environ 1,5 m de profondeur. Une variation saisonnière du niveau (environ 20 cm) a été constatée durant l'essai, sans que cela soit lié à la réalisation de l'essai, la nappe variant de façon similaire au droit de l'essai et dans un piézomètre situé à 200 m de là.

4 MESURES

4.1 *Prétraitement des données*

Lors du dépouillement des premières mesures, il s'est avéré que le court laps de temps entre l'installation des appareils de mesure et le début du chargement était à l'origine de perturbations de celles-ci. Il a donc été décidé de remettre les mesures à zéro en date du 16 mai, comme cela est visible sur certains graphiques ci-après.

4.2 *Capteurs de pression*

L'augmentation des pressions totales à la surface du sol au cours du temps, sous l'effet de l'installation du remblai sont montrées à la Figure 6. On y voit clairement l'effet de la remise à zéro des capteurs le 16/05. Les observations suivantes doivent également être prises en compte :

- Les mesures des capteurs P4 et P5 sont en bon accord avec la densité mesurée pour le remblai ;
- Le capteur P6 donne des valeurs légèrement trop élevées, mais la tendance générale est correcte ;
- Les mesures du capteur P3 sont correctes jusqu'à la phase 3, mais un peu basses pendant la phase 4 ;
- Les cellules P1 et P7 (éloignées du centre de la pyramide) donnent les résultats attendus ;
- La cellule P2 donne des résultats anormalement bas, dès le début des mesures (mauvais calibrage du capteur, mauvaise installation, défectuosité…).

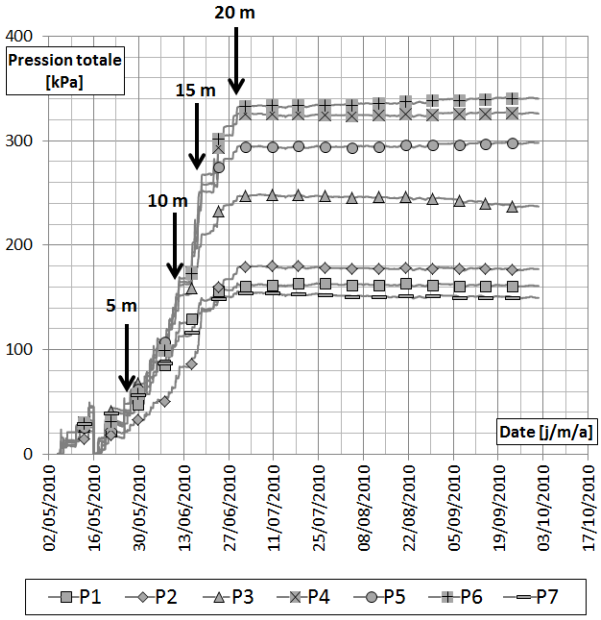


Figure 6 – Mesures des pressions totales – les flèches indiquent les hauteurs de remblai à 5, 10, 15 et 20 m

4.3 *Inclinomètres horizontaux*

La Figure 7 ci-dessous montre les tassements mesurés sous le tumulus, au niveau du fond de coffre, à la fin du chargement (hauteur : 20 m). La date de référence est le 16/05, le tassement des extrémités des tubes, mesuré grâce aux bornes topographiques, est intégré dans ces graphes.

À la fin de la première étape, tous les profils de tassement sont similaires. Ce résultat était prévisible étant donné la relative faiblesse de la charge et son uniformité. La valeur absolue des tassements (de l'ordre du centimètre) est faible du fait de la remise à zéro des mesures le 16/05, alors qu'environ 2,5 m de remblai (sur les 5 que compte la phase 1) étaient déjà en place. Le tassement maximal à la fin de la phase 2 est de l'ordre de 2 cm. Il est de l'ordre de 3 cm à la fin de la phase 3 et de 48 mm à la fin du chargement. Les inclinomètres Z1 et Z5, situés aux extrémités du tumulus, montrent le moins de tassement. L'inclinomètre Z3, coupant le tumulus en deux, montre les tassements les plus importants.

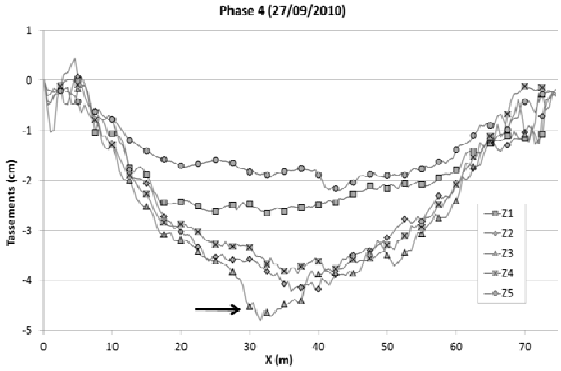


Figure 7 – Mesures aux inclinomètres horizontaux à la fin de la phase 4

4.4 *Extensomètres de forage*

Le Tableau 1 présente les résultats des mesures aux extensomètres de forage, en fin de chargement. Les valeurs négatives représentent un tassement des couches concernées, alors que les valeurs positives signifieraient un gonflement.

Ces valeurs positives n'ont aucune signification dans le cas d'un chargement par mise en place d'un remblai.

Tableau 1 – Extensomètres de forage – Variation des épaisseurs des couches, en mm (valeurs négatives : compression)

Couche	*E1*	*E2*	*E3*	*E4*	*E5*
QS/MS	-40	-21	-27	-22	-24
BS1	-11	-9	-5	-5	
BS2			-6	-6	-6
BS3	0	-1	**6**	**4**	-3
TL2	-1	0		-7	
DS	/	/	-8	/	**2**

Les valeurs positives mesurées dans les extensomètres E3, E4 et E5 rendent ceux-ci non fiables ; leurs résultats ne sont par conséquent pas utilisés par la suite.

5 MODELISATION

5.1 *Étapes de modélisation*

La première modélisation a été réalisée de façon totalement prédictive au moyen du logiciel par différences finies FLAC 3D. Une tentative de calibration des paramètres utilisés dans le modèle FLAC a été réalisée après le chargement.

Cette tentative de calibration n'étant pas satisfaisante, le modèle a ensuite été repris avec Plaxis 3D (éléments finis), de façon à pouvoir bénéficier de lois de comportement de sol plus

avancées, n'étant pas implémentées par défaut dans FLAC. Bien que le modèle Plaxis fût postérieur à l'essai de chargement, il a été réalisé « en aveugle » par un autre modélisateur que les modèles FLAC. Les étapes de prédiction et de calibration ont donc également été réalisées dans cette phase.

5.2 *Lois constitutives*

Les modèles FLAC sont basés sur la loi de comportement élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb.

En conditions drainées, les paramètres définissant le comportement la limite plastique du sol sont la cohésion effective c' et l'angle de frottement interne φ'. Le comportement élastique est régi par le module de Young E_Y (ou par le module œdométrique E_{oed}) et le coefficient de Poisson ν'.

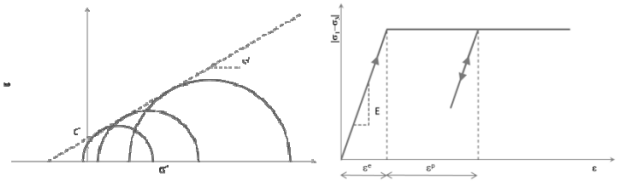


Figure 8 – Mohr-Coulomb – Critère de rupture et loi contraintes-déformations

Les modèles plus avancés réalisés avec Plaxis 3D utilisent quant à eux une loi de comportement de type hyperbolique, avec écrouissage et prise en compte des petites déformations (*Hardening Soil with small strain stiffness*). Le critère de rupture est de type 'Mohr-Coulomb'.

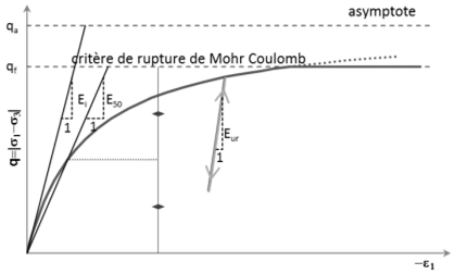


Figure 9 – Loi de comportement hyperbolique avec écrouissage

Le comportement élastique est régi par le module de rigidité en premier chargement E_{50} et par le module de rigidité en déchargement/rechargement E_{ur} (Figure 9), ainsi que par le module de compression œdométrique E_{oed}.

Dans Plaxis, ces paramètres sont ramenés à une pression de référence (par défaut 100 kPa) :

(1)

(2)

Le paramètre 'm' est caractéristique du comportement sableux ou argileux du sol et varie généralement entre 0,5 et 1,0.

Le comportement en petites déformations est caractérisé par une courbe de réduction donnant l'évolution du module de cisaillement G en fonction de la déformation angulaire γ (Figure 10). Ces courbes de réduction respectent la formulation de Hardin-Drnevich (G_s : module sécant, G_t : module tangent) :

(3)

(4)

Le paramètre a vaut 0,385 et $\gamma_{0.7}$ représente la distorsion pour laquelle G_s vaut 70 % du module de petites déformations G_0. Dans Plaxis, les courbes de réduction sont limitées pour les plus grandes déformations, à des valeurs telles que $G_t \geq G_{ur}$ (Bringkreve, 2012).

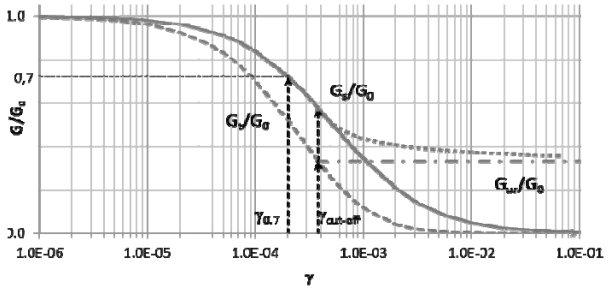


Figure 10 – Comportement en petites déformations – courbes de réduction

5.3 *Paramètres géomécaniques des modèles prédictifs*

Les stratigraphies prises en compte sont illustrées à la Figure 11. Les traits pleins représentent les couches prises en compte dans les modèles à épaisseurs uniformes ; les traits pointillés représentent les bornes des épaisseurs dans les modèles à épaisseurs de couches variables.

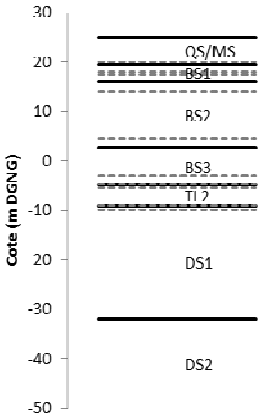


Figure 11 – Stratigraphies utilisées dans les modèles

Les modèles FLAC sont basés sur la loi de Mohr-Coulomb. Les paramètres associés aux différentes couches, déduits des campagnes géotechniques globales (Remeysen, 2011), sont repris au Tableau 2. Le coefficient de Poisson vaut 0,3 et le poids volumique 20 kN/m³.

Tableau 2 – Modèle prédictif FLAC – Paramètres géomécaniques

Couche	*E (MPa)*	*c' (kPa)*	*φ' (°)*
QS/MS	60	0,2	35,0
BS1	70		37,5
BS2	90		
BS3	80		
TL2	14	8,0	25,0
DS	90	2,0	32,5

Plusieurs modèles sont réalisés en Plaxis (comparaison directe avec le modèle FLAC : modèle à épaisseurs uniformes et loi de Mohr-Coulomb ; modèle plus détaillé avec épaisseurs de couches variables et loi hyperbolique). Les paramètres géomécaniques utilisés pour ces modèles sont déduits de corrélations avec les douze essais CPT complémentaires (Lunne, 1997). Pour les couches sableuses, les modules œdométriques sont donnés par :

pour (5)

Pour les couches argileuses (TL2), le module œdométrique est donné par :

(6)

Pour la loi hyperbolique, le paramètre m est fixé à 0,5 dans les sables, 0,9 dans l'argile sableuse (TL2) et 0,6 dans les sables glauconifères (DS2). Les modules de rigidité sont tirés des modules œdométriques :

pour (7)

pour (8)

Les modules de cisaillement en petites déformations G_0 sont déduits des modules de déchargement/rechargement G_{ur} en considérant un ratio G_0/G_{ur} de 2 dans les sables et 4,5 dans les argiles (Brinkgreve, 2012), et comparées aux résultats des campagnes géophysiques (bender, suspension logger).

Le paramètre $\gamma_{0.7}$ est estimé à partir de la formule ci-après (Brinkgreve, 2012) :

— (9)

Tableau 3 – Modèles prédictifs Plaxis – Paramètres géomécaniques

Couche	$E_{50,ref}$ (MPa)	$G_{0,ref}$ (MPa)	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$ (-)
QS/MS1	57,80	72,20	1,23
QS/MS2	67,40	84,20	1,45
BS1	93,20	116,50	1,24
BS2	87,40	109,20	1,84
BS3	60,60	75,80	3,36
TL2	12,90	100,0	1,80
DS1	29,20	120,0	2,70
DS2	26,70	200,0	1,80

5.4 *Résultats des modèles prédictifs*

Tableau 4 – Résultats des modèles prédictifs (tassements max)

Phase	*FLAC MC*	*Plaxis MC*	*Plaxis HSSmall*	*Mesures (inclino)*
1	40 mm	56 mm	30 mm	≤ 10 mm
2	102 mm	99 mm	54 mm	20 mm
3	153 mm	131 mm	74 mm	30 mm
4	184 mm	151 mm	86 mm	48 mm

Les résultats des différents modèles prédictifs sont comparés aux résultats expérimentaux au Tableau 4.

Les modèles FLAC et Plaxis utilisant la loi de Mohr-Coulomb (MC) fournissent des résultats comparables. La loi hyperbolique avec écrouissage et prise en compte des petites déformations (HSSmall) donne des tassements nettement plus faibles que les modèles précédents, bien qu'encore surestimés.

Une tentative de calibration du modèle FLAC pour retrouver les tassements mesurés, conduit à augmenter drastiquement les modules de rigidité (facteurs allant de 2,4 à 68). Les résultats des campagnes géotechniques étant cohérents entre eux et avec d'autres sites de même type, il convient de s'interroger sur la signification physique de tels coefficients, d'autant que même s'il est possible d'approcher ainsi le tassement maximal en fin de chargement, les tassements calculés ailleurs sous le remblai restent beaucoup trop importants.

5.5 *Calibration au moyen du pressiomètre autoforeur*

Le pressiomètre autoforeur permet d'obtenir des courbes contraintes/déplacements en limitant les perturbations dans le terrain, de déterminer le module de cisaillement pour divers niveaux de (faibles) distorsions. Il permet par conséquent d'estimer les courbes de réduction des matériaux testés.

Le sondage réalisé dans le cadre de ce projet est éloigné d'environ 500 m du tumulus ; trente-quatre essais ont été réalisés jusqu'à une profondeur de 69,80 m. La Figure 12 montre l'évolution des modules de cisaillement sécant déduits des essais, en fonction de la profondeur et pour divers niveaux de distorsion.

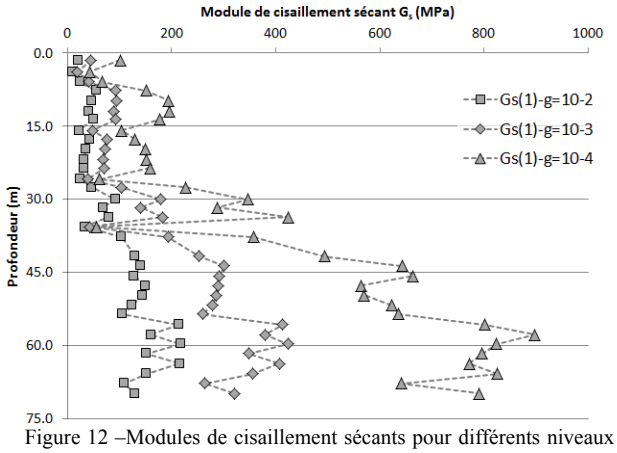


Figure 12 –Modules de cisaillement sécants pour différents niveaux de distorsion

Ces résultats sont utilisés pour raffiner les valeurs des paramètres G_0 et $\gamma_{0.7}$. Les paramètres G_0 et $\gamma_{0.7}$ sont déterminés en ajustant des courbes de réduction suivant la loi de Hardin-Drnevich aux points expérimentaux, au moyen du solveur du tableur Microsoft Excel (Figure 13, Tableau 5).

Pour les couches « BS », les mesures des modules sécants pour $\gamma = 10^{-3}$ semblent faibles par rapport à celles obtenues pour $\gamma = 10^{-4}$ et $\gamma = 10^{-2}$. Les valeurs d'ajustement privilégient par conséquent ces deux dernières distorsions.

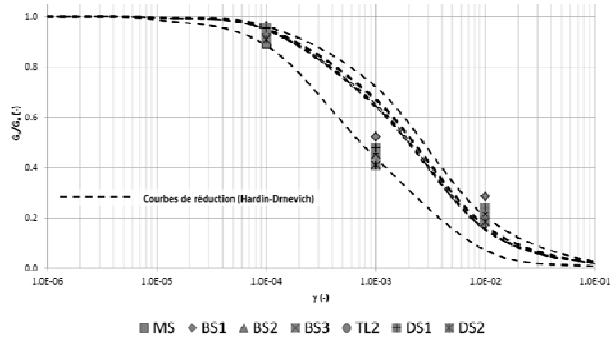


Figure 13 – Courbes de réduction déduites du pressiomètre autoforeur

Tableau 5 – Courbes de réduction calibrées au pressiomètre autoforeur – paramètres d'ajustement

Couche	G_0 *(MPa)*	$\gamma_{0.7}$ *(-)*
QS/MS	78,30	7,0 10^{-4}
BS1/2	209,5	7,5 10^{-4}
BS3	126,2	6,8 10^{-4}
TL2	160,5	7,7 10^{-4}
DS1	291,6	7,9 10^{-4}
DS2	829,9	3,0 10^{-4}

Les tassements calculés après calibration au pressiomètre autoforeur sont meilleurs que les précédents (75 mm en fin de chargement).

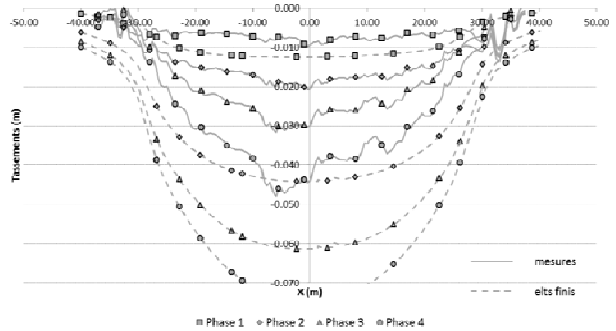


Figure 14 – Tassements mesurés et calculés le long de l'inclinomètre Z3 après calibrage au pressiomètre autoforeur

5.6 *Processus itératif*

La calibration via le pressiomètre autoforeur n'étant pas pleinement satisfaisante, un processus itératif, qualitatif et quantitatif, est entrepris pour faire converger les calculs vers les résultats expérimentaux en comparant les tassements calculés et mesurés, et en adaptant les paramètres des différentes couches de sol (petites déformations : G_0, grandes déformations : E_{50}, E_{oed} & E_{ur}, forme des courbes de réduction : $\gamma_{0.7}$) et en tenant compte des distorsions calculées dans les différentes couches du modèle, en fonction de la localisation des points considérés par rapport au tumulus, pour que les profils inclinométriques calculés et mesurés se confondent (Figure 15 : inclinomètre Z3).

L'amélioration de la qualité globale des résultats est estimée via « l'erreur » globale au sens des moindres carrés, pour chaque inclinomètre (équation 11, Figure 16). Les paramètres optimisés sont résumés au Tableau 6.

(10)

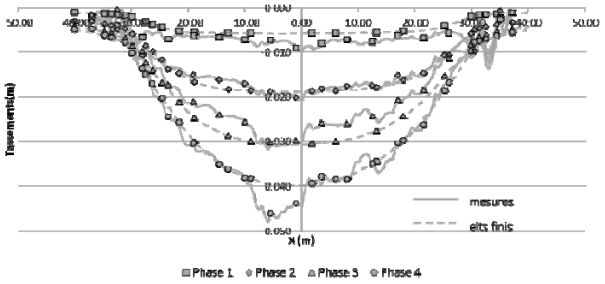


Figure 15 – Tassements mesurés et calculés le long de l'inclinomètre Z3 après optimisation des paramètres

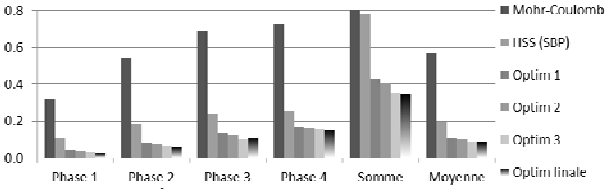


Figure 16 – Évolution des erreurs au cours de l'optimisation (inclinomètre Z3)

Tableau 6 – Paramètres optimisés

Couche	$E_{50, ref}$ *(MPa)*	$E_{oed, ref}$ *(MPa)*	$E_{ur, ref}$ *(MPa)*	$G_{0, ref}$ *(MPa)*	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$ *(-)*
QS/MS	25,50		76,40	110,0	7,00
BS1/2	266,7		800,0	530,0	2,00
BS3	251,2		753,2	1458	0,15
TL2	38,00	19,00	191,3	552,2	1,00
DS1	26,30		78,90	98,40	4,51
DS2	23,40		70,10	154,4	3,13

6 CONCLUSION

L'utilisation de l'analyse régressive a permis d'optimiser les paramètres géomécaniques caractérisant un site en vue d'estimer au mieux les tassements pouvant être attendus suite à la construction d'une installation de stockage de déchets faiblement radioactifs pour les calculs aux états-limites de service. L'utilisation des résultats du pressiomètre autoforeur a constitué une étape importante dans ce processus d'optimisation. En outre, ces paramètres, plus sécuritaires, sont utilisés pour les vérifications aux états-limites ultimes.

7 REFERENCES

Remeysen K, Van Cotthem A. *et al*, 2011, Geotechnical report of the disposal site at Dessel, ONDRAF/NIRAS NIROND-TR 2011-41E Version 1

Lunne T, Robertson P.K. et Powell J.J.M, 1997, *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, London

Brinkgreve R *et al*, 2012, *Plaxis 3D 2012 User's manuals*, Plaxis BV, The Netherlands

Bidwell T, 1999, Report on pressuremeter tests, CIR 1048/99, Cambridge University, United Kingdom