

ÉVALUATION DES EFFORTS DANS LES GÉOSYNTHÉTIQUES PAR MODÉLISATION EN DÉPLACEMENT

EVALUATION OF GEOSYNTHETIC LOADS BY MODELISATION IN DISPLACEMENT

Baptiste PAGE¹, Johann BRUHIER²

1 ANTEA – Service Grands Projets d'Aménagement, Orléans, France

2 HUESKER FRANCE SAS, Lingolsheim

RÉSUMÉ – Les dispositifs comportant des géosynthétiques sont couramment rencontrés dans les ouvrages géotechniques. Les angles de frottement entre les matériaux manufacturés qui les constituent sont généralement faibles, notamment au contact des géomembranes. La détermination de l'angle de frottement de la surface de glissement préférentielle conditionne le dimensionnement des ouvrages. Cette caractérisation se fait, en général à l'aide des appareillages suivants : boîte de cisaillement, plan incliné, et boîte d'arrachement. Les logiciels FLAC et FLAC^{3D} permettent de modéliser les ouvrages comprenant des géosynthétiques, à l'aide de différents éléments de structures du code de calcul.

Mots-clés : efforts, géosynthétique, essai d'arrachement, interfaces

ABSTRACT – The Systems including geosynthetics are often met in civil engineering works. The angles of friction between the manufactured materials which constitute them are generally weak, in particular in contact with the geomembranes. The determination of the angle of friction of the preferential slip surface conditions the design of the devices. This characterization is done, in general using the following equipment : shear test, inclined plane test, pull out test. The Softwares FLAC and FLAC^{3D} make it possible to simulate civil engineering works including geosynthetics, using interface and structural elements of the computer code.

Keywords: tension, geosynthetic, pull-out test, interface

1. Introduction

Les dispositifs comportant des géosynthétiques sont couramment rencontrés dans les ouvrages géotechniques. Ces dispositifs peuvent allier un multicouche de géosynthétiques : géomembrane, géosynthétique bentonitique, géospaceur, géogrille et géotextile... et une couche de sol granulaire sur ou sous-jacente. Certains ouvrages tels que les Dispositifs d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) utilisés, notamment, en flanc, fond et couverture de casiers de Centre de Stockage de Déchets présentent souvent des désordres graves. Le plan de glissement préférentiel se situe en général, aux interfaces géosynthétiques. En effet, les angles de frottement entre les matériaux qui les constituent sont généralement faibles, notamment au contact des géomembranes. Le dimensionnement des ouvrages est donc une étape importante afin de parer au phénomène d'instabilité, en cours de mise en œuvre et lors de la période d'exploitation de l'ouvrage.

Actuellement, les méthodes de dimensionnement généralement utilisées demeurent relativement sommaires et correspondent à des calculs à l'état d'équilibre limite de glissement plan sur plan, sans tenir compte de la raideur propre de chaque lit de géosynthétique. La détermination de l'angle de frottement de la surface de glissement conditionne le dimensionnement du dispositif. Cette caractérisation se fait en général à l'aide de trois essais de performance.

2. Simulation des essais de performance

2.1. Interface géosynthétique

Le comportement du géosynthétique à l'interface avec les matériaux voisins (sol ou autre géosynthétique) constitue un aspect important lors du dimensionnement des ouvrages. On parle de frottement aux interfaces géosynthétiques pour définir le frottement entre deux géosynthétiques ou entre un géosynthétique et un sol.

La résistance au cisaillement à l'interface d'un géosynthétique et d'un matériau (sol ou géosynthétique) est caractérisée par une loi de frottement de type Mohr-Coulomb :

$$\tau = c_a + \sigma_n \times \tan(\delta) \quad (1)$$

- où τ = contrainte de cisaillement entre les deux matériaux ;
 σ_n = contrainte normale dans le plan de cisaillement ;
 c_a = cohésion du géosynthétique (en général nulle) ;
 δ = angle de frottement entre les deux matériaux.

Le phénomène d'interface peut être appréhendé au laboratoire par l'un des essais suivant :

- essai d'arrachement (« Pull out test ») ;
- essai de cisaillement à la boîte (« shear test ») ;
- essai au plan incliné (« inclined plane test »).

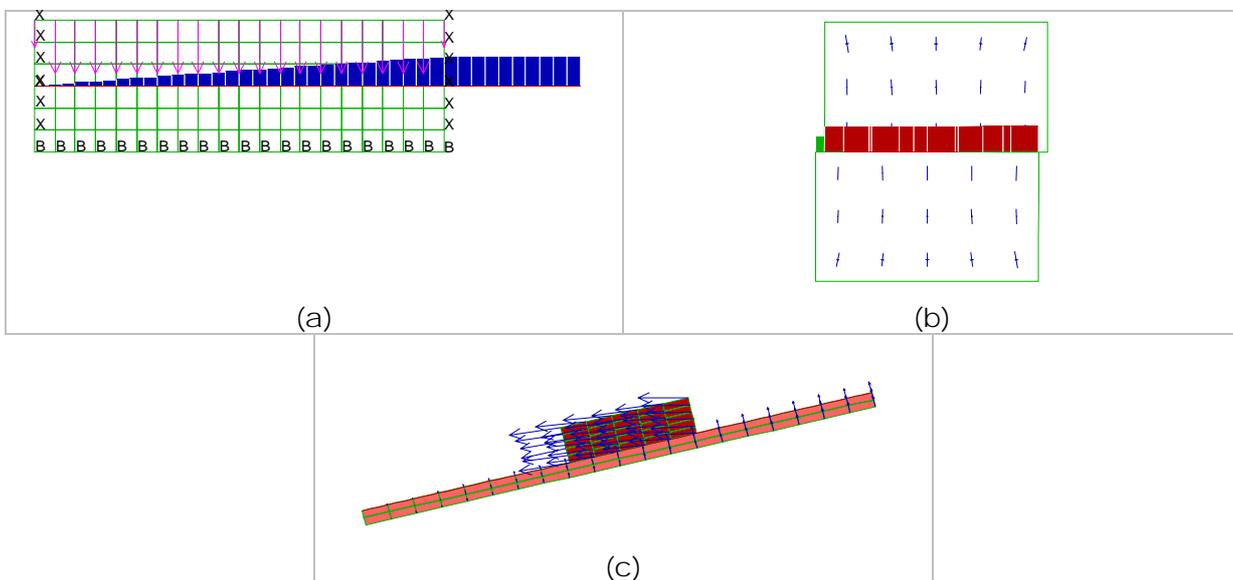
2.2. Modélisation des géosynthétiques avec les logiciels FLAC et FLAC^{3D}

Les géosynthétiques peuvent être modélisés sous FLAC et FLAC^{3D} à l'aide d'éléments de structure de type poutre, câble ou bande. L'utilisation de tels éléments nécessite de spécifier les caractéristiques du géosynthétique, tel que le module d'élasticité, la densité, l'aire de la section, l'inertie (prise égale à 0 pour simuler l'effet de flexion des géosynthétiques), la raideur...

Ces éléments intègrent ou sont associés à des interfaces qui permettent de prendre en compte les caractéristiques aux interfaces géosynthétiques. Parmi ces éléments de structure, seuls les éléments de type poutre et bande peuvent être superposés, ce qui rend possible la modélisation des ouvrages constitués par des lits de géosynthétiques en deux dimensions. Seuls les éléments de structure de type poutre permettent de prendre en compte la séparation des zones de part et d'autre du géosynthétique.

2.3. Modélisation des essais de performance

Les essais de performance peuvent être modélisés à l'aide des logiciels FLAC et FLAC^{3D}. La figure 1 présente une vue des modèles permettant de simuler les trois essais en deux dimensions.



(a) - essais d'arrachement ; (b) - essai à la boîte de cisaillement ; (c) - essai au plan incliné.

Figure 1. Simulations en 2D des essais de performance

Seul l'essai d'arrachement peut être modélisé en trois dimensions. En effet, les éléments de type bande du logiciel FLAC^{3D} ne permettent pas de prendre en compte une séparation des zones de part et d'autre de l'inclusion. Le chapitre suivant s'attache à présenter la simulation de l'essai d'arrachement en deux et trois dimensions.

3. Modélisation d'un essai d'arrachement

3.1. Position du problème

Le problème consiste à simuler l'extraction d'un géosynthétique ancré entre deux couches de sol. On se propose de comparer l'évolution de la résistance à l'arrachement obtenue par simulation numérique avec celle mesurée lors d'essais en laboratoire sous différentes contraintes normales (25, 50 et 100kPa). Les résultats de ces essais de laboratoire sont donnés en figure 3.

Le géosynthétique étudié est la géogrille FORTRAC 200/30-30MPS fabriqué par la société HUESKER. La gamme FORTRAC® correspond à un ensemble de géogrilles flexibles caractérisées par une résistance à la traction élevée (de 20 kN/m à 1000 kN/m), fabriquées à partir de fibres synthétiques à haut module, à faible fluage et enduites d'une couche de protection polymère. Les caractéristiques intrinsèques de la géogrille sont données dans le tableau I.

Tableau I. Caractéristiques de la géogrille Fortrac 200/30-30 MPS

Caractéristiques	Unités		Géogrille
Epaisseur	e	(mm)	1
Tension de rupture	T	(kN/m)	200 (à 6% de déformation)
Raideur	J	(kN/m)	2 222
Module d'élasticité	E	(GPa)	2,222
Poids	W	(g/m ²)	300
Coefficient de Poisson	v	-	0,33

Le sol utilisé est un sable de Braaschaat dont les caractéristiques géotechniques connus sont les consignés dans le tableau II (les valeurs en italiques ont été déterminés à l'aide d'essai en laboratoire).

Tableau II. Propriétés géotechniques du sable de Braaschaat

Caractéristiques géotechniques			Sable de Braaschaat (Allemagne)
Poids volumique	γ	(kN/m ³)	16,7
Cohésion	c	(kPa)	25
Angle de frottement	ϕ	(°)	32,7
Module de Young	E	(MPa)	15
Coefficient de Poisson	v	-	0,3

Les caractéristiques à l'interface sable / géosynthétique peuvent être déterminée à l'aide de la formule :

$$T_{\max} = 2 \times L \times B \times \sigma_n \times \tan \delta \quad (2)$$

où T_{\max} est la résistance à l'arrachement maximale ;
 L et B sont respectivement la longueur et la largeur de l'éprouvette testée ;
 σ_n est la contrainte normale appliquée sur la nappe ;
 δ est l'angle de frottement entre les deux matériaux.

Le tracé du graphique τ/σ_n permet de déterminer les caractéristiques de l'interface : $\delta = 18,7^\circ$ et $c = 12$ kPa. Cette cohésion représente une cohésion apparente créée par l'imbrication des éléments du sol dans les ouvertures de la géogrille. Dans le cas où celle-ci serait fixée à 0, l'angle de frottement de l'interface prend la valeur de 29° . Les caractéristiques à l'interface déterminée à l'aide de la formule 2 sont consignées dans le tableau III.

Tableau III. Caractéristiques à l'interface sable de Braaschaat / géogrille

Contrainte de confinement	Résistance à l'arrachement	Caractéristiques à l'interface	
σ_n - kPa	T_{\max} - kN/m	δ - °	ca - kPa
28,3	50,3	18,7	12
50,3	73,1		
75,3	88,7		

L'angle de frottement du sol étant égal à $32,7^\circ$, la valeur de l'angle de frottement à l'interface géosynthétique ne peut être supérieure à cette valeur. La résistance au cisaillement à l'interface géosynthétique est modélisée à l'aide d'une loi de frottement de type Mohr-Coulomb.

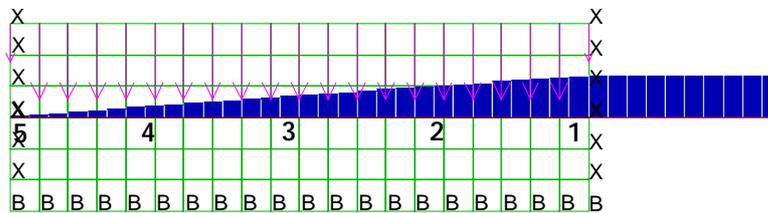
La raideur tangentielle de l'interface peut, également, être déterminée à partir des courbes d'arrachement. Elle correspond au rapport de la contrainte tangentielle à l'arrachement par rapport au déplacement de l'inclusion mesuré à l'arrachement. Le tableau IV consigne pour chaque contrainte normale, la valeur de la raideur tangentielle calculée :

Tableau IV. Propriétés géotechniques du sable de Braaschaat

Contrainte tangentielle à l'arrachement	Déplacement mesuré à l'arrachement	Raideur tangentielle calculée
τ_{\max} - kPa	d_{\max} - mm	k_s - MN/m/m
20,95	10	2,1
30,45	5	6,1
36,95	10	3,7

3.2. Modèles numériques utilisés

La figure 2 présente les modèles mis en œuvre en 2D et en 3D.



1, 2, 3, 4, 5 : points de suivis des déplacements



11, 12, 13, 14, 15, 16 : nœuds de suivis des déplacements

21, 22, 23, 24, 25, 26 : surfaces de suivi de la contrainte tangentielle s'exerçant sur le GSY

Figure 2. Essais d'arrachement – modèle FLAC et FLAC^{3D}

Le modèle FLAC est constitué de 20×7 zones et de 40 éléments de structures. A des fins comparatives, ces derniers sont soit des éléments de type poutre (beam elements), soit de type bande (strip elements). Une fonction en langage Fish (langage du code de calcul) permet de prendre en compte la résistance en traction des éléments de type poutre et, ainsi d'imposer une limite de rupture en traction à ces derniers. Le modèle FLAC^{3D} est constitué d'une grille de 280 zones (soit 463 nœuds) et 40 éléments de type « geogrid » (soit 30 nœuds).

Les premières phases des simulations consistent à définir la grille et les conditions aux limites, à mettre en place la géogrille, à l'application de la contrainte normale et à la résolution du système ainsi défini pour atteindre l'équilibre mécanique.

L'essai d'arrachement est simulé en imposant une vitesse de déplacement horizontal au niveau du (ou des) nœud(s) de l'extrémité sollicitée de l'élément de structure. Cette vitesse est fixée initialement à 10^{-6} m par pas de calcul. Une fonction Fish permet, éventuellement, de modifier cette vitesse pendant les calculs, en fonction de la valeur des forces non équilibrées (unbalanced force). Une vitesse d'extraction maximum est fixée à 10^{-4} m/pas. L'analyse des résultats des modélisations présentées dans ce chapitre montre que la vitesse demeure égale à 10^{-6} m/pas durant la durée des calculs.

Les simulations peuvent être menées en petites ou grandes déformations.

Les déplacements simulés sont suivis à l'aide des nœuds des éléments de structure (cf. figure 2).

La résistance à l'arrachement simulée est enregistrée de deux manières, à l'aide d'un historique des forces s'exerçant dans l'élément de structure de l'extrémité sollicitée du géosynthétique et grâce à une fonction Fish permettant de suivre les forces non équilibrées au niveau de ce nœud.

Le tableau V récapitule le tassement simulé après application de la contrainte de confinement :

Tableau V. Synthèse des résultats après phase d'initialisation

Modèle	Contrainte de confinement (σ_n) simulée		Tassement absolu simulé de l'ordre de	
	sur le boîtier supérieur	sur la géogrid	Avant application de σ_n	Après application de σ_n
	kPa	kPa	mm	mm
Modèle 2D Elément de type poutre	25	28,22	1	3
	50	53,22		4
	75	78,32		5
Modèle 2D Elément de type bande	25	25	0,03	0,45
	50	50		0,8
	75	75		1,15
Modèle 3D	25	28,42	0,04	0,44
	50	54,01		0,88
	75	78,34		1,2

3.3. Résultats des modélisations

Les tableaux VI et VII consignent, pour les simulations réalisées respectivement avec les éléments de structures de type poutre et de type bande du logiciel FLAC, les paramètres ayant permis de caler les résultats numériques sur les données des essais en laboratoire (indiquées en italique) :

Tableau VI. Simulations à l'essai d'arrachement – élément de structure de type poutre – FLAC

Contrainte normale	Caractéristiques à l'interface géosynthétique				Module d'élasticité inclusion	Résistance à l'arrachement simulée
	Raideur normale	Raideur tangentielle	Cohésion	Angle de frottement		
σ_n - kPa	k_n – MN/m/m	k_s – MN/m/m	c – kPa	δ - °	E – GPa	T_{max} – kN/m
25	2,1 (2,1)	2,1 (2,1)	10,5 (12)	18,7 (18,7)	2,222	49,31 (50,3)
50	6,1 (6,1)	6,1 (6,1)	12 (12)	18,7 (18,7)	2,222	74,27 (73,1)
75	3,7 (3,7)	3,7 (3,7)	10 (12)	18,7 (18,7)	2,222	89,77 (88,7)

Tableau VII. Simulations à l'essai d'arrachement – élément de structure de type bande – FLAC

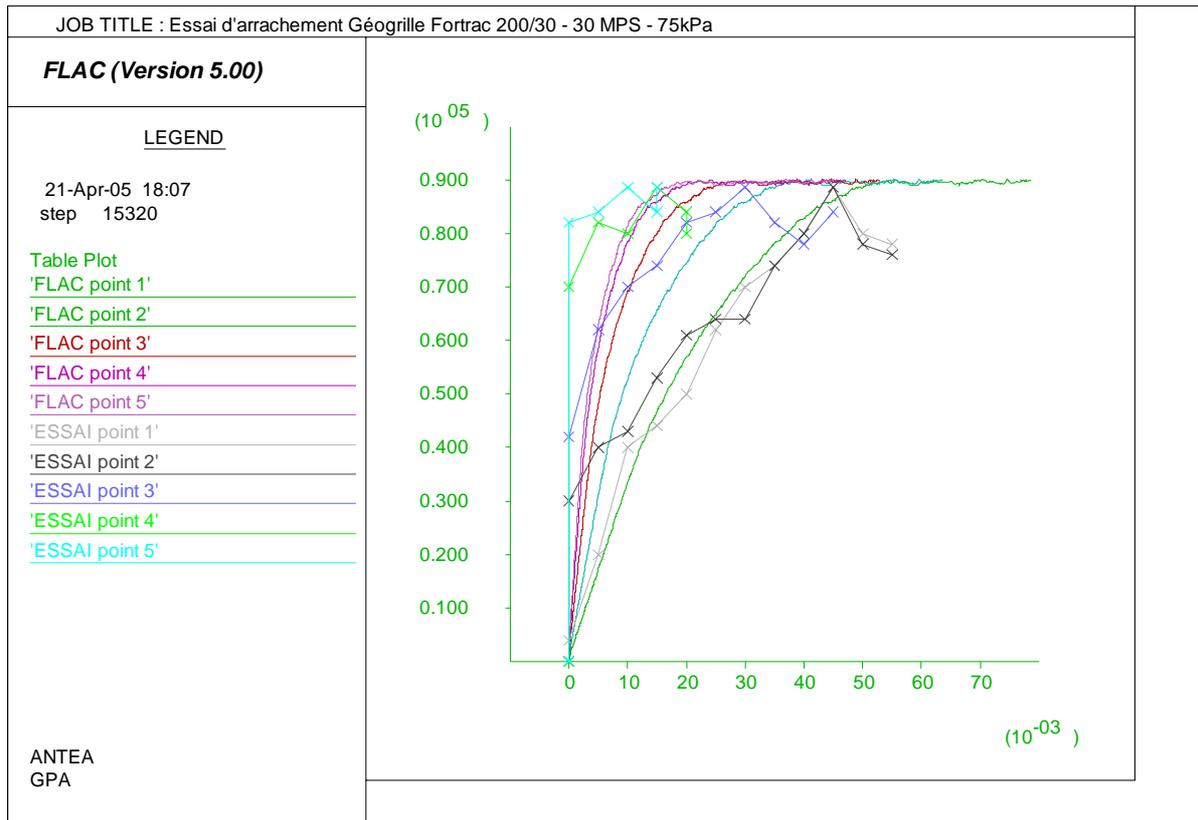
Contrainte normale	Caractéristiques à l'interface géosynthétique			Module d'élasticité inclusion	Résistance à l'arrachement simulée
	Raideur tangentielle	Cohésion	Angle de frottement		
σ_n - kPa	K_s – kN/m/m	c – kPa	δ - °	E – GPa	T_{max} – kN/m
25	6 (2,1)	10,5 (12)	18,7 (18,7)	2,222	47,98 (50,3)
50	20 (6,1)	11,5 (12)	18,7 (18,7)	2,222	69,90 (73,1)
75	10 (3,7)	9,5 (12)	18,7 (18,7)	2,222	84,17 (88,7)

Le tableau VIII consigne, pour le modèle FLAC^{3D}, les paramètres ayant permis de caler les résultats numériques sur les données des essais en laboratoire indiquées en italique (en gras, poids des terres) :

Tableau VIII. Simulations à l'essai d'arrachement – FLAC^{3D}

σ_n appliquée sur boîtier supérieur	σ_n moyenne appliquée sur élément Geogrid	Module d'élasticité inclusion	Caractéristiques à l'interface géosynthétique			Résistance à l'arrachement simulée
			Cohésion	Angle de frottement	Raideur tangentielle	
		E – GPa	c – kPa	δ - °	k_s – kN/m/m	T_{max} – kN/m
25	28,42 (28,34)	0,5 (1,67)	12 (12)	18,7 (18,7)	2095 (2095)	50,65 (50,3)
50	54,01 (53,34)	0,55 (1,67)	13 (12)	18,7 (18,7)	6090 (6090)	73,1 (73,1)
75	78,34 (78,34)	0,5 (1,67)	11,5 (12)	18,7 (18,7)	3695 (3695)	88,7 (88,7)

La figure 3 présente les courbes efforts déformations simulés en deux dimensions et celles issues déterminées en laboratoire pour l'essai réalisé sous une contrainte de confinement de 75 kPa :



(courbe continue : modélisation FLAC – courbe avec croix : essai en laboratoire)

Figure 3. Résultats de la modélisation avec FLAC – élément de structure de type BEAM – contrainte de confinement égale à 75 kPa.

La résistance maximale simulée est pour toutes ces simulations de l'ordre de celle mesurée lors des essais.

Les différentes simulations réalisées et les études paramétriques ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- la cohésion, l'angle de frottement et la longueur ancrée du géosynthétique influent essentiellement sur la résistance maximale à l'arrachement (T_{max}) ;
- la raideur de l'inclusion, la (ou les) raideurs de l'interface déterminent la cinématique de l'extraction du géosynthétique (déplacement maximal à l'extraction). Le chemin effort - déformation mesuré lors de l'essai est toutefois difficilement modélisable ;
- l'influence de la vitesse d'extraction n'est pas significative. Toutefois, une vitesse trop forte (à partir de 10^{-4} m/pas) entraîne une réponse numérique erronée : la résistance à l'arrachement augmente artificiellement du fait de l'inertie du système ;
- l'influence du module de Young (E) du sol et du coefficient de poisson (ν) de la géogrille sont peu significative (pour les valeurs cohérentes) ;
- les éléments de type poutre en 2D et de type bande en 3D permettent de mieux simuler l'extraction du géosynthétiques que les éléments de type câble ou bande en 2D ;
- des artefacts numériques peuvent être rencontrés avec les éléments de structure de type poutre du code de calcul 2D lorsqu'un élément de structure est extrait de la grille (chute de résistance).

4. Evaluation des efforts dans les lits multiples de géosynthétiques

Le comportement des ouvrages comprenant des lits de géosynthétiques peut être modélisé à l'aide d'éléments de structure de type poutre associés à l'aide d'interfaces en 2D. Les efforts se développant dans la barrière active d'un CSD peuvent être évalués suivant cette méthode. L'ouvrage théorique étudié est caractérisé par un talus de pente 1V/2H, une hauteur de déchets de 15 m mis en place en trois couches et un multicouche composé de trois géosynthétiques dont les caractéristiques sont :

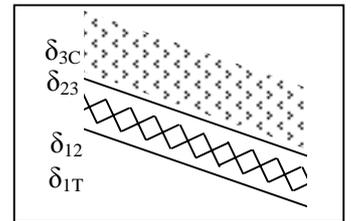
Tableau IX. Résultats des simulations à l'essai d'arrachement – FLAC

Géosynthétiques	Tension maxi (Tult - kN/m)	Raideur (kN/m)	Epaisseur (mm)	Module d'Elasticité (MPa)
Géomembrane	35	330	2	165
Géocomposite de drainage	10	52	5	10,5
Géotextile de protection	30	130	4,2	31

Les caractéristiques aux interfaces géosynthétiques sont récapitulées dans le tableau X. La surface de glissement préférentielle se situe à l'interface géomembrane / géocomposite de drainage.

Tableau X. Résultats des simulations à l'essai d'arrachement – FLAC

Interface	Angle de frottement δ - °	Cohésion c - kPa
δ_{3C} – gtx/couche drainante	30	0
δ_{23} – gnt/gtx	15	0
δ_{12} – gnt/gmb	8	0
δ_{1T} – gmb/CCL	10	0



Le tableau XI présente les efforts simulés dans les géosynthétiques à l'aide du logiciel FLAC et ceux déterminés à l'aide de la méthode analytique proposée par Liu et Gilbert (2003). La méthode analytique, proposée par Liu et Gilbert (2003), correspond à un calcul à l'état d'équilibre pour la surface de glissement préférentielle.

Tableau XI. Comparaison méthode analytique – méthode numérique

Géosynthétique	Traction simulée – T – kN/m (T/Tult - %)	Méthode analytique – T – kN/m (T/Tult - %)
Géotextile de protection	12,24 (41%)	3,15 (10,5%)
Géocomposite de drainage	4,5 (45%)	1,26 (12,5%)
Géomembrane	6,1 (17,5%)	8 (22,9%)

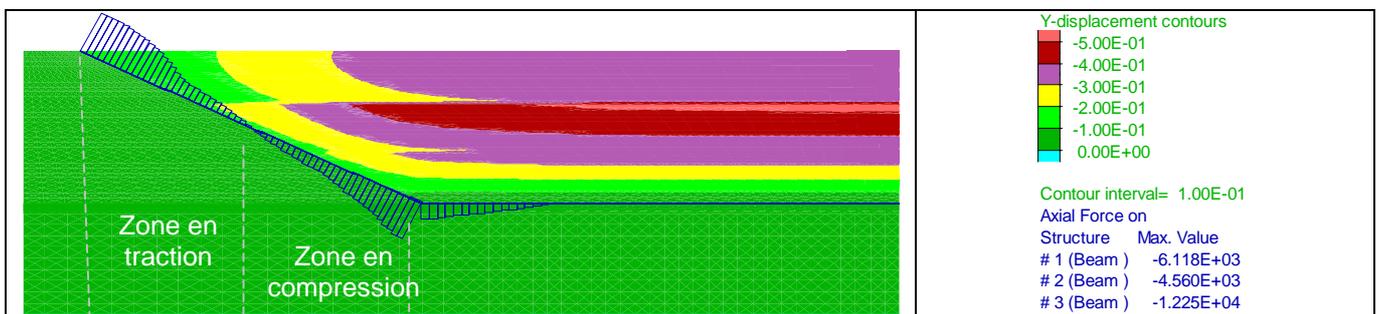


Figure 4. Efforts dans les lits de géosynthétiques par modélisation en déplacement

Les efforts simulés pour le géotextile anti-poinçonnant et le géocomposite de drainage sont supérieurs à ceux déterminés par la méthode analytique, et inversement pour la géomembrane. Les géotextiles de protection et de drainage dans cette configuration nécessitent également des propriétés mécaniques (de renforcement) et leurs fonctionnalités doivent alors être examinées sous ces nouvelles contraintes. Cette différence peut s'expliquer par la prise en compte du tassement des déchets simulés dans le cas de la méthode numérique et l'hypothèse simplificatrice consistant à retenir uniquement l'interface de glissement préférentielle utilisée comme assertion pour développer la méthode analytique.

5. Conclusions

La détermination de l'angle de frottement de la surface de glissement préférentielle conditionne le dimensionnement des dispositifs. Cette caractérisation se fait, en général à l'aide des appareillages suivants : boîte de cisaillement, plan incliné, et boîte d'arrachement.

Les logiciels FLAC et FLAC^{3D} permettent de modéliser les ouvrages comprenant des géosynthétiques tels que, par exemple, les murs renforcés, les barrières d'étanchéité, les matelas de transfert de charge des remblais sur sols compressible, à l'aide de différents éléments de structures des codes de calcul (éléments de type poutre, câble ou bande pour le code 2D, bande pour le code 3D). Le choix d'un élément est dicté par ses caractéristiques, reflet de sa formulation mathématique. Les principales caractéristiques différenciant les éléments de structures sont :

- la possibilité de prendre en compte de plusieurs jeux de paramètres aux interfaces ;
- la continuité des zones ou des éléments de volumes de part et d'autres de l'élément de structure ;
- la possibilité de superposer plusieurs éléments de même type et de caractéristiques intrinsèques et aux interfaces différentes.

Les éléments de type poutre permettent de simuler le comportement des lits de géosynthétiques en intégrant les déplacements induits par les matériaux sur ou sous jacent. Ceux-ci n'ont malheureusement pas d'équivalent en trois dimensions. Les éléments de type bande, câble peuvent être utilisés pour simuler le comportement des géosynthétiques de renforcement.

6. Références bibliographiques

- Aiban S.A., Ali S.M. (2001) Nonwoven Geotextile-Sabkha and -Sand Interface Friction Characteristics Using Pullout Tests, *Geosynthetics International*, Vol. 8, No. 3, 193-220.
- Bakeer R. M., Sayed M., Cates P., Subramanian R. (1998) Pullout and shear tests on geogrid reinforced lightweight aggregate, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 16, 119-133.
- Bakeer R. M., Abdel-Rahman A. H., Napolitano P. J. (1998) Geotextile friction mobilization during field pullout test, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 16, 73-85.
- Billiaux D., Cundall P. (1993) Simulation des géomatériaux par la méthode des éléments lagrangiens, *Revue Française de Géotechnique*, vol. 63, 9-21.
- Briançon L., Girard H., Poulain D. (2002) Slope stability of lining Systems - Experimental Modeling of friction at geosynthetic interfaces, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 20, 147-172.
- Giroud J. P., Beech J. F. (1989) Stability of soil layers on geosynthetic lining systems. *Geosynthetics '89 Conference Proceedings*, 1, 35-46.
- Gurung N., Iwao Y. (1999) Pullout test analysis for georeinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 17, 157-170.
- Itasca consulting group, Inc., Manual - Theory and Background - Section 4 : Interface & Structural Elements, *FLAC3D version 3.0 and FLAC2D version 5.0*
- Ju J. W., Park J. B., Seo G., Cho S. D. (2004) Staged pullout test method of reinforced Earth using hyperbolic Function, *Proc. of the International Symposium on Earth Reinforcement*, 369-376.
- Kodikara J. (2000) Analysis of tension development in geomembranes placed on landfill slopes", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 18, 47-61.
- Koerner R.M., Wayne M.H. (1994) Designing with geosynthetic, *Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, Fourth Edition*, 761 p.
- Liu C.-N. (2001) Tension of Geosynthetic Material Regarding Soils on Landfill Liner Slopes, *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) Vol. 25, No. 4*, 211-218.
- Liu C.-N., Gilbert R. B. (2003) Simplified method for estimating geosynthetic loads in landfill liner side slopes during filling, *Geosynthetics International*, 10, No. 1, 24-33.
- Lopes P.C., Lopes M.L., Lopes M.P. (2001) Shear Behaviour of Geosynthetics in the Inclined Plane Test – Influence of Soil Particle Size and Geosynthetic Structure, *Geosynthetics International*, 8, 4, 327-342.
- Reyes Ramirez R., (2003) Nouveaux regards sur l'essai au plan incliné - appliqué au frottement des interfaces géosynthétiques, *Thèse de doctorat, Univ. Grenoble I*, 215 p.
- Vaid Y.P., Rinne N. (1995) Geomembrane Coefficients of Interface Friction, *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 1, 309-325.