

# **DIMENSIONNEMENT INTERACTIF, DANS UNE DÉMARCHE QUALITÉ-SÉCURITÉ-ENVIRONNEMENT, DE LA COUVERTURE D'UN TALUS DE GRANDE HAUTEUR ET DE FORTE PENTE DANS UNE ISD**

## ***INTERACTIVE DESIGN, IN A QUALITY-SAFETY-ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, OF THE FINAL COVER ON TALL AND STEEP SLOPE IN A WASTE FACILITY***

Baptiste PAGE, Laurent BRIANCON  
Antea Group, Arcueil, France

**RÉSUMÉ** – Cette communication présente l'application de la méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif de la couverture finale d'un talus équipée d'une géomembrane. Cette couverture d'Installation de Stockage de Déchets, équipée d'un dispositif d'étanchéité, est mise en œuvre sur un talus de grande hauteur, pouvant dépasser les 40 m, de forte pente, pouvant atteindre 40 degrés et situé le long d'une zone à fort enjeu environnemental. Ce projet a été conduit dans le cadre d'une démarche Qualité-Hygiène-Sécurité-Environnement initiée dès la conception et poursuivie lors de sa réalisation.

Mots-clés : ISD, Couverture, Stabilité, Géosynthétiques, Instrumentation

**ABSTRACT** – This communication presents an application of the observational method for interactive design of the final cover of a slope. This cover, with a two faces textured geomembrane, is implemented on a slope tall, exceeding 40 m, steep, up to 40 degrees and located along an area of high environmental issue. This project was conducted as part of a Quality-Health-Safety-Environmental management initiated from conception and continued during its construction.

Keywords: Landfill, Cover, Stability, Geosynthetics, Instrumentation.

### **1. Introduction**

Dans le cadre du réaménagement d'un site de Stockage de Déchets, l'arrêté préfectoral d'autorisation d'exploiter définit les prescriptions relatives à la mise en place d'une couverture provisoire puis définitive à l'issue de la phase d'exploitation des différentes alvéoles.

### **2. Constitution de la couverture finale du talus**

La couverture finale du talus, imposée par l'Arrêté Préfectoral (AP) d'autorisation d'exploiter en vigueur, élaborée sur la base du Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter (DDAE), est constituée par (Figure 1) :

- une géomembrane,
- un géosynthétique bentonitique,
- 80 cm de tout-venant,
- un géocomposite de drainage,
- 30 cm de terre végétale.

Afin de prendre en compte la réglementation en vigueur, les études préalables et la couverture provisoire préalablement mise en place, la couverture finale du talus de l'ISD, comprenant un Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) texturée des deux faces, est constituée par, du bas vers le haut (Figure 2) :

- un géotextile de protection,
- un géosynthétique de renforcement,
- une géomembrane texturée sur ses 2 faces,
- un géosynthétique bentonitique,
- un géocomposite de drainage,
- un géotextile de renforcement,
- 80 cm de tout-venant,
- 30 cm de terre végétale.

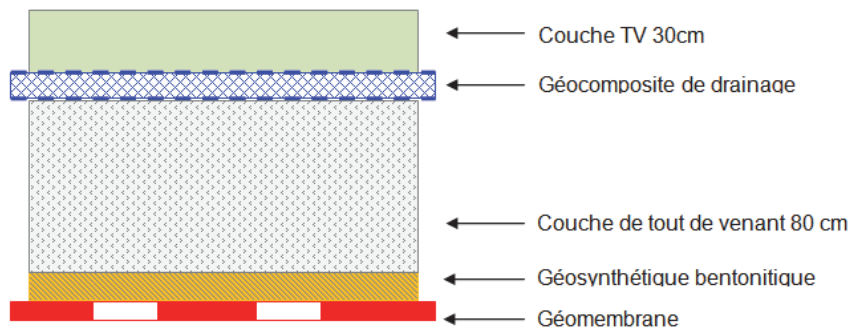


Figure 1. Constitution de la couverture finale du talus selon les exigences réglementaires.

Le géocomposite de drainage prévu initialement entre les couches de TV et de tout venant a été déplacé sur le géosynthétique bentonitique afin de protéger ce dernier des intempéries lors de sa pose et de parer à tout risque d'accumulation d'eaux sur le géosynthétique bentonitique, préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage. Un géotextile de renforcement a été ajouté sur le géotextile de drainage afin de reprendre les efforts induits par la couverture dans les zones où le géotextile de renforcement sous la géomembrane était de résistance insuffisante au regard du projet modifié.

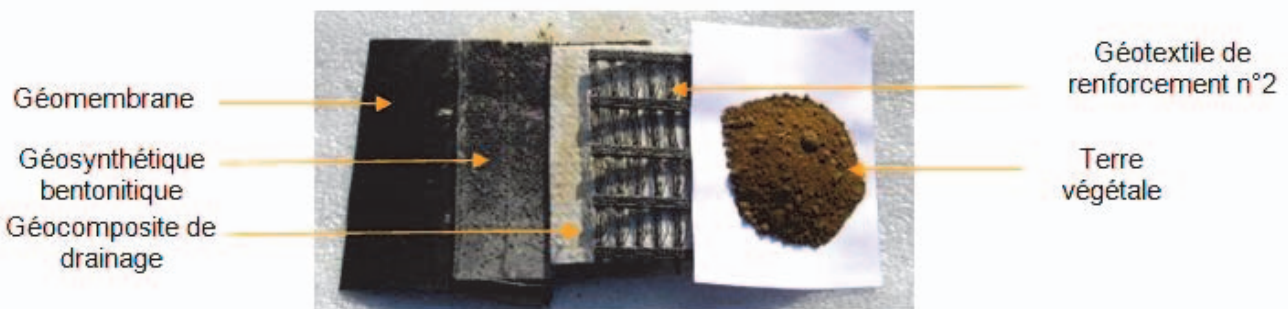
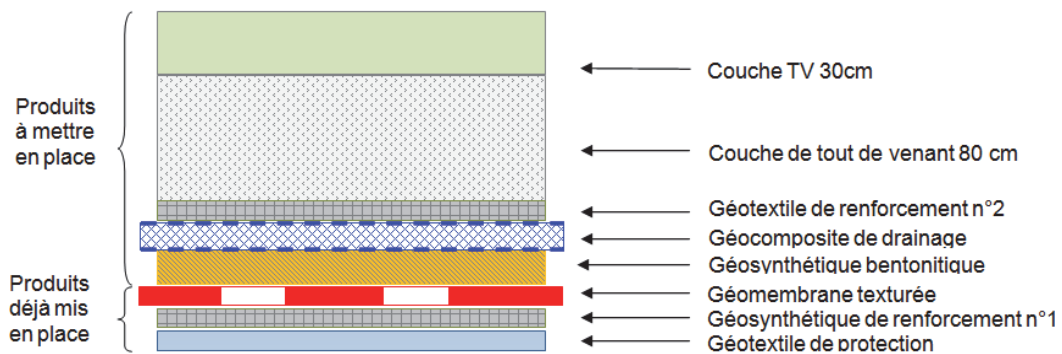


Figure 2. Constitution de la couverture finale du talus de l'ISD retenue.

### 3. Définition de la solution technique pour la couverture finale

#### 3.1. Contraintes à prendre en compte

Outre les contraintes réglementaires, les contraintes d'ordre techniques, environnementales et d'exploitation ont été préalablement identifiées.

##### 3.1.1. Contraintes techniques

Les contraintes techniques sont de différentes natures :

- *topographique* : la géométrie du talus doit être prise en compte, en termes de :
  - o hauteur (> 35 m, variable), pente (> 40 degrés, variable) ;
  - o risbermes non continues et de largeur variable ;

- espace disponible en pied de talus variable.
- *aléa sismique faible* ;
- *ouvrages existants* :
  - une couverture provisoire constituée par un géotextile de protection, un géosynthétique de renforcement n°1 et une géomembrane texturée a été, pour partie, préalablement posée ;
  - des chambres en béton abritant le dispositif de collecte des lixiviats, les réseaux de détection des éventuelles fuites et le réseau de contrôle des eaux souterraines se trouvent en pied du talus, au droit de chacune des alvéoles ;
- *constructive* : la longueur des rouleaux de géosynthétiques disponibles sur le marché peut être trop faible par rapport aux rampants du talus.

### 3.1.2. Contraintes environnementales

Le talus jouxte une *Zone Écologique Sensible (ZES)* où il n'est pas autorisé de réaliser de travaux. La présence de déchets stabilisés stockés en vrac ou en « big-bags » limite les terrassements en masse pour reprofiler les talus.

### 3.1.3. Contraintes d'ordre d'exploitation

Une piste en pied de talus doit être conservée pour permettre les *opérations d'entretien et de surveillance post-exploitation*, notamment, l'inspection des chambres de collecte des lixiviats et le dispositif de gestion des eaux pluviales.

## 3.2. Reconnaissances préalables

Les reconnaissances préalables ont porté sur *les caractéristiques géomécaniques des formations naturelles et remblais*, à savoir :

- la digue périphérique et le remblai de la Barrière de Sécurité Passive ;
- les stabilisats ;
- les matériaux de couverture provisoire ;
- les matériaux envisagés pour la couche de tout venant et de la couche végétalisable.

Des prélèvements et essais ont été réalisés suivants les normes d'essais géotechniques en vigueur, en particulier des essais triaxiaux CU+u. Ces reconnaissances ont permis de définir un modèle géotechnique (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques géomécaniques retenues pour le modèle géotechnique.

Nature des matériaux	Poids volumique ( $\gamma_n$ - kN/m <sup>3</sup> )	Angle de frottement ( $\phi'$ – degrés)	Cohésion ( $c'$ – kPa)
Schiste altéré	20	28	30
Remblai digue	20	22	5
Argile - BSP	22	25	15
Stabilisats	17	30	500
Tout venant	20	25	15

Les stabilisats présentent des caractéristiques assimilables à un mauvais béton, de part le mode le procédé de traitement consistant à inerte les déchets à l'aide d'un liant hydraulique et des polymères.

*Le comportement aux interfaces géosynthétiques* a nécessité la réalisation d'essais de frottement au plan incliné suivant la norme européenne EN ISO 12957-2 (2005) et selon la procédure « en force » (Briançon, 2001 ; Briançon et al., 2002 ; Briançon et al., 2011). Ces essais ont été réalisés pour déterminer le frottement des interfaces suivantes (Tableau 2) :

- géotextile de renforcement n°2 (GTXR2) / sol de recouvrement (TV) ;
- géocomposite de drainage (GCD) / géotextile de renforcement n°2 (GTXR2) ;
- géosynthétique bentonitique (GSB) / géocomposite de drainage (GCD) ;
- géomembrane texturée sur ses 2 faces (GMB) / géosynthétique bentonitique (GSB) ;
- géotextile de protection (GTXP) / géotextile de renforcement n°1 (GXTR1).

Tableau 2. Caractéristiques aux interfaces géosynthétiques déterminées au plan incliné

Interfaces	Procédure normalisée	Procédure « en force »	Angle de frottement retenu
GTXR2-TV	40 à 42 degrés	33 à 35 degrés	≥ 40 degrés
GCD-GTXR2	40 à 43 degrés	≥ 40 degrés	≥ 40 degrés
GSB-GCD	38 à 44 degrés	35 degrés	35 degrés
GMB-GSB	35 à 39 degrés	33 à 35 degrés	33-35 degrés
GTXP-GTXR1	17 à 20 degrés	16 degrés	16-19 degrés

À partir de ces essais, nous avons observé que la procédure normalisée de l'essai au plan incliné peut conduire à une surestimation de l'angle de frottement compte tenu de la mobilisation lente du frottement aux interfaces géosynthétiques. Pour l'interface GSB/GCD, l'angle de frottement à l'interface a été déterminé en bloquant l'essai à différente inclinaison et en attendant que le glissement se produise. Les angles de frottement réels pourraient donc potentiellement être plus faibles que ceux mesurés.

Les deux interfaces supérieures au contact de la terre végétale (GTXR2/TV et GCD/GTXR2) ne peuvent pas être dissociées puisqu'il y a un contact entre la terre végétale et la géogrille, entre la géogrille et le géocomposite de drainage mais aussi entre la terre végétale et le géocomposite de drainage (à travers les mailles de la géogrille). L'angle de frottement que l'on peut retenir pour ces deux interfaces est supérieur à 40 degrés. Cette valeur n'est pas un angle de frottement pur car il prend en compte une partie d'adhésion entre la terre végétale et les deux géosynthétiques. Les résultats en force pour ces deux interfaces semblent donner des valeurs inférieures mais la rupture brutale de ces interfaces intervenant pour des inclinaisons proches des limites d'inclinaison du plan ne permet pas une interprétation systématique.

L'angle de frottement que l'on peut retenir pour l'interface GSB-GCD est égal à 35 degrés. Cet angle a été déterminé en tenant compte de la lenteur de la mobilisation du frottement en bloquant l'inclinaison du plan pour laquelle le déplacement du boîtier supérieur se poursuit jusqu'à la rupture. Les essais normalisés (inclinaison à vitesse constante) entraînent une surestimation importante de l'angle mesuré.

L'angle de frottement que l'on peut retenir pour l'interface GMB-GSB est égal à 33-35 degrés. Cet angle a été déterminé par la procédure en force ; la procédure normalisée amène à des valeurs comprises entre 35 et 39 degrés.

L'angle de frottement que l'on peut retenir pour l'interface GTXP-GTXR1 est égal à 16-19 degrés. Cet angle a été déterminé par la procédure en force ; la procédure normalisée amène à des valeurs comprises entre 17 et 19 degrés.

Les essais réalisés selon la procédure en force semblent bien adaptés et ont mis en évidence que l'interface critique, caractérisée par l'angle de frottement minimal, n'est pas l'interface GMB/GSB, comme considéré lors de la phase de conception initiale mais l'interface GTXP/GTXR1. Cette interface se situe entre un géotextile non tissé (GTXP) et un géotextile tissé (GTXR1), positionnés sous la géomembrane texturée.

Enfin ces essais ont confirmé que l'état initial du produit est un paramètre important vis-à-vis de l'angle de frottement. En effet, les essais montrent que pour certaines interfaces, les frottements mesurés sont plus faibles pour une interface ayant déjà été sollicitée en glissement. Les angles de frottement réels pourraient donc être diminués compte tenu d'une modification de l'état de surface lors de la pose du produit ou lors de son vieillissement par sollicitations extérieures notamment les UV.

### 3.3. Méthode de dimensionnement

Le dimensionnement de la solution technique a été réalisé sur la base de deux profils types (Figure 3) en fonction de l'espace disponible entre le pied de l'ouvrage et la zone écologique sensible (ZES). Lorsque le pied du talus de la couverture projetée dépasse la limite de la ZES, un mur renforcé en géosynthétiques de 7 à 10 m de hauteur a été mis en place.

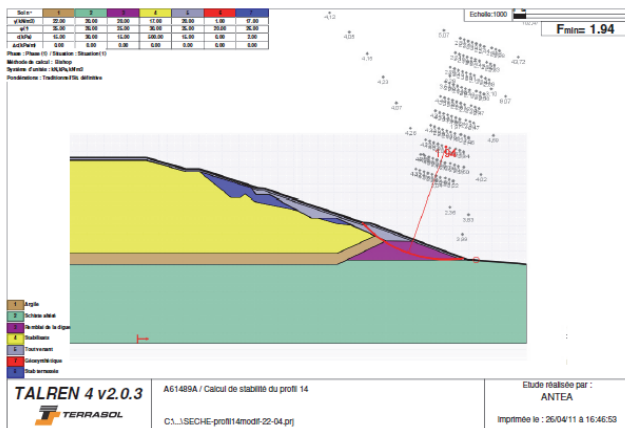
La *stabilité globale* a été vérifiée par la méthode de Bishop et en supposant une rupture sur une surface quelconque, en particulier le long du DEG, en utilisant le logiciel TALREN4.

La *stabilité locale de l'ouvrage* a été vérifiée par différentes méthodes :

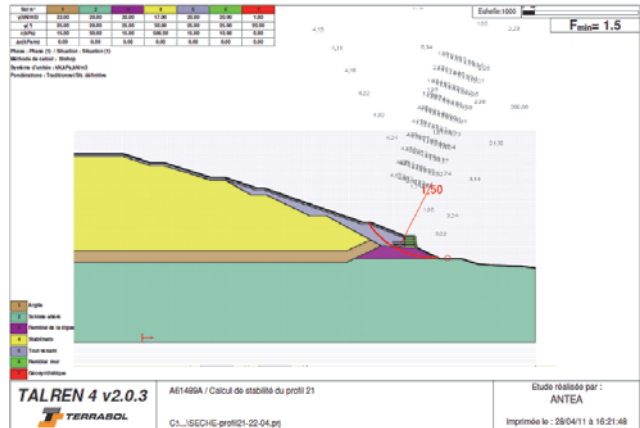
- pour *les parties avec butée de pied* : à l'aide la méthode de dimensionnement développé dans le guide « Designing with geosynthetics » (Koerner, 2005) ;

- pour les parties sans butée de pied : la méthode développée dans la norme XP G 38-067 « Géosynthétiques - géotextiles et produits apparentés - stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - justification du dimensionnement et éléments de conception » ;
- pour le mur renforcé en géosynthétiques : la méthode développée dans la norme NF P 94-270 « Calcul géotechnique-Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué ».

La première phase de calcul a été réalisée sur 5 profils types. Pas moins de 20 profils ont ensuite été étudiés pour prendre en compte les variabilités spatiales et géométriques de l'ouvrage. Des tests de sensibilité des caractéristiques géomécaniques des formations modélisées et de l'angle de frottement critique du DEG ont également été réalisés. La figure 3 présente une vue des deux profils géotechniques, respectivement avec et sans mur renforcé en géosynthétiques, modélisés à l'aide du logiciel TALREN4.



Profil type avec talus



Profil type avec mur renforcé en géosynthétiques

Figure 3. Exemple de calcul de stabilité.

Compte tenu de la difficulté à prévoir le comportement géotechnique d'un ouvrage, il a été décidé de mettre en place la méthode observationnelle, dans laquelle la conception est revue pendant la construction en suivant à l'aide d'un plan d'instrumentation et de contrôle, si le comportement réel est compris dans les limites acceptables de l'ouvrage.

#### 4. Application de la méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif dans le cadre d'une démarche QHSE

##### 4.1. Suivi et contrôles lors de la réalisation

Le programme de contrôles, défini dans le cadre de la période de préparation, porte sur :

- la topographie avec un suivi en continu par un géomètre ;
- l'étanchéité avec contrôles visuel, non destructif (mise en pression du canal central de l'ensemble des doubles soudures) et destructif des soudures par du personnel certifié ASQUAL ;
- les terrassements avec contrôles de compactage hebdomadaire par essais au gamma-densimètre et à la plaque et de la perméabilité des argiles.

##### 4.2. Instrumentation du dispositif d'étanchéité par géomembrane texturée

Un dispositif d'instrumentation a été mis en place afin d'appliquer la méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif de la couverture en vue d'optimiser l'ancrage, voire la constitution du DEG.

Ce dispositif d'instrumentation inclut des capteurs :

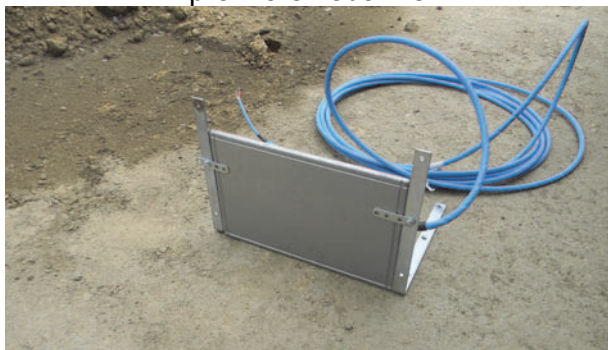
- de déplacement (Figure 4a et 4b) ;
- de force au niveau de la tranchée d'ancrage ;
- de pression totale en pied de l'ouvrage (Figure 4c).



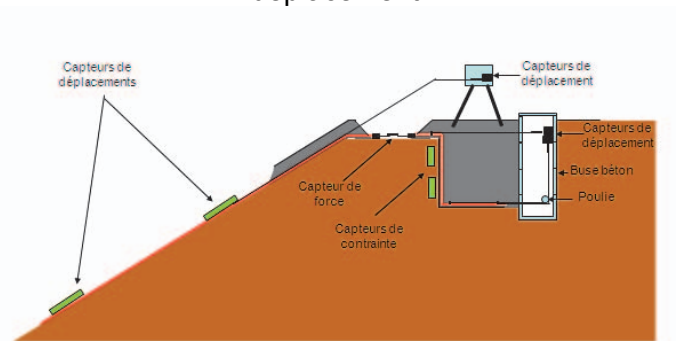
a. Capteurs de déplacement installés sur la première risberme



b. Câbles de connexion pour la mesure du déplacement



c. Capteur de pression disposé en pied de talus



d. Dispositif de mesure final (crête de talus)

Figure 4. Schéma de principe et photographiques du dispositif d'instrumentation du DEG.

Les capteurs de déplacement ont dans un premier temps été installés au niveau du premier talus pour suivre la première phase de remblaiement (point A de la figure 5). Les capteurs de déplacement ont été positionnés sur le géotextile de renforcement n°1, soit au niveau de l'interface critique. Après remblaiement du talus 1, le dispositif a été déplacé au niveau du talus 2 (point B de la figure 5). Les capteurs de déplacement ont alors été installés sur le géotextile de renforcement n°1 (sous la géomembrane) et sur le géotextile de renforcement n°2 (sur la géomembrane).

Le capteur de force sera installé sur la crête du talus lorsque les travaux de remblaiement atteindront le dernier talus. Les capteurs de déplacement seront alors transférés du second talus au dernier talus (Figure 4d).

La figure 5 présente l'évolution des déplacements mesurés en fonction du temps. L'analyse de ce graphique met en avant que le déplacement augmente au fur et à mesure de la montée des remblais pour atteindre une valeur de l'ordre de 20 à 70 mm pour un rampant total d'environ 40 ml pour les deux talus soit entre 0,10 à 0,20% du rampant. La majeure partie de ce déplacement peut s'expliquer par un réagencement des géosynthétiques les uns avec les autres. Les déplacements mesurés au niveau du GTXR1 (sous la géomembrane) et du GTXR2 (sur la géomembrane) ont une cinétique similaire mettant en avant le transfert des efforts de géosynthétique en géosynthétique ;

Par ailleurs, les mesures ont pu être impactées par les travaux à proximité du dispositif de mesure, en particulier lors des travaux de :

- mise en place du géotextile de renforcement n°2 (point C) ;
- mise en place du merlon de gestion des eaux pluviales au niveau du talus n°2 (point D) ;
- étanchéité et de remblaiement du talus 3 (point E).

L'interprétation des mesures doit donc prendre en compte ces perturbations.

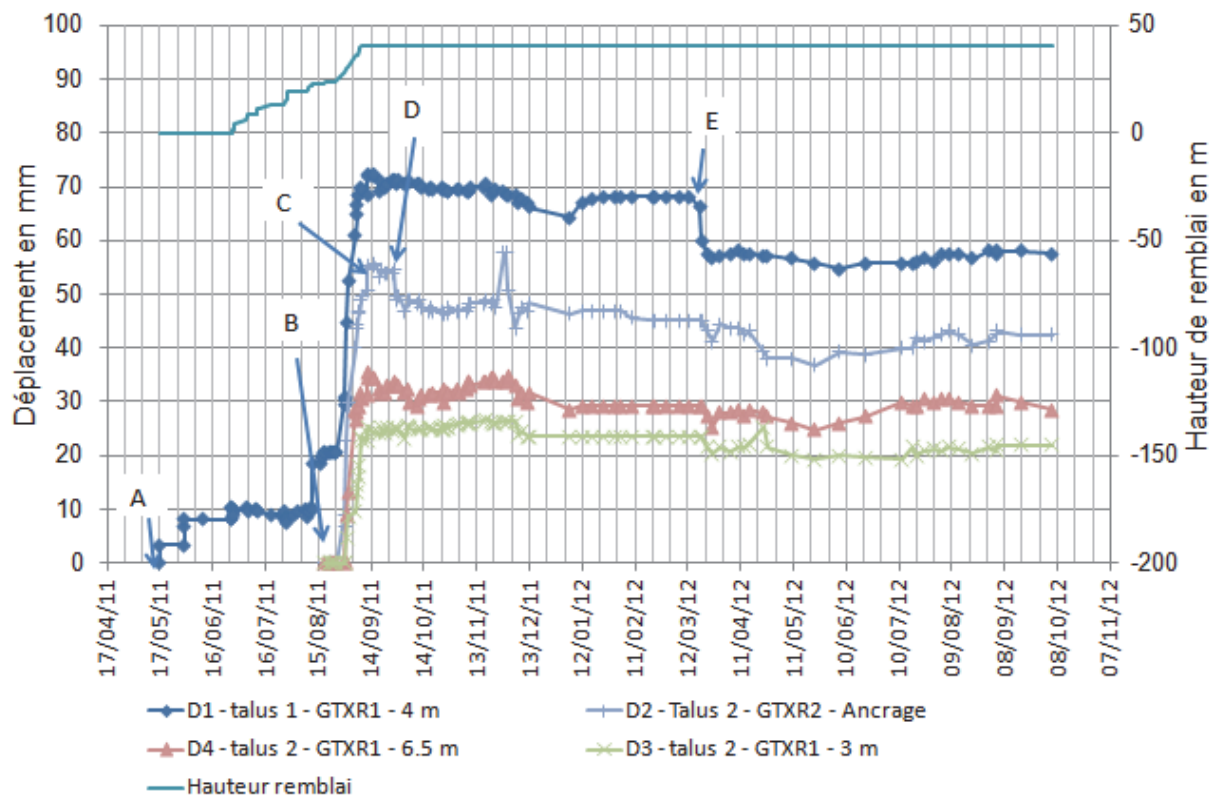


Figure 5. Évolution des déplacements au niveau du GTXR1 en fonction du temps.

La figure 6 présente l'évolution de la pression totale en pied du talus mesurée (CPT1) en fonction du rampant du DEG. L'évolution théorique en fonction de trois valeurs d'angle de frottement critique : 16, 19 et 22 degrés, a également été reportée sur ce graphique, en tenant compte d'un angle de frottement des matériaux de couverture de 38 degrés. Cette valeur a été mesurée sur un échantillon intact prélevée après compactage et soumise à un essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.

L'analyse de ce graphique met en avant que le transfert des efforts de géosynthétique en géosynthétique semble se faire progressivement dans le temps induisant une mobilisation progressive de la butée de pied. Le délai nécessaire pour mobiliser la totalité de la butée de pied, soit celui nécessaire au transfert des efforts à travers les différents produits est estimé entre 1 et 3 mois.

En considérant un angle de frottement des matériaux de 38 degrés, l'angle de frottement critique peut être estimé par retro-analyse à environ 19 degrés. Cette valeur est dans la gamme définie par essai au plan incliné (entre 16 et 19 degrés). Il convient de garder en mémoire qu'une augmentation ou une réduction de deux degrés de l'angle de frottement du matériau impacte d'un degré la valeur de l'angle frottement critique.

L'instrumentation permet donc de vérifier que le comportement du Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane est conforme à celui attendu et approché lors des études préalables sur la base d'essais en laboratoire. Elle permet d'optimiser la constitution du DEG en identifiant plus précisément les zones où le géotextile de renforcement n°2 doit être mis en place et, par conséquent, de réduire le coût des travaux.

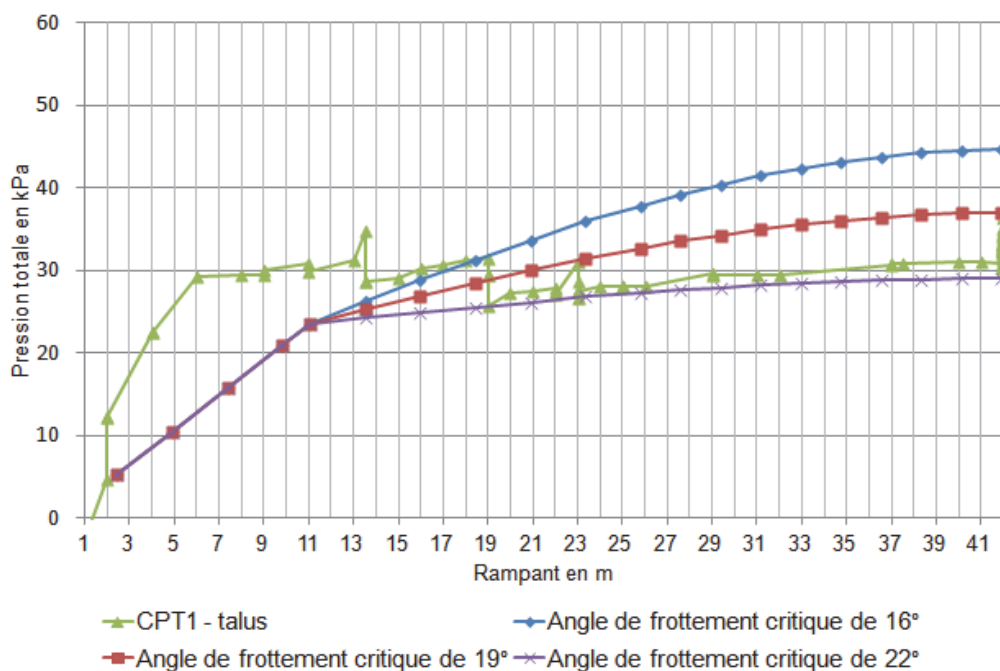


Figure 6. Évolution de la pression totale en pied du talus en fonction du linéaire du rampant du talus.

### 4.3. Suivi topographique de la couverture finale

Le dispositif de suivi topographique de la couverture finale est constitué de plots de suivi altimétriques. Le suivi a été démarré après finalisation du remblaiement des talus 1 et 2, en décembre 2011 avec une fréquence hebdomadaire pendant 6 mois puis mensuelle, sur une période de janvier à novembre 2012.

La figure 7 présente le déplacement relatif entre deux levés espacés d'un mois. Il met en avant la stabilité du talus puisque les variations sont de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la mesure topographique au GPS ( $\pm 2$  cm). Le seuil des limites acceptables n'est pas dépassé pour les déplacements. On notera une reprise des déplacements, de l'ordre de 1 à 2 cm, lors de la mise en place des remblais du troisième talus en août 2012, puis une stabilisation des déplacements.

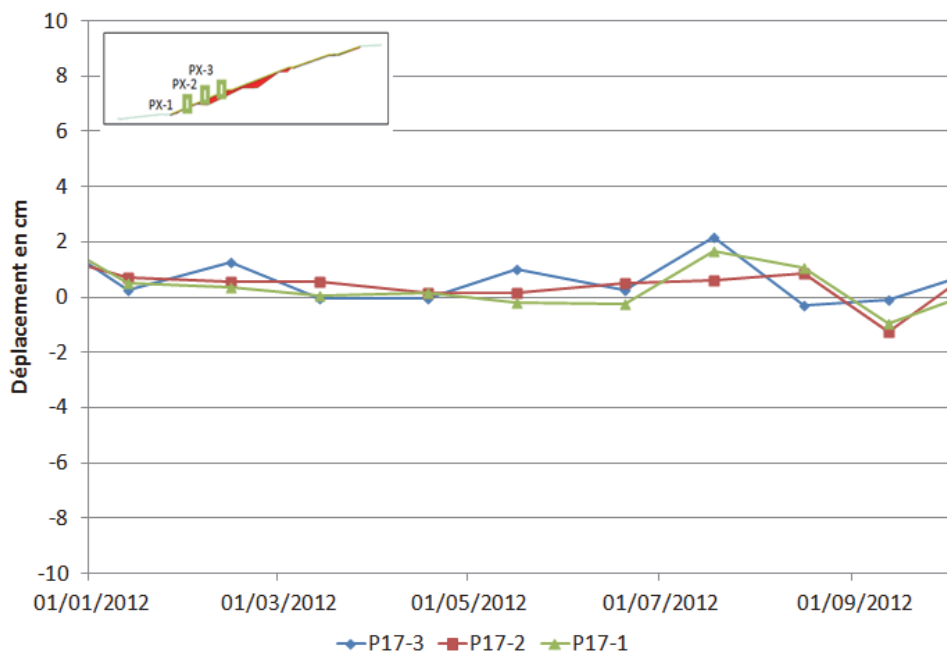


Figure 7. Résultats du suivi topographique au niveau du profil 17.



#### 4.4. Hygiène et sécurité

En termes d'hygiène et sécurité, la Coordination Sécurité et Protection de la Santé (CSPS) a été assurée par l'Exploitant. Une attention toute particulière a été prise en compte lors du chantier pour garantir la sécurité des biens et des personnes.

Les photographies suivantes illustrent les dispositifs mis en place en particulier, le dispositif innovant anti-chute pour le personnel a constitué à l'aide de la longueur de retour d'ancrage des lès de géogrille du mur renforcé en géosynthétiques (Figure 8) dont la hauteur est comprise entre 7 et 10 m.

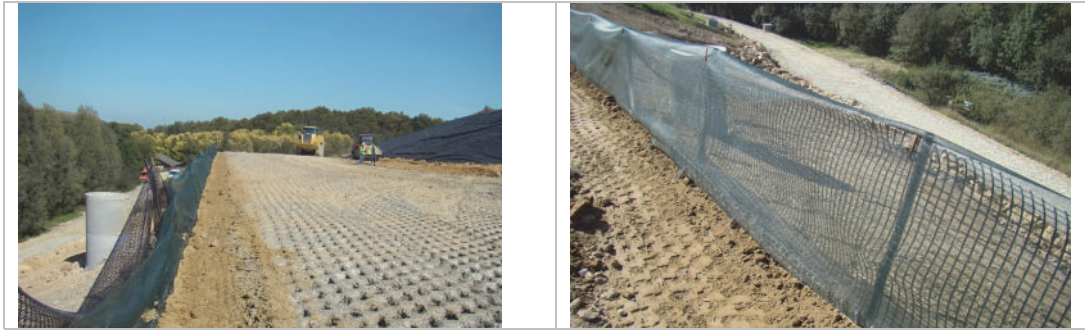


Figure 8. Mesures prises dans le cadre de la démarche QHSE.

#### 4.5. Suivi environnemental et réinsertion paysagère

En termes environnementaux, une attention toute particulière a été prise pour séparer les eaux pluviales tombant sur les déchets, produisant des lixiviats, et les eaux pluviales ruisselant sur la couverture, par la réalisation de merlon de dérivation des eaux et mise en place de couverture provisoire étanche (Figure 9).

Le recours à un ouvrage renforcé en géosynthétique a permis de ne pas impacter la Zone Écologique Sensible en aval du talus.

Une attention toute particulière est portée au réaménagement paysager comme l'illustrent les photographies suivantes prises le 19 avril 2012.



Figure 9. Aménagements paysagers.

### 5. Conclusions

L'application de la méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif est adaptée à l'optimisation de la couverture finale où les comportements du sol et du dispositif d'étanchéité par géomembranes sont souvent difficile à appréhender de manière précise, malgré une reconnaissance géotechnique préalable détaillée et, bien entendu, nécessaire et indispensable. Il convient de préciser

que cette méthode de dimensionnement n'est en aucun cas une facilité, qu'il pourrait être tentant d'utiliser pour justifier de dangereuses économies sur les études et investigations géotechniques préalables.

Elle nécessite une forte implication et une grande réactivité de l'ensemble des acteurs, à savoir, le Maître d'Ouvrage, le Maître d'œuvre, les Entreprises de terrassement et d'étanchéité mais également les fournisseurs de géosynthétiques, les laboratoires de contrôle, etc., pour prendre en compte, dans un minimum de temps, les optimisations et adaptations sur l'ouvrage.

Les données mesurées à l'aide du plan incliné, dont la norme doit être adaptée pour permettre d'intégrer l'interprétation suivant la procédure « en force », et celles issues du dispositif d'instrumentation du DEG et du suivi topographique ont permis, pour ces premières phases de travaux, de mieux appréhender le comportement de cet ouvrage et ainsi optimiser les ancrages et, localement, la constitution du DEG.

Ces données, après compléments d'interprétations, par exemple par modélisation en déplacement (Page et Bruhier, 2006), doivent également permettre d'optimiser en coût et en délai les futurs ouvrages de l'Installation de Stockage de Déchets dangereux avec une meilleure maîtrise des risques.

## 6. Références bibliographiques

- AFNOR (2005), Norme EN ISO 12957-2 : « Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement – Partie 2 : Essai sur plan incliné »
- AFNOR (2007). Norme EN ISO 12957-1 : « Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement – Partie 1 : Essai de cisaillement direct »
- AFNOR (2009), Norme NF P 94-270 « Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué ».
- AFNOR (2010). Norme XP G 38-067 : « Géosynthétiques - géotextiles et produits apparentés - stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - justification du dimensionnement et éléments de conception »
- Allagnat D. et al. (2005), La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages. Presses des Ponts et chaussées.
- Koerner R. (2005), Designing with geosynthetics, 5th edition.
- Briançon L. (2001). Stabilité sur pentes des dispositifs géosynthétiques - Caractérisation du frottement aux interfaces et application. Thèse ès science, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 200 pages.
- Briançon L., Girard H. and Poulain D. (2002). Slope stability of lining systems - Experimental modelling of friction at geosynthetic interfaces. Geotextiles and Geomembranes, vol. 20 (3), pp 147-172.
- Page B., Bruhier J. (2006). Évaluation des efforts dans les géosynthétiques par modélisation en déplacement- Rencontres géosynthétiques 2006.
- Briançon L., Girard H., Gourc J.P., Poulain D, (2011). Justification d'une modification de la norme relative au frottement des interfaces géosynthétiques au plan incliné.