

Structure en sol renforcé par grillages métalliques et géogrilles avec façade végétalisable ou minérale.

Application of steel wire mesh and geogrids for reinforced soil structures with vegetated and mineral facings

Alberto Grimod¹, Alexandre Plastre¹, Marco Vicari¹, Nicolas Goninet¹

¹Marita Maccaferri Marocco S.A. Route de l'Oulja km 0,6 - Sale, Maroc

Résumé

L'article présente la possibilité de coupler ensemble des géogrilles et du grillage métallique double torsion afin de pouvoir construire des murs en sol renforcés (*Mechanically Stabilized Earth* – MSE) de grande hauteur. Lors du dimensionnement de ces structures, le calcul doit prendre en considération la combinaison des géogrilles à haute résistance en polyester, considérées comme renfort principal, avec des unités préassemblées à l'usine de grillage double torsion, qui constituent le renfort secondaire et la façade (minérale ou végétale). Dans ces ouvrages hybrides, le renfort principal doit développer la résistance à la traction demandée lors du calcul (en considérant les coefficients de sécurité partiels), tandis que les unités de grillage métallique, qui sont fabriquées avec une nappe de grillage double torsion ayant la fonction de renfort secondaire, assurent la stabilité du parement vis-à-vis des possibles mécanismes de rupture : glissement, arrachement (*pull-out*) et rotation. Les évidences sur des structures existantes démontrent que les structures hybrides sont économiquement avantageuses dès qu'on dépasse les 10m de hauteur, car la façade et le renfort secondaire sont fabriqués ensemble comme des unités préassemblées, et la géogrille de renfort principale peut facilement être dimensionnée avec des espacements de 2 à 3 fois la hauteur du système de façade. Des structures hybrides de grande hauteur ont été réalisées dans le monde entier. Certaines des plus importantes sont présentées dans cet article : du premier ouvrage de 15 m de haut construit en 1997 au Royaume Unis, aux applications les plus récentes en Inde, de plus de 80 m de hauteur.

Mots clef: grillage métallique, géogrille, renfort, structure en sol renforcé, étude de cas.

Abstract

The paper deals with the possibility to combine geogrids and double twist steel meshes together to build high Mechanically Stabilized Earth (MSE) walls or slopes. For their design and construction it is possible to combine wire mesh units with high strength polyester geogrids, considering in this case the geogrids as “primary reinforcement” and the wire mesh units (double twisted wire mesh gabion units able to provide “stone facings” or double twisted wire vegetated external facing units) as a “secondary reinforcement” and “facing units”. In these hybrid structures the primary reinforcement is used to provide the tensile forces required to ensure global stability with the desired Factor of Safety; while the wire mesh units, which are produced with a “tail” of double twisted wire mesh as a secondary reinforcement, provide the local stability at the face, ensuring that no local mechanism of direct sliding, pullout or rotational failure can occur. Results on existing structures indicate that, as structures achieve relevant heights (above 10 m), hybrid structures become very cost effective, since the facing and the secondary reinforcement are made up of standard units while the primary geogrid reinforcement can be designed at a vertical spacing up to 2 to 3 times the size (height and depth) of the facing system, that is even at 3.0 m vertical centres. Very tall hybrid structures have been built all over the world according to this approach and case histories are presented of a reinforced soil hybrid structure such up to 80 m high.

Keywords: steel wire mesh, geogrid, reinforcement, reinforced soil structure, case study.

Introduction : les ouvrages en remblai renforcé

Les ouvrages en remblais renforcés sont des ouvrages de soutènement qui fonctionnent par frottement entre les éléments de renforcements et le remblai mis en œuvre. Ces ouvrages composites constituent des blocs capables de soutenir de grandes hauteurs et de reprendre de très fortes sollicitations. Ils présentent également un très bon comportement vis-à-vis de sollicitations sismiques.



Figure 1. Schéma de principe d'un sol renforcé avec façade en gabion double torsion

Les structures en sol renforcé offrent des avantages économiques par rapport aux systèmes conventionnels de murs de soutènement. Ce constat a poussé les chercheurs et les concepteurs à trouver des solutions qui pourraient réduire le coût total d'un tel ouvrage en optimisant l'utilisation du type de renfort, et notamment sur la combinaison entre des géogrids et des renforts en grillage à base de fil métallique (Hatami et al, 2001). Les simulations numériques, effectuées avec la prise en compte des conditions de contraintes planes, ont montré qu'un arrangement alternatif de renforts semble être plus efficace que des arrangements groupés de renforts de rigidité différente combinés ensemble.

Les remblais renforcés sont généralement utilisés pour différentes applications : soutènement des infrastructures (routes, autoroutes, chemin de fer, aéroports), élargissement de plateformes ou parking, protection des berges des rivières, merlons pare-blocs, mur de contrefort pour arrêter des glissements de terrain, mur de soutènement dans des zone sensibles sur le plan paysager et environnemental (ex. parc naturels), etc.



Figure 2. Gauche : remblai renforcé à parement minéral (utilisation en milieu routier et

hydraulique - France). Droite : remblai renforcé à parement végétal (utilisation comme merlon pare-bloc, capacité 25 MJ, hauteur 12m – Italie)

Les structures en sol renforcé hybrides

En comparant avec un modèle numérique de prévision de rupture plus réaliste (différences finies), certaines des configurations de calculs avec des renforts mixtes fournissent une réponse sous charge semblable à un modèle de renfort uniforme théorique. Les résultats de l'étude ont suggéré que la rigidité des couches de renfort placées à de petits intervalles est une stratégie à privilégier pour réduire au minimum la déformation du parement plutôt que d'utiliser des renforts plus raides avec un plus grand espacement. Ces résultats amènent à concevoir une structure de remblai renforcé hybride fait d'une combinaison de grillage métallique et de géogrilles, où le composant en acier a une fonction de renfort secondaire (qui minimise la déformation du parement) et les géogrilles constituent les fonctions de renfort principal, apportant aux matériaux une plus haute résistance, pour un coût modéré dans des conditions relativement simples d'installation (Figure 3).

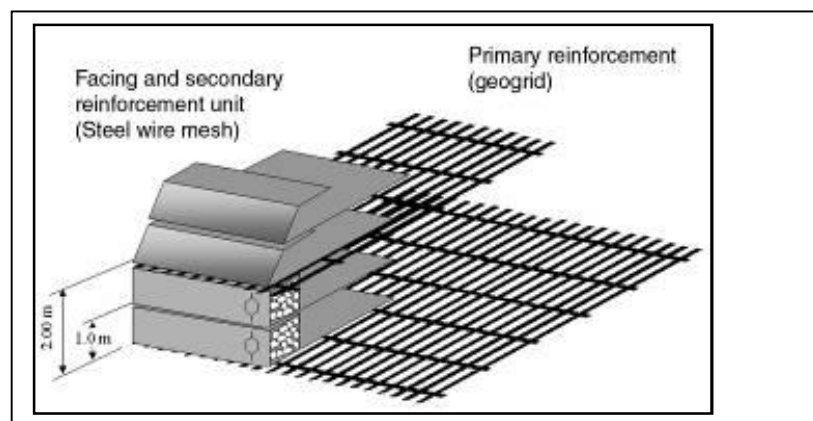


Figure 3. Principe d'un remblai renforcé de type hybride

Le système hybride est un remblai renforcé à parement incliné (végétalisable ou minéral) ou vertical (généralement minéral) constitué d'un grillage métallique double torsion (renfort secondaire et façade) inséré dans un matériau de remblai ayant un angle de frottement élevé et couplé, à chaque n-niveau, avec une géogrille qui fonctionne comme renfort principal. Les efforts de traction dans le sol sont transférés aux armatures par frottement.

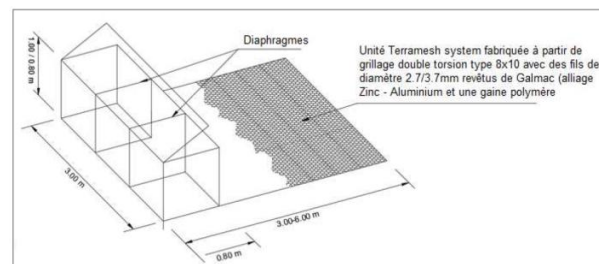
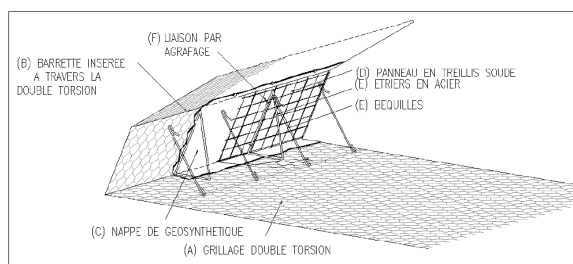


Figure 4. Vue des éléments en grillage double torsion à parement incliné (gauche) et vertical (droite). On remarque la nappe du renfort secondaire.

Les structures en sol renforcé hybrides utilisant du grillage double torsion présentent de nombreux avantages :

1. Perméabilité du parement, garantissant le drainage du remblai ;
2. Flexibilité de l'ouvrage, permettant à la structure de tolérer des tassements différentiels du sol, sans compromettre la stabilité du système ;
3. Possibilité d'avoir une façade minérale ou végétalisable, verticale ou inclinée, permettant de minimiser les impacts sur l'environnement et de s'adapter au site ;
4. Durabilité du système : grâce au revêtement polymérique appliqué sur le fil métallique constituant les unités en grillage double torsion, conformément à la norme EN 10223-3, ces systèmes peuvent atteindre une durée de vie de plus de 120 ans dans des environnements agressifs (ex. environnement type C4 en accord à la norme ISO 9223) ;
5. Economie et simplicité de mise en œuvre ;
6. Insonorisation (ex. barrières acoustiques) significative, jusqu'à 10-28 dB ;
7. Résistance aux impacts (merlon pare-blocs) très élevée, jusqu'à 25000-30000 kJ.

Logiciel de dimensionnement : Macstars W – Méthode des Déplacements

Macstars W est un logiciel développé pour vérifier la stabilité de pente en utilisant différents types du renfort et de scénarios complexes de conception. Le logiciel utilise l'approche conventionnelle de l'équilibre limite (Bishop, Janbu) et la méthode des déplacements (Lemonnier, Gourc). Macstars W a été employé pour vérifier son efficacité en reconstruisant le modèle d'effort et de contrainte des renforts dans des murs expérimentaux, en imposant la surface de rupture et l'étape-chargement de la structure.

Les résultats principaux de l'analyse méthode de déplacements sont décrits ci-dessous (Vicari et Duran da Silva 2005) :

- les conditions expérimentales de rupture ont été obtenues avec une valeur de l'angle de frottement de 52° ;
- Les tassements verticaux calculés sont presque identiques à ceux mesurés et tendent à être plus élevés seulement quand la charge appliquée est proche de la rupture (Figure 5) ;
- la valeur maximum du Facteur de Sécurité (FS) est atteinte pour toutes les étapes de charge en imposant une contrainte dans les renforts de grillage métallique égal à 18% ;
- l'état FS=1 est atteint pour $q=650$ kPa, auquel correspond un tassement vertical de la partie supérieure de la tête de mur égal à 40 millimètres.

En conclusion, la méthode des déplacements introduite dans le logiciel Macstars W permet une très bonne modélisation des conditions de dimensionnement, loin des conditions de rupture, ce qui correspond à une approche classique de dimensionnement pour le concepteur.

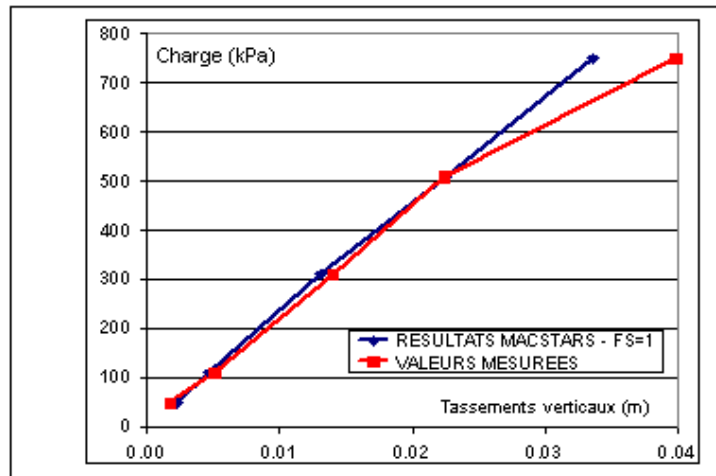


Figure 5. Comparaison entre les calculs effectués par Macstars et les tassements mesurés

Etude de cas de structures hybrides en sol renforcé par Grillage métallique et Géogrilles

Mur de 15 m de haut - Rénovation de cale sèche de Nigg (Cromarty Firth, UK, 1997)

Barmac, propriétaire de Nigg drydock, souhaitait faire évoluer son installation pour permettre la restauration de plus grands navires : un nouveau mur de quai de 240 m de long et 15 m de hauteur était nécessaire pour remplacer le pan incliné existant. Les exigences des clients ont été analysées en détail et en raison de la nature sans précédent de la conception, Maccaferri et Ove Arup ont travaillé conjointement pour satisfaire les demandes du client.

La conception préliminaire pour le mur renforcé constitué par des modules de remblai renforcé en grillage à parement gabion a été réalisée en conformité avec la norme BS 8006-1 ; vérifiant la stabilité interne et externe, en utilisant à la fois le logiciel Macstars et le logiciel d'équilibre limite Slope.

La contrainte principale était l'abaissement des eaux souterraines de 13 m à 0 m en moins de douze heures, ce qui a compliqué la conception et a exigé la mise en place d'une importante série de drains composés de géotextiles et d'agrégats. En combinant cette action avec les charges importantes appliquées sur le mur, la stabilité de la structure pouvait seulement être assurée avec l'utilisation de renforts à haute résistance en géogrille polyester (Paralink 300 kN/m), utilisé en combinaison avec les unités de Terramesh system (50 kN/m) suivant les indications de la figure 6.

La géogrille disposée dans la moitié inférieure de la structure assure une résistance élevée pour éliminer le risque de grand glissement et des renforts de longueur pouvant atteindre 20m ont été utilisés. La géogrille ParaLink est une structure composite, composée d'un noyau intérieur en fibres de polyester caractérisées par un faible fluage et d'une gaine en polyéthylène dur, rendant la structure durable et idéale pour l'environnement agressif de chez Nigg.

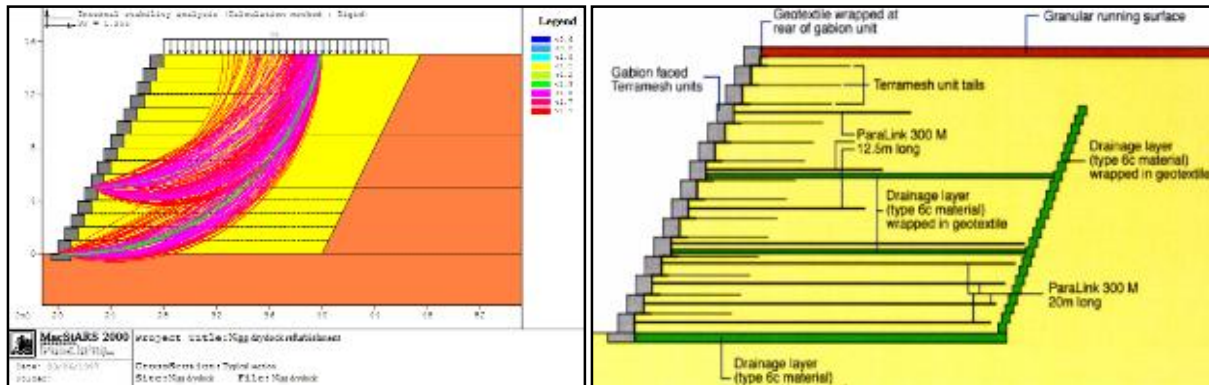


Figure 6. Nigg, UK– Calculs avec logiciel Macstars et coupe type de la solution hybride

Les travaux ont été réalisés en un mois. Dans la semaine suivant la fin des travaux, le dock a été mis en eau pour la première fois (Figure 7).



Figure 7. Nigg, UK – Ouvrage en cours de réalisation et une fois terminé

Ouvrage de 29,2m de haut - Aménagement d'un Parc à Leiria (Portugal)

Ce mur en sol renforcé a été construit pour agrandir le parking du Parc Retail à Leiria, Portugal. L'ouvrage présente une hauteur maximale de 29,2 m. Compte tenu de la faible emprise en pied, la solution retenue a consisté en la combinaison d'un mur en remblai renforcé (semi vertical) et d'un talus en sol renforcé. Une solution constituée de renforts principaux en géogrilles et de renforts secondaires plus courts en grillage métallique (Figure 8) a été retenue.

En parallèle, une comparaison a été faite en utilisant une approche conventionnelle utilisant le même type de renforts de géogrilles avec une plus petite résistance et uniformément espacée. Les renforts en géogrilles ont été choisis pour fournir des facteurs de sécurité interne et global comparables à la solution combinant des renforts principaux et secondaires; la section alternative de conception est rapportée dans la figure 8. Basé sur l'expérience, le coût estimatif de la section conçue utilisant des renforts combinés, en incluant l'approvisionnement du matériel et les coûts d'installation (mise en œuvre, fourniture et compactage du remblai) a été estimé approximativement à 15 % moins chère que la section équivalente conçue avec des renforts en géogrilles seulement. Le projet à Leiria a été conçu en avril 2001. La construction de mur (3.300

m2 de parement) a commencé en mai 2001 et s'est terminée en août 2001. L'hydroensemencement a été fait en octobre 2001 (Figure 9).

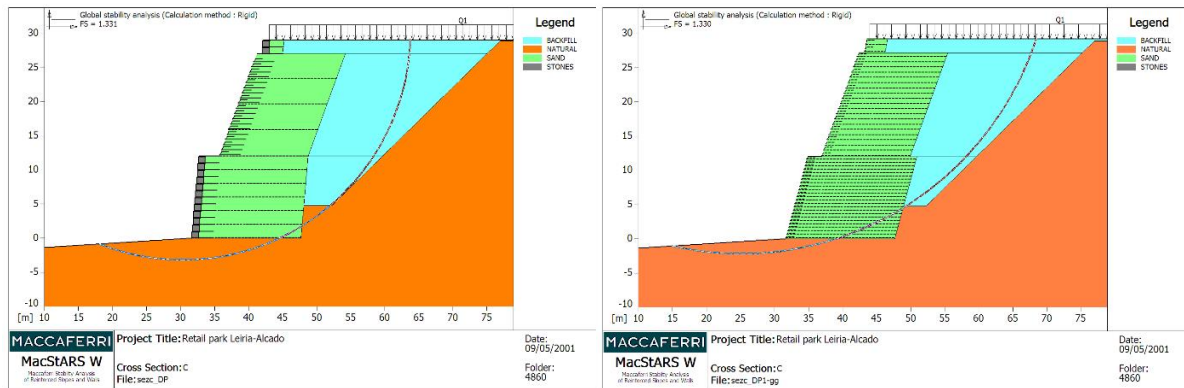


Figure 8. Leiria, Portugal – Solution mise en œuvre - géogrilles et grillage- (schéma supérieur) en comparaison avec la solution avec une géogrille uniforme (schéma inférieur)



Figure 9. Leiria, Portugal – Vue de l'ouvrage en construction et une fois terminé

Ouvrage de 37 m de hauteur - Autoroute entre Rreshen et Kalimash (Albanie)

Le projet de 103 kilomètres de long, attribué à l'entreprise Bechtel Enka Joint Venture (BEJV), est un raccordement clé entre le port de Durres, premier port d'Albanie sur la Mer Adriatique et le Kosovo. L'autoroute est conçue en 2x2 voies avec des chaussées de 2 x 3.75 m, complétées par des bandes d'arrêt d'urgences de 2 m et fondée sur le relief difficile du terrain montagneux de l'Albanie à plus de 1.000 m d'altitude. 30 structures en sol renforcé hybrides composées de Terramesh system ayant des nappes de 4 m de longueur et de géogrilles ParaLink 300, dont la longueur est variable en fonction de l'emplacement dans le remblai, ont été réalisés. La hauteur maximale des différents ouvrages est de 37 m. Compte tenu de la fondation sur versant du massif en sol renforcé, les éléments de base sont associés à des longueurs de géogrille plus faibles qu'en tête d'ouvrage (Figure 10).

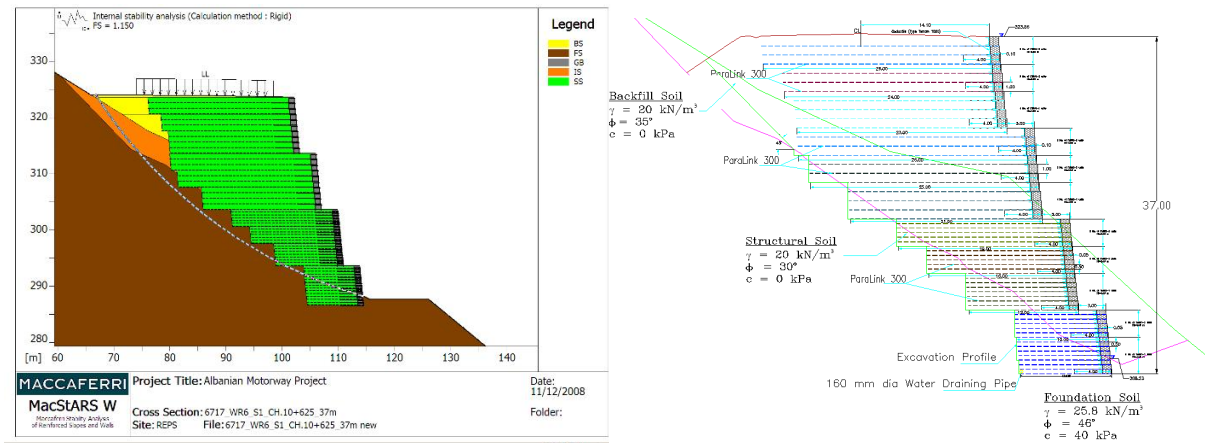


Figure 10. Projet autoroutier entre Rreshen et Kalimash, Albanie – Calculs Macstars et coupe type du mur en remblai renforcé hybride de 37 m de hauteur



Figure 11. Projet autoroutier entre Rreshen et Kalimash, Albanie – Vue de la structure en construction et une fois terminée

Ouvrage de 80 m de hauteur – Aéroport du Sikkim (Inde)

La région du Sikkim, au nord de l'Inde, est une zone très isolée à l'accès difficile par des cols à très haute altitude. La réalisation d'un aéroport pour approvisionner plus rapidement la région et permettre l'intervention rapide des secours devenait indispensable. Le relief de haute montagne imposait la réalisation d'une piste sur un versant montagneux, nécessitant de gros travaux de terrassement en déblais et remblais et la construction d'ouvrages de soutènement à l'aval de la piste sur une longueur de plus de 2 km.

Compte tenu de la grande hauteur des ouvrages et de l'aléa sismique important, la technique de soutènement s'est naturellement orientée vers une solution en sol renforcé. Cette technique permettait entre autres de répondre aux exigences de temps (rapidité de pose), de souplesse (ouvrage fondé en zone sismique), de drainage (zone soumise à de forts épisodes pluvieux – mousson), d'intégration dans l'environnement et de réutilisation des matériaux issus des déblais importants. Une analyse spécifique du terrain en place et du remblai mis en œuvre a été réalisée.

L'emprise limitée a nécessité la mise en œuvre d'un parement sub-vertical en pied d'ouvrage à l'aide d'un module de remblai renforcé en grillage à parement gabions alors que la partie supérieure était constituée de modules de remblai renforcé en grillage inclinés et végétalisables. En couverture, un talus d'une douzaine de mètres de hauteur, de 30° d'inclinaison a été réalisé. Le talus a été imperméabilisé à l'aide d'une couche d'argile de 25 cm d'épaisseur et d'une géomembrane et protégé de l'érosion par un tapis anti-érosion.

Les renforts principaux de l'ouvrage sont des géogrilles en polyester protégées par une gaine en polypropylène de résistance et de longueur variable suivant leur emplacement dans le remblai. Pour la section la plus importante, la hauteur totale de l'ouvrage est de 80 m avec 26 m de parement minéral sub-vertical, 40 m de parement raidi végétalisable et 12 m de talus incliné à 30°. En pied d'ouvrage le dimensionnement a conduit à mettre en œuvre des géogrilles d'une résistance de 800 kN/m pour une longueur de 66 m espacées tous les mètres de longueur (Figure 12).

Des dispositifs de collecte des eaux ont également été aménagés afin de canaliser les quelques 5 cours d'eaux traversant la zone d'étude ainsi que l'ensemble des eaux pluviales tombant sur le site. Des drains constitués de gravier + géotextiles ont été placés à l'arrière du remblai structural et des cadres bétons traversant la structure en sol renforcé ont spécialement été installés pour permettre la traversée des torrents dévalant de la montagne (Figure 13).

La réalisation de l'ouvrage de soutènement s'est effectuée entre janvier 2009 et décembre 2011 et les installations complètes de l'aéroport devaient être terminées pour fin 2012. Durant la construction, en septembre 2011 l'ouvrage a subi un séisme de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter (ce qui a causé une accélération horizontale d'environ 2,94 m/s² bien supérieure à l'accélération de calcul de 1,17 m/s²) sans pour autant compromettre son intégrité au contraire de nombreux ouvrages construits dans le secteur.

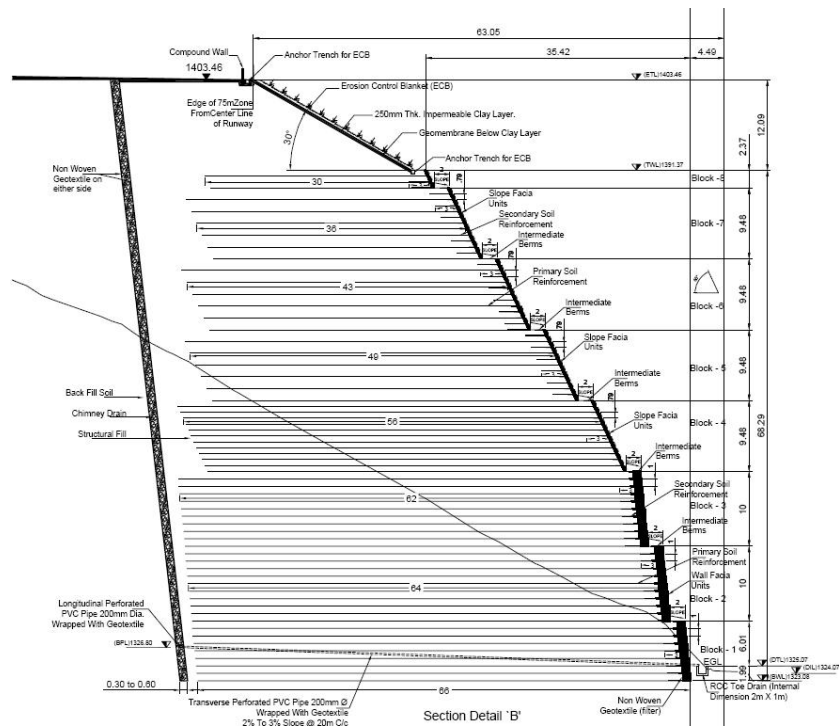


Figure 12. Coupe type de la hauteur maximale



Figure 13. Photographies de l'ouvrage fini

Conclusion

Des recherches complètes couvrant la modélisation physique et numérique ont été réalisées sur des structures mixtes combinant des géogrilles et des renforts en grillage métallique. Les résultats permettent aujourd'hui de concevoir des structures en remblai renforcé hybrides, combinaison de grillage métallique en double torsion et de géogrilles à haute résistance, pour diminuer sensiblement le coût des ouvrages par rapport aux solutions traditionnelles connues. Des ouvrages de très grandes hauteurs (plus de 80m) ont déjà été réalisés dans le monde et sont en projet actuellement.

Bibliographie

- BS 8006-1, 2010 - Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BSI Standards publication.
- Bishop A. W., 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5: 7-17.
- EN 10223-3, 2013. Steel wire and wire products for fencing and netting. Part 3: Hexagonal steel wire mesh products for civil engineering purposes
- FLAC 2D. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2D, ITASCA, Minneapolis (USA)
- Gourc J.P., Ratel A., Delmas P. 1986. Design of fabric retaining walls: The displacement method, 3rd International Conference On Geotextiles, II: 289-294, Vienna.
- Hatami K., Bathrust R.J., Di Pietro P. 2001. Static Response of Reinforced Soils Retaining Walls with Non-uniform Reinforcements. *The International Journal of Geomechanics*: Volume 1, Number 4, 477-506.
- ISO 9223, 2012. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres -- Classification, determination and estimation. International standard.
- Janbu N., Bjerrum L. and Kjaernsli B., 1956. Stabilitetsberegning for fyllinger skjaeringer og naturlige skraninger. Norwegian Geotechnical Publication No. 16, Oslo, Norway.
- Macstars W – Maccaferri Stability Analysis of Reinforced Soils and Walls software, Officine Maccaferri, Bologna (Italie)
- SLOPE. Computer program for the analysing the stability of slopes. Geosolve, London
- Vicari M., Duran da Silva J., 2005. Lessons learned from the numerical modelling of a retaining wall with non-uniform reinforcements, Infogeo 2005, Belo Horizonte.