

# 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.*

# Etude expérimentale des mécanismes de déformation développés dans les plateformes granulaires renforcées par géosynthétiques sur cavités

Experimental study of the strain mechanisms developed inside geosynthetic reinforced granular platforms over cavities

Minh Tuan Pham, Laurent Briançon  
*SMS-ID, INSA Lyon, France, minh-tuan.pham@insa-lyon.fr*

Daniel Dias  
*Laboratoire 3S-R, Université Grenoble Alpes, France*

Abdelkader Abdelouhab  
*Texinov, France*

**RÉSUMÉ :** Les ouvrages linéaires routiers et ferroviaires traversent parfois des zones d'effondrements potentiels qui sont liées à la présence de cavités souterraines. Parmi les diverses techniques de renforcement, la solution par renforcement géosynthétique est largement utilisée. Plusieurs études récentes ont apporté des éléments de compréhension sur les mécanismes développés dans la plateforme granulaire renforcée lorsqu'une cavité apparaît. Il a été démontré expérimentalement sur un seul type de sol que la déformée de la nappe dépend du mode d'ouverture de la cavité. Il a aussi été mis en évidence numériquement que l'application de la charge sur la nappe au droit de la cavité n'est pas uniforme et dépend du mode d'ouverture de la cavité comme la valeur du coefficient de foisonnement. Un nouvel appareillage de laboratoire a été développé pour simuler différents modes d'ouvertures de cavités pour différentes configurations géométriques. Les essais menés pour trois sols et un géosynthétique de renforcement ont permis de déterminer la forme du volume de sol effondré au droit de la cavité et de calculer le coefficient de foisonnement pour chaque configuration d'essai.

**ABSTRACT:** New highways or railways lines constructions sometimes cross areas of potential collapses due to the presence of underground cavities. Among solutions, the use of geosynthetic-reinforced embankments increases. Many studies have recently improved the knowledge on the mechanisms developed inside the reinforced granular platform when a cavity appears. In particular, the deflection of the geosynthetic is different according to the process of the cavity opening, the shape of the load distribution on the geosynthetic above the cavity is non-uniform and depends on the process of the cavity opening like the value of the expansion coefficient. A new laboratory device has been developed to simulate a cavity by both processes (trapdoor and progressive cavity diameter opening process) for various ratios between the height of the platform and the diameter of the cavity. Tests performed on three different soils and one geosynthetic reinforcement have allowed to define the shape of the soil area affected by the sinkhole (cylindrical or tronconical) and determine the value of the expansion coefficient.

Mots-clés : géosynthétique, renforcement, cavité, expérimentation

## 1 INTRODUCTION

L'aménagement progressif du territoire conduit à l'exploitation de nouvelles zones, actuellement délaissées, car présentant des risques pour la sécurité des usagers. C'est notamment le cas des zones d'effondrements potentiels qui sont liées à la présence de cavités souterraines. Depuis quelques années, le développement de la technique de renforcement par géosynthétique positionné à la base des plateformes a permis d'apporter des solutions techniques économiques pour limiter temporairement les conséquences d'un effondrement localisé tout en répondant à la maîtrise des déflexions de surface nécessaire à la poursuite du trafic.

Malgré plusieurs succès de réalisation et de sécurisation d'ouvrages dans des zones à risque d'effondrement, les méthodes de dimensionnement existantes nécessitent quelques améliorations pour prendre en compte les mécanismes réels développés dans la plateforme renforcée par géosynthétique.

Une expérimentation en laboratoire a été développée pour simuler des effondrements sous une plateforme renforcée par géosynthétique. Les résultats de ces essais ont permis d'identifier l'influence du mode d'ouverture sur les mécanismes de transfert de charge et analyser finement le foisonnement du sol au droit de la cavité.

## 2 ETUDES ANTERIEURES

En France, les premières études menées sur cette thématique dans le cadre du projet RAFAEL (Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés) ont débouché sur une méthode de dimensionnement simplifiée qui a été reformulée (Briançon et Villard, 2006 - 2008 ; Villard et Briançon, 2008) en prenant en compte les mécanismes d'interaction jusqu'alors négligés entre la nappe géosynthétique et le sol environnant. Cette méthode a été enrichie par les résultats d'une étude expérimentale en vraie grandeur (Huckert

et al., 2016) couplée à une étude numérique par éléments discrets (Villard et al., 2016) mettant en évidence l'influence du mode d'ouverture de la cavité sur la répartition de la charge sur le géosynthétique au droit de la cavité.

### 3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

#### 3.1 Appareillage d'essai développé

Le dispositif expérimental (Figure 1) est constitué d'une base rigide rectangulaire (1,2 m x 1,4 m) montée sur 4 pieds et percée en son centre par une cavité de diamètre  $D = 0,5$  m. Un à trois cylindres (de diamètre  $D = 1$  m et de hauteur  $H = 0,25$  m) peuvent être fixés sur la base rigide permettant ainsi de simuler différentes configurations de plateformes renforcées :  $H/D = 0,5$ ,  $H/D = 1$  et  $H/D = 1,5$ . Un dispositif d'ancrage est disposé de part et d'autre de la base rigide afin de fixer les nappes géosynthétiques à tester. Deux dispositifs spécifiques peuvent être installés sous la base rigide afin de simuler l'apparition d'une cavité :

- Une plaque circulaire rigide associée à un vérin permettant de simuler un effondrement vertical (Mode A),
- Un cône rempli de sable, sa vidange permettant de simuler une ouverture concentrique de la cavité sous la nappe géosynthétique (Mode B).

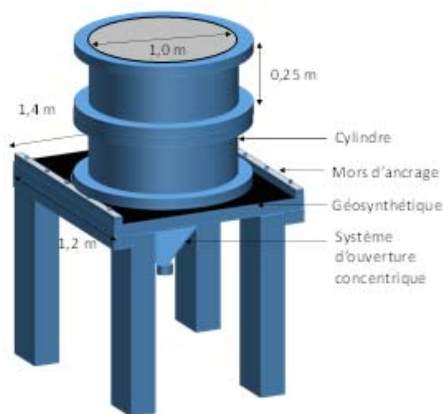


Figure 1 – Dispositif expérimental

#### 3.2 Instrumentation

La déformée de la nappe géosynthétique après ouverture de la cavité ainsi que le tassement en surface sont mesurés à l'aide d'un capteur de déplacement laser sans contact fonctionnant selon le principe de la triangulation. Ce capteur a une fréquence d'acquisition de 1,5 kHz et une résolution de 32  $\mu$ m en statique à 300  $\mu$ m en dynamique. Ce capteur peut se mouvoir sur un rail positionné sur le cylindre supérieur (pour la mesure du tassement en surface) et sous la base rigide (pour la mesure de la déflexion de la nappe géosynthétique). Ce capteur laser est relié à un capteur de déplacement à fil permettant de mesurer sa position sur le rail.

Ces deux capteurs de déplacement sont connectés à une centrale d'acquisition. Ce dispositif permet de mesurer avec une grande précision le déplacement de la nappe géosynthétique et le tassement en surface.

#### 3.3 Procédure

Le système d'ouverture est installé sous la cavité, puis la nappe géosynthétique est fixée entre les deux mors dans le sens production. Le ou les cylindres sont placés sur la base rigide puis remplis de sol avec un protocole permettant de contrôler la densité moyenne. Le rail de mesure est alors fixé sur le cylindre supérieur afin de mesurer l'état de surface initial ; les mesures

sont faites dans le sens production et transverse de la nappe géosynthétique. On procède ensuite à l'ouverture de la cavité. Lorsque la cavité est entièrement ouverte, le système d'ouverture est retiré et les mesures de tassement en surface et de déflexion de la nappe sont réalisées dans le sens production et transverse. Pour chacune de ces mesures, plusieurs allers-retours du capteur de déplacement laser sur le rail sont nécessaires pour obtenir des courbes continues.

### 4 PROGRAMME D'ESSAIS

#### 4.1 Matériaux testés

Trois sols secs ont été testés : un sable fin noté  $S_F$ , un sable grossier noté  $S_G$  et une gravette notée  $G$ , au contact d'un géotextile de renforcement. Les principales caractéristiques des sols et du géotextile sont données dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Principales caractéristiques des sols testés.

Sols	$D_{max}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )
$S_F$	1	0,36	1,82	0,89	1,40	2,64
$S_G$	2	0,82	2,07	0,85	1,44	2,63
G	10	6,1	2,52	1,36	1,32	2,62
Sols	$e_{min}$	$e_{max}$	$e$	$I_D$	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)
$S_F$	0,59	0,98	0,89	0,23	35,0	0
$S_G$	0,48	0,85	0,83	0,05	36,0	0
G	0,578	1,00	0,98	0,05	38,4	0

Tableau 2. Principales caractéristiques du géotextile.

Géotextile	Sens production		Sens travers	
	$T_{max}$ (kN/m)	$\epsilon$ (%)	$T_{max}$ (kN/m)	$\epsilon$ (%)
Geoter FPET	15	12	15	12

Les angles de frottement des sables ont été mesurés au triaxial sur des éprouvettes de 70 mm de diamètre pour de faibles contraintes de confinement (25kPa, 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa). En ce qui concerne la gravette, le sol a été écrêté pour que le diamètre de l'éprouvette soit supérieur à  $10.D_{max}$ . Les essais sur cavité ont été réalisés avec une densité correspondant à un état lâche du sol. Pour certains essais, d'autres densités ont été testées pour vérifier l'influence de ce paramètre sur les résultats.

#### 4.2 Programme

Une campagne expérimentale a été menée au laboratoire pour analyser le comportement de la plateforme renforcée pour les deux modes d'ouverture (Mode A et Mode B), les trois sols ( $S_S$ ,  $S_G$  et  $G$ ) et les trois rapports  $H/D$  (0,5, 1 et 1,5. Certains essais ont été doublés pour vérifier leur répétabilité. Pour chaque essai, une nappe géosynthétique vierge a été utilisée et la densité moyenne du sol remplissant le ou les cylindres a été contrôlée par pesée du sol mis en place. Les densités ont ainsi été obtenues avec une précision de  $\pm 0,01$  Mg/m<sup>3</sup>. Pour chaque essai la déformée en surface et la déflexion de la nappe ont été mesurées dans le sens production et transverse de la nappe géosynthétique (Figure 2).

Le nom de chaque essai a été codifié selon la procédure suivante : sol ( $S_F$ ,  $S_G$  ou  $G$ ) / Mode d'ouverture (A ou B) / ratio  $H/D$  / densité du sol, par exemple  $S_F/A/0,5/1,4$ .

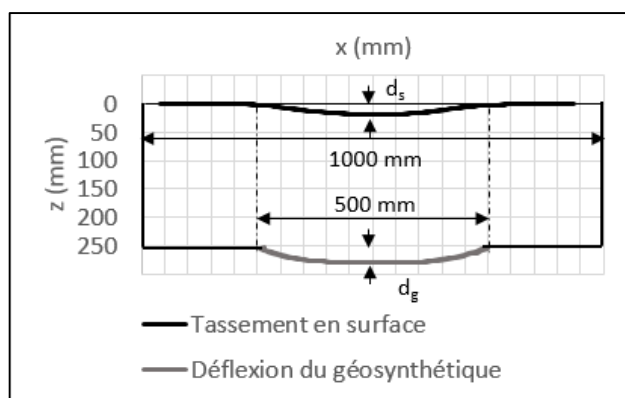


Figure 2 – Exemple de mesures d'un essai

Les tableaux 3 et 4 présentent le programme expérimental ainsi que les mesures du tassement maximal en surface et de la flèche maximale de la nappe géosynthétique.

Les essais avec le sable fin et le rapport  $H/D=0,5$  ont été répétés pour les deux modes d'ouverture A (Tableau 3) et B (Tableau 4), les résultats ont montré une bonne répétabilité des tests. Les différences observées sur la flèche du géosynthétique  $d_g$  peuvent être attribuée à l'état initial de la nappe qui n'est pas aisé à reproduire.

Tableau 3. Essais réalisés avec le mode d'ouverture A.

Essais	$d_s$ (mm)	$d_g$ (mm)	$Ce_1$	$Ce_2$
$S_f/A/0,5/1,40^1$	19	30	1,023	1,044
$S_f/A/0,5/1,41^2$	22	32	1,018	1,043
$S_f/A/1,0/1,38$	14	32	1,018	1,025
$S_f/A/1,5/1,39$	6	27	1,014	1,016
$S_G/A/0,5/1,45$	18	35	1,035	1,028
$S_G/A/1,0/1,45$	13	31	1,018	1,030
$S_G/A/1,0/1,50$	11	33	1,022	1,032
$S_G/A/1,0/1,50$	14	28	1,015	1,026
$S_G/A/1,5/1,44$	2	27	1,016	1,019
$G/A/0,5/1,34$	23	29	1,012	1,009
$G/A/1,0/1,32$	17	29	1,012	1,026
$G/A/1,5/1,30$	8	36	1,019	1,028

## 5 RESULTATS ET ANALYSE

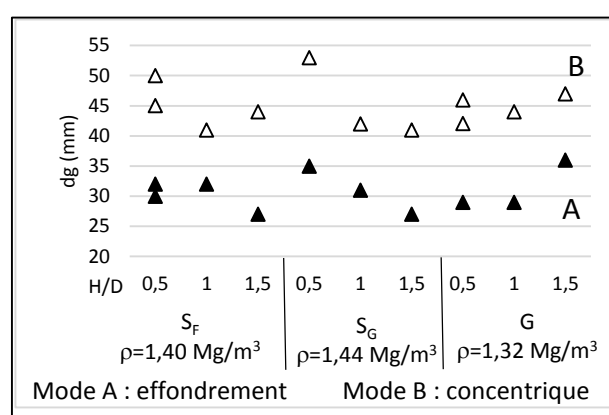
### 5.1 Influence du mode d'ouverture

La figure 3 présente les valeurs de la flèche maximale  $d_g$  du géosynthétique pour les deux modes d'ouverture A et B et pour les différentes configurations géométriques et les trois sols testés. On observe que l'ouverture concentrique (Mode B) amène systématiquement à des flèches supérieures que celles obtenues dans les mêmes conditions pour un effondrement vertical (Mode A). Cette observation confirme les résultats de l'étude numérique menée par Villard et al. (2016).

Tableau 4. Essais réalisés avec le mode d'ouverture B.

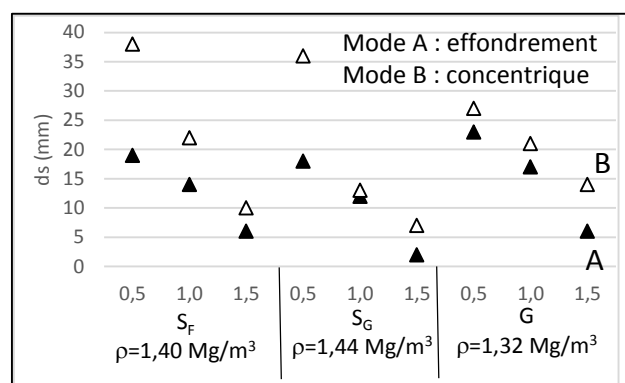
Essais	$d_s$ (mm)	$d_g$ (mm)	$Ce_1$	$Ce_2$
$S_f/B/0,5/1,41^1$	38	50	1,024	1,032

$S_f/B/0,5/1,41^2$	38	45	1,015	1,035
$S_f/B/1,0/1,40$	22	41	1,019	1,026
$S_f/B/1,5/1,39$	10	44	1,023	1,016
$S_G/B/0,5/1,45$	36	53	1,033	1,044
$S_G/B/0,5/1,50$	26	45	1,037	1,059
$S_G/B/0,5/1,57$	25	41	1,032	1,061
$S_G/B/0,5/1,64$	9	34	1,049	1,071
$S_G/B/1,0/1,44$	13	42	1,029	1,017
$S_G/B/1,5/1,44$	7	41	1,023	1,022
$G/B/0,5/1,32^1$	27	46	1,036	1,055
$G/B/0,5/1,32^2$	27	42	1,032	1,036
$G/B/1,0/1,32$	21	44	1,023	1,022
$G/B/1,5/1,31$	14	47	1,022	1,033


 Figure 3 – Influence du mode d'ouverture sur  $d_g$ 

### 5.2 Influence du rapport H/D sur les tassements

La figure 4 montre l'influence du rapport  $H/D$  sur le tassement en surface  $d_s$ . On observe que le tassement en surface diminue avec l'augmentation de la hauteur du remblai pour un diamètre de cavité donné. Cependant, même pour un rapport de  $H/D = 1,5$ , le plan d'égal tassement n'est pas encore atteint.


 Figure 4 – Influence du rapport  $H/D$  sur  $d_s$ 

### 5.3 Analyse du foisonnement

#### 5.3.1 Forme du sol effondré au droit de la cavité

Les mesures du tassement en surface ont montré que pour 80 %

des essais l'effondrement au droit de la cavité était cylindrique. Les cas où l'effondrement est de forme tronconique se produisent plutôt pour de faibles ratio H/D et l'ouverture du cône reste faible (< 10°).

### 5.3.2 Calcul du coefficient de foisonnement

La méthode proposée pour déterminer la flèche maximale du géosynthétique pour un critère de tassement en surface donné consiste à considérer que la déformée du géosynthétique et la déformée en surface sont des paraboloïdes de révolution. Cette hypothèse forte permet d'aboutir à l'équation suivante :

$$ds = dg + 2H \cdot (1 - Ce_1) \quad (1)$$

Aucune étude n'a à ce jour permis de définir avec précision une règle générale permettant de fixer la valeur du coefficient de foisonnement  $Ce$ .

Les essais réalisés dans notre étude ont permis de déterminer à partir des mesures  $ds$  et  $dg$ , les coefficients de foisonnement  $Ce_1$  en supposant que les déformées sont des paraboloïdes de révolution.

De plus, pour chaque essai, une fonction a été calée sur la déformée du géosynthétique et la déformée en surface, il a été montré que :

- la déformée de la nappe géosynthétique pouvait être approchée par une fonction polynomiale d'ordre 4,
- la déformée du sol en surface pouvait être approchée par une fonction gaussienne.

A partir des fonctions polynomiale  $f(x)$  et gaussienne  $g(x)$  définies entre le centre de la cavité et son rayon, il est possible de déterminer les volumes  $V_s$  et  $V_g$  tels que :

$$V_s = \int_0^{R_0} \pi \cdot g^2(x) \cdot dx \quad \text{et} \quad V_g = \int_0^{R_0} \pi \cdot f^2(x) \cdot dx \quad (2)$$

Le coefficient de foisonnement  $Ce_2$  est alors déterminé par la relation suivante :

$$Ce_2 = \frac{V_f}{V_i} = 1 + \frac{V_g - V_s}{\pi \cdot H \cdot \frac{D^2}{4}} \quad (3)$$

$V_i$  étant le volume du cylindre de sol situé au droit de la cavité.

### 5.3.3 Comparaison entre les coefficients de foisonnement estimés par les différentes méthodes

Les tableaux 3 et 4 présentent les valeurs des coefficients de foisonnement calculés par les deux méthodes (Equation 1 et 3).

On note que les valeurs de coefficients de foisonnement calculées par la méthode parabolique varient entre 1,01 et 1,04 qui sont des valeurs communément adoptées pour le dimensionnement des géosynthétiques sur cavité pour ces types de matériaux. On note aussi des différences non négligeables entre les coefficients obtenus par la méthode parabolique et ceux déterminés à partir de la mesure exacte des déformées. Dans 80 % des cas, la méthode exacte donne un coefficient de foisonnement supérieur. Bien que l'hypothèse des paraboloïdes de révolution ne permette pas de se caler sur les courbes de tassement réelles mesurées, elle donne des coefficients de foisonnement qui vont dans le sens de la sécurité.

### 5.3.4 Influence de la densité sur le foisonnement

L'influence de la densité a été testée sur l'essai avec le sable grossier  $S_g$ , pour une ouverture concentrique (Tableau 4) et un

ratio  $H/D = 0,5$  pour des indices de densités  $I_D$  variant de 0 à 0,66 correspondant respectivement à des masses volumiques de  $1,45 \text{ Mg/m}^3$  à  $1,64 \text{ Mg/m}^3$ . On note que la densité influence le coefficient de foisonnement : il augmente avec la densité, ce qui semble correspondre à sa définition.

## 6 CONCLUSION

Une nouvel appareil a été conçu et développé pour simuler des effondrements localisés sous une plateforme granulaire renforcée à sa base par une nappe géosynthétique. Cet appareillage permet de simuler deux modes d'ouverture de la cavité. Les résultats des premiers essais réalisés sur un géosynthétique de renforcement et trois sols granulaires mis en œuvre dans un état lâche sont encourageants. L'appareillage et la procédure de mise en œuvre permettent d'obtenir des résultats répétables. Ces premiers essais ont permis de mettre en évidence l'influence du mode d'ouverture de la cavité sur la déflexion du géosynthétique, validant des études numériques antérieures. Des mesures précises des tassements en surface et de la déformée de la nappe géosynthétique ont aussi permis de mettre à défaut l'hypothèse simplifiée d'un paraboloïde de révolution utilisée dans le dimensionnement courant pour définir la déformée maximale de la nappe en fonction du critère de tassement en surface et d'un coefficient de foisonnement. Ce coefficient de foisonnement pourrait d'ailleurs être renommé coefficient de déconfinement ce qui correspondrait mieux aux mécanismes développés au droit de la cavité. De nouveaux essais seront réalisés avec des géosynthétiques plus déformables et des densités de sol plus grandes. L'instrumentation actuelle sera complétée par des mesures très précises de la distribution de charge après ouverture de la cavité pour améliorer la compréhension des mécanismes mis en jeu et enrichir les méthodes de dimensionnement actuelles.

## 7 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour son soutien dans Laboratoire commun PITAGOR (Plateforme d'Innovations Technologiques Appliquées aux Géosynthétiques des Ouvrages Renforcés) dans lequel ce travail s'inscrit.

## 8 REFERENCES

- Briançon L. et Villard P. 2006. Dimensionnement des renforcements géosynthétiques de plates-formes sur cavités. *Revue Française de Géotechnique* 117 (4), pp 51-62.
- Briançon L. and Villard P. 2008. Design of geosynthetic-reinforced platforms spanning localized sinkholes. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (5), 416-428.
- Huckert A. Briançon L. Villard P. and Garcin P. 2016. Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: experimental and analytical approaches. *Geotextile and Geomembrane* 44(3), 442-456.
- Villard P. Huckert A. and Briançon L. 2016. Load Transfer Mechanisms In Geotextile-Reinforced Embankments Overlying Voids: Numerical Approach And Design. *Geotextile and Geomembrane* 44 (3), 381-395.
- Villard P. and Briançon L. 2008. Design of geosynthetic reinforcements for platforms subjected to localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal* 45 (2), 196-209.