

Construction de la nationale Kigali-Gatuna - Franchissement des marais

Laurent Şakou¹, Michel Mbessa², Romain Durand³, Amel Belinga⁴, Rémy Zeh⁵, Giuseppe Ballestra⁶

¹ *Huesker Synthetic GmbH, Allemagne*

² *Chef de Département de Génie Civil de l'ENSP de Yaoundé, Cameroun*

³ *Huesker SAS, France*

⁴ *Cabinet Medou, BET, Cameroun*

⁵ *Ministère des Travaux publics, Chef de la Cellule de Veille Technologique, Cameroun*

⁶ *Redstone Ltd, Rwanda*

RESUME

La solution des remblais renforcés sur les marais (sols compressibles) représente une alternative écologique, économique et technique intéressante dans les projets d'infrastructures routières en Afrique. La route nationale Kigali-Gatuna d'une longueur de 80 km fait partie du réseau primaire d'intérêt international qui relie le Rwanda à l'Ouganda. La section du projet qui se situe dans le corridor nord pays reliant Kigali au port international de Mombasa a été réalisée en 2015. Cette section traverse trois grands marais d'une longueur totale de 1900 ml constituée de différentes couches de sols compressibles d'une profondeur totale allant jusqu'à 9 m.

Le présent article illustre les résultats des reconnaissances géotechniques et résultats des analyses technico-économiques des variantes envisagées dans ce projet par le bureau d'étude technique. Les motivations ayant abouties au choix de la solution de couche de remblai renforcé par géogrilles comme technique adéquate de franchissement des trois marais. La conception, la modélisation des matériaux de renforcements afin d'assurer les stabilités, les détails et les dispositions constructives de l'ouvrage routier sont présentés.

ABSTRACT

The solution of reinforced embankments on marshes (compressible soils) represents an interesting ecological, economic and technical alternative in road infrastructure projects in Africa. The 80 km-long Kigali-Gatuna National Highway is part of the primary international network linking Rwanda and Uganda. The section of the project which is located in the north corridor country linking Kigali to the international port of Mombasa was realized in 2015. This section crosses three large marshes of a total length of 1900 ml consisting of different layers of compressible soils of a depth Up to 9 m.

This article illustrates the results of the geotechnical surveys and the results of the technical-economic analyzes of the variants envisaged in this project by the technical office. The motivations leading to the choice of the geogrid reinforced embankment solution as an adequate technique for overbridging the three marshes. The design, modeling of the reinforcement materials to ensure the stabilités, details and construction features of the roadwork are presented.

1. INTRODUCTION

Les travaux concernent la section de la route Kigali – Gatuna du corridor nord reliant Kigali au port international de Mombasa. Il s'agit d'un tronçon de 77,80 km qui prend son origine à la périphérie de la ville de Kigali et s'étend jusqu'à Gatuna située à la frontière avec l'Ouganda.



Figure 1 – Localisation de la section de la route Kigali – Gatuna, Rwanda

Les travaux de reconstruction sont regroupés en 5 phases :

- Réhabilitation (élargissement et renforcement) de la chaussée bitumée, y compris reconstruction de la structure, et mise en place d'une nouvelle couche de roulement et aménagement de la plateforme au poste frontière.
- Amélioration du système d'assainissement avec mise en place de drains sous fossés et remplacement des ouvrages d'assainissement dégradés.
- Construction des remblais renforcés pour la traversée de trois marais sur sols compressibles (1900 ml).
- Élargissement de la section courante des ponts existants et création des trottoirs piétons en encorbellement.
- Création d'un rond-point à l'entrée de Kigali

2. LOCALISATION ET LONGUEUR DES ZONES DE MARAIS

Le projet traverse trois zones marécageuses communément appelés Marais A, B et C, qui ont été reconnues par des forages et des essais géotechniques. Il s'agit selon le marché des travaux des zones suivantes :

- Marécage A : pk 61+785 - pk 62+327 (L=542 m)
- Marécage B : pk 64+925 - pk 65+725 (L=800 m)
- Marécage C : pk 67+200 - pk 67+827 (L=627 m)

3. CAMPAGNE GEOTECHNIQUE

En ce qui concerne la répartition des reconnaissances géotechniques, il était recommandé d'envisager pour chacun des trois sites, des tests pouvant, suivant les conditions locales, être adaptés tout en respectant les paramètres à obtenir. L'analyse des résultats a permis en seconde partie de l'étude d'analyser les différentes options de traitement de ces marais et recommander la meilleure solution pour la réalisation des travaux

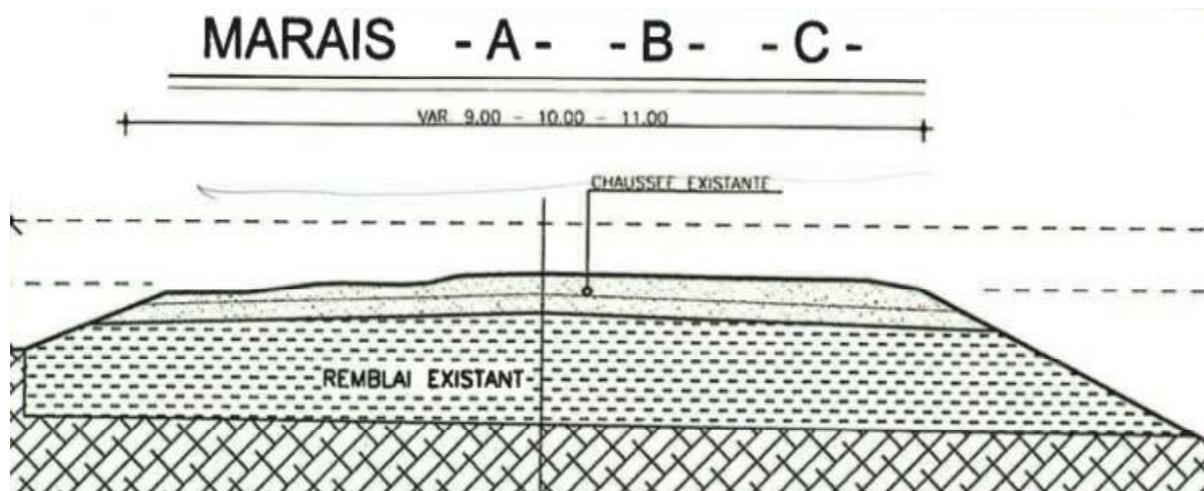


Figure 2 – Profil en travers type existant de la route Kigali – Gatuna, Rwanda

Les différents résultats analysés par la mission de contrôle, montrent que les trois sites sont semblables étant composés de sols de très faibles compacités, et pratiquement immergés en permanence. Les analyses granulométriques et sédimentométriques, font ressortir les faibles dimensions des particules composant le sol, et cela jusqu'à des grandes profondeurs (25 à 28 m). Les profils en travers montrent une profondeur qui varie de 10 à 20 m d'argile schisteuse, reposant soit directement sur de la tourbe en plaquette, soit sur des argiles jaunes sur un fond sableux.

4. ETUDES DES VARIANTES DE TRAITEMENT DES MARAIS

L'étude établie à la suite des reconnaissances géotechniques une liste de solutions techniques qui peuvent être préconisées. Il s'agit en fait du catalogue de solutions connues pour le traitement des zones compressibles. Les différentes solutions techniques préconisées sont :

- Solutions 1 et 2 : Préchargement du sol en place.
- Solution 3 : Construction avec des matériaux de remblais allégés
- Solution 4 : Construction avec des structures ultralégères
- Solution 5 : Pont sur piles fondés dans le sol dur
- Solution 6 : Remblai renforcé par nappes de renfort Fortrac
- Solution 7 : Renforcement des remblais par inclusions rigides.

Le tableau 1 montre une synthèse des différentes solutions proposées et évaluées par la mission de contrôle.

Tableau 1 : Synthèse des solutions proposées

Solution	Technique	Contrainte	Fiabilité	Commentaires
1 et 2	Préchargement	Temps nécessaire, perméabilité du sol, emprise	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Lent, peu cher, pas adapté à cause de la perméabilité du sol
	Préchargement avec drains verticaux	Plus rapide, perméabilité du sol, emprise	Plus flexible	Rapide, relativement cher, pas adapté à cause de la perméabilité du sol
3 et 4	Remblais légers	Protection du matériau léger	Faible, tassements possibles	Cher, nécessite systèmes de renforcement Remblais très légers, très

				chers
5	Pont / dalle sur pieux	Profondeur et capacité portante du bon sol	Très bonne	Extrêmement cher
6	Remblai renforcé par nappes de renfort Fortrac	Disponibilité des nappes de renfort	Très bonne Très flexible	Rapide, adapté, relativement moins onéreux
7	Remblai sur inclusions rigides	Profondeur et capacité portante du bon sol	Bonne	Très cher, rapide

Une évaluation systématique des différentes options a permis au Maître d'oeuvre (Mininfra / Rwanda Transport Development Agency (RTDA)) de porter son choix sur la solution 6 « Remblai renforcé de faible hauteur par nappes de renforts Fortrac »

5. CONCEPTION ET MODELISATION

Les calculs pour le dimensionnement du remblai renforcé à la base sont effectués conformément à la méthode standard de dimensionnement géotechnique suivant les recommandations du EBGE0 2010. Les vérifications des stabilités sont réalisées avec le logiciel « GGU Stability » selon les méthodes de Bishop et Janbu, en tenant compte de Eurocode 7. Les calculs sont basés sur le concept de sécurité partielle selon les recommandations du EBGE0 2010. Les forces motrices sont pondérées et les forces de résistance déduites dans le but d'atteindre une marge de sécurité définie en fonction du cas de charge individuelle (DS-P ou DS-T). Le degré d'utilisation obtenu « μ » et doit être $\leq 1,0$.

En situation persistante (DS-P) l'analyse de stabilité du remblai considère que le processus de consolidation est achevé et le calcul est fait avec les paramètres du sol drainés. Pour tenir compte des conditions non drainées durant la période de construction, l'analyse en situation transitoire (DS-T) est réalisée avec des paramètres drainés du sol en assumant la présence d'un excès de pression interstitielle dans le sol compressible. L'excès de pression interstitielle peut être mis en oeuvre dans le modèle GGU avec l'aide des couches de consolidations. Les charges et paramètres géotechniques de dimensionnement sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Charges et paramètres géotechniques de dimensionnement

<i>Charges</i>			
surcharge de trafic « live load »	[kN/m ²]		p = 33,3
surcharge routière « dead load »	[kN/m ²]		q = 0
<i>Paramètre du remblai technique</i>			
hauteur du remblai	[m]		1 ≤ H ≤ 3
angle de frottement	[°]		φ' = 25 / 35
cohésion	[kN/m ²]		c' = 0
masse volumique du sol	[kN/m ³]		γ = 20
valeur-PH			neutre
<i>Sol marécageux</i>		<i>sableux argileux</i>	
épaisseur couche de sol	[m]	D	10
masse volumique du sol	[kN/m ³]	γ	14
angle de frottement	[°]	φ'	20
cohésion	[kN/m ²]	c'	5
niveau des eaux souterraines		H _w	-1,0

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 et ancrage 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 tiens compte de la résistance à la traction de à court terme ($R_{B,k0}$) et à long terme ($R_{B,d}$) du géogrille. Le polymère constitutif du 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 du géogrille utilisé sont présentés dans le Tab. 3.

Tableau 3 : Coefficients réducteurs appliqués sur le géogrille

	$R_{B,k0}$ [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
F 40/40 T	40	1,39	1,41	1,43	1,45	1,50	1,60	1,08	1,11	1,14	1	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 (Ebge 2010).

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

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

Les caractéristiques techniques du géogrille utilisé sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques techniques du géogrille

Caractéristiques spécifiques	Unité	Géogrille
Type de fibre avec enduction polymérique		PET
Résistance à la rupture nominale DIN EN ISO 10319 (SP/ST)	kN/m	$\geq 40/40$
Allongement à la rupture nominale DIN EN ISO 10319 (SP/ST)	%	$\leq 10/10$
Résistance de conception $R_{B,d}$	kN/m	26,7
Coefficient d'interaction dans le sable DIN EN ISO 12957-1-2	[-]	$\geq 0,9$

Masse surfacique DIN EN ISO 9864	g/m ²	240
Maille des géogrilles	mm	20 x 30
Post-fluage après construction jusqu'à la fin de la durée de vie conception		≤ 1%

La Figure 3 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode de Bishop dans la marais A. Le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 3026 cercles de rupture potentielle examinés est de 0,95 (< 1,0).

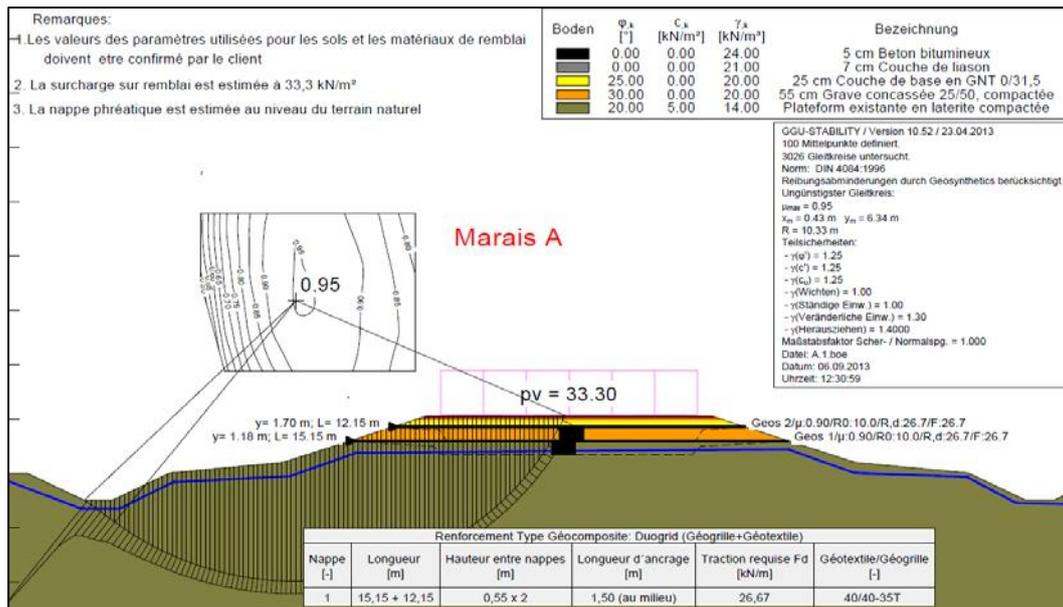


Figure 3 – Justification ELU-stabilité globale Marais A

La Figure 4 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode de Bishop dans la marais B. Le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 3026 cercles de rupture potentielle examinés est de 0,91 (< 1,0).

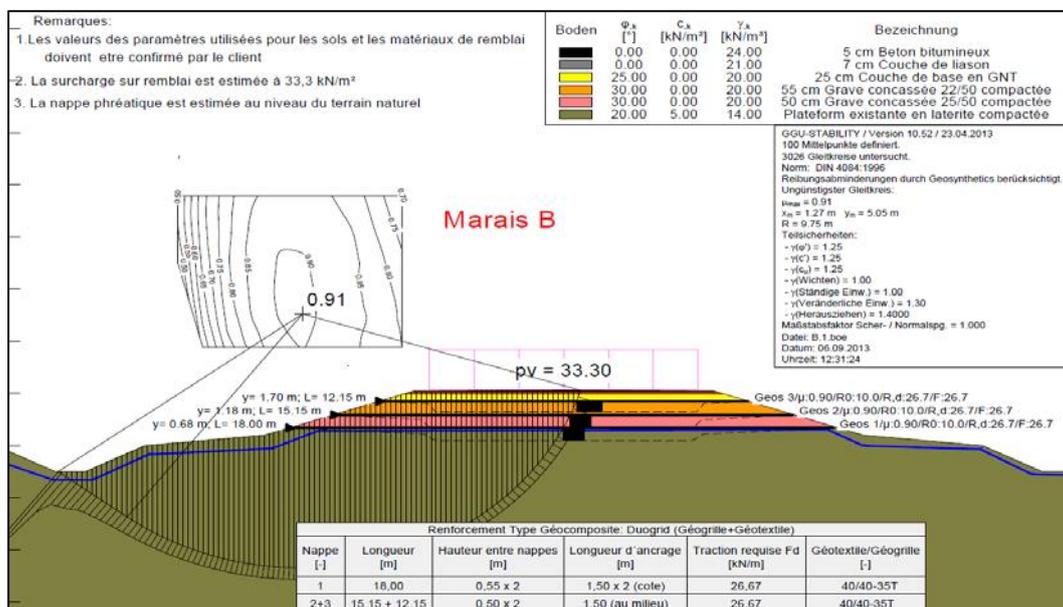


Figure 4 – Justification ELU-stabilité globale Marais B

La Figure 5 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode de Bishop dans la marais C. Le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 3026 cercles de rupture potentielle examinés est de 0,96 (< 1,0).

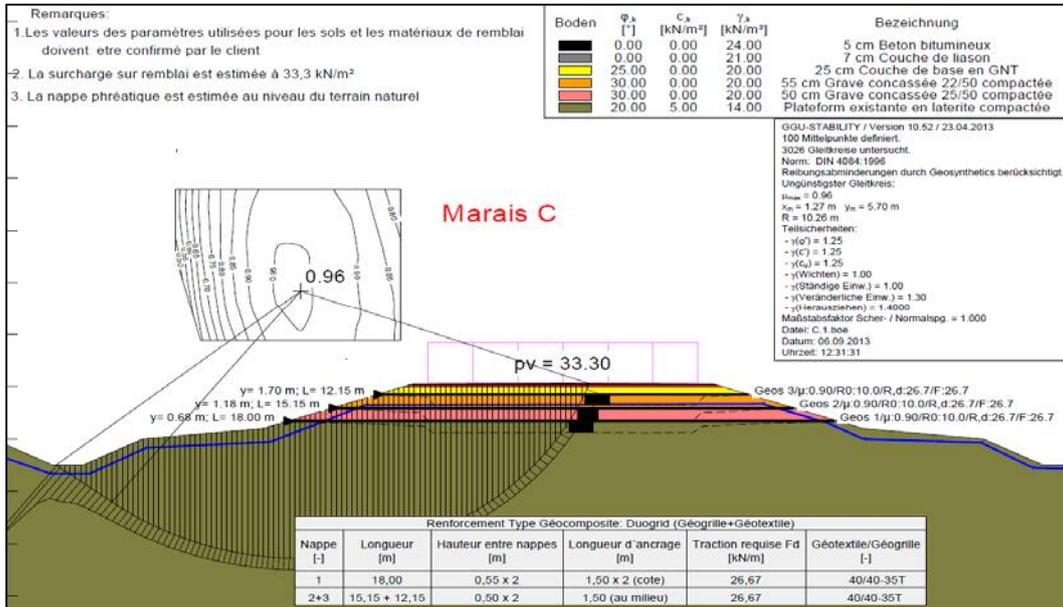


Figure 4 – Justification ELU-stabilité globale Marais C

La figure 5 présente le profil en travers type dans la marais A

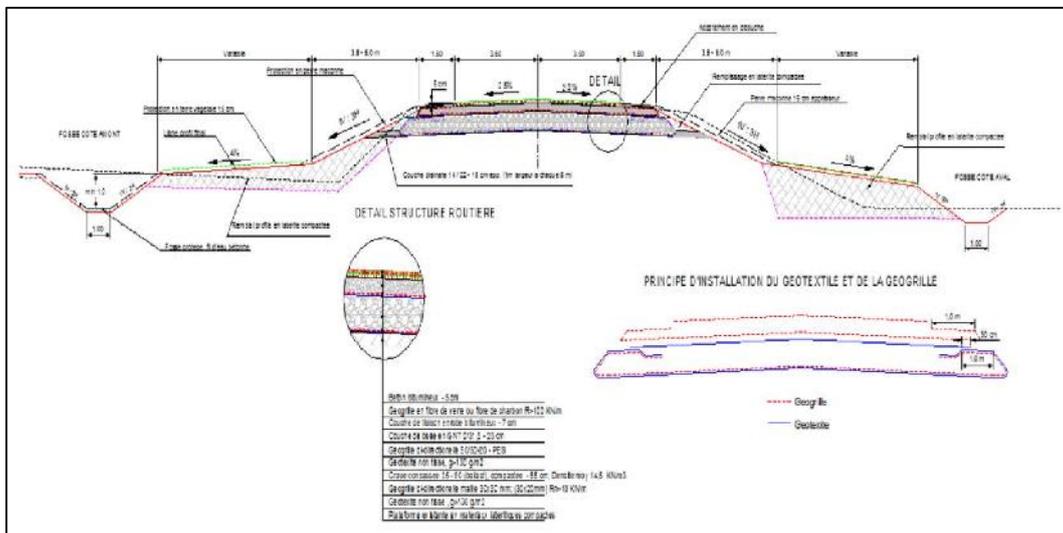


Figure 5 – Coupe en travers type du marais A

6. TRAITEMENT DES ZONES DE TRANSITION

Les zones de transitions situées en début et fin des marais entre zones renforcées et le sol support ferme sont traitées par diminution progressive de l'épaisseur du complexe de remblai renforcé sur une longueur de 30 ml. Ce système permet de réaliser une dalle de transition souple mais rigidifiée pour lutter efficacement contre les phénomènes de tassements différentiels possibles.

7. AMENAGEMENT DES TALUS ET ASSAINISSEMENT LONGITUDINAL ET TRANSVERSAL

Les talus de la route construite sont profilés à une pente de 1H:3V et seront protégés en perrés maçonnés. Cette mesure permet d'équilibrer le terrassement « flottant » et d'assurer ainsi les bonnes conditions pour l'entretien. Afin d'assurer un écoulement rapide des eaux zénithales vers les dispositifs de drainage longitudinaux, les contre banquettes en matériaux latéritiques ont été aménagés en pente de 4 %.

8. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

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.



Figure 7 : Travaux de terrassement



Figure 8 : Ouvrages d'assainissements



Figure 9 : Matériaux drainant sur le géogrille



Figure 10 : Ancrage du géogrille



Figure 11 : Vue de l'ouvrage – Marais A

9. CONCLUSION

La solution de remblai renforcé sur les marais A, B et C dans le cadre de la construction de la route Kigali-Gatuna a montré que cette solution, lorsqu'elle est retenue par les maîtres d'œuvres présente des avantages significatifs tant sur le plan économique, écologique et qu'environnemental. 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 solutions techniques en accord avec les principes du développement durable sont de plus en plus recherchées par les états. Cette solution de remblai renforcé comme solution de franchissement des marais dans un contexte géotechnique bien maîtrisé apparaît comme une solution particulièrement intéressante au regard du développement durable.

BIBLIOGRAPHIE

DIN EN 1997-1 (2004) Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules

TR – Engineering – Rapport technique - réhabilitation des zones de marais-RW/FED/2009/021-097

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.

Ziegler M. (2005) Geotechnische Nachweise nach DIN 1054: Einführung mit Beispielen, Ernst & Sohn