

REMBLAIS DE PRECHARGEMENT RENFORCES PAR DES GEOSYNTHETIQUES A PAREMENT SOUPLE GEOTEXTILE

TEMPORARY EMBANKMENTS REINFORCED BY GEOSYNTHETIC LAYERS WITH FLEXIBLE FACING MADE OF GEOTEXTILE CONTAINERS

R. Durand¹, J. Bruhier¹ et T. Funfrock²

¹ HUESKER France SAS, Rue Jacques Coulaux, 67190 Gresswiller, France

² COSEA

RÉSUMÉ – L'ouvrage pont-rail PRA2709 (LGV COSEA " Tours-Bordeaux ", section G, lot 14) enjambe le ruisseau du Pas de Lapouyade. Pour accélérer la consolidation du sol compressible, deux remblais de préchargement à talus raidis, renforcés par des géosynthétiques, ont été construits. Une solution innovante de parement a été mise en œuvre avec l'emploi de conteneurs géotextiles souples remplis de sable (big bags)

Mots-clés : Préchargement, remblai renforcé, géosynthétiques, parement souple

ABSTRACT – The railway bridge PRA2709 (TGV Line "COSEA" between Tours and Bordeaux, section G, lot 14) crosses the small river "Pas de Lapouyade". To speed up the consolidation of the soft foundation soil two geosynthetic reinforced preloading embankments had to be built. A simple and straightforward facing solution was found with flexible geotextile containers filled with sand (big bags)

Keywords: Preloading, reinforced embankmen, geosynthetics, flexible facing

1. Introduction

Le projet réside dans la réalisation d'un Pont Rail (PRA) de type portique avec murs de retour en aile associés. L'ouvrage consiste en deux portiques (C0 et C1) sur pieux et deux culées boîtes fondées sur radier. Cet ouvrage permet le franchissement par la LGV SEA du ruisseau « Pas de Lapouyade ».

L'étude géotechnique d'exécution G3 montre un risque de tassement de l'ordre de 7 cm. La solution retenue au préalable à la construction de l'ouvrage consiste en l'édification d'un remblai de préchargement au droit de chacune des culées jusqu'à une cote $Z_{\text{projet}} + 3 \text{ t/m}^2$ soit $Z_{\text{projet}} + 1,5 \text{ m}$. Aucune purge des formations superficielles n'est préconisée et la construction des fondations ne commencera qu'après consommation totale des tassements. Compte tenu des contraintes géométriques inhérentes à la présence du ruisseau « Pas de Lapouyade », les deux remblais de préchargement au droit des deux culées doivent présenter un talus raidi sur leur face côté cours d'eau. Une solution de remblai renforcé par nappes géosynthétiques, souple et facile de mise en œuvre, a permis la construction des remblais provisoires soumis aux tassements. Une solution innovante de parement a été mise en œuvre avec l'emploi de conteneurs géotextiles souples remplis de sable, généralement appelés « big bags », autour desquels s'effectue le retour de nappe des lés géosynthétiques.

L'armature géosynthétique est constituée d'un géosynthétique tissé en polyvinyle d'alcool (PVA). Le PVA présente une excellente durabilité dans les milieux alcalins et s'imposait ici en raison du pH élevé du sol de remblai traité à la chaux. La résistance à la traction ultime du géosynthétique de renforcement est calculée conformément aux guides ISO/TR 20432. La justification de la stabilité est effectuée d'après les normes NF P 94-270 et XP G 38-064

Les remblais de préchargement sont restés en place jusqu'à consommation et stabilisation des tassements. De l'ordre de 5 à 8 cm, ils n'ont pas affecté la stabilité du massif renforcé souple.

2. Entrants

2.1. Situation géographique

Le ruisseau « Pas de Lapouyade » coule du sud-ouest au nord-est sur la commune de Lapouyade à la frontière entre les départements de la Gironde (33) et de la Charente maritime (17). A une altitude d'environ 55 m, la trace de la LGV Sud Europe Atlantique traverse le ruisseau au PK270 par le pont-rail PRA2709. Les premiers travaux de terrassement sur le site sont visibles sur l'image satellite de Google Earth (figure 1).

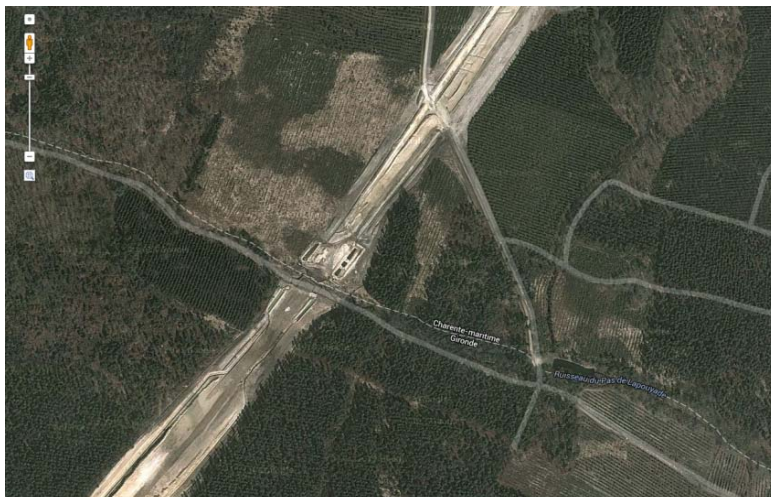


Figure 1. Vue aérienne (Google Earth) de la zone du PRA 2709 avant les travaux de préchargement et de construction de l'ouvrage d'art.

2.2. Nature du sous-sol et des matériaux de remblai

Le terrain en place sous les deux préchargements est composé d'alluvions sableuses et sablo-argileuses. S'agissant de dépôts alluviaux superficiels, ceux-ci peuvent présenter des variations latérales de faciès. Il est ainsi possible de rencontrer des lentilles argileuses au sein des niveaux sableux. De même, des niveaux superficiels décomprimés sableux peuvent être observés. Le sol support ne fera cependant pas l'objet d'une purge.

Les caractéristiques géotechniques retenues pour la justification de la stabilité des remblais de préchargement sont un poids volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, un angle de frottement interne $\phi' = 28^\circ$ et une cohésion $c' = 5 \text{ kPa}$.

Le matériau utilisé en remblai est un matériau sablo/graveleux avec des fines type B4/B5/B6 selon la classification du GTR 92. Sensible à l'eau, il est traité à la chaux. Ses caractéristiques géotechniques retenues pour la justification de la stabilité des remblais de préchargement sont un poids volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, un angle de frottement interne $\phi' = 30^\circ$ et une cohésion $c' = 5 \text{ kPa}$.

2.3. Hydrogéologie

La zone d'étude est située à proximité immédiate du lit du ruisseau « Pas de Lapouyade ». Le niveau de la nappe est situé à faible profondeur. Dans l'étude, le niveau de la nappe est pris à 53,6 m NGF.

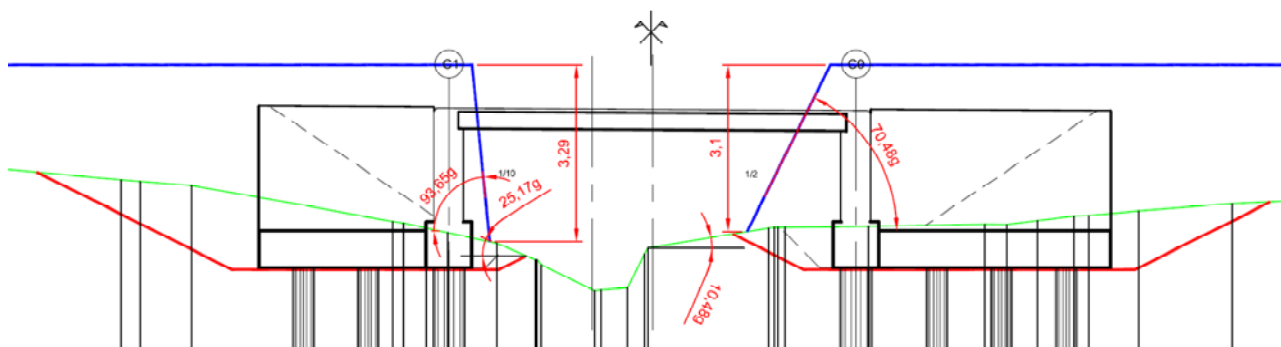


Figure 2. Géométrie des préchargements des culées C0 et C1.

2.4. Géométrie

Les préchargements sont construits jusqu'à la cote 63,5 m ; soit $Z_{\text{projet}} + 1,5$ m, (figure 2, en bleu). La face renforcée de chaque remblai de préchargement de chaque côté du ruisseau, a une pente de 1H/2V et 1H/10V respectivement pour les culées C0 (côté Paris) et C1 (côté Bordeaux).

3. Remblai renforcé par des géosynthétiques : les normes justificatives

Pour assurer la stabilité des talus à 1H/2V et 1H/10V, le choix de la construction d'un mur de soutènement renforcé par des géosynthétiques s'est imposé comme une solution souple et facile de mise en œuvre pour les deux préchargements soumis aux tassements.

La justification des murs et talus de soutènement s'effectue selon l'une ou l'autre des normes NF P 94-270 (juillet 2009) et XP G38-064 (août 2010).

3.1. Normes NF P 94-270 et XP G38-064

La norme NF P 94-270 (juillet 2009) : « *Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement. Remblais renforcés et massifs en sol cloué* » est la norme nationale d'application pour ce type d'ouvrage selon l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1). Ce document est conforme aux principes du calcul aux états limites avec facteurs partiels, définis dans la norme NF EN 1990 et son annexe nationale NF P 06-100-2, et respecte les exigences de la norme NF EN 1997-1 et de son annexe nationale NF P 94 251-2, applicables au calcul des ouvrages géotechniques.

La norme XP G38-064 (août 2010) : « *Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques – justification du dimensionnement et éléments de conception* » est une norme expérimentale. Elle encadre la justification par le calcul des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. Sont définis comme talus des ouvrages dont l'inclinaison du parement est inférieure ou égale à 1H/4V au sens de la norme NF EN 14475. Ainsi, pour les ouvrages dont l'inclinaison est supérieure à 1H/4V, la norme NF P 94-270 s'applique.

Dans l'étude, le talus renforcé côté culée C0, de pente 1H/2V, est un talus fortement raidi entrant dans le domaine d'application de la norme XP G38-064. Côté culée C1, il s'agit d'un mur à fruit de pente 1H/10V régi par la norme NF P 94-270.

3.2. Justification d'un ouvrage en sol renforcé

Les deux normes ne s'appliquent pleinement qu'aux projets relevant de la catégorie géotechnique 2. Le principe général de la justification d'un ouvrage est illustré dans la figure 4.

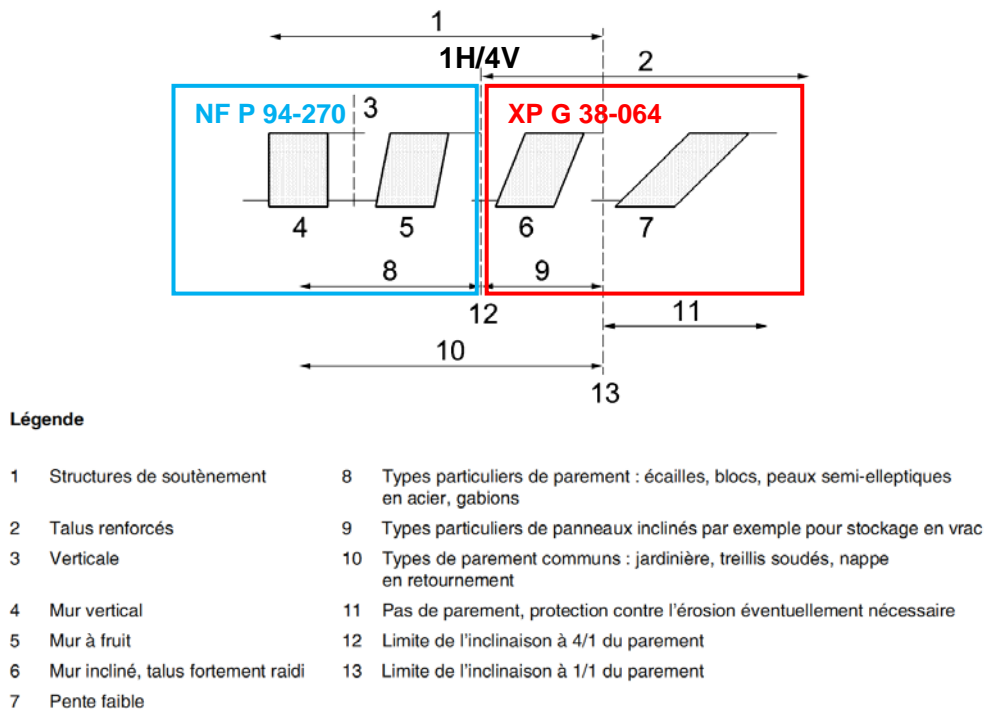


Figure 3. Norme de dimensionnement à appliquer pour différents types de structures de soutènement et de parement (conformément à la norme NF EN 14475).

3.3. Vérifications minimales à faire aux états limites ultimes : Stabilités externe, générale, mixte et interne

Les vérifications des stabilités (figures 5, 6, 7 et 8) doivent être réalisées pour chaque ouvrage selon les états limites ultimes (ELU) GEO (géotechniques) ou STR (pour les structures). Pour chaque état limite, il doit être vérifié, selon l'approche de calcul indiquée que

$$E_d < R_d \quad (1)$$

où E_d est la valeur de calcul de l'effet des actions et R_d est la valeur de calcul de la résistance à l'effet de ces actions.

Les approches 2 et 3 (selon l'Annexe nationale NF EN 1997-1/NA) définissent les combinaisons des ensembles de facteurs partiels à considérer. Les facteurs partiels s'appliquent sur les actions et effets des actions (A1 ou A2), sur les paramètres du sol et des éléments de renforcement (M1 ou M2) et sur les résistances géotechniques (R2 ou R3).

La justification de la stabilité externe du massif renforcé (figure 5), considéré comme un bloc, est la justification de la géométrie du massif vis-à-vis du glissement et du poinçonnement à l'interface avec le sol support. Il s'agit d'un ELU GEO et la combinaison de coefficients facteurs partiels à prendre en compte est celle de l'approche 2.

La justification de la stabilité générale du massif renforcé (figure 6) est la justification de la géométrie du massif vis-à-vis de lignes de glissement potentielles par grand glissement, englobant le massif renforcé. Il s'agit d'un ELU GEO et elle doit s'effectuer selon l'approche 3.

La justification de la stabilité mixte du massif renforcé (figure 7) est la justification de la distribution des renforcements et de la géométrie du massif vis-à-vis de lignes de glissement potentielles par grand glissement qui interceptent et/ou longent au moins un des lits de renforcement. Il s'agit d'un état limite de type GEO et STR car il concerne à la fois la géométrie du massif ainsi que les renforcements. La vérification doit s'effectuer selon l'approche 3.

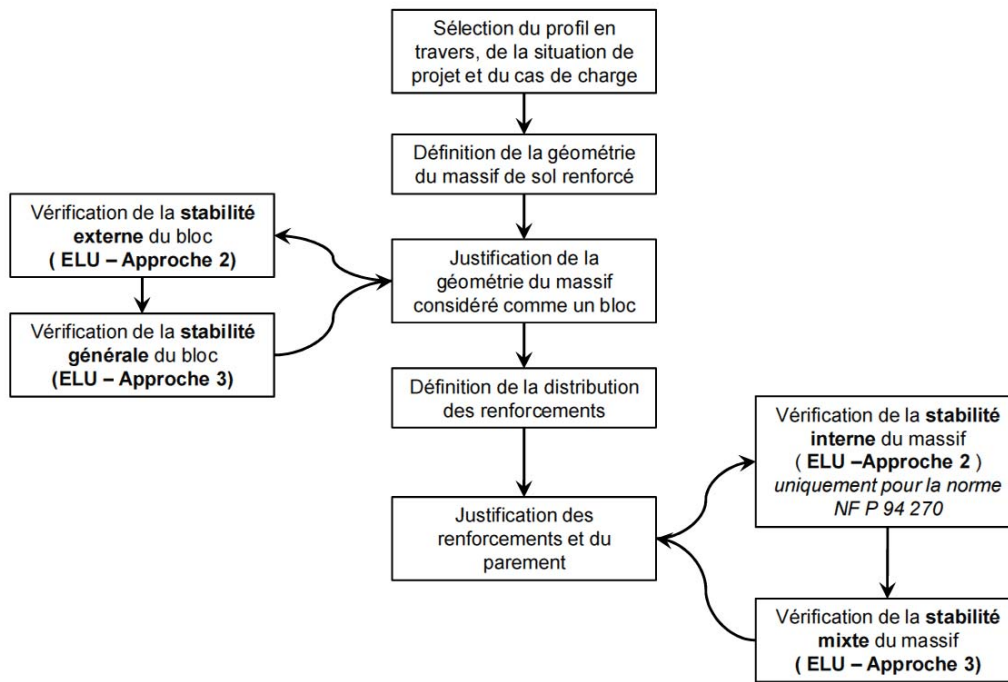


Figure 4. Principe général de la justification d'un ouvrage en sol renforcé : Etude aux états limites ultimes (ELU) d'un profil en travers représentatif.

La justification de la stabilité interne (figure 8) et de la résistance au parement consiste à déterminer les efforts appliqués à chaque lit de renforcement et justifier la distribution qui permet d'éviter leur cassure, allongement excessif ou rupture d'adhérence. Il s'agit d'un état limite ultime de type STR. Les vérifications sont effectuées suivant l'approche 2. La stabilité interne n'est pas obligatoirement à vérifier dans le cadre de la norme XP G 38-064.

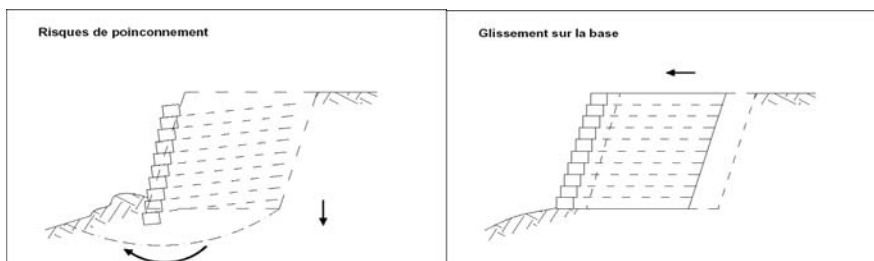


Figure 5. Stabilité externe : Poinçonnement et glissement du bloc/massif sur le sol support.



a) Cas général

Figure 6. Stabilité générale : Grand glissement.

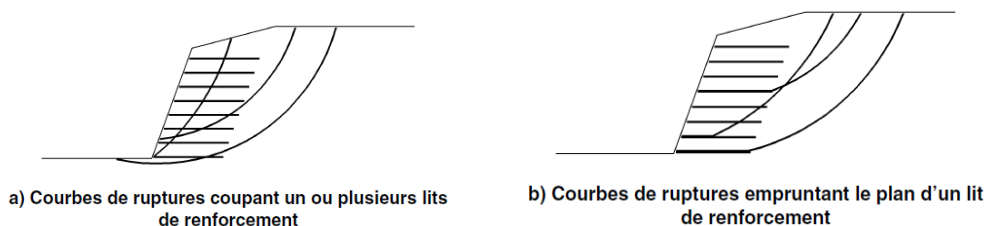


Figure 7. Stabilité mixte : Lignes de glissement interceptant ou longeant au moins un lit de renforcement.

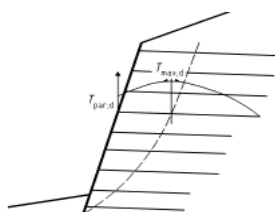


Figure 11.1 - Ligne des tractions maximales

Figure 8. Stabilité interne : Répartition des efforts dans chaque lit de renforcement.

4. Conception du remblai de préchargement renforcé par nappes géosynthétiques : exemple de la culée C0

D'inclinaison de parement 1H/2V, le remblai de préchargement de la culée C0 est justifié selon la norme XP G 38-064.

4.1. Caractérisation de l'ouvrage

L'annexe B, normative, de la norme NF P 94-270 permet de définir les catégories géotechniques et de durée d'utilisation de l'ouvrage en sol renforcé en fonction des conditions de site et par conséquent les exigences minimales relatives aux reconnaissances géotechniques, calculs et contrôles d'exécution.

L'ouvrage en sol renforcé considéré est un remblai de préchargement, il s'agit d'un ouvrage de classe de conséquences CC1 au sens de la norme NF EN 1990. La ruine ou l'endommagement vis-à-vis des personnes ou des ouvrages avoisinants aurait des conséquences faibles ou négligeables.

Les conditions du site sont considérées simples et connues, notamment avec le rapport d'étude géotechnique G3 de phase EXE de l'ouvrage définitif PRA2709, l'ouvrage est de catégorie géotechnique 1, conformément à la NF EN 1997-1.

Les remblais de préchargement étant par nature provisoires, l'ouvrage renforcé appartient à la catégorie de durée d'utilisation 1.

4.2. Choix du géosynthétique de renforcement

Le choix du type de géosynthétique de renforcement et ses caractéristiques dépend des caractéristiques de l'ouvrage et des matériaux de remblai.

Le matériau de remblai est traité à la chaux. D'après l'annexe B, normative, de la norme XP G 38-064, le pH du remblai est compris entre 9 et 11,5. Le géosynthétique choisi ne doit donc pas être sensible à l'hydrolyse pour des pH supérieurs à 9. Le géosynthétique mis en œuvre est un produit de la gamme Robutec[®] en PVA. Ce produit dispose d'un certificat ERA Technology définissant les facteurs partiels à appliquer sur le produit pour le calcul de la résistance à la traction ultime, utilisée dans la modélisation, à la durée de service de l'ouvrage $R_{t,a}$ telle que :

$$R_{t,a} = \frac{R_{t,k}}{(\Gamma_{flu} \times \Gamma_{vieill} \times \Gamma_{instal}) \times \gamma_{M,t}} \quad (2)$$

Où $R_{t,k}$ est la résistance caractéristique à la traction du géosynthétique de renforcement mesurée selon la norme NF EN ISO 10 319.

Où Γ_{flu} est le coefficient de réduction lié à l'évolution physique du matériau sous l'effet du fluage. Ce coefficient est défini selon deux critères. Le critère de rupture par traction du produit et le critère d'allongement post-construction (de 10h à la durée de service de l'ouvrage) limité à 3%. La valeur la plus défavorable des deux critères est prise en compte. En l'absence d'essai ou d'avis technique, l'annexe A de la norme XP G 38-064 définit les valeurs par défaut (Tableau 1)

Tableau 1. Valeurs forfaitaires de Γ_{flu}

Conditions de mise en œuvre	PP/PE	PEHD	PET	PVA	AR
Coefficient Γ_{flu}	6	5	3	3	3

Où Γ_{vieill} est le coefficient de réduction lié aux dégradations d'origine chimique ou biochimique dues à l'environnement. En l'absence d'essai ou d'avis technique, l'annexe B de la norme XP G 38-064 définit les valeurs par défaut (Tableau 2)

Tableau 2. Valeurs forfaitaires de Γ_{vieill}

Classe de durée d'utilisation	pH	PET (fils)	PA	PEHD (extrudés)	PP
1 à 3	4 à 8	1,05	1,1	1,05	1,05
4 à 5		1,2	a)	1,3	1,3
1 à 3	8 à 9	1,1	1,1	1,05	1,05
4 à 5		1,3	a)	1,3	1,3

a) utilisation guide ISO/TR 20342

Où Γ_{instal} est le coefficient de réduction de l'endommagement dû aux agressions mécaniques lors de la construction. En l'absence d'essai/d'avis technique, l'annexe C de la norme XP G 38-064 définit les valeurs par défaut (Tableau 3).

Tableau 3. Valeurs forfaitaires de Γ_{instal}

Conditions de mise en œuvre	Peu sévères	Moyennement sévères	Sévères	Très sévères
Coefficient Γ_{instal}	1,15	1,25	1,50	2,50

$\gamma_{M,t}$ est le facteur partiel pour la résistance à la traction des éléments de renforcement issu de l'Eurocode 7.

Pour le géosynthétique en PVA retenu, la classe de durée d'utilisation 1 et des conditions de mise en œuvre sévères et un pH > 9, le coefficient de réduction global vaut $\Gamma_{total} = 3,65$. A titre d'exemple, sans essai ou avis technique, le coefficient de réduction global Γ_{total} est supérieur à 6,2 sans être en mesure d'apporter de justification sur la valeur de Γ_{vieill} considérée pour le pH > 9.

4.3. Justification de la stabilité

La longueur et la répartition des renforcements géosynthétiques ainsi que leur résistance à la traction sont intégrées dans le modèle géométrique et géotechnique du terrain et de l'ouvrage.

La stabilité générale et la stabilité mixte sont justifiées simultanément par la méthode de Bishop (figure 9). Le ratio de la valeur de calcul de l'effet déstabilisant des actions qui agissent sur le massif limité par la surface de glissement étudiée $T_{dst,d}$ sur la valeur de calcul de la résistance

stabilisatrice ultime mobilisée le long de la surface de glissement correspondante $R_{st,d}$ doit être inférieur à l'inverse du facteur partiel de modèle $\gamma_{S,d} = 1,1$.

$$T_{dst,d}/R_{st,d} < 1/\gamma_{S,d} \quad (3)$$

Le cercle de glissement le plus défavorable a un ratio $T_{dst,d}/R_{st,d}$ de 0,89 (figure 9), les stabilités générales et mixtes sont donc vérifiées.

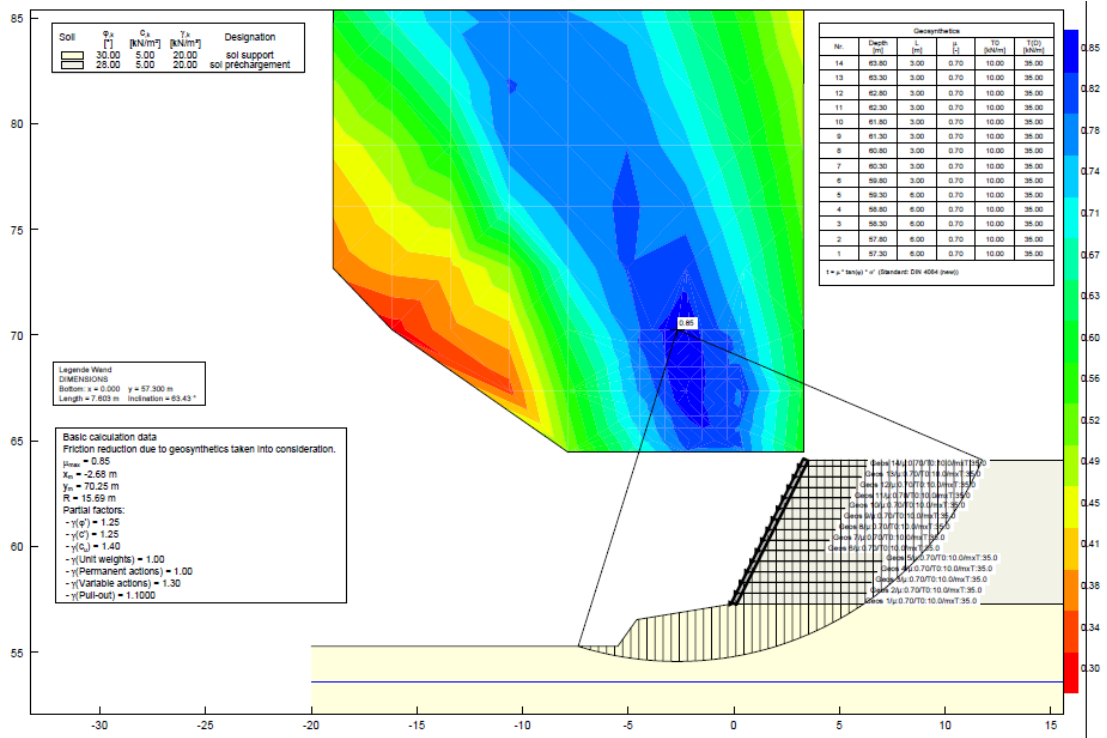


Figure 9. Justification des stabilités générales et mixtes avec GGU Stability.

La stabilité externe est justifiée sur le massif renforcé considéré comme un bloc par vérification que, d'une part la résistance ultime (portance) du terrain de fondation R_k est supérieure au poids des terres et charges V_d qui lui sont appliquées sur l'emprise du massif renforcé pondéré du facteur partiel de portance $\gamma_{R,v} = 1,4$.

$$(V_d \times \gamma_{R,v})/R_k < 1 \quad (4)$$

Et d'autre part, la résistance ultime au glissement sur le terrain de fondation R_d est supérieure à la valeur de calcul de la composante, parallèle à la base de l'ouvrage de la résultante actions appliquées au bloc « massif renforcé » H_d pondérée du facteur partiel de glissement $\gamma_{R,h} = 1,1$.

$$(H_d \times \gamma_{R,h})/R_k < 1 \quad (5)$$

4.4. Choix du parement

Les remblais de préchargement sont des ouvrages en terre ayant pour but d'accélérer la consolidation du sol support. Le massif va donc subir des déplacements verticaux. De plus des tassements différentiels peuvent apparaître si le sol est hétérogène. Le parement choisi est un parement souple par retour de nappe au sens de l'annexe E de la norme XP G 38-064.

Afin d'assurer une sécurité supplémentaire lors de la construction du remblai renforcé, d'ajouter un confinement du matériau de remblai au niveau de la façade et d'optimiser les quantités de géosynthétiques, des grands récipients vrac souples (GRVS) géotextiles communément appelés bigs-bags cubiques d'un 1 m³ une fois remplis sont mis en œuvre à l'avant du massif renforcé. Les

nappes géosynthétiques s'enroulent autour des big bags, assurant leur ancrage parfait. Egalement souples, ils sont également un élément du parement pouvant supporter les tassements différentiels.

La question de la protection aux UV ne se pose pas car le géosynthétique de renforcement est en PVA ce qui lui assure une résistance suffisante pour la durée de service de l'ouvrage de quelques mois maximum. Les big bags procurent même une protection supplémentaire en cas de vandalisme sur l'ouvrage.

5. Mise en œuvre du massif renforcé : exemple de la culée C0

5.1. Schéma de principe de l'ouvrage

Le massif renforcé consiste en nappes géosynthétiques espacées verticalement de $s_v = 0,5$ m. Les nappes de longueur d'ancrage 6 m à la base du remblai et 3 m ensuite s'enroulent autour d'un big bag et forment un retour de nappe de même longueur à l'arrière du massif selon le principe décrit figure 10.

Ce principe de construction, en plus d'assurer une stabilité accrue et d'être facile de mise en œuvre, permet d'économiser 19 m de longueur de géosynthétique par mètre linéaire de remblai renforcé soit près de 22% de la quantité totale de fourniture par rapport à une solution par retour de nappe classique de 1,5 m tous les 50 cm de hauteur.

5.2. Mise en œuvre

Le groupe COSEA SGI a réalisé la construction du massif renforcé de la culée C0 en juin-juillet 2013 après avoir préalablement installé un profilomètre et préparé le fond de fouille. Les big bags ont été remplis et les nappes de géosynthétique découpées à la longueur voulue à l'écart du site et ensuite placés selon la géométrie du massif. Quelques big bags ont été installés latéralement au remblai de préchargement pour assurer la continuité avec les talus non raidis (figure 10, figure 11).

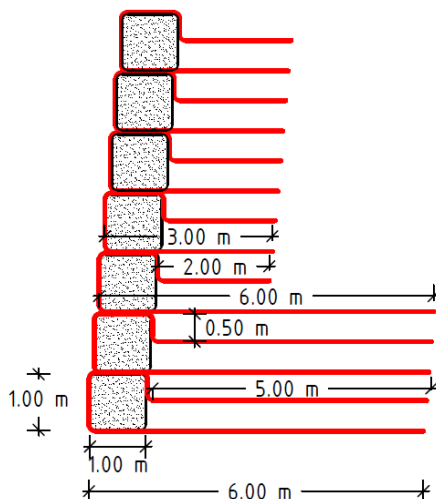


Figure 10. Schéma de principe du renforcement et vue sur le remblai construit.

Les nappes de géosynthétique sont placées horizontalement puis les big bags sont déposés à niveau du parement. Le remblai est ensuite monté sur 50 cm puis le retour de nappe replié. La figure 10 montre le remblai de préchargement, aux abords du ruisseau « Pas de Lapouyade » terminé.



Figure 11. Mise en œuvre.

6. Suivi des tassements et enlèvement du préchargement

Dès la fin de la construction du remblai de préchargement, la consolidation est suivie au moyen de mesures profilométriques. Le tassement est calculé par différence d'altitude par rapport à un point zéro réalisé avant la mise en œuvre du massif. La consolidation est considérée terminée lorsque les tassements sont stabilisés depuis au moins 3 semaines.

Sous le préchargement de la culée C0, des valeurs de 5 à 8 cm de tassement sont atteintes et stabilisées en moins d'un mois et demi (figure 12). Aucune déformation n'était visible sur le massif renforcé par des géosynthétiques.

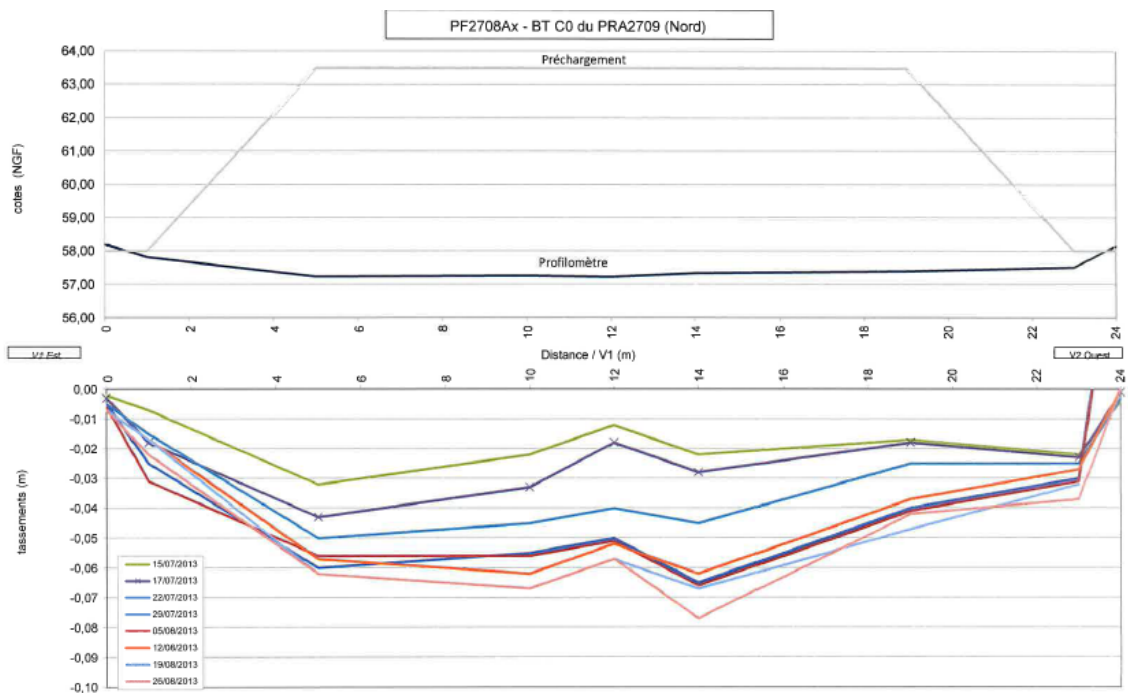


Figure 12. Suivi des tassements avec un profilomètre.

7. Conclusion

Conçus selon les normes NF P 94-270 et XP G 38-064 respectivement, les massifs renforcés par nappes géosynthétiques des culées C0 et C1 du PRA2709 ont rempli leur rôle de permettre la consolidation du sol support par tassement en assurant la stabilité des talus raidis des remblais de préchargement à proximité du ruisseau «Pas de Lapouyade».

La justification judicieuse des stabilités externe, générale, mixte et interne, si nécessaire, ainsi que le choix d'un géosynthétique tissé adapté au matériau et d'une méthode de construction astucieuse à parement souple en big bags ont permis de mener à bien ce projet de façon sûre, facile et économique.

Références bibliographiques

- Norme NF P 94-270 (juillet 2009) : « *Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement. Remblais renforcés et massifs en sol cloué* »
- Norme XP G38-064 (août 2010) : « *Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques – justification du dimensionnement et éléments de conception* »
- Norme NF EN 1990 : « *Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures* »
- Norme NF P 06-100-2 : « *Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures. Annexe nationale à la NF EN 1990* »
- Norme NF EN 1997-1 : « *Eurocode 7 : calcul géotechnique – Partie 1 : règles générales* »
- Norme NF P 94 251-2 : « *Eurocode 7 : calcul géotechnique – Partie 1 : règles générales. Annexe nationale à la norme NF EN 1997-1* »
- Norme NF EN 14-475 (2006) : « *Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Remblais renforcés* »
- Norme ISO/TR 20-342 (2007) : « *Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement* »
- Norme NF EN ISO 10 319 (2008) : « *Géosynthétiques – Essai de traction des bandes larges* »