

REMBLAIS RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUES DANS DES OUVRAGES D'INFRASTRUCTURE: ILLUSTRATION DE LA VARIÉTÉ DE PAREMENT AU TRAVERS DE PROJETS RÉCENTS

GEOGRID REINFORCED STRUCTURES IN INFRASTRUCTURE PROJECTS: ILLUSTRATION OF THE VARIETY OF FACINGS OF RECENT PROJECTS

Omar NACIRI¹, Frédéric LE BACCON²

1 *BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG, Espelkamp-Fiestel, Allemagne*

2 *NAUE Applications S.A.R.L., Vienne, France*

RÉSUMÉ – Les remblais renforcés par géosynthétiques sont de plus en plus utilisés et acceptés en tant que solution alternative aux méthodes traditionnelles, telles que les murs-poids en béton. Les géosynthétiques de renforcement offrent de nombreux avantages économiques, écologiques et techniques mais également une grande variété de parements pour répondre aux exigences esthétiques, le tout dans le respect du cadre normatif français. Ainsi, les talus raidis et les murs de soutènement peuvent être facilement adaptés à l'environnement de l'ouvrage. Selon l'inclinaison de l'ouvrage, le concepteur peut choisir entre différents types de parements disponibles sur le marché. Cet article montre la flexibilité, la durabilité et l'aspect économique de ces ouvrages. La première partie de cet article est consacrée aux différents systèmes et matériaux de parements en fonction de la configuration d'un ouvrage tandis que la seconde partie illustre plusieurs projets récents de remblais renforcés réalisés en France avec différents parements.

Mots-clés: Parement, remblai renforcé, géosynthétiques, écologie, esthétique.

ABSTRACT – Geosynthetic reinforced walls and slopes are increasingly used and accepted as alternative to traditional methods as for example concrete walls. The geosynthetic reinforcement products offer numerous advantages as to economy, ecology and technics but also a great variety of facings in order to meet the aesthetic requirements - this all in compliance with the French regulations. Thus, steep slopes and retaining walls can easily be adapted to the construction environment. According to the inclination of the construction, the designer can choose between different types of facings which are available on the market. This article informs about the flexibility, the durability as well as the economical aspect of such construction structures. The first part of this article deals with the different facing systems and materials depending on the configuration of a project while the second part illustrates several recently executed geosynthetic-reinforced projects which have been carried out in France with various facing systems.

Keywords: Facing, reinforced soil, geosynthetics, ecology, aesthetic.

1. Introduction

Apparus il y a une quarantaine d'années, les géosynthétiques sont aujourd'hui de plus en plus utilisés dans les projets d'infrastructures et notamment dans des ouvrages techniques tels que les remblais renforcés. Connus pour leur intérêt économique dans ces ouvrages, les géosynthétiques de renforcement sont une réelle alternative aux méthodes traditionnelles d'ouvrages de soutènement tels que les murs poids en béton, avec des avantages indéniables du point de vue du bilan écologique mais aussi de la variété des systèmes de parements associés disponibles.

Une autre raison pour l'utilisation croissante des géosynthétiques de renforcement dans les projets d'infrastructures est l'apparition depuis ces dernières années de normes pour le dimensionnement et l'exécution des murs de soutènement inclinés et les talus raidis en remblais renforcés (Normes NF P 94 270, XP G 38-064 et NF EN 14475). Les deux premières normes de dimensionnement ont été élaborées pour compléter l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1) dont elles constituent les normes nationales d'applications pour ce type d'ouvrages.

Elles ont apporté plus de transparence et de cohérence aux concepteurs. La conception de ces remblais étant désormais normalisée, ils ont pris toute leur place dans les projets d'infrastructures en

répondant aux exigences des ouvrages d'art avec un dimensionnement qui peut prendre en compte une durée de service à long terme.

2. Avantages économiques et écologiques des ouvrages avec solutions géosynthétiques

De nombreuses études ont porté sur l'avantage économique de ces ouvrages en remblai renforcé par géosynthétiques. Parmi les premières études comparatives figure celle faite par Koerner et al. (1998), à la fin des années 90 aux Etats-Unis. L'auteur a réalisé une étude des coûts de construction de murs de soutènement traditionnels en béton et de remblais renforcés par géosynthétiques. Cette étude a montré que le remblai renforcé par géosynthétiques apparaît comme la solution la moins coûteuse à hauteur équivalente. L'expérience en Europe nous indique qu'une économie du même ordre de grandeur (jusqu'à 50% des coûts) peut également être obtenue et que les entreprises sont de plus en plus intéressées à proposer ce type de constructions dites alternatives.

La réduction significative de l'empreinte carbone est également un enjeu actuellement et pour les années à venir. Quelques études comparatives entre des solutions classiques ou par géosynthétiques ont été menées telle que Corney et al. (2009). Non seulement l'effet économique apparaît clairement dans cette étude car étant moins énergivore, mais elle met également en évidence que la réduction de l'empreinte carbone durant tout le processus, depuis la fabrication des matières premières jusqu'à la construction sur site, est un critère important en faveur des ouvrages de soutènement par géosynthétiques.

Egloffstein (2009) en Allemagne illustre également cet aspect d'impact écologique avec un exemple de talus raidi réalisé en remblai renforcé par géogrilles pour stabiliser une route dans une région montagneuse de l'Allemagne (Figure 1).



Figure 1. Talus raide renforcé, phase de construction (à gauche) et phase d'exploitation (à droite).

Le projet a été initialement conçu avec un mur-poids classique en béton, mais pour des raisons politiques, le projet a été remanié avec une solution végétalisable avec une inclinaison de 60 degrés. Non seulement le budget pour la construction a été réduit par un facteur de 1,6, mais également l'empreinte carbone calculée pour les deux solutions donne un résultat de 6:1 (Figure 2).

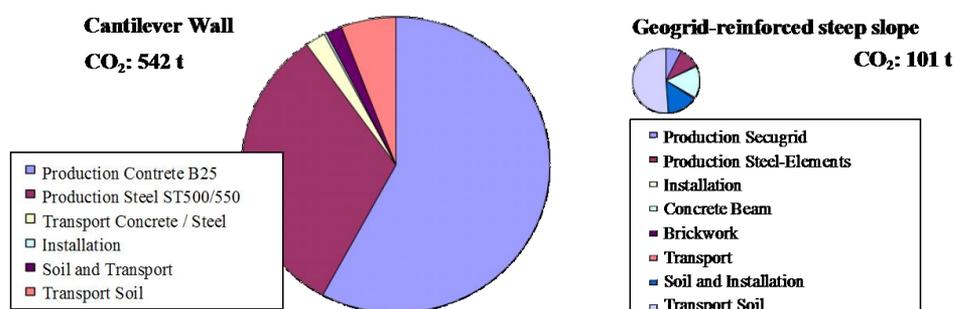


Figure 2. Étude comparative de l'empreinte carbone, exemple de mur poids en béton (à gauche) et de talus réalisé en géogrilles (à droite) (Egloffstein, 2009)

L'EAGM (European Association of Geosynthetic product Manufacturers) qui représente la grande majorité du marché européen des géosynthétiques et l'ETH Zürich (Institut Fédéral de Technologie) ont réalisés en 2012 une étude sur l'impact environnemental des géosynthétiques en faisant une série d'analyses du cycle de vie pour plusieurs fonctions et types d'applications. La performance environnementale des géosynthétiques est ensuite comparée à celle des matériaux de construction traditionnellement utilisés.

Cette étude a permis d'évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie d'ouvrages équivalents construits avec et sans géosynthétiques. Elle a démontré que l'utilisation de géosynthétiques peut permettre de réduire significativement l'impact sur le changement climatique global dans toutes les applications étudiées.

3. Variété de parement

Le parement représente la partie extérieure et visible de manière permanente du remblai renforcé. Différents types de parement existent sur le marché. Les parements sont des éléments faits de divers matériaux et configurations avec différents modes de liaison entre le parement lui-même et le géosynthétique de renforcement. Leur choix technique est principalement lié à leur inclinaison, qui est soit imposée par l'ouvrage ou définie par le concepteur.

Le parement a pour rôle de retenir les matériaux du remblai renforcé et de protéger les géosynthétiques de renforcement vis-à-vis de la lumière (ultra-violets) qui provoque leur vieillissement ainsi que vis-à-vis des endommagements (vandalisme, exposition au feu, etc.).

Les types de structures de soutènement et de parement sont définis en fonction de l'inclinaison de la face extérieure par la norme NF EN 14475. Cette norme européenne établit les principes généraux pour la construction des ouvrages en remblai renforcé. Elle s'applique aux remblais techniques renforcés par l'inclusion de renforcements horizontaux placés entre les couches de remblais au cours de leur construction.

Quelques exemples d'unité de parement sont présentés sur la Figure 3.

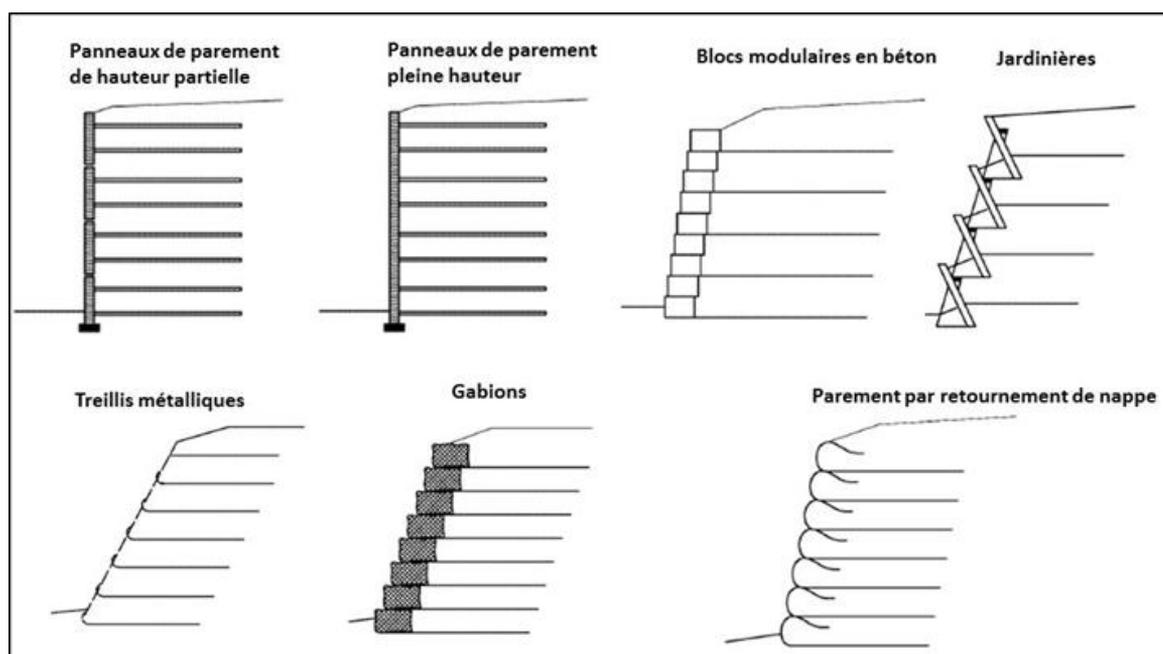


Figure 3. Quelques exemples d'unité de parement selon la norme NF EN 14475.

Les ouvrages en remblai renforcé par géosynthétiques offrent une grande flexibilité dans le choix de type de parement permettant d'être intégrés facilement dans des environnements variés. En effet, au cours des dernières années, le marché a connu une croissance, une large gamme de parement est devenue disponible, permettant des solutions pour presque toutes les situations.

4. Illustration de différents types de parements au travers de projets

Ce paragraphe vise à illustrer au travers de quelques projets réalisés récemment en France, des exemples de parements de talus raidis et ouvrages de soutènement pouvant être souples, rigides ou encore végétalisés, à l'aspect minéral ou en béton et parfois même combinés.

4.1. Merlon de protection contre les chutes de blocs à Val d'Isère

4.1.1. Données générales du projet

Le projet est situé sur la commune de Val d'Isère 73 (Hautes-Alpes) à la limite de la carrière de la Daille, au bord de la route départementale RD 902.

Le projet consiste d'une part à rehausser un merlon existant et d'autre part de réaliser un nouveau merlon de protection sur environ 150 mètres linéaires de façon de protéger la route départementale RD 902 accédant à la station de Val d'Isère contre les risques de chutes de blocs rocheux en provenance des falaises. Ces falaises qui se trouvent en amont de la carrière de la Daille, possédant une hauteur qui varie de 150 m à 300 m avec une inclinaison entre 53 degrés et 77 degrés. L'ouvrage est construit parallèlement sur une longueur d'environ 150 m à la route RD 902.

La difficulté était de conjuguer une emprise restreinte avec la construction d'un soutènement de grande hauteur aussi raide que possible tout en assurant sa fonction de pare-blocs.

L'ouvrage présente deux faces, l'une côté voirie avec un parement minéral rocheux, pour s'adapter à l'environnement rocheux (exigences esthétiques), et l'autre côté montagne qui est un ancien merlon, a été rehaussé afin de protéger et sécuriser la route contre les chutes permanentes de blocs et pierres. Le merlon a également été prolongé par rapport à l'ancien ouvrage.

4.1.2. Géométrie, caractéristiques et parements de l'ouvrage

4.1.2.1. Côté route départementale RD 902

Étant donné l'emprise limitée, une structure très inclinée a été réalisée. L'ouvrage est composé de deux structures superposées et séparées par une risberme de 1 m de large. En partie basse de l'ouvrage un parement minéral comportant des nappes de renforcements incliné à 5V/1H (environ 79°), sur une hauteur de 5 m. Il est réalisé en matériaux pierreux derrière un treillis métallique galvanisé, tous deux visibles sur une hauteur de 5,0 m. Ce type de parement est réalisé avec des nappes de renforcement avec un espacement vertical de 0,68 m. L'ouvrage est posé sur une longrine béton et protégé par une bordure granit T3. La partie haute de l'ouvrage se compose d'un talus avec une pente inclinée à 1V/1H (45 degrés) avec une hauteur de 0 à 6,75 m. Pour ce talus, une végétalisation est réalisée pour amener une protection vis-à-vis des phénomènes d'érosion.

4.1.2.2. Côté amont falaise

Le parement amont côté falaise a été réalisé par des pneus sur tout le linéaire de l'ouvrage. Il est incliné à 2,15V/1H (65°) par rapport à l'horizontal. Les pneus utilisés ont une épaisseur de 0,33 m et un diamètre de 1,10 m. Les nappes de renforcement en géogrille sont mises en œuvre avec un espacement vertical de 0,66 m (toutes les deux rangées de pneus) de façon à pouvoir être « pincées » entre deux rangées de pneus. La longueur en crête de merlon est de 3,0 m.

Les Figures 4 et 5 présentent un schéma de principe de l'ouvrage et un profil de long.

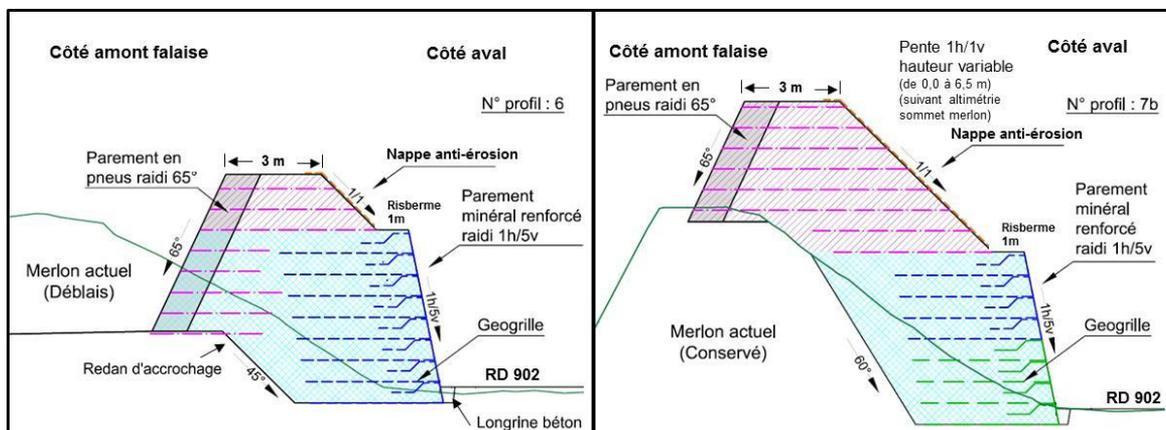


Figure 4. Profils de principe de l'ouvrage.

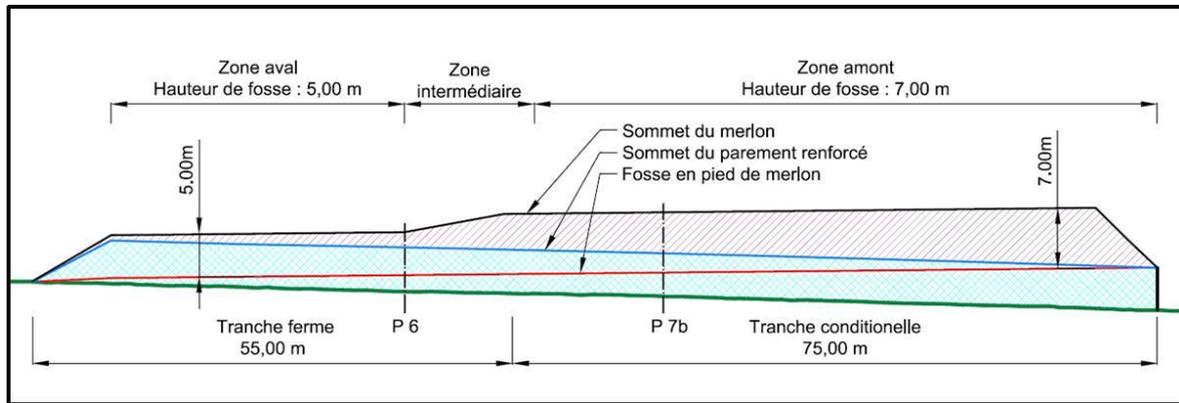


Figure 5. Profil de long.

Le renforcement des remblais est réalisé avec des géogrilles en polyester. Les remblais utilisés sont des matériaux extraits du site avec une granulométrie de 0/200 mm.



Figure 6. Photos de l'ouvrage.

4.1.3. Eléments généraux de conception de l'ouvrage

4.1.3.1. Hypothèses géotechniques et caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques des sols en place et des matériaux mis en œuvre sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des sols

	Angle de frottement interne φ' [degrés]	Cohésion effective c' [kPa]	Poids volumique γ [kN/m ³]
Remblai renforcé	36	0	21
Merlon en pneu-sol	35	0	18
Éboulis en place	35	5	19
Matériaux drainants	38	0	19

4.1.3.2. Classification sismique du site

Le projet est situé en zone de sismicité 3. Les terrains en place correspondent à un sol de classe B au sens de l'Eurocode 8. L'accélération maximale de référence est $a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$.

Le dimensionnement de ce projet a inclus la prise en compte d'une sismicité suivant la méthode pseudo-statique.

4.1.3.3. Renforcements et parements du merlon

Les renforcements utilisés sont des géogrilles en polyester (PET) Secugrid 40/80/120 suivant les zones.

4.1.3.4. Dimensionnement

Les calculs pour le dimensionnement du remblai renforcé sont effectués conformément à la méthode standard de dimensionnement géotechnique suivant les recommandations de la norme NF P 94-270 pour les remblais dont le parement est incliné à plus de 4V/1H et la norme XP G 38-064 pour les autres inclinaisons.

Pour les stabilités mixtes et générales, l'ouvrage est dimensionné à l'aide du logiciel «Stability» (Figure 7)

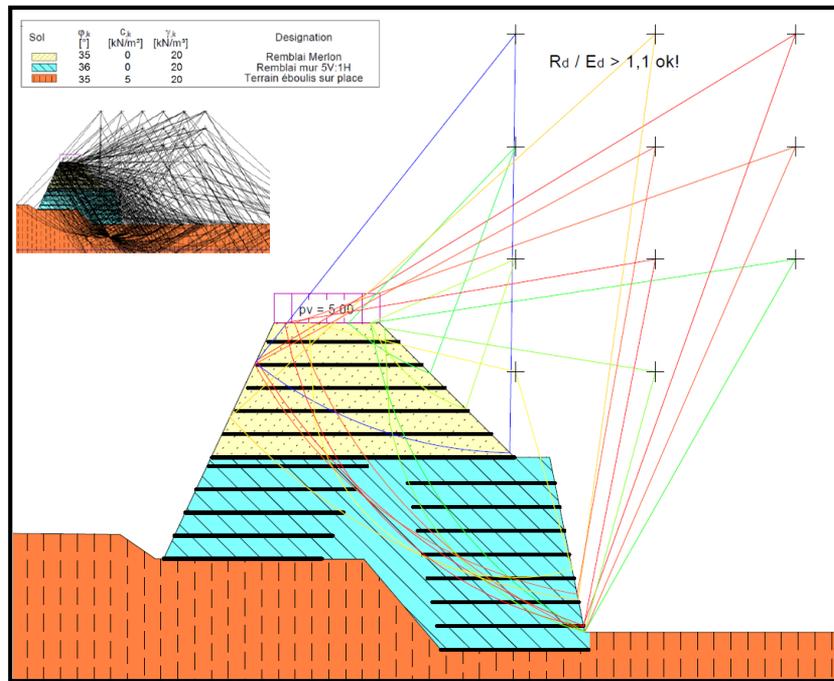


Figure 7. Exemple de lignes de rupture potentielle circulaire pour la stabilité mixte et générale. (Logiciel GGU-Stability)

4.2. RD 612 Rond-Point Vincent Badie (Béziers)

Pour fluidifier le trafic, le Conseil Général de l'Hérault restructure depuis septembre 2012 le giratoire Vincent Badie à l'est de Béziers. Ce chantier amorce le réaménagement des rocade Nord et Est de la ville, sur la RD 612. Cette rocade passe désormais sous le giratoire en 2 x 2 voies pour accéder à l'autoroute A9. Ces travaux créent un dénivelé important entre l'axe central du giratoire et l'anneau périphérique situé au niveau du terrain naturel.

Deux murs de soutènement ont été nécessaires à l'intérieur du giratoire de part et d'autre de l'axe de la RD 612.

Chacun des murs comporte deux types de parements: en partie inférieure, un parement minéral avec gabions sur une hauteur d'environ 4,0 m, surmonté d'un remblai renforcé à parement béton constitué d'éléments préfabriqués de pleine hauteur de 3,12 m posés sur semelle. Cette combinaison de deux parements associée à une géogridde de renforcement est une alternative proposée par l'entreprise à une solution initiale en mur de soutènement en «L» en béton tel qu'illustré dans sa coupe de principe de la Figure 8 ci-dessous.

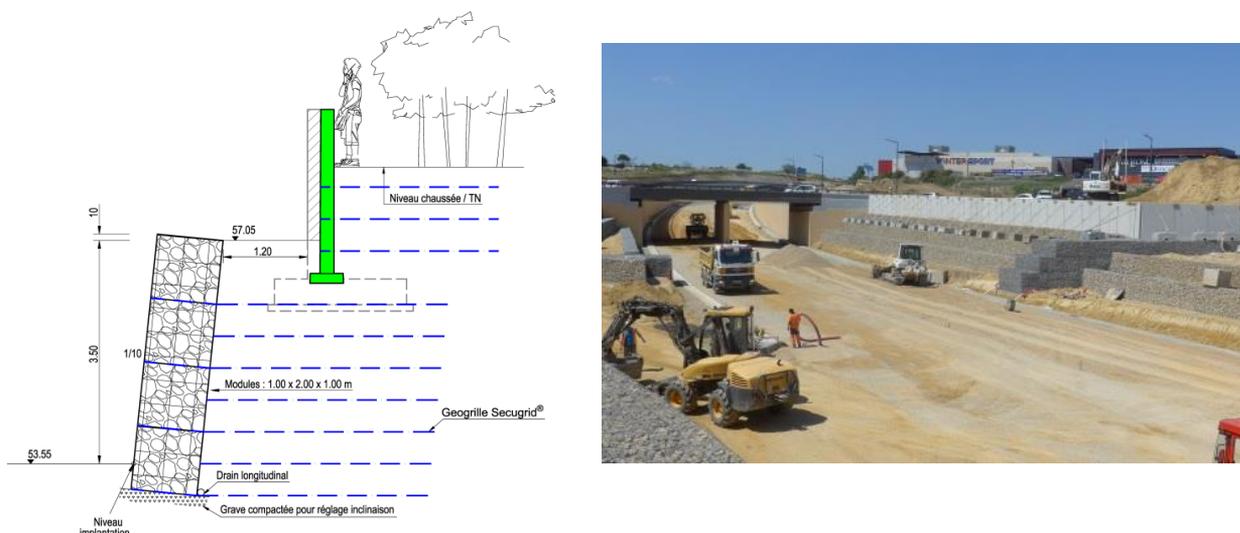


Figure 8. Coupe de principe et photo en cours de travaux illustrant les deux types de parements mis en œuvre.

L'ouvrage combine ainsi les deux systèmes, gabions et panneaux, sur un même soutènement. Ce type de parement ne présente aucun risque vis-à-vis de l'érosion causée par la pluie qui peut être intense dans cette région de Méditerranée.

Les renforcements de sol sont réalisés avec des géogrilles en polyester Secugrid avec un système de connexion à chaque type de parement. Les ouvrages sont dimensionnés conformément à la norme NF P94-270.



Figure 9. Photo de l'ouvrage en exploitation.

4.3 Fort de Feyzin

Les solutions en remblais renforcés avec différents parements offrent aux architectes de nombreuses possibilités, avec un grand degré de flexibilité dans la conception de la surface visible de l'ouvrage, comme le montre ce cas du Fort Feyzin, qui était une garnison abandonnée transformée en un centre de loisirs.

Le Fort de Feyzin a été édifié entre 1875 et 1877 sur une butte surplombant la vallée du Rhône, afin de protéger l'entrée sud de Lyon des invasions italiennes.

En 2009, la commune de Feyzin définit un projet global de développement du site: le Fort de Feyzin accueillera, après restauration, une base de loisirs avec un centre équestre. Afin d'utiliser d'avantage cet espace, un centre s'inscrit dans l'objectif de faire du fort un espace de loisirs de pleine nature avec un manège couvert ainsi qu'une carrière à ciel ouvert.

L'architecture du Fort et ses espaces naturels se prêtent particulièrement bien à cet aménagement, respectant ainsi le patrimoine existant. C'est dans cette optique qu'a été retenue la technique de remblai renforcé avec géosynthétique associé à un parement végétalisé. Le remblai monté en gradin a permis de réserver un espace pour les plantations d'espèces sélectionnées par l'architecte avec un paillis de surface afin de réduire les besoins en eau. La solution offre également l'avantage d'avoir utilisé les sols en place pour le remblai technique, en l'occurrence des terres limoneuses et sablo-limoneuses, évitant ainsi l'acheminement de granulats sur site.

L'inclinaison de la structure est de 68° et une hauteur allant jusqu'à environ 9,5 m. La géogrille de renforcement a été incorporée dans les couches, toujours en alternance avec une épaisseur de matériau de remblai compacté de 70 cm. Les différents remblais sont dimensionnés conformément à la norme XP G 38-064.



Figure 10. Photos en cours et après réalisation.

4.4 Réhabilitation et l'élargissement de routes existantes sur pentes: Cas de la RD 98 entre La Tania et Méribel

La route départementale RD 98 reliant Méribel à la station de la Tania en Tarentaise subit depuis plusieurs années des déformations importantes remettant en cause les conditions de sécurité de cet axe routier. L'origine de ces déformations est de multiples glissements de terrain en période de fonte des neiges. Une situation qui a finalement réduit cette route à une chaussée unique avec une circulation en alternance à partir de 2012 poussant le département de la Savoie de lancer des travaux stabilisation.

Afin de stabiliser cette portion de route, les travaux ont consisté à décaler la route actuelle et de créer une assise en remblai renforcé après déchargement du talus amont afin d'offrir un ouvrage monolithique pouvant se déformer uniformément.



Figure 11. Photos des déformations et affaissements de la chaussée.

Les matériaux du site ont été triés et purgés puis remplacés par un remblai renforcé par géogrilles en polyester avec un enrochement de part et d'autre. Les matériaux du site excavés ont été réutilisés dans le remblai renforcé. Le parement est composé de gabion en acier galvanisé remplis de pierres calibrées extraites du site. Ce type de parement minéral a été retenu pour son intégration paysagère et sa pérennité en site montagneux en altitude.



Figure 12. Photos en cours et après réalisation.

5. Conclusion

L'utilisation de géosynthétiques dans les remblais renforcés offre de nombreux avantages car ils permettent la réalisation d'ouvrages à géométrie complexe et flexible pour s'adapter à la situation du terrain et des exigences des concepteurs.

La réutilisation des matériaux issus des terrassements sur site est possible avec ce type d'ouvrage aussi bien dans le remblai technique qu'en parement. Cette technique aujourd'hui répandue génère des économies de construction et réduit l'impact environnemental par rapport aux méthodes traditionnelles.

Le parement de ces ouvrages peut être traité avec une grande variété en fonction de l'environnement du site de construction et de la configuration de l'ouvrage, avec des éléments préfabriqués, avec d'autres géosynthétiques ou avec des matériaux naturels.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (2009), Norme NF P 94 270 «Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènements renforcés et massifs en sol cloué», 188 pages
- AFNOR (2010), Norme XP G 38 064 «Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques - Justification du dimensionnement et éléments de conceptions», 69 pages.
- AFNOR (2005), Norme NF EN 14475 «Exécution de travaux géotechniques spéciaux».
- Fraser I., Elsing A. (2012). Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the E.A.G.M., Case 4, Soil Retaining Wall, *EUROGEO 5, Valencia, Spain*.
- Naciri O., Vollmert L. (2015). Geogrid reinforced structures for important infrastructure projects. *16th African Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Innovative Geotechnics for Africa, pages 493-499*.
- Nancey A., Laidié N. (2013). Analyse du cycle de vie des solutions géosynthétiques au regard des matériaux de construction conventionnels, *Rencontres géosynthétiques 2013, Dijon, pages 45-71*.
- Egloffstein T. (2009). Bauverfahren mit mineralischen Baustoffen und Bindemitteln im ökologischen Vergleich mit dem Einsatz von Geokunststoffen. *6. Geokunststoff-Kolloquium, NAUE GmbH & Co. KG, Bad Wildungen*,
- Corney N., Cox P., Norgate S., Thrower A. (2009). Sustainable Geosystems in Civil Engineering Applications. *WRAP, Banbury*,
- Koerner J., Soong T.-Y., Korner R.M. (1998). Earth Retaining Wall Costs in the USA, *GRI Report 10, Geosynthetic Institute, Folsom Pennsylvania, pages 38*
- Logiciel Stability de la société GGU, Allemagne

