

EXPÉRIENCE RWANDAISE DANS LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT EN SOL RENFORCÉ

RWANDESE EXPERIENCE IN RETAINING STRUCTURES WITH REINFORCED SOIL

Laurent SAKOU¹, Romain DURAND², Michel MBESSA³, Giuseppe BALLESTRA⁴

1 Huesker Synthetic GmbH, Gescher, Germany;

2 Huesker SAS, France

3 Chef de Département de Génie Civil de l'ENSP de Yaoundé, Cameroun

4 Redstone Ltd

RÉSUMÉ - Malgré des applications nombreuses, courantes et prouvées sur les plans techniques, économiques et environnementaux, les géogrilles de renforcement restent des matériaux peu utilisés par les maîtres d'œuvre, les entrepreneurs, les bureaux d'études, les instituts et les écoles de formations d'ingénieurs en Afrique et plus particulièrement en Afrique Subsaharienne. Le présent article illustre un cas pratique d'ouvrage de soutènement en sol renforcé par géogrilles dans le cadre de la réhabilitation de l'autoroute joignant Ruhengeri à Gisenyi au Nord du Rwanda. Le challenge, les objectifs, la conception, les principes de dimensionnement, et les dispositions constructives dans ce projet sont présentés.

Mots-clés : Mur de soutènement, massif renforcé par géogrilles, principes de dimensionnement.

ABSTRACT - Despite all the current and proven applications regarding the technical, economic and environmental aspects, geogrids remain little used by jobs owners, contractors, consultants, engineering institutes and schools in Africa and particularly in Sub-Saharan Africa. A practical case of geogrid reinforced retaining soil as part of the rehabilitation of the highway joining Ruhengeri to Gisenyi in the North of Rwanda is illustrated. The challenge, the objectives, the conception, the design methodologies and the construction details within the project are presented.

Keywords: Retaining wall, geogrids reinforced soil, design principles.

1. Introduction

La route Ruhengeri à Gisenyi dans le nord du Rwanda est la principale voie de transit des marchandises vers la République démocratique du Congo (RDC). Cette route traverse une région montagneuse. Il est important de mentionner que la route originale a été construite il y a environ 40 ans. L'augmentation du volume du trafic des poids lourds et la détérioration générale de l'état de la route existante ont entraîné des ruptures et des déplacements en bordure de chaussée sur une section de la voie principale. Par ailleurs, certaines parties de cette section de la chaussée présentent une largeur de chaussée insuffisante et un manque de structure de sécurité appropriée (Figure 1).

2. Objectifs et solution retenue

La réhabilitation de la route Ruhengeri à Gisenyi implique entre autre l'élargissement de la chaussée existante d'environ 1 m, la création supplémentaire d'une « épaulement » d'environ 2 m et la construction d'une barrière de sécurité appropriée sur une section d'environ 200 m. Ces objectifs ont conduit à une analyse technico-économique de quatre options différentes (terrassement côté intérieur de la montagne, murs poids en moellons, murs poids en béton armé, sol renforcé par géogrilles). Au bout de cette analyse, le maître d'ouvrage a opté pour la solution de remblai de sol renforcé par géogrilles avec un parement raidi à aspect végétalisable. Cette solution de remblai de sol renforcé par des géogrilles a été retenue entre autres pour les raisons suivantes :

- la possibilité de réemploi des matériaux du site,
- la souplesse et la rapidité de la mise en œuvre par de la main d'œuvre locale,
- l'adaptation du système avec les phases de construction,
- le respect du temps de construction,
- le faible coût de cette solution par rapport aux solutions traditionnelles,

- le respect des mitoyens et de l'environnement.

En bref, cette analyse technico-économique a montré que la solution de remblai de sol renforcé par des géogrilles était plus appropriée, plus économique, plus écologique et durable dans un contexte de développement durable. Les travaux de réhabilitation de la voie Ruhengeri-Gisenyi ont débuté en juillet 2007 et ont été achevés en mars 2010. La section incluant le remblai de sol renforcé a été construite en 2009.



Figure 1. Situation de la section de route avant le début des travaux.

3. Conception et dimensionnement

La conception et le dimensionnement ont été réalisés conformément aux normes et guides européens. Les calculs géotechniques ont été effectués conformément à la norme allemande DIN 1054 (Vérification de la sécurité des travaux de terrassement et des fondations), le guide allemand EBGEO (Recommandations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements), et l'Eurocode EC7 à travers les facteurs de sécurité partiels. L'analyse de l'ouvrage consistait à vérifier d'une part sa stabilité interne, externe et mixte (États limites ultimes ELU), et d'autre part les déformations et distorsions, déplacements et tassements du remblai renforcé en service (États limites de services ELS). Les calculs ont été réalisés avec le logiciel de conception GGU Stability (Slope Stability analysis and analysis of soil nailing and reinforced earth walls to DIN 4084 and EC 7).

3.1. *Éléments généraux de conception*

Les données du projet, fixées contractuellement par le maître d'œuvre, recouvrent le site d'implantation ainsi que la catégorie de l'ouvrage (ouvrage permanent). Les autres données nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage de soutènement sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Charges et paramètres géotechniques de dimensionnement.

Charges			
charge permanente	[kPa]	$p = 10$	
charge routière	[kPa]	$q_r = 20$	
charge piétonne	[kPa]	$q_s = 5$	
Paramètre du sol		remblai technique	terrain existant
Angle de frottement	[degrés]	$\varphi' = 28$	$\varphi' = 36$
Cohésion	[kPa]	$c' = 5$	$c' = 100$
Masse volumique du sol	[kN/m ³]	$\gamma = 19$	$\gamma = 24$
Valeur-pH (3 to 9)		neutre	neutre

Aucune action sismique n'a été considérée dans cette zone du projet. Le parement sera incliné de 70 degrés par rapport à l'horizontale. La hauteur maximale du remblai en sol renforcé sera de 8 m. La Figure 2 présente la géométrie de section et le sol renforcé projeté.

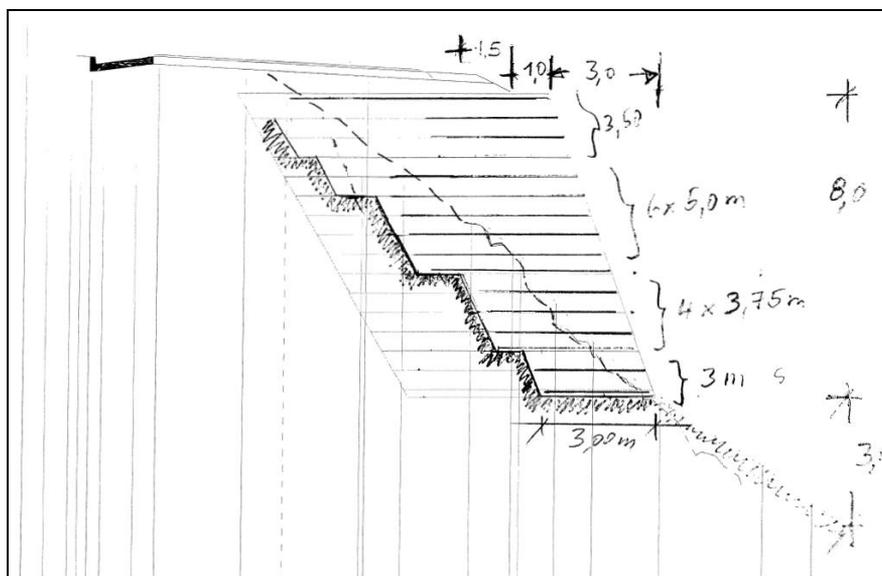


Figure 2. Géométrie de la section de route Ruhengeri à Gisenyi à renforcer.

3.2. Dimensionnement, Résultats et choix de la géogrille

La justification de la stabilité interne, externe et mixte du remblai renforcé par géogrilles consiste à vérifier le choix des géogrilles en type, nombre, longueur et espacement vertical à l'intérieur du remblai, de façon à assurer l'équilibre pour toutes les lignes de ruptures potentielles. Cette justification consiste à vérifier que, pour chaque combinaison d'actions, les résistances de calcul des éléments constitutifs et celles mobilisées par les phénomènes mis en jeu (interaction sol/géogrille, cisaillement du sol) génèrent un degré d'utilisation inférieur à 1,0. Le degré d'utilisation (μ) est défini par l'équation 1 (Ziegler, 2005).

$$\mu \times \sum R_d - \sum F_d = 0 \quad (1)$$

μ : Degré d'utilisation [-]

$\sum R_d$: Somme des valeurs de calcul de la résistance stabilisatrice ultime.

$\sum F_d$: Somme des valeurs de calcul de l'effet déstabilisant ultime.

Le dimensionnement tient compte de la résistance à la traction à court terme ($R_{B,k0}$) et à long terme ($R_{B,d}$) de la géogrille. Le polymère constitutif de la géogrille doit être compatible en termes de durabilité avec le matériau de remblai et les matériaux constitutifs du parement. Les différents coefficients réducteurs pris en compte dans l'évaluation de la résistance à la traction à long terme de la géogrille utilisée sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Coefficients réducteurs appliqués sur le géogridde utilisé dans le projet.

	$R_{B,k0}$ [kN/m]	A_1						A_2			A_3	A_4			A_5	γ_M		
		1 an	2 ans	5 ans	10 ans	60 ans	120 ans	grain fin $D_{90} \leq 2$ mm	grain mix $D_{90} \leq 32$ mm	grain gros $D_{90} \leq 63$ mm		Acide ($2 \leq \text{pH} < 4$)	Neutre ($4 \leq \text{pH} \leq 9$)	Alcalin ($9 < \text{pH} \leq 10$)		CC 1	CC 2	CC 3
Géogridde Type Fortrac 55 T	55	1,39	1,41	1,43	1,45	1,50	1,60	1,08	1,11	1,14	1,0	1,15	1,03	1,10	1,0	1,4	1,3	1,2

Les coefficients réducteurs sont définis par des essais normalisés et validés par des avis techniques. La résistance en traction de dimensionnement à long terme $R_{B,d}$ est définie suivant l'équation 2.

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k0}}{A_1^* A_2 A_3^* A_4 A_5^* \gamma_M} \quad (2)$$

- A_1 : coefficient réducteur lié à l'évolution physique du matériau sous l'effet du fluage,
- A_2 : coefficient réducteur lié à l'endommagement dû aux agressions mécaniques lors de la construction,
- A_3 : coefficient réducteur lié au recouvrement, connexion, liaison,
- A_4 : coefficient réducteur lié aux dégradations d'origine chimique ou biochimique dues à l'environnement,
- A_5 : coefficient réducteur lié à l'impact dynamique,
- γ_M : coefficient de sécurité sur le géosynthétique.

Le Tableau.3 présente les caractéristiques spécifiques de la géogridde utilisée dans le projet. Ce sont des géogriddes flexibles en fibres de polyester de haute ténacité recouvertes d'une protection en polymère contre les agents extérieurs (contre les rayons U.V., les micro-organismes et les produits chimiques présents dans le sol).

Tableau 3. Caractéristiques spécifiques de la géogridde utilisée dans le projet.

Caractéristiques spécifiques	Unité	Géogridde
Type de fibre avec enduction polymérique		PET
Résistance à la rupture nominale DIN EN ISO 10319 (SP/ST)	kN/m	$\geq 55/25$
Allongement à la rupture nominale DIN EN ISO 10319 (SP/ST)	%	$\leq 10/10$
Résistance de conception R_{dt}^*	kN/m	22,07
Coefficient d'interaction avec le sable DIN EN ISO 12957-1-2	[-]	$\geq 0,9$
Masse surfacique DIN EN ISO 9864	g/m ²	240
Maille des géogriddes	mm	20 x 30
Post-fluage après construction jusqu'à la fin de la durée de vie conception		$\leq 1\%$

On obtient donc pour la géogridde une résistance en traction à court terme de 55 kN/m et une résistance en traction de dimensionnement à long terme de 22,07 kN/m. Les valeurs de calcul $T(D)$, l'intersection du géogridde et du remblai technique (u), les coefficients réducteurs, et les longueurs d'ancrage de chaque nappe géogridde sont présentés sur les Figures 3 et 4.

La Figure 3 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode de Bishop, le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 3000 cercles de rupture potentielle examinés est de 0,96 ($< 1,0$).

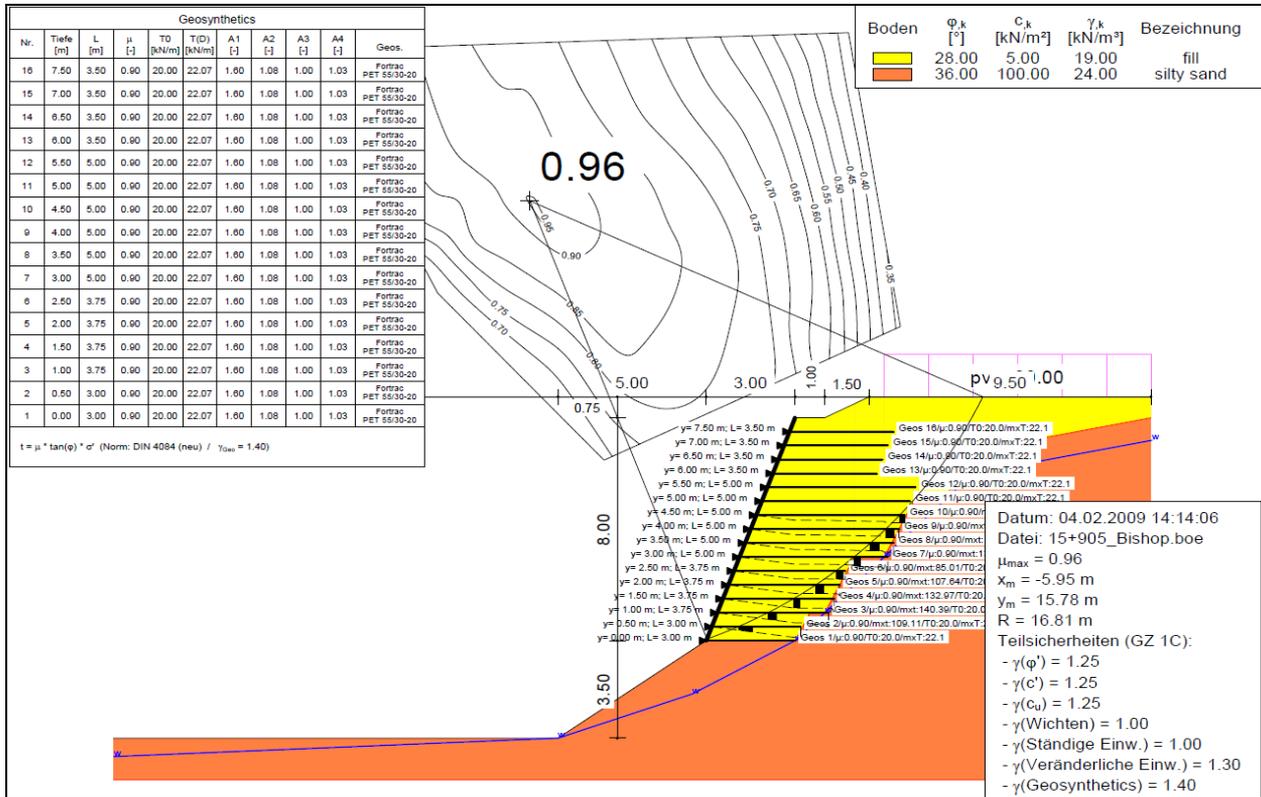


Figure 3. Cercles de rupture potentielle selon la méthode de Bishop (GGU-Stability).

La Figure 4 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode des blocs glissants, le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 2000 lignes de rupture potentielle examinés est de 0,95 (< 1,0).

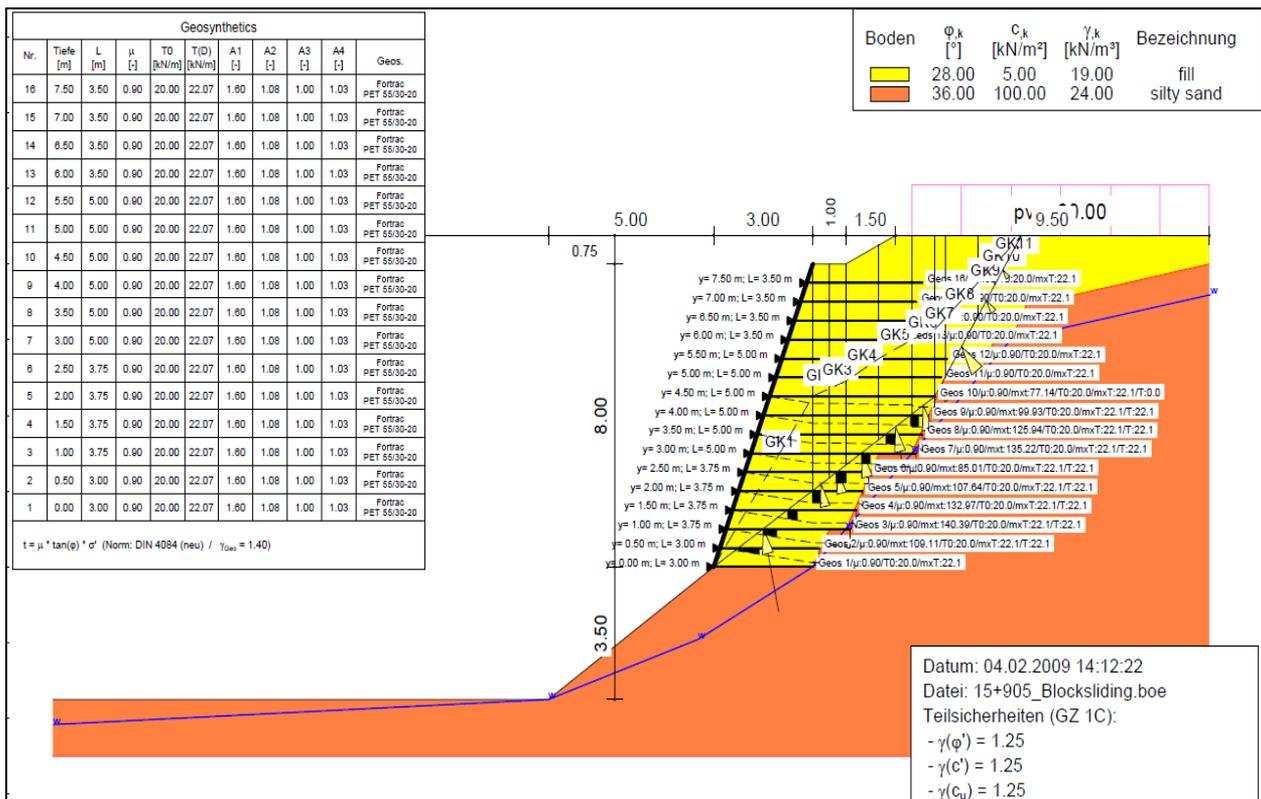


Figure 4. Lignes de rupture potentielle selon la méthode des Blocs glissants (GGU-Stability).

4. Construction du massif renforcé : Route Ruhengeri-Gisenyi

Il est rappelé que la Norme européenne NF EN 14475 (Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés-) établit de manière générale les principes généraux pour la réalisation de ce type de travaux. Le procédé de construction est un processus répétitif.

- La première phase de construction comprend l'excavation de la pente existante jusqu'au niveau requis (Figures 5 et 6).
- Un géotextile non-tissé a été installé le long du remblai pour assurer la séparation et la filtration (Figure 7).
- Le sol support du remblai technique a été soigneusement compacté afin d'obtenir une plate-forme uniforme. L'uniformité et l'angle désiré du parement sont réalisés à l'aide d'un coffrage provisoire fixé et maintenu en place par des tiges métalliques (Figure 8).
- Un géotextile anti-érosif est placé en face avant du géogrille pour maintenir la terre végétale (Figure 9) Les géogrilles de longueur requise d'après les calculs de stabilité (Figs. 3 et 4) sont mises en œuvre avec une longueur suffisante en amont du coffrage provisoire pour assurer un retour de nappe/ancrage d'au moins 1,50 m (Figure 10).
- La couche de matériau de remblai est ensuite apportée jusqu'à la hauteur spécifiée (60 cm) et compactée à une densité Proctor d'au moins 98% de l'OPN.
- La couche de remblai étant complète, le coffrage provisoire est enlevé et replacé au-dessus pour la couche suivante. Le même procédé est répété jusqu'à ce que la hauteur maximale de la structure soit atteinte.

Les figures suivantes présentent les différentes étapes de construction :



Figure 5. Vue du site, début des travaux de terrassement



Figure 6. Excavation de la pente existante.



Figure 7. Géotextile de séparation et filtration



Figure 8. Installation de la géogrille et du géotextile.



Figure 9. Ancreage du géogrille par retournement



Figure 10. Vue globale de l'ouvrage en cours de construction.



Figure 11. Vue de l'ouvrage

5. Conclusion

L'expérience rwandaise avec le remblai renforcé par nappes de géogrilles dans le cadre de la réhabilitation de la route principale Ruhengeri-Gisenyi a montré que cette solution, lorsqu'elle est retenue par les maîtres d'œuvres présente des avantages significatifs tant sur le plan économique, écologique, qu'environnemental, avec une parfaite intégration paysagère. Les solutions traditionnelles peuvent souvent être coûteuses et peu adaptées dans des contextes géotechniques et géologiques difficiles comme dans le cas du projet présenté. Les recherches continues des solutions techniques en accordance avec les principes de développement durable étant de plus en plus exhortées par les états rendent ce type de structures, qui présentent d'énormes avantages au regard du développement durable, particulièrement intéressant. Grâce à la réduction importante du volume et du poids des matériaux à transporter, ces structures permettent en général de réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière significative. Ils permettent le réemploi des matériaux du site ou à proximité du site tout en réduisant le temps de construction et les coûts de chantier.

6. Références bibliographiques

- DIN 1054 (2005) Baugrund: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
- DIN EN 1997-1 (2004) Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules
- EBGEO (2010) Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements, *German Geotechnical Society (DGGT), Ernst & Sohn, Essen-Berlin.*
- NF EN 14475 (2007) Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés. *Indice de classement : P 94-326*
- NF EN ISO 10319 (2008) Géosynthétiques - Essai de traction en bande large
- M Geok E 2005 (2005) Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus,
- Ziegler M. (2005). Geotechnische Nachweise nach DIN 1054: Einführung mit Beispielen, *Ernst & Sohn*