

STABILISATION D'UNE COUCHE DE SOL MINCE SUR PENTE – NOUVELLE NORME XP G38-067

STABILIZATION OF A THIN SOIL LAYER OVER SLOPE – NEW STANDARD XP G 38-067

Alain HÉRAULT¹, Julien FOURIER², Fabien LE POCREAU³

¹ Colbond Geosynthetics, Saint-Denis, France

² Sita FD, Paris La Défense, France

³ FLI, Fondettes, France

RÉSUMÉ – Le recours à une couche de protection et de végétalisation sur dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques est fréquent, tant sur les flancs de bassins d'orage qu'en couverture d'installations de stockage de déchets. La nouvelle norme XP G38-067 fixe les règles de justification de la stabilité de la couche de recouvrement et du dispositif lui-même. Ces règles, issues des Eurocodes, avaient déjà été appliquées en 2009 sur l'installation de stockage de déchets dangereux de Villeparisis (77), pour déterminer la résistance en traction du géocomposite de drainage à mettre en œuvre.

Mots-clefs : angle de frottement, plan de glissement, interfaces, facteurs partiels, traction

ABSTRACT – The use of a protection layer allowing vegetation installation on slopes covered with a geomembrane is usual on sides of storm water basins and on capping of waste storage facilities. The new standard XP G38-067 establishes rules for justification of geosynthetics and soil layer stability. These rules, derived from Eurocodes, had been already applied in 2009 to the storage of dangerous waste in Villeparisis (77), to determine the tensile strength of the drainage geocomposite to use.

Keywords: friction angle, sliding surface, interfaces, partial factors, tensile

1. Introduction

Le calcul géotechnique des structures est régi par l'Eurocode 7 depuis 2010, terme de la période transitoire de coexistence avec les normes nationales fixé par la commission européenne. Afin de mettre le dimensionnement des Dispositifs d'Étanchéité par Géosynthétiques (DEG) en conformité avec cette exigence, la commission française de normalisation « Géosynthétiques » a rédigé la norme XP G 38-067 publiée par l'AFNOR en Juillet 2010. Cette nouvelle norme applique les principes du calcul aux états limites avec facteurs partiels (voir exemple tableau 1), définis dans l'Eurocode 0 (NF EN 1990/A1) et l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1), au calcul des géosynthétiques assurant la stabilité de la structure de recouvrement (terre végétale, matériaux granulaires) des DEG sur pentes.

Tableau 1. Facteurs partiels pour les actions ou les effets des actions

Action		Symbole	A1
Permanente	Défavorable	γ_{Gsup}	1,35
	Favorable	γ_{Ginf}	1,0
Variable	Défavorable	γ_{Qsup}	1,5
	Favorable	γ_{Qinf}	0

Les Eurocodes instituent une approche semi-probabiliste de la sécurité : par exemple, les effets des actions sont désormais déterminés à travers des combinaisons d'actions différentes si l'on est en situations de projet durables ou transitoires ou en situations de projet accidentelles voire sismiques. Pour la présente application, ce sont les facteurs partiels figurant dans le tableau 1 qui s'appliquent aux situations de projet durables ou transitoires, le facteur partiel à appliquer dépend du type d'action, permanente ou variable, et de son effet sur la stabilité, défavorable ou favorable. C'est ainsi que l'on ne majorera pas une charge permanente ($\gamma_{Ginf} = 1,0$) sur une tranchée d'ancrage et que l'on ne prendra pas en compte de charge variable ($\gamma_{Qinf} = 0$) puisqu'elles améliorent toutes les deux la résistance du dispositif d'ancrage. Par contre, on majorera les charges défavorables à la stabilité sur les rampants, d'un

coefficient $\gamma_{\text{Gsup}} = 1,35$ pour la charge permanente de sol de recouvrement et d'un coefficient $\gamma_{\text{Qsup}} = 1,50$ pour les surcharges.

Sont présentées ci-après les principales étapes d'un tel dimensionnement, en prenant pour exemple une couverture de 12 000 m² conçue par SITA FD et mise en œuvre par la société FLI en 2009/2010 sur l'installation de stockage de déchets dangereux de Villeparisis (77). Il s'agissait d'apporter une solution technique sûre permettant d'isoler le massif de déchets dangereux des précipitations pour empêcher la création de lixiviats. Un dispositif géosynthétique de stabilisation et de drainage de la couche de terre de couverture a été placé sur la géomembrane lisse en PEHD, sur des rampants de 54 m avec des pentes pouvant atteindre 35%. On détaille ci-dessous le dimensionnement mécanique du géosynthétique et des dispositifs d'ancrage, réalisé conformément aux principes des Eurocodes repris dans la norme XP G38-067.

2. Description de l'ouvrage

L'Installation de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) de Villeparisis, située dans le département de Seine-et-Marne, est ouverte depuis 1977 et constitue l'une des 5 installations de stockage de déchets dangereux de SITA FD. Le site est autorisé à recevoir en stockage 250 000 tonnes de déchets dangereux par an.

Il s'agit comme déchets de résidus de l'incinération (REFIOM), résidus de traitement d'effluents, terres souillées, résidus de la métallurgie, résidus de stations d'épuration d'eaux industrielles, résidus de peinture, résidus minéraux de traitement chimique et déchets d'amiante.

Le site de Villeparisis dispose également d'une plate-forme de traitement de terres polluées. Il s'agit plus précisément de terres qui présentent une forte pollution en hydrocarbures (HAP, etc.). Ces terres sont traitées par un procédé naturel et biologique de dégradation appelé Biocentre[®] : les polluants sont détruits et transformés en vapeur d'eau et en gaz carbonique par des bactéries.

Le dispositif de couverture définitive est décrit sur la figure 1.

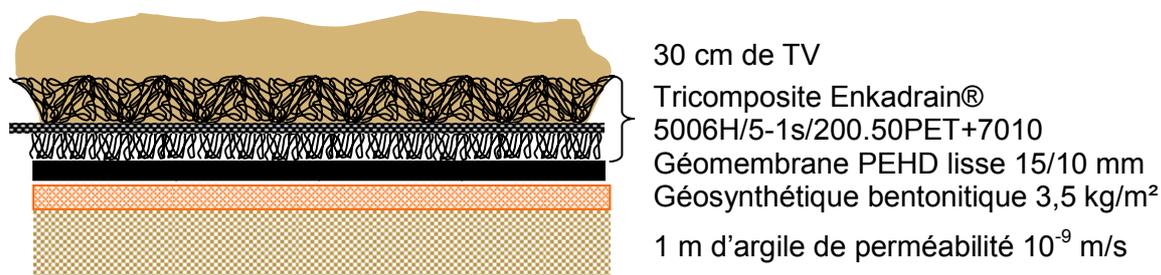


Figure 1. Coupe de la couverture

Un tel dispositif sur pente impose au concepteur de s'assurer de la stabilité au glissement de toutes les couches et de déterminer le cas échéant la résistance en traction à requérir pour le produit chargé d'assurer une fonction renforcement.

Les pentes des talus réaménagés dépassent souvent 20% et atteignent sur certains profils 35% avec des longueurs de rampant de plus de 50 m sur le talus nord. Cela a conduit à décomposer le talus en deux rampants de 30 m et 24 m pour la justification de la résistance en traction du géocomposite de drainage et à prévoir un ancrage intermédiaire du DEG en plus de l'ancrage de tête de talus. Les deux rampants sont donc ainsi traités indépendamment, tant au niveau de la sollicitation en traction du produit de renforcement qu'au niveau de son ancrage. La norme XP G38-067 prévoit également une décomposition d'un talus en plusieurs rampants lorsque la pente du talus n'est pas constante.

3. Stabilité de la couche de recouvrement

La première exigence consiste à vérifier que le sol de couverture dispose des caractéristiques géotechniques suffisantes pour être stable sur la pente prévue au projet. En effet, quel que soit le dispositif d'étanchéité par géosynthétiques choisi, le sol sus-jacent ne doit pas se cisailer dans son épaisseur du fait d'une pente trop forte, on note $R_{1;d}$ la résistance au cisaillement interne du sol de couverture (figure 2).

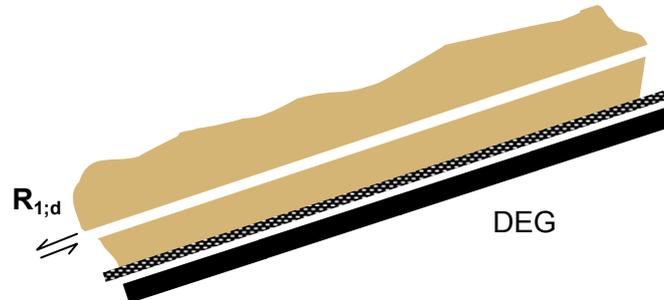


Figure 2. Cisaillement interne du sol de couverture

Cette vérification doit normalement être réalisée dès l'avant-projet, en intégrant, en plus des facteurs du tableau 1, le facteur partiel $\gamma_{R,h}$ mentionné dans le tableau 2, car elle a une incidence directe sur l'emprise des ouvrages, elle implique une connaissance des matériaux d'apport. Dans le cas d'une terre végétale, la norme recommande de ne pas dépasser 2H/1V (27 degrés) dans les cas courants et de s'assurer de sa stabilité pour des inclinaisons supérieures. On dispose ainsi de nombreuses références à 3H/2V (34 degrés) mais au-delà, la stabilité d'une terre végétale devient trop aléatoire. Pour cet ouvrage, la pente est de 35% soit environ 19 degrés. L'épaisseur de la couche de recouvrement est de 0,30 m, elle entre dans le cadre du domaine d'application de la norme XP G38-067 qui ne considère que des couches de sol minces dont l'épaisseur ne doit pas dépasser 5% de la longueur développée du talus étudié, sauf pour les petits talus (inférieurs à 4 m) pour lesquels une couche de 20 cm peut être considérée comme mince.

Tableau 2. Facteurs partiels pour les résistances géotechniques

Résistance	Symbole	R2
Glissement du sol	$\gamma_{R,h}$	1,1
Glissement d'interface	$\gamma_{R,f}$	1,35

Cette stabilité dépend aussi des conditions hydrauliques : une accumulation d'eau à la base d'une couche de sol se traduit par une pression hydraulique qui peut conduire au glissement de la couche par altération de sa résistance au cisaillement interne. La norme XP G38-067 suppose que cette pression hydraulique est nulle, c'est le cas lorsqu'il n'y a pas d'infiltration d'eau dans la couche de recouvrement ou qu'un dispositif de drainage est mis en place à la base de la couche. Sur le site de Villeparisis, le choix a été fait par la maîtrise d'œuvre de prévoir une interface drainante, ceci s'est traduit par la mise en œuvre d'un tricomposite Enkadrain® de drainage, de renforcement et de stabilisation de sol dont la capacité de débit dans le plan est de 2,5 l/s/m sous 20 kPa pour le gradient unitaire.

4. Stabilité du dispositif d'étanchéité par géosynthétiques (DEG)

4.1. Mobilisation de la résistance au glissement d'interface

La résistance au glissement d'interface doit d'abord être vérifiée à la base de la couche de sol de recouvrement ; cette résistance est notée $R_{2;d}$ (figure 3). Après avoir contrôlé précédemment que la couche de sol ne se cisailait pas pour la pente considérée, on contrôle ici qu'elle ne glisse pas sur le géosynthétique sous-jacent. Sur faibles pentes, il s'agit généralement d'un géotextile, on applique alors la règle communément admise en renforcement de sol, elle indique un rapport de 0,6 à 0,8 entre la

tangente de l'angle de frottement d'interface sol/géotextile et la tangente de l'angle de frottement interne du sol.

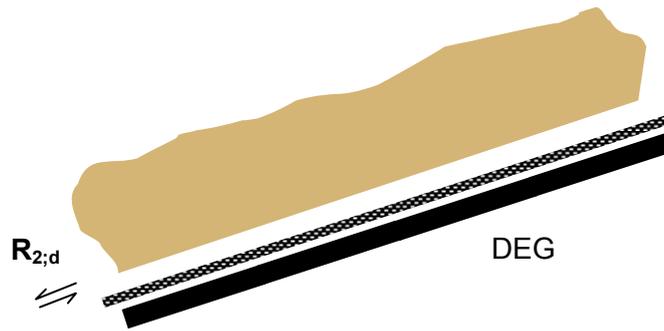


Figure 3. Cisaillement d'interface à la base de la couche de sol

Pour de plus fortes pentes, des structures tridimensionnelles ouvertes permettant d'augmenter, par pénétration du sol, le frottement d'interface à la base de la couche sont nécessaires pour en assurer la stabilité. Sur l'ouvrage de Villeparisis, compte-tenu des caractéristiques géotechniques supposées d'un limon naturel et du facteur partiel applicable $\gamma_{R,f}$ mentionné dans le tableau 2, il a été nécessaire de recourir à une structure tridimensionnelle type Enkamat®, identifiée comme géomatelas dans la norme NF EN ISO 10 318.

Après avoir ainsi vérifié la stabilité au glissement de la couche de recouvrement sur sa base, l'étape suivante consiste à contrôler la stabilité au glissement de toutes les interfaces du DEG, y compris les interfaces internes des géocomposites dont le mode d'assemblage doit garantir une résistance au cisaillement suffisante à long terme. On doit vérifier que la composante H_d , tangentielle au plan de glissement, des actions appliquées au « bloc » de matériau sus-jacent, affectée des facteurs partiels indiqués dans le tableau 1, est bien inférieure à la résistance au glissement minimale $R_{f,d}$ des interfaces du DEG (figure 4).

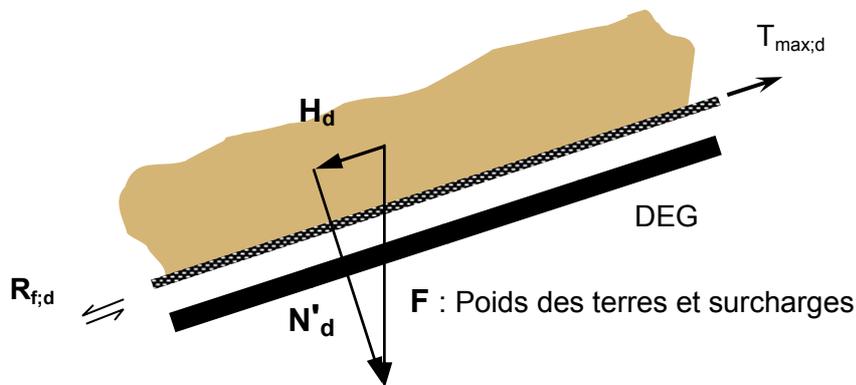


Figure 4. Cisaillement d'interface dans le DEG

Deux paramètres sont à considérer pour déterminer cette résistance : l'action N'_d s'exerçant normalement au plan du talus, affectée des mêmes facteurs partiels que la composante tangentielle, et l'angle de frottement minimal des interfaces du DEG. L'identification de l'interface la moins frottante nécessite de connaître les produits ou du moins les types de produits en contact et, le cas échéant, leur sens de pose pour prendre en compte des rugosités éventuellement différentes d'une face à l'autre d'un constituant. La caractérisation des interfaces relève de la norme NF EN ISO 12957-2 lorsque les épaisseurs de couche de recouvrement sont inférieures à 75 cm et NF EN ISO 12957-1 pour des couches plus épaisses. À Villeparisis, la géomembrane lisse en PEHD constituait le plan de glissement préférentiel avec un angle de frottement de 10 degrés avec le géocomposite de drainage. La stabilité du dispositif sur une pente de 35% (≈ 19 degrés) ne peut alors être assurée que par mobilisation de la fonction renforcement du tricomposite Enkadrain®.

4.2. Mobilisation de la résistance à la traction du géosynthétique de renforcement

Les contraintes qui se développent sur le plan de glissement préférentiel se traduisent par une variation continue de l'effort de traction le long du géosynthétique de renforcement qui atteint sa tension maximale en tête de talus. Il convient de vérifier que la raideur (ou module de déformation) du géosynthétique à mobiliser en traction est supérieure aux raideurs des autres géosynthétiques impliqués (NF EN ISO 10319 & NF P 84-501). La tension du géosynthétique de renforcement $T_{\max;d}$ est égale à la différence entre la composante tangentielle H_d des actions appliquées et la résistance au glissement minimale $R_{f;d}$ des interfaces du DEG ; elle ne doit pas dépasser sa résistance à la traction $R_{t;d}$ pour la durée d'utilisation spécifiée, compte tenu de son endommagement probable lors de la mise en œuvre et des conséquences de son vieillissement dans l'environnement considéré.

$$T_{\max;d} = H_d - R_{f;d} \leq R_{t;d} \quad (1)$$

La résistance à la traction $R_{t;d}$, valeur de calcul, est déduite de la résistance caractéristique à la traction $R_{t;k}$ du géosynthétique de renforcement, valeur mesurée en laboratoire conformément à la norme NF EN ISO 10319, par la relation suivante :

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\Gamma_{end} \Gamma_{flu} \Gamma_{deg} \gamma_{M;t}} \quad (2)$$

Γ : Coefficients de réduction traduisant une diminution de résistance du géosynthétique de renforcement par :

Γ_{end} : endommagement dû aux agressions mécaniques lors de la construction

Γ_{flu} : évolution physique du matériau sous l'effet du fluage, selon les deux critères de rupture par traction du produit et d'allongement post construction limité à 3%.

Γ_{deg} : dégradations d'origine chimique ou biochimique dues à l'environnement

$\gamma_{M;t}$ est le facteur partiel pour la résistance à la traction du géosynthétique de renforcement = 1,25

Ce coefficient Γ varie pour la gamme Enkadrain® de 2,5 à près de 7 selon les polymères utilisés (PET ou PP) et les conditions d'utilisation. Faute de résultats d'essais spécifiques, des valeurs par défaut indiqués dans la norme XP G38-067 conduisent à des valeurs Γ variant de 5 à 12 pour des conditions de mise en œuvre non « sévères ».

Sur Villeparisis, la résistance requise pour le produit de renforcement en polyester était de 167 kN/m, le tricomposite Enkadrain® mis en œuvre offrait une résistance à la traction $R_{t;k}$ de 200 kN/m avec un module de déformation proche de 2 000 kN/m, très largement supérieur au module de déformation de la géomembrane.

5. Résistance en ancrage

La capacité du dispositif d'ancrage doit permettre de reprendre les efforts transmis en tête par le géosynthétique de renforcement. Là aussi, il convient de vérifier dès l'avant-projet que l'emprise disponible en tête de talus permet de réaliser l'ancrage nécessaire à la stabilité du dispositif en respectant la réglementation en vigueur sur la profondeur maximale de la tranchée admissible sans blindage (décret du 7 Mars 2008), un ancrage à plat se révélant très souvent insuffisant.

Le calcul de la capacité d'ancrage consiste à totaliser la résistance au cisaillement disponible par frottement sur l'interface la moins frottante du dispositif et celle disponible sur la face supérieure du DEG en contact avec le matériau de remplissage de tranchée. La norme XP G38-067 fournit en annexe B les formules de calcul pour les configurations d'ancrage les plus usuelles.

On vérifie parallèlement la stabilité au cisaillement de la tête de talus. Faute de méthode de calcul satisfaisante, une règle empirique est proposée par la norme en recommandant une largeur minimale en crête de 1 mètre.

Se posait à Villeparisis le cas particulier d'un ancrage sur risberme intermédiaire (figure 5), il fallait veiller dans cette configuration à la continuité des étanchéités et du drainage par effet tuile, un

recouvrement minimum de 1 m a été effectué. Il n'y a ici aucune continuité dans la fonction renforcement du fait de la décomposition initiale du talus en deux rampants mécaniquement indépendants.

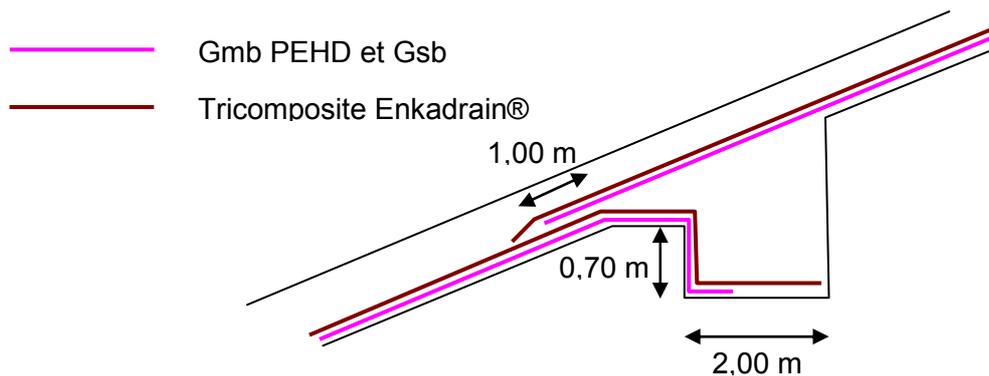


Figure 5. Ancre intermédiaire de Villeparisis

6. Dispositions de mise en œuvre

Compte-tenu des grandes longueurs de rampant sur le talus nord, une méthodologie de mise en œuvre spécifique schématisée sur la figure 6 a été mise au point.

Une tranchée d'ancrage intermédiaire a donc été réalisée à 30 m en partant du bas du talus. L'ensemble du dispositif d'étanchéité et de drainage a ensuite été mis en œuvre.

Le stock initial de terre végétale ($4\ 200\ \text{m}^3$) a été séparé en deux stocks : un stock de matériaux monté en haut de talus et un autre stock réalisé en bas de talus, qui permet un lestage du dispositif d'étanchéité et drainage pendant la mise en œuvre du bas vers le haut des 30 cm de matériaux de recouvrement. Ces deux stocks de matériaux ont été montés sur 1 m d'épaisseur minimum afin de protéger le dispositif d'étanchéité et de drainage.

La mise en œuvre de la terre végétale a été réalisée à l'aide d'une pelle à grand balancier type 325 BL de Caterpillar (Figure 7). Le rayon d'action de ce type d'engin est d'environ 20 m. La terre végétale a toujours été mise en œuvre à partir du bas du talus vers le haut pour ne pas solliciter le dispositif dans le sens de la traction. La pelle a toujours évolué sans à-coups sur une épaisseur minimale de 1 m de matériaux pour éviter toute sollicitation dynamique et tout endommagement accidentel du dispositif. Le rythme de couverture était d'environ $2\ 000\ \text{m}^2$ par jour.

7. Conclusions

La géotechnique est entrée, au même titre que le bâtiment et le génie civil, dans le cadre réglementaire des Eurocodes instituant une approche semi-probabiliste de la sécurité via un certain nombre de facteurs partiels communs à tous les métiers de la construction. Il était souhaitable que les géosynthétiques, pour être crédibles, s'inscrivent également et rapidement dans cette évolution inéluctable.

La norme XP G38-067 fournit désormais à tous les concepteurs de bassins d'orages et d'installations de stockage de déchets un outil de dimensionnement, conforme aux Eurocodes, qui leur permettra d'affiner et de sécuriser leurs choix d'avant-projet. Il les aidera également dans leur tâche au moment de l'évaluation technique des solutions proposées par les entreprises.

Cependant, aussi pointues que puissent être les approches de calcul, elles ne permettent pas de s'affranchir des règles de l'art au moment de l'exécution des travaux.

Méthodologie de mise en œuvre de 0,3 m de la terre végétale sur le tri-composite ENKADRAIN®

2 / Mise en œuvre terre végétale depuis le haut – de bas en haut.

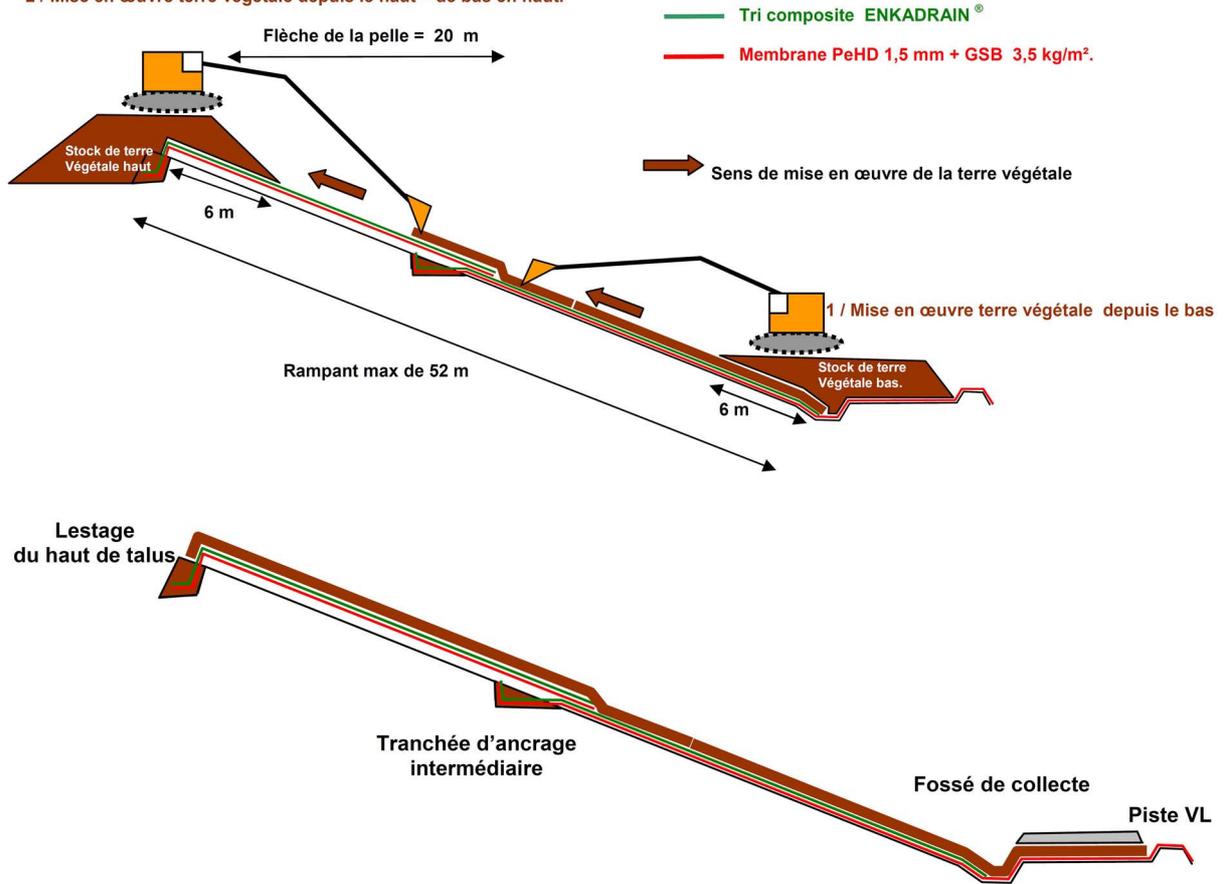


Figure 6. Méthodologie de mise en œuvre



Figure 7. Mise en œuvre de la couche de recouvrement sur le DEG

8. Références bibliographiques

- AFNOR (Juillet 2010). Norme XP G38-067 – Géosynthétiques – Géotextiles et produits apparentés – Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente – Justification du dimensionnement et éléments de conception.
- AFNOR (Juillet 2006). Norme NF EN 1990/A1, Eurocode – Bases de calcul des structures, avec son annexe nationale.
- AFNOR (Juin 2005). Norme NF EN 1997-1, Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales, avec son annexe nationale.
- AFNOR (Septembre 2005). Norme NF EN ISO 12957-1 – Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement – Partie 1 : essai de cisaillement direct
- AFNOR (Septembre 2005). Norme NF EN ISO 12957-2 – Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement – Partie 2 : essais sur plan incliné
- AFNOR (Mai 2006). Norme NF EN ISO 10318 – Géosynthétiques – Termes et définitions.
- AFNOR (Août 2008). Norme NF EN ISO 10319 – Géosynthétiques – Essai de traction des bandes larges.
- AFNOR (Septembre 1992). Norme NF P84-501 – Géomembranes – Dispositif d'étanchéité par géomembranes (DEG) – Détermination des caractéristiques en traction.
- Ministère de l'Économie, de l'industrie et de l'Emploi (Juillet 2009). Recommandation sur la référence aux Eurocodes dans les marchés publics relatifs aux ouvrages de construction. Groupe d'Etude des Marchés Ouvrages – Travaux et Maîtrise d'œuvre.
- Décret n° 2008-244 du 7 mars 2008 relatif au code du travail (partie réglementaire)