

# DIMENSIONNEMENT DES REMBLAIS RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUE EN ZONES SUJETTES À EFFONDREMENT – BILAN DES CONNAISSANCES

## DESIGN METHODS FOR REINFORCED EMBANKMENTS SUBJECTED TO LOCALIZED SINKHOLES – STATE OF KNOWLEDGES

Pascal VILLARD<sup>1</sup>, Laurent BRIANCON<sup>2</sup>, Philippe DELMAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire 3S-R, UJF – INP - CNRS, Grenoble, France.

<sup>2</sup> Conservatoire National des Arts et Métiers, Chaire de Géotechnique, Paris, France.

**RÉSUMÉ** – L'une des solutions techniques couramment utilisées pour prévenir les risques d'incidents graves liés à la présence de cavités souterraines consiste en la mise en place, à la base des remblais routiers ou ferroviaires, d'un renforcement de type géosynthétique. L'objectif du renforcement est de limiter, en cas d'une remontée de fontis, les tassements de surface à des valeurs admissibles jusqu'à ce qu'une opération de comblement et de réparation puisse être effectuée. Même si des avancées récentes ont permis d'améliorer les méthodes de dimensionnement, celles-ci ont un domaine d'applications limité qu'il convient de respecter. Les hypothèses fondamentales qui régissent ces méthodes de dimensionnement sont exposées et leurs domaines de validité discutés.

**Mots-clés** : Renforcement, Géosynthétique, Dimensionnement, Effondrement Localisé.

**ABSTRACT** – A commonly adopted solution to prevent the risk due to localized sinkholes consists in the set up of a reinforced geosynthetic at the base of the construction of highways or railway lines. The aim of this reinforcement is to reduce the settlement at the surface to acceptable values when a sinkhole appears. Even if new developments have improved the design, their applications are limited to granular soils. This paper presents the fundamental assumptions commonly adopted and their validity domains are discussed.

**Keywords**: Reinforcement, Geosynthetic, Design, Localised sinkhole

### 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. Les techniques de reconnaissance de ces cavités ne permettent en général pas de détecter les cavités de manière exhaustive et les travaux de comblement sont souvent très onéreux sans pouvoir systématiquement apporter la garantie d'une solution pérenne. L'incidence du risque d'effondrement localisé de surface, qui subsiste pour les infrastructures de transport est d'autant plus préjudiciable lorsqu'elle se situe en déblai ou, lorsqu'en remblai, l'épaisseur de celui-ci est réduite. Depuis quelques années, le développement de la technique de renforcement par géosynthétique positionné à la base des plateformes a permis d'apporter des solutions pour limiter temporairement les conséquences d'un effondrement localisé tout en répondant à la maîtrise des déformations et des tassements de surface nécessaires à la poursuite du trafic. Le dimensionnement de ces structures est basé sur des hypothèses simplificatrices fortes qui correspondent à des domaines d'applications bien particuliers et qu'il convient de rappeler.

En France, les premières études menées sur cette thématique dans le cadre du projet R.A.F.A.E.L (Gourc et al., 1999) (Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés) ont débouché sur une méthode de dimensionnement simplifiée qui est à l'heure actuelle largement utilisée (Blivet et al., 2001 ; Villard et al., 2002). Cette méthode a été récemment reformulée (Briançon et Villard, 2006 - 2008 ; Villard et Briançon 2008) par la prise en compte de nouvelles hypothèses émises sur la base d'expérimentations complémentaires menées spécifiquement (Nancey et al., 2004 ; Briançon et al., 2005) pour prendre en considération des mécanismes plus complexes jusqu'alors négligés comme les déplacements et les déformations de la nappe géosynthétique dans les zones d'ancrage, ou l'augmentation des contraintes verticales au bord de la cavité.

Quoi qu'il en soit, un certain nombre de points reste problématique (comme la détermination du coefficient de foisonnement pour les remblais granulaires) et de nombreuses hypothèses peuvent encore être mises en défaut (notamment pour des applications mettant en œuvre des sols traités). Un

certain nombre de points doivent donc être élucidés pour permettre une utilisation plus large de cette technique de renforcement.

## 2. Hypothèses qui régissent les méthodes de dimensionnement

Les méthodes de dimensionnement analytiques actuelles sont basées sur des démarches similaires qui consistent à évaluer successivement les charges agissant sur le géosynthétique, les tensions et les déplacements de la nappe au dessus et éventuellement de part et d'autre de la cavité et les tassements de surface. Chacune de ces étapes implique des hypothèses simplificatrices qui restreignent fortement le domaine de validité des méthodes analytiques existantes. On se propose ici de faire un état des connaissances quant à ces méthodes de dimensionnement pour préciser leur domaine d'applications et pour souligner les points obscurs qui restent à explorer. Si la validité de la méthode de dimensionnement est un point crucial quant à l'application de cette technique, la définition du problème (géométrie et cinématique d'effondrement) en est un autre. Des sondages, des études géotechniques et des essais de caractérisation en laboratoire sont indispensables à la bonne définition de la problématique.

### 2.1. Evaluation des charges agissant sur la nappe géosynthétique

L'évaluation de la charge agissant sur le géosynthétique est peut être l'un des points les plus sensibles des méthodes actuelles car faisant appel à des mécanismes complexes. En effet, l'effondrement du sol situé sous la nappe va engendrer des déformations importantes et une réorganisation des charges au sein du remblai. Il en résulte un transfert de charge vers les bords de la cavité et donc une diminution des efforts agissant sur la nappe géosynthétique. Suivant la nature du sol (matériau granulaire ou cohésif) et les géométries considérées, les mécanismes impliqués sont vraisemblablement différents. On imagine assez bien la mise en place de mécanismes de transferts de charge ou d'effet voûte dans les matériaux granulaires suite à un effondrement progressif du sol sous-jacent et des mécanismes de poutre et de ruptures brutales pour les matériaux cohésifs. A noter qu'à ce jour, on dispose de peu de retours d'expériences ou d'informations précises quant à ces mécanismes complexes agissant dans le corps de remblai.

Suite aux travaux réalisés dans le cadre du programme de recherches R.A.F.A.E.L. (Gourc et al., 1999 ; Villard et al., 2000) la méthode d'équilibre limite développée à l'origine par Terzaghi (1943), qui suppose que le sol immédiatement au-dessus de la cavité s'effondre suivant une colonne verticale entre les masses de sol adjacentes qui sont restées stables, a été retenue pour déterminer la charge agissant sur la nappe géosynthétique (Fig.1a).

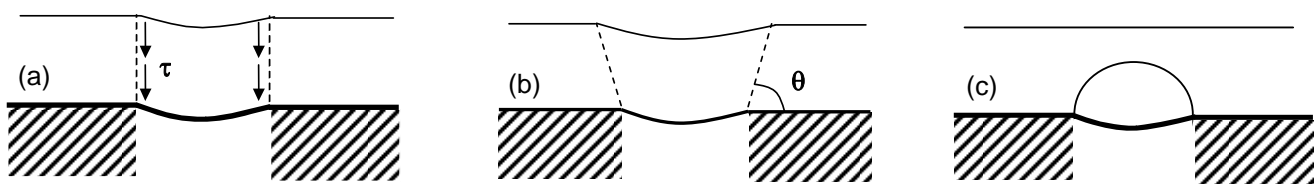


Figure 1. Géométries des zones d'effondrement proposées.

La résistance au cisaillement mobilisée par frottement sur la périphérie de la colonne de sol effondré induit une réduction des efforts sur la nappe géosynthétique au droit de la cavité. L'équilibre d'un tronçon cylindrique de sol effondré permet d'établir une relation entre la charge  $q$  agissant sur la nappe géosynthétique et les charges appliquées. Cette hypothèse de calcul simple est largement utilisée, cependant, sa validité par rapport à la problématique des remblais renforcés n'a pas été clairement démontrée et certains aspects, comme notamment la valeur du coefficient  $K$  (rapport entre les contraintes horizontales et contraintes verticales au droit des zones effondrées) nécessaire à la détermination des efforts de cisaillement, sont encore largement discutés (Handy, 1985 ; Mc Kelvey, 1994). A noter que certaines méthodes de dimensionnement supposent des mécanismes différents (Fig.1). Par exemple la méthode BS8006 (1995) suppose un effondrement du sol suivant un cône d'effondrement (Fig.1b).

### 2.2. Evaluation des tensions et déplacement de la nappe géosynthétique

Les déplacements et les tensions dans la nappe géosynthétique, faisant suite aux efforts qui lui sont appliqués, résultent de son comportement en membrane et de sa déformation par mise en tension dans les zones situées de part et d'autre de la cavité. Les paramètres influents sont la raideur en traction  $J$  de la nappe géosynthétique et le comportement d'interface via les angles de frottement aux interfaces supérieures et inférieures  $\delta$ . Par opposition aux mécanismes inhérents aux plates-formes granulaires, le comportement de la nappe géosynthétique est à l'heure actuelle relativement bien connu que se soit par des modèles numériques tridimensionnels (Villard et Giraud, 1998) qui permettent de prendre en compte la nature fibreuse du géosynthétique (chaque direction de fibre  $y$  est représentée) ou que se soit par des formulations analytiques bidimensionnelles établies moyennant quelques hypothèses simplificatrices.

Les formulations analytiques utilisées dans les méthodes de dimensionnement pour décrire le comportement en membrane de la nappe géosynthétique (Giraud, 1995) supposent que la nappe géosynthétique est unidirectionnelle (une direction de renfort privilégiée), que la charge  $q$  agissant sur la nappe est répartie uniformément et que le comportement en traction de la nappe géosynthétique est élastique linéaire. L'équilibre d'une portion de nappe, permet d'établir une relation entre la tension maximale dans la nappe  $T_{max}$ , la charge appliquée  $q$ , la déformation maximale dans la nappe  $\varepsilon_{max}$ , la raideur du géosynthétique  $J$  et le diamètre  $D$  de la cavité. Ces formulations sont classiquement utilisées dans la majorité des méthodes de dimensionnement mais il est bon de souligner que les premières formulations proposées supposent que la nappe géosynthétique est ancrée aux bords de la cavité ce qui va à l'encontre de la sécurité quant à l'estimation des tassements de surface.

Des développements récents (Briançon et Villard, 2008 ; Villard et Briançon 2008) ont été proposés pour prendre en considération le comportement de la nappe géosynthétique dans les zones situées de part et d'autre de la cavité (Fig.2). On observe, dans ces zones, lors de l'effondrement du sol de remblai sur la nappe, des déformations plus ou moins importantes qui résultent des efforts de frottement mobilisés dans ces portions de nappe par un mécanisme d'ancrage. Ces déformations participent à l'augmentation de la longueur de nappe au-dessus de la cavité ce qui conduit à des accroissements des déplacements verticaux de la nappe et des tassements de surface. Les lois de frottement considérées aux interfaces sol/géosynthétique sont des lois de frottement de Coulomb définies par un angle de frottement à l'interface  $\delta$  et une longueur caractéristique  $U_0$  qui représente le déplacement à partir duquel le frottement maximal peut être mobilisé.

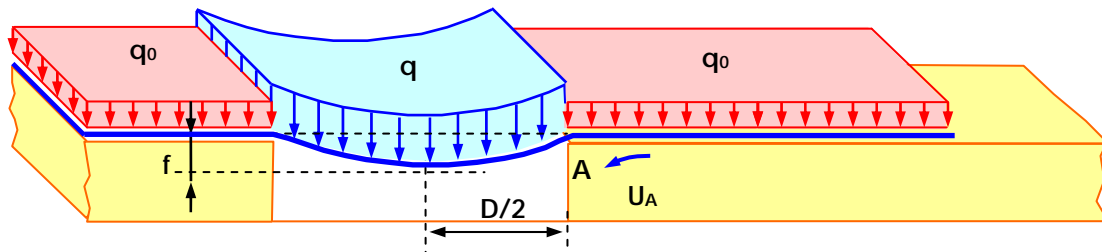


Figure 2. Comportement de la nappe géosynthétique de part et d'autre de la cavité.

Le changement d'orientation de la nappe géosynthétique au bord de la cavité (point A) a été pris en considération ce qui permet d'intégrer l'augmentation locale des contraintes ainsi que la diminution de tension dans la nappe qui en résulte (principe de l'équilibre limite d'un corps frottant sur un arc circulaire). De plus des conditions aux limites spécifiques ont été introduites (nappe ancrée à un point fixe ou extrémités libres) ce qui permet entre autre de déterminer les déformations et les tensions de la nappe dans les zones de recouvrement.

### 2.3. Evaluation des tassements de surface

Lors de l'effondrement du sol de remblai sur la nappe celui-ci se trouve fortement remanié. Suivant la nature de l'effondrement (effondrement progressif ou effondrement brusque) et en fonction de la nature du sol de remblai considérée (matériau granulaire, sol traité ou matériau cohésif) les mécanismes observés peuvent être très différents. A ce sujet, peu de données précises sont disponibles à l'heure actuelle, notamment en ce qui concerne les mécanismes de rupture ou d'effondrement pour les remblais cohésifs ou traités.

Pour les sols granulaires, un coefficient de foisonnement ou d'expansion  $C_e$  est introduit pour prendre en considération l'augmentation de volume du sol consécutif à son remaniement lors de l'effondrement. Ce paramètre, difficilement quantifiable, car non sujet à un essai normalisé, a une influence importante

sur le dimensionnement (Briançon et Villard, 2006). Une réflexion approfondie quant à un protocole d'essai semble nécessaire.

De par la prise en considération d'un coefficient de foisonnement pour le sol effondré les déplacements attendus en surface sont inférieurs à ceux obtenus au niveau de la nappe géosynthétique. En effet le volume libéré lors de la déformation de la nappe géosynthétique est partiellement comblé par l'augmentation de volume du sol lors de son expansion par désenchevêtrement et par cisaillement (Fig.3). En supposant que le foisonnement s'applique à la totalité du sol effondré, ce qui n'est vraisemblablement pas toujours le cas si des mécanismes d'effondrement en blocs sont constatés, il est possible d'établir une relation entre le tassement de surface  $s$ , la flèche maximale du géosynthétique  $f$ , le coefficient de foisonnement du sol  $C_e$ , et la hauteur du remblai  $H$ .

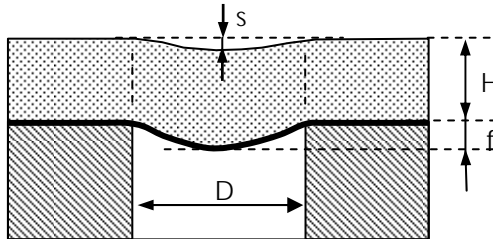


Figure 3. Mécanisme de foisonnement.

Comme on vient de l'évoquer, ce mécanisme d'expansion du sol suite à son effondrement reste problématique et a une importance cruciale sur le dimensionnement. En effet les critères de dimensionnement sont essentiellement des critères géométriques de surface qui doivent garantir, même après formation d'une cavité sous le remblai, une traficabilité acceptable jusqu'à ce qu'une intervention de comblement puisse être envisagée. Soulignons le fait que les mécanismes pris en compte actuellement dans les méthodes de dimensionnement semblent plus adaptés pour décrire les phénomènes qui peuvent survenir dans les remblais granulaires soumis à des effondrements progressifs. L'utilisation d'un coefficient de foisonnement pour des sols traités n'a à l'heure actuelle aucun fondement avéré et ne s'appuie sur aucun résultat expérimental.

#### 2.4. Synthèse des hypothèses et domaines d'application

Les méthodes de dimensionnement usuelles prennent en considération une cinétique d'effondrement du sol sur la nappe qui permet une réduction des contraintes sur la nappe. Un mécanisme dérivé de l'équilibre d'un cylindre de sol en mouvement entre des zones fixes est souvent adopté. Cette réduction de contraintes est fonction des caractéristiques géométriques du remblai : diamètre de la cavité, hauteur du remblai et frottement intergranulaire. La cohésion du remblai, dans l'hypothèse d'un effondrement du sol sur la nappe, n'est en général jamais prise en considération pour le dimensionnement.

L'effet membrane est pris en compte grâce à des formulations analytiques établies en 2D qui s'appliquent donc à des nappes unidirectionnelles (nappes renforcées dans une direction). Pour des cavités circulaires et pour des applications mettant en œuvre plusieurs directions de renforcement (nappes superposées ou nappes présentant des rigidités différentes), les tassements de surface peuvent être obtenus, en première approximation, en considérant une rigidité équivalente à l'ensemble des directions de renforts considérées ( $J=J_1+J_2$ ).

Des hypothèses fortes sont émises quant à la répartition des charges sur la nappe (charge uniformément répartie) et quant au comportement de la nappe en traction (comportement élastique linéaire). La répartition uniforme sur la nappe est vraisemblablement le point le plus critiquable, notamment lorsque des effondrements en blocs ou des mécanismes de poinçonnement sont attendus. Pour des comportements de la nappe géosynthétique fortement non linéaires, le recours à un calcul itératif est nécessaire pour faire correspondre une raideur sécante du géosynthétique  $J(\varepsilon)$  aux déformations obtenues ( $\varepsilon$ ).

Les méthodes de dimensionnement les plus récentes prennent en considération des mécanismes plus complexes jusqu'alors négligés comme les déplacements et les déformations de la nappe géosynthétique dans les zones situées de part et d'autre de la cavité, ou l'augmentation des contraintes verticales au bord de la cavité. Deux paramètres régissent ces mécanismes : l'angle de frottement d'interface et le déplacement maximal  $U_0$  devant être atteint pour mobiliser le frottement maximal. Si  $U_0$  a une influence faible sur le dimensionnement, l'angle de frottement d'interface est prépondérant quant au dimensionnement (Briançon et Villard, 2008). La détermination de  $U_0$  peut s'avérer problématique. Des valeurs comprises entre 5 mm et quelques centimètres peuvent être considérées si l'on tient

compte des ondulations et des plis de la nappe consécutifs à sa mise en œuvre. A noter que dans les zones de recouvrement il convient de considérer l'interface entre les deux nappes géosynthétiques qui a des caractéristiques mécaniques moindres que celles obtenues entre le sol et la nappe.

Les tassements de surface sont estimés en prenant en considération un coefficient de foisonnement du sol. Actuellement, la littérature fait état de valeurs de  $C_e$  allant jusqu'à 1,15 pour des sols de remblai à forte granularité, mais des valeurs de 1,03 à 1,1 semblent plus appropriées pour des matériaux de remblai courants.

### 3. Principe de dimensionnement

Des formules analytiques ont été établies en considérant des conditions limites différentes pour traiter du dimensionnement de la nappe géosynthétique dans les zones courantes des ouvrages linéaires (remblais routiers ou ferroviaires) et dans les zones de recouvrement (Briançon et Villard, 2008). Il s'est avéré que le dimensionnement de la nappe dans les zones de recouvrement conduit à des déplacements en surface plus importants consécutivement à des valeurs d'angles de frottement plus faibles dans ces zones (frottement géosynthétique/géosynthétique) et à des conditions aux limites particulières (extrémités libres). Ceci implique des glissements de la nappe plus importants et donc une augmentation des déplacements verticaux au niveau de la nappe et en surface. En contrepartie les tensions dans la nappe sont diminuées comparativement à celles obtenues dans les zones courantes (pas d'extrémités libres).

La résolution des équations d'équilibre proposée dans la méthode de dimensionnement (Villard et Briançon, 2008) est itérative puisqu'une tension forte dans la nappe implique des déformations et des glissements importants qui ont tendance à réduire les tensions effectives dans la nappe. Une programmation de l'ensemble des formules de dimensionnement dans un tableur a donné lieu à la réalisation d'un logiciel de dimensionnement.

Lorsque la géométrie du projet est clairement établie (diamètre de la cavité et hauteur de remblai à mettre en place), le dimensionnement consiste à déterminer un type de géosynthétique (raideur, tension de rupture et déformation admissible en service) qui permette de vérifier les critères géométriques de surface. Les formules analytiques établies dans les zones courantes de l'ouvrage et dans les zones de recouvrement (ou zone à extrémité libre) doivent être conjointement considérées. Les formules établies dans les zones courantes donnent une tension maximale et un taux de déformation à ne pas dépasser. Celles établies dans les zones de recouvrement permettent de définir la raideur du géosynthétique et la longueur de recouvrement à mettre en œuvre de telle sorte que les critères géométriques de surface soient respectés.

Dans la phase projet (hauteur et nature du remblai non définis) il est possible d'optimiser le dimensionnement par la recherche simultanée d'un couple de valeurs (raideur du géosynthétique et hauteur de remblai). En effet, une hauteur de remblai élevée permet une diminution de la raideur du renforcement, inversement une rigidité élevée permet la mise en œuvre de remblai de faible épaisseur.

### 4. Validation et prospectives

Les méthodes de dimensionnement sont établies moyennant des hypothèses simplificatrices qu'il convient de respecter. Pour des applications sortant du cadre des prescriptions émises il est nécessaire de mettre en œuvre des modèles numériques plus sophistiqués jusqu'à ce qu'un mécanisme simplifié soit proposé. C'est dans ce cadre et pour répondre à des problématiques complexes telles que les remblais traités qu'un code de recherche spécifique a été développé.

A défaut de tout autre point de comparaison, la potentialité du modèle numérique à rendre compte du comportement des ouvrages renforcés a été éprouvée par comparaison entre des simulations numériques et des expérimentations en vraie grandeur réalisées dans des conditions maîtrisées (Briançon et al., 2005). Elles ont consisté à réaliser un effondrement localisé sous une plate-forme de ballast de 50 cm d'épaisseur renforcée à sa base par une nappe géosynthétique. Les déformations du géosynthétique ont été mesurées dans les zones d'ancrage et dans la zone centrale située au dessus de la cavité par des capteurs à fibres optiques (Procédé Géodetec - Nancey et al., 2004). Les déplacements verticaux de la nappe ont été mesurés lors de l'effondrement. Cette application présente un intérêt particulier pour valider le modèle numérique puisqu'elle permet de prendre en considération le comportement évolutif du sol granulaire lors de l'effondrement, les mécanismes de transfert de charge et de foisonnement de la couche granulaire, l'interaction sol/renforcement et notamment la mobilisation par

frottement du géosynthétique dans les zones d'ancrage. De plus, les hypothèses qui régissent cette application (remblai granulaire, problème plan, renforcement unidirectionnel et chargement uniformément réparti) autorisent la comparaison avec les méthodes de dimensionnement existantes.

Le code de calcul utilisé est basé sur un couplage entre les méthodes aux éléments finis et aux éléments discrets. Le modèle éléments finis met en oeuvre des éléments triangles à trois nœuds de faible épaisseur (Villard et Giraud, 1998) qui permettent de rendre compte du comportement spécifique du géosynthétique et de son interface avec le sol (Le Hello et al., 2006). Le comportement de chaque direction de fibres est considéré dans la matrice de comportement de l'élément, ce qui permet de rendre compte des comportements en traction et en membrane de la nappe géosynthétique (pas d'efforts de flexion et de compression dans les fibres). Le modèle discret utilisé pour la modélisation du sol granulaire met en oeuvre des particules sphériques qui peuvent être associées sous forme de cluster pour mieux rendre compte du comportement spécifique des sols naturels. Ces particules se déplacent indépendamment les unes des autres au gré des sollicitations qui leurs sont imposées. En conséquence, des éléments en contact à un instant donné peuvent se séparer alors que d'autres initialement très éloignées peuvent entrer en contact. L'intérêt du modèle discret réside, de par son principe de discrétisation d'un matériau par un ensemble de particules, dans sa capacité à reproduire certains mécanismes spécifiques aux sols (foisonnement, cisaillement, transfert de charge, etc.).

Les paramètres pris en considération dans le modèle numérique correspondent aux caractéristiques réelles des matériaux utilisés. La nappe géosynthétique est un géotextile non tissé renforcé dont la raideur en traction dans la direction du renforcement est  $J=1100$  kN/m et dont la tension à la rupture est  $T_{\max}=125$  kN/m. Elle est modélisée par 1360 éléments finis triangulaires d'épaisseur 5 mm. Le remblai granulaire est constitué d'un sol grossier (20/40 mm) de poids volumique  $17$  kN/m<sup>3</sup> et dont l'angle de frottement interne au pic a été estimé à  $44^\circ$ . Il est modélisé (Fig.4) par 10000 clusters de longueur  $1,5$  d constitués de deux particules de diamètre  $d$  imbriquées ( $d$  compris entre  $0,02$  m et  $0,04$  m). Les angles de frottement aux interfaces sol/géosynthétique sont respectivement  $30^\circ$  et  $25^\circ$  pour les interfaces inférieure et supérieure. La cavité a une largeur de  $2$  m.

Les mécanismes servant de base de comparaison entre le modèle numérique, l'expérimentation et les formules analytiques de dimensionnement sont : la mise en tension de la nappe dans la zone d'ancrage (Fig.5), les déplacements verticaux de la nappe géosynthétique (Fig.6) et les déplacements des particules du remblai granulaire (Fig.4).

La comparaison des résultats montre que le modèle numérique permet de reproduire de façon satisfaisante les principaux mécanismes impliqués pendant l'effondrement du remblai renforcé : mise en tension de la nappe dans les zones d'ancrage (Fig.5), augmentation des déformations (et des tensions dans la nappe) au droit de la cavité (Fig.6), effet membrane de la nappe (Fig.4), foisonnement du sol et transfert de charge dans le matelas granulaires. Comparativement les résultats numériques en déformations obtenus au dessus de la cavité mettent en évidence des mécanismes de transfert et de report de charge dans le matelas granulaire qui ne sont pas pris en compte dans le modèle analytique qui est basé sur l'hypothèse d'une charge répartie uniforme appliquée sur le géotextile.

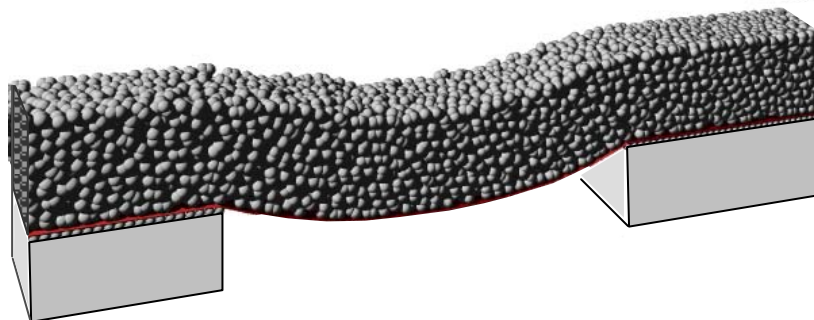


Figure 4. Discretisation du remblai granulaire (après effondrement).

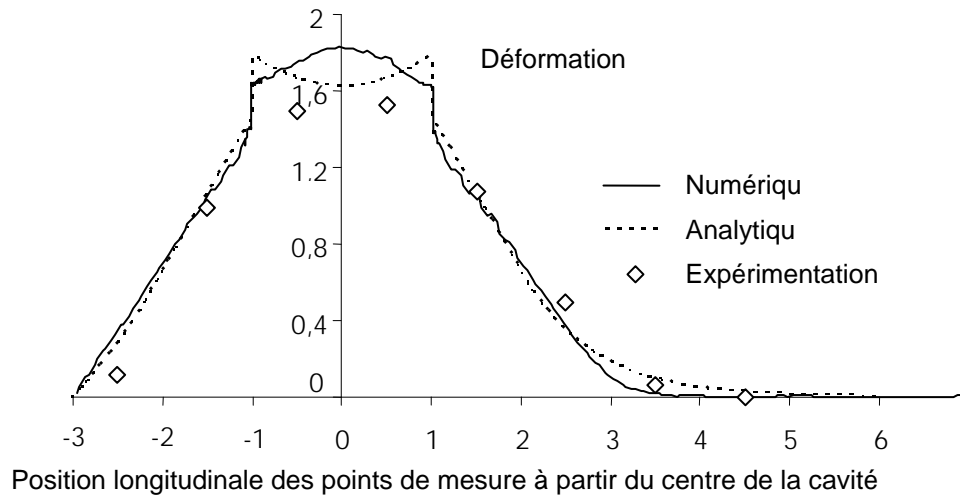


Figure 5. Comparaison des déformations numériques, analytiques et expérimentales.

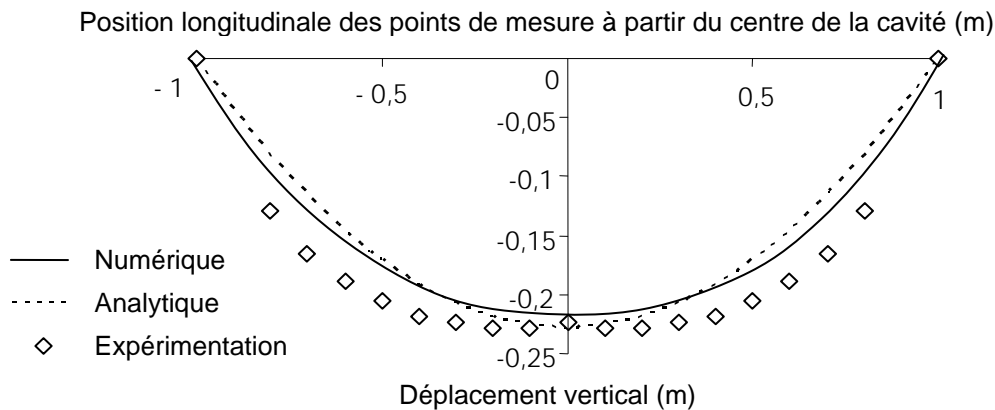


Figure 6. Comparaison des déplacements verticaux numériques, analytiques et expérimentaux.

Au travers de cette application on montre que la méthode de dimensionnement appliquée dans le respect de ses hypothèses permet d'approcher de façon très satisfaisante le comportement des remblais granulaires de faible hauteur (pour des fortes hauteurs, on peut s'attendre à des mécanismes d'effet voûte et de transfert de charge qui ont vraisemblablement des implications plus importantes sur la validité de l'hypothèse d'une charge uniforme répartie). La potentialité du modèle numérique à rendre compte des mécanismes sophistiqués inhérents à la problématique étudiée a été démontrée sur une expérimentation réalisée dans des conditions maîtrisées. L'extension à des problèmes plus complexes avec prise en compte d'un comportement de sol cohésif est d'ores et déjà possible mais le manque de données expérimentales limite fortement la portée des résultats qui pourront être obtenus. Des retours d'expériences et des expérimentations complémentaires nous semblent indispensables à la finalisation de ce travail.

## 5. Conclusions

Nous avons tenu au travers de cet article à rappeler les hypothèses fondamentales qui régissent les méthodes de dimensionnement relatives aux renforcements de sols en zones d'effondrements potentiels et avons présenté les développements et améliorations récemment effectuées. Bien qu'il subsiste quelques interrogations (notamment sur la détermination du coefficient de foisonnement des sols) la méthode, confrontée à des résultats expérimentaux en vraie grandeur, montre qu'elle semble bien adaptée pour les remblais granulaires de faible épaisseur. À l'heure actuelle, et dans l'attente d'études complémentaires, le recours à un code numérique pour des applications plus complexes, semble nécessaire. L'évolution des travaux futurs nécessite un retour d'expérience et des études complémentaires.



## 6. Références bibliographiques

- Blivet J.C., Khay M., Gourc J.P., Giraud H. (2001). Design considerations of geosynthetic for reinforced embankments subjected to localized subsidence. *Proceedings of the Geosynthetics'2001 Conference*, February 12-14, 2001, Portland, Oregon, USA, 741-754.
- Briançon L., Nancey A., Villard P. (2005). Development of Geodetect: a new warning system for the survey of reinforced earth constructions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, XXVII (1-2), 23-32.
- Briançon L., Villard P. (2006). Dimensionnement des renforcements géosynthétiques de plates-formes sur cavités. *Revue Française de Géotechnique*, n° 117, 4<sup>e</sup> trimestre 2006, pp 51-62.
- Briançon L., Villard P. (2008). Design of geosynthetic reinforcements of platforms subjected to localised sinkholes. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 26, 5: 416-428.
- British Standard BS 8006 (1995). *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*, British Standard Institution, London, 162p.
- Gourc J.P., Villard P., Giraud H., Blivet J.C., Khay M., Imbert B., Morbois A., Delmas Ph. (1999). Sinkholes beneath a reinforced earthfill – A large scale motorway and railway experiment. *In proceedings of Geosynthetics' 99*, Boston, Massachusetts, USA, 28-30 April 1999, 2: 833-846.
- Handy R.L. (1985). The arch in arching. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111 (50), pp. 302-318.
- Le Hello B., Villard P., Nancey A., Delmas P. (2006). Coupling finite elements and discrete elements methods, application to reinforced embankment by piles and geosynthetics géosynthétiques, 6<sup>th</sup> *European Conference*, Graz, Austria, 06-08 September 2006, 6 pages.
- Mc Kelvey III J.A. (1994). The anatomy of soil arching. *Geotextiles and Geomembranes*, 13, pp. 317-329.
- Nancey A., Briançon L., Villard P. (2004). The first intelligent geosynthetic for measurements of strain soil and the survey of reinforced earth construction. *Proc. of Railway Engineering*, London, UK, 6-7 July 2004, 9 pages.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. New York, Wiley.
- Villard P., Giraud H. (1998). Three-Dimensional modelling of the behaviour of geotextile sheets as membrane. *Textile Research Journal*, 68: 797-806.
- Villard P., Gourc J.P., Giraud, H. (2000). A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal*, October 2000, vol. 37, pp. 987-999.
- Villard P., Gourc J.P., Blivet J.C. (2002). Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires. *Revue Française de Géotechnique*, n°99, pp. 23-34.
- Villard P., Briançon L. (2008). Design of geosynthetic reinforcements of platforms subjected to localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 45, n°2 pp. 196-209.