

DIMENSIONNEMENT D'UN GEOSYNTHETIQUE DE RENFORCEMENT POUR LA REHAUSSE D'UNE ISDND

DESIGN OF GEOSYNTHETIC REINFORCEMENT FOR THE EXTENSION OF OLD LANDFILL

Abdelkader ABDELOUHAB¹, Marie TANKERE², François CARTAUD³,

¹ *Texinov, France*

² *Deltaval, France*

³ *Egis, France*

RÉSUMÉ – Cet article présente le projet d'extension de l'ISDND de Champigny (département de l'Yonne) ainsi que la méthode de dimensionnement utilisée pour estimer les efforts de traction qui seront repris par le géosynthétique de renforcement. Le calcul est basé sur la méthode RAFAEL, qui est une référence pour le dimensionnement de géosynthétiques pour la sécurisation contre l'affaissement ou l'effondrement de sols.

ABSTRACT – This paper presents the extension project of the old landfill in Champigny in France and the design method used to estimate the tensile strength of the geosynthetic reinforcement required for this project. The design is based on the RAFAEL method, which is a reference method for the design of geosynthetics used to prevent against the soil subsidence.

1. Introduction

Les projets d'extension des anciennes Installations de Déchets Non Dangereux (ISDND) se sont accélérés ces dernières années à cause des contraintes économiques et environnementales qui rendent difficile, voire impossible selon les cas, la création de nouvelles installations. En effet, l'installation des ISDND est de moins en moins acceptable dans les zones urbanisées, c'est pourquoi leur impact environnemental et visuel doit être limité, ainsi que leur emprise au sol : ceci conduit fréquemment à envisager l'extension des ISDND existantes. Ces projets d'extension se font par la construction de nouveaux casiers en appui total ou partiel sur des casiers plus anciens. Ces derniers sont généralement non conformes à la réglementation actuelle et nécessitent la mise en place de dispositifs d'étanchéité complémentaires. Dans le cas d'une extension verticale, en appui essentiellement sur le sommet d'un casier existant, il faut s'assurer de l'intégrité des dispositifs d'étanchéité du nouveau casier vis-à-vis des tassements différentiels des déchets anciens. C'est dans ce cadre que des géosynthétiques de renforcement sont installés au sommet de l'ancien casier afin de reprendre les efforts apportés par les déchets du nouveau casier et de limiter ainsi les tassements différentiels.

A ce jour, malgré quelques retours d'expérience de projets réalisés avec succès, il semble qu'il n'existe pas de méthode de dimensionnement reconnue permettant de calculer précisément les efforts de traction que doit reprendre le géosynthétique de renforcement afin de maîtriser les tassements différentiels. La méthode RAFAEL a été utilisée dans le cas du projet d'aménagement de l'extension de l'ISDND de Champigny (département de l'Yonne). Les hypothèses ainsi que les paramètres de calcul sont présentés dans cet article, afin de contribuer à la communication d'exemples d'installations pérennes et au développement de cette méthode.

2. Présentation du projet

2.1 Objectif du projet

Le projet consiste à agrandir une ISDND par la superposition d'une nouvelle aire de stockage des déchets sur une ancienne zone, la surface concernée représente environ 12 000 mètres carrés. Cette superposition de nouveaux déchets sur 22 mètres d'épaisseur entraîne un tassement de la zone support, ce qui risque d'endommager le complexe d'étanchéité (géomembrane et niveau drainant). Pour éviter cela, il a été décidé d'installer un géotextile de renforcement afin d'assurer un "effet membrane" et de le dimensionner pour limiter sa déformation à 3 %.

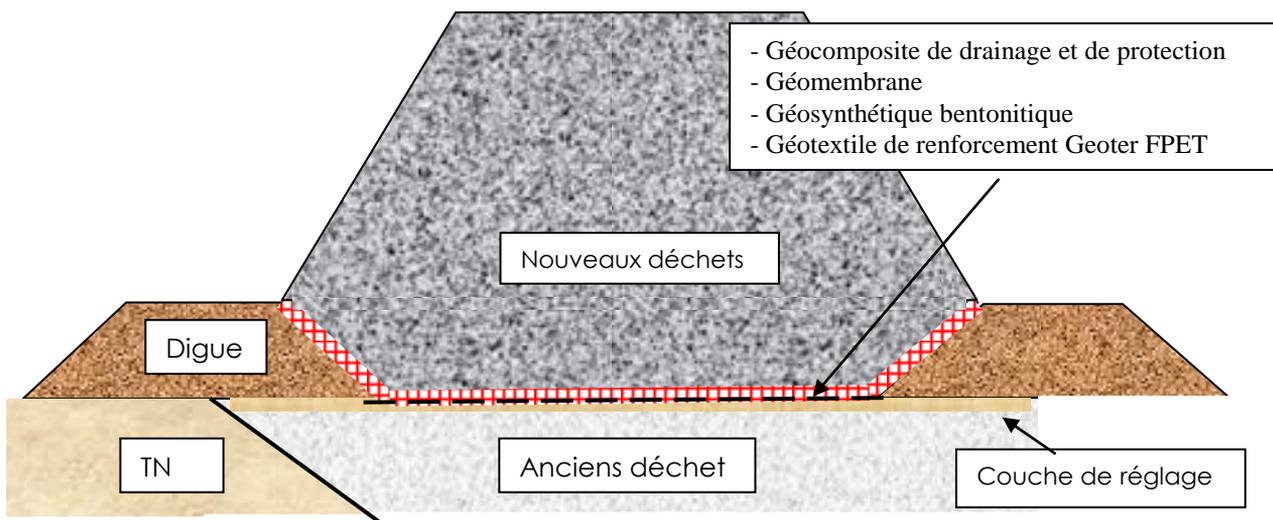


Figure 1. Coupe schématique de la rehausse de l'ISDND de Champigny, casier C

2.2 Situation géographique et conditions géologiques

L'ISDND de Champigny-sur-Yonne est située au Nord du département de l'Yonne (89), à 30 Km à l'Ouest de Fontainebleau. Le site est exploité depuis 1981 pour le stockage de déchets provenant du département de l'Yonne et principalement de sa zone Nord. Le Maître d'Ouvrage est la société COVED. Le stockage des déchets se fait en remblayant par phases successives les vides de fouille créés par terrassements. L'activité de traitement des déchets est autorisée depuis 1981 puis a été reconduite en 2004 au profit de COVED. Le projet d'extension fait suite au dossier de demande « d'Autorisation d'Exploiter » réalisé en juin 2008 permettant le stockage de 1 100 000 mètres cubes de déchets non dangereux au sein des casiers A, B, C et D. Les travaux concernent en premier lieu le casier C. Sa superficie en fond est de l'ordre de 13 000 mètres carrés, en surélévation au droit de cellules existantes 0 à 3.

Une partie du projet d'extension est située hors zone de stockage de déchets, au sein de sols remaniés résultant de l'activité humaine en surface et d'origine naturelle quand on atteint une certaine profondeur. On rencontre ainsi des colluvions et remblais sur des épaisseurs de 3.5 à 6.0 m, des calcaires puis une dalle de grès discontinue surmontant des sables et argiles d'âge Stampien sur une épaisseur de plusieurs mètres (jusqu'à 7.60 m). Le socle en dessous est constitué de craies Campaniennes dont l'épaisseur est de plus de 30 m.

L'étude hydrogéologique a montré l'absence de venues d'eaux dans les sables et dans la craie lors des reconnaissances. Il n'est pas fait mention explicitement à la présence d'une nappe.

2.3 Les travaux d'étanchéité et de renforcement

2.3.1. Etanchéité

Les travaux d'étanchéité du casier C se font par géosynthétiques. Dans un premier temps, la couche de terres de couverture (d'une épaisseur moyenne de 50 cm) a été décapée après démontage du réseau de dégazage mis en place sur les anciennes cellules 0 à 3. Une fois le niveau des anciens déchets atteint, une couche de sables fins (type sable de Fontainebleau) a été mise en œuvre afin d'égaliser la surface de pose des géosynthétiques et de créer les pentes de fond du futur casier permettant de diriger les lixiviats vers les points bas du nouveau casier C. Sur cette couche sableuse soigneusement réglée, le géotextile de renforcement est mis en place, puis un géosynthétique bentonitique (GSB) est installé, enfin une géomembrane PEHD lisse 2 mm est posée sur le GSB. Au-dessus de cette géomembrane, un géocomposite de drainage et de protection, est posé en substitution partielle du niveau drainant. En couverture de casier C, une fois comblé par les déchets déplacés et modelés, un géofilm ép.=0,75 mm est provisoirement appliqué pour dégazage temporaire et couverture des déchets.

2.3.2. Renforcement

Le casier C créé dans le cadre de l'extension se superpose en grande partie de sa surface sur les anciennes cellules 0 à 3. Le tassement des déchets sous-jacents, sous l'effet de la charge apportée par les nouveaux déchets, est donc inévitable. L'utilisation d'un géosynthétique bentonitique puis une géomembrane PEHD en fond et flancs du casier C, nécessite de limiter les déformations pour éviter l'endommagement de l'étanchéité active par les efforts de tractions qui se développent suite aux tassements du support (anciens déchets).

Donc afin de maîtriser les déformations, un géosynthétique de renforcement est prévu pour reprendre les efforts par « effet membrane » (Figure 2). Cette méthode a démontré son efficacité dans d'autres projets de configuration similaire.

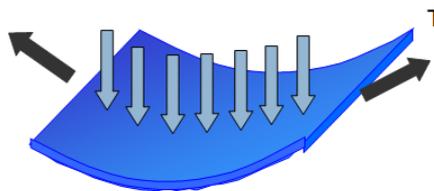


Figure 2 : Illustration de l'effet membrane

Le géotextile utilisé dans ce cas sera à base de polymère résistant dans le temps aux contraintes mécaniques et aux conditions chimiques d'une ISDND.

Le géotextile est posé en fond de forme du casier C et s'arrête en pied de digue périphérique. Le complexe d'étanchéité, quant à lui, remonte sur les flancs pour être ancré en haut de la digue périphérique à la fin des travaux (Figures 1 et 3).



Figure 3. Pose du Geoter FPET et mise en place des déchets (Sources : Egis et Texinov)

3. Hypothèses et paramètres de calcul

3.1 Méthode de calcul

Le tassement différentiel ou l'affaissement excessif éventuel des anciens déchets peut être assimilé à un affaissement de sol ou à un effondrement de cavité, d'où l'utilisation d'un géotextile de renforcement pour sécuriser la zone d'affaissement. La méthode de calcul RAFAEL est utilisée pour estimer la résistance du géotextile nécessaire. Cette méthode de dimensionnement issue des expérimentations réalisées dans le cadre du projet RAFAEL s'appuie sur la théorie de Terzaghi pour le calcul de la contrainte verticale sur le géosynthétique au droit de la zone d'affaissement. La déformée et les tensions du renforcement sont obtenues par un calcul en membrane où, par hypothèse, la nappe géosynthétique ne se déplace pas dans son ancrage et reste fixée en bord de cavité. Cette méthode a été validée et n'a cessé d'être améliorée et optimisée dans plusieurs travaux de recherches (Gourc et al 1999, Blivet, et al 2001, Villard et al 2002, Briançon et Villard 2006, Huckert et al 2013, Delmas et al 2015).

3.2 Paramètres de calcul et dimensions de l'ouvrage

A la base, la méthode RAFAEL s'applique au cas de remblais granulaires auxquels il est possible d'attribuer un facteur de foisonnement, défini comme le rapport du volume de sol foisonné par le volume de sol avant foisonnement. Dans le cas de ce projet le coefficient de foisonnement des matériaux de déchets peut être pris égal à 1. Celui-ci n'a pas d'incidence sur le résultat de calcul car il n'y a pas d'exigence particulière concernant la déflexion en surface.

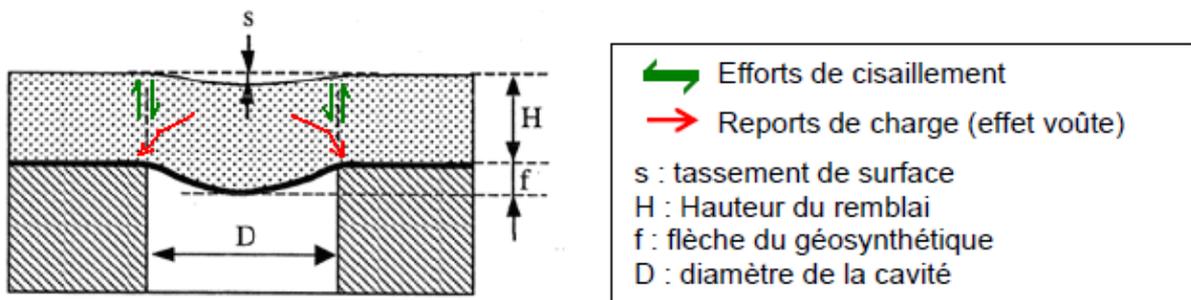


Figure 4. Principe de fonctionnement d'un géosynthétique de renforcement sur cavité (sources : Huckert et al. 2014, Projet Geolnov, Méthode Rafael appliquée par Briançon et Villard, 2006)

Le diamètre de la zone de tassement ou d'effondrement éventuel pris en compte dans le calcul est de 2 m. En effet, il est considéré que le tassement différentiel se produit entre deux points durs espacés de 2 m maximum. Ce diamètre est défini par rapport à la nature des déchets susceptibles de tasser lors du compactage ou à long terme par dégradation ou consolidation dans le casier sous-jacent.

La hauteur du casier est de 22 m au maximum (dénivelé le plus important entre haut de nouveau casier C et fond de forme). Pour les remblais de hauteur $H > 3D$, le calcul s'effectuera sur une hauteur de $3D$ maximum. En effet, au-delà d'un ratio de $H/D=3$, un effet de voûte se crée et stabilise le volume de sol sus-jacent (Lawson and Yee 2011, Delmas et al 2015). La hauteur de sol à prendre en compte dans le calcul est limitée donc dans ce cas à $3 \cdot D = 3 \cdot 2 = 6$ m.

Les paramètres géotechniques pris en compte pour les déchets sont : le poids volumique de 9 kN/m^3 , l'angle de frottement de 18° et la Cohésion de 0 kPa . La cohésion est en réalité proche de 22° , le choix d'affecter une valeur de 0 kPa est sécuritaire, en effet il existe un risque de perte de cohésion à long terme.

Le critère dimensionnant dans ce projet est la déflexion du géosynthétique qui ne doit pas dépasser 3%. Cette valeur correspond à la déformation admissible en service que pourrait subir la géomembrane en gardant toutes ses performances d'étanchéité. La déformation de rupture pour une géomembrane PEHD de 2,0 mm d'épaisseur est inférieure à 6%.

Le géosynthétique de renforcement est dimensionné pour une durabilité de 120 ans. En conséquence, tous les facteurs de durabilité sont pris en compte, à savoir : le fluage à long terme, l'endommagement à la mise en œuvre, la durabilité chimique et le coefficient de sécurité sur la résistance du géosynthétique conformément au guide ISO TR 20432, à la norme NF P 94270 et à la norme NF G 38064.

Des coefficients de sécurité partiels sont appliqués selon l'Eurocode 7- calcul géotechnique. Pour un calcul à l'ELS ces coefficients sont ramenés à 1. Pour un calcul à l'ELU, un coefficient de 1,35 est appliqué au poids volumique du sol et aux surcharges permanentes, quant aux surcharges variables, le coefficient appliqué est de 1,5.

3.3 Calcul de la résistance de traction requise

La déformation maximale autorisée au niveau du géosynthétique est $\varepsilon_{\max} = 3\%$. A partir de cette déformation et après avoir déterminé la contrainte verticale exercée sur le géosynthétique (en prenant en compte les coefficients partiels sur les matériaux et les surcharges), on calcule la résistance de traction nécessaire $R_{t;d}$ (résistance de calcul à long terme) pour garantir une déformation maximal ε_{\max} :

$$R_{t;d} = \frac{\sigma_v D}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon_{\max}}}$$

$R_{t;d}$ permet ensuite, de déterminer la résistance de traction ultime du géosynthétique requis (résistance à court terme R_t), en appliquant les facteurs de réduction :

$$R_t = R_{t;d} * RF_{\text{fluage}} * RF_{\text{endommagement}} * RF_{\text{chimique}} * \gamma_{m,t}$$

A partir de la résistance requise à court terme R_t , on choisit un géosynthétique dont la résistance caractéristique en traction $R_{t;k}$ est supérieure ou égale à R_t .

$$R_{t;k} \geq R_t$$

Ce calcul est vérifié à l'ELS et à l'ELU. Le calcul à l'ELS consiste à déterminer la résistance R_t pour la déformation de service ($\varepsilon_{\max} = 3\%$). Le calcul à l'ELU consiste à déterminer la résistance R_t pour une déformation qui correspond à la rupture du renforcement ou de la géomembrane (on dimensionne selon le cas le plus défavorable).

3.4 Facteurs de réduction

RF_{fluage} :

Le facteur de réduction lié au fluage permet de considérer l'influence du fluage sur la résistance en traction des renforcements géosynthétiques et de limiter les déformations pendant la durée de vie de l'ouvrage. Pour le calcul à l'ELU, on utilise le coefficient de fluage correspondant à la rupture physique du produit alors que pour un calcul à l'ELS, on utilise le coefficient de fluage correspondant à un allongement de fluage maximal, entre la fin de construction et la durée d'utilisation. Dans ce deuxième cas, on se reporte aux courbes isochrones. Les deux critères sont généralement vérifiés pour ce type de projet même si le cas le plus dimensionnant est souvent le calcul à l'ELS où l'utilisation des courbes isochrones est indispensable.

RF_{endommagement}

Ce facteur de réduction correspond à l'endommagement des géosynthétiques de renforcement lors de leur installation et le compactage des remblais. Il dépend de plusieurs paramètres liés à la fois au type de géosynthétique (type de polymère, fabrication, masse surfacique...) et aux conditions de l'ouvrage (matériau de remblai, conditions de mise en œuvre, épaisseur de la couche compactée...).

RF_{chimique}

Le facteur de réduction lié au vieillissement (hydrolyse, oxydation) des géosynthétiques de renforcement dépend également du type de produit (polymer PET, PVA, PP, PE, Aramide...) et des conditions de l'environnement du produit. Dans le cas des décharges, le risque de contact direct ou indirect avec les déchets exclut d'office l'utilisation de certains polymères.

$\gamma_{m,t}$:

Facteur partiel pour la résistance du géosynthétique de renforcement vis-à-vis d'une rupture par traction. Selon la NF G 38064, la valeur à affecter à ce facteur partiel à l'ELU est de 1,25.

3.5 Calcul de l'ancrage et du recouvrement des nappes géotextiles

3.5.1. Ancrage et recouvrement longitudinal

Il est nécessaire de déterminer un recouvrement longitudinal entre chaque nappe et un ancrage au bord. Pour l'ancrage, on prend en compte le frottement sol/géosynthétique, quant au recouvrement, on considère le frottement sol/géosynthétique sur une face et un frottement géosynthétique/ géosynthétique pour l'autre face.

Le principe de calcul est le même pour les deux cas :

$$L_L = \frac{T_{\max} * \gamma_{mf}}{\left[(\gamma * H + Q) * (C_{i\Phi_1} * \tan\Phi) \right] + \left[(\gamma * H + Q) * (C_{i\Phi_2} * \tan\Phi) \right]}$$

T_{max} : Force d'ancrage à reprendre = $R_t ; d$

γ_{mf} : Coefficient partiel sur la résistance au cisaillement interne selon L'Eurocode 7 = 1,35

Q : Surcharge permanente

ϕ : Angle de frottement interne des matériaux de couverture

H : Hauteur des matériaux au-dessus du géosynthétique

γ : Poids volumique des matériaux de couverture

$C_{i\phi}$: Coefficient d'interaction à l'interface sol/géosynthétique ou géosynthétique/géosynthétique (il dépend du type de géosynthétique et des matériaux de couverture.

3.5.1. Recouvrement transversal

Le recouvrement transversal est nécessaire même pour un renforcement monodirectionnel pour assurer la continuité des nappes dans le sens travers.

La largeur de recouvrement transversal à prendre en compte dans le cas d'un renforcement monodirectionnel, est le minimum entre : $2 \cdot \varepsilon_{max} \cdot D$ et 0,5m

3.6 Prise en compte de la mobilisation progressive du frottement en ancrage

Des essais in situ et des modélisations numériques, effectués par L. Briançon et P. Villard en 2006 et en 2008, ont permis de valider la méthode RAFAEL en apportant une amélioration qui prend en compte la mobilisation progressive du frottement au niveau des ancrages. Ce comportement est lié à l'action combinée de la mise en tension de la nappe (déformation de la nappe dans les zones d'ancrages) et du glissement relatif du sol/nappe pour mobiliser le frottement. Ce comportement a été vérifié et validé dans d'autres projets de recherche et travaux expérimentaux pour le cas d'effondrement sur cavités (A. Huckert et al. 2014, Projet Geolnov). La similitude de ce phénomène avec le cas d'affaissement de déchets sous rehausse nécessite d'être étudiée même si les coefficients de sécurité utilisés actuellement permettent de couvrir suffisamment l'écart calculé avec cette nouvelle méthode.

3. Choix du Géosynthétique

Le choix du géosynthétique est fait sur plusieurs critères. Les deux critères principaux sont la résistance caractéristique du produit et la nature du polymère. Le produit choisi pour cet ouvrage est le Geoter FPVA 400 qui présente une résistance caractéristique en traction $R_{t;k}$ de 400 kN/m. Celle-ci est supérieure à la résistance de traction ultime R_t calculée en intégrant le comportement du géosynthétique dans le temps pour la durée de service. Le produit choisi est à base de polymère polyvinyle alcool (PVA) qui présente une bonne résistance chimique à long terme même au contact direct ou indirect de déchets.

4. Conclusions

L'utilisation des géosynthétiques de renforcement pour la sécurisation et la protection du complexe d'étanchéité de la rehausse de l'ISDND de Champigny-sur-Yonne est une solution techniquement et économiquement intéressante. L'expérience de ce chantier a mis en évidence la facilité et la rapidité de mise en place du renforcement.

La méthode RAFAEL, utilisée pour le dimensionnement, a permis d'estimer la résistance du géosynthétique nécessaire pour reprendre la charge des nouveaux déchets sus-jacents en cas d'affaissement des anciens déchets soit lors de compactage soit par consolidation. La méthode de calcul de géosynthétiques sur cavités (RAFAEL ou

méthodes équivalentes) est à ce jour la méthode la plus adaptée pour les projets de rehausse de décharge mais ne permet pas un dimensionnement optimisé. En effet, cette méthode est développée pour le cas d'effondrement d'un sol granulaire au-dessus d'une cavité. Les mécanismes de comportement des matériaux de déchets sont différents de ceux des matériaux granulaires. Un suivi par une instrumentation adaptée (fibre optique intégrée dans le géosynthétique de renforcement, capteurs de tassement, inclinomètre, capteur de pressions) permettrait de développer et d'adapter cette méthode pour les projets de rehausse d'ISDND.

Remerciements

Nous tenons à remercier le maître d'ouvrage Coved et à l'entreprise Guintoli qui nous ont fourni les informations nécessaires et qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de cet article.

5. 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., Villard P., 2006. Dimensionnement des renforcements géosynthétiques de plates-formes sur cavités. Revue Française de Géotechnique, n° 117, 4° trimestre 2006, pp 51-62.
- Briançon L., Metais S., Mazeas G., Page B., Tapin J.C., 2015. L'instrumentation d'une ISDND construite sur formations compressible. Rencontres Géosynthétiques 2015, La Rochelle.
- Delmas P., Villard P., et Huckert A., 2015. Dimensionnement à court terme et à long terme de structure renforcée par géosynthétique sur cavités potentielles : prise en compte de la sécurité. Rencontres Géosynthétiques 2015, La Rochelle.
- EN 1997-1 Eurocode 7- calcul géotechnique- Partie 1 : règles générales
- Guide ISO / TR 20432 2007 : les lignes directrices pour la détermination de la résistance à long terme des géosynthétiques pour le renforcement des sols.
- Guide ISO/TS 13434 : Géosynthétiques - les lignes directrices concernant la durabilité.
- Giraud H., 1997. Renforcement des zones d'effondrement localisées – Modélisations physique et numérique, PhD thesis, Université Grenoble I - Joseph Fourier, 291 p.
- Gourc, J.P., Villard, P., Giraud, H., Blivet, J.C., Khay, M., Imbert, B., Morbois, A. & Delmas P. 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.
- Huckert, A., Garcin, P., Villard, P., Briançon, L. & Auray G. 2013b. Mécanismes de transfert de charges dans les remblais sur cavités renforcés par géotextiles : approches expérimentales et numériques. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2-6 septembre 2013, Paris, 4p.
- Lawson C.R., Yee T.W., 2011. Serviceability limits of basal reinforced embankments spanning voids. Proc. Geo-Frontiers 2011, pp. 3276-3285.
- 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, 99 : 23-34.