

LA SOLUTION TERRE ARMÉE DANS UN PROJET DE SOUTÈNEMENT DE LA LIGNE FERROVIAIRE FCE, MADAGASCAR

REINFORCED SOIL SOLUTION IN THE STUDY OF A RETAINING STRUCTURE PROJECT ALONG THE LINE RAILWAY FCE, MADAGASCAR

Voahanginirina RAMASIARINORO¹, N. ANDRIAMAMONJISOA¹, Lala ANDRIANAIVO², Fidiniavo RAVOKATRA¹, N RAKOTONDRABEZAHARINORO¹

¹ Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre, BP 906 Antananarivo 101 Madagascar, ramasiarinoro@yahoo.fr

² Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Laboratoire de Géotechnologie, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

RÉSUMÉ – Lors d'une étude de soutènement, les incidences d'un choix techniquement et économiquement judicieux sont particulièrement importantes. Ce manuscrit présente d'abord les bilans relatifs au glissement de terrain, ensuite les problèmes de stabilité mécanique du soutènement. Il se propose de comparer les solutions et d'en tirer enfin la technologie terre armée comme solution.

ABSTRACT – When studying a retaining structure, the incidences of a choice, technically as well as economically, are particularly important. At first, this paper presents the results of landslides studies. The problems of mechanical stability of the retaining structures are then treated. Finally, a technical and economical comparison between proposed solutions leads to reinforced soil for an overall evaluation.

1. Préambule

Les ouvrages à risques engageant la sécurité des personnes et des biens comme les soutènements nécessitent des études géologiques et techniques approfondies qui fourniront plusieurs solutions à un même problème. Le choix de l'une ou de l'autre des solutions étudiées et proposées sera fonction d'une part des conditions liées au site et d'autre part, des conditions économiques liées au projet. Le long de la ligne ferroviaire FCE, des mouvements du terrain se sont produits au cours du temps mettant en danger la stabilité des talus.

Les études ont conduit à la détermination des cercles du glissement. Le calcul a été basé sur le cercle de rupture le plus probable donnant un coefficient de sécurité minimum « F_{min} ». La modélisation a été effectuée sur des programmes informatiques GEOSTAB, STABR, PLAXI et GAWACWIN et le calcul a été fait suivant la méthode de Bishop.

Trois (03) variantes de solution ont été prises en compte : mur de soutènement en gabions, en béton armée et la terre armée.

2. Situation générale

Des glissements rotationnels, affaissements des remblais d'accès, éboulements, fissuration du mur de soutènement en maçonnerie de moellons existants menacent la circulation le long de la ligne FCE. Pour pouvoir déterminer les origines et/ou causes probables d'instabilité, une campagne d'investigations géologique, géotechnique et

géophysique a été menée. Elle a été réalisée sur la base de la mission géotechnique de type G 5.

2.1. Investigations

2.2.1. Sondages au pénétromètre dynamique (Pd) à la tarière manuelle (Tr)

Les résultats des sondages à la tarière manuelle et au pénétromètre dynamique permettent d'avoir la coupe du sol en place. Le niveau du toit rocheux de nature gneissique pend de 25° à 35° vers le nord. Ce pendage est parallèle à la topographie actuelle (Figures 1 et 2).

2.2.2. Prospection géophysique

Les figures 3, 4 et 5 illustrent les résultats issus d'un sondage électrique vertical (SEV) et de quatre profils de panneau électrique utilisant la technique d'imagerie montrant un terrain hétérogène.

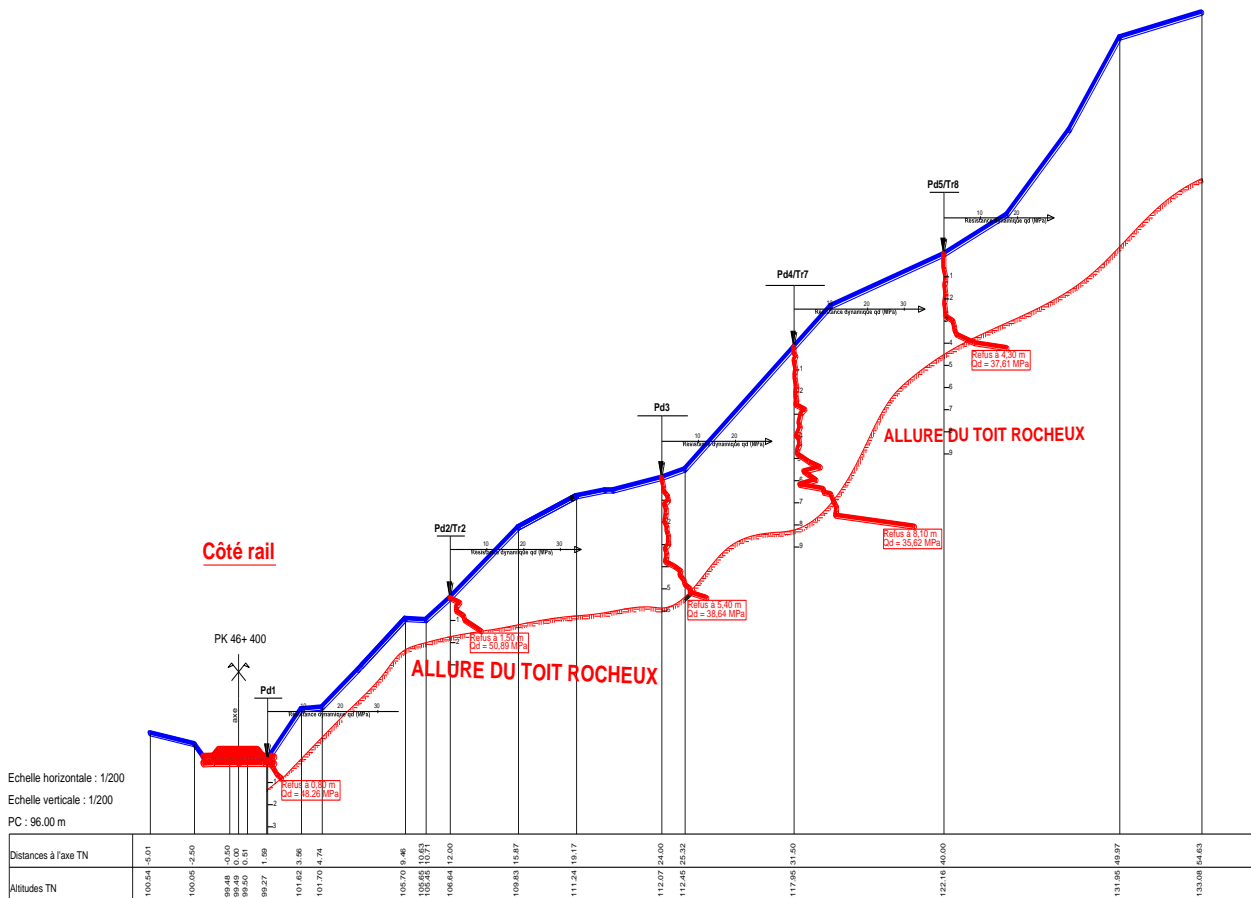


Figure 1. Allure générale de l'horizon résistant

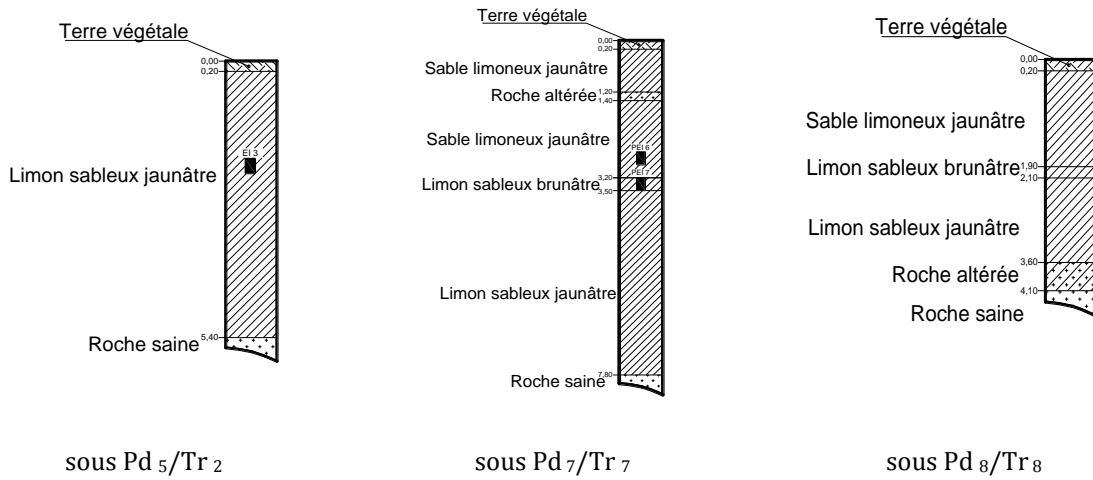


Figure 2 : Coupes du sol en place

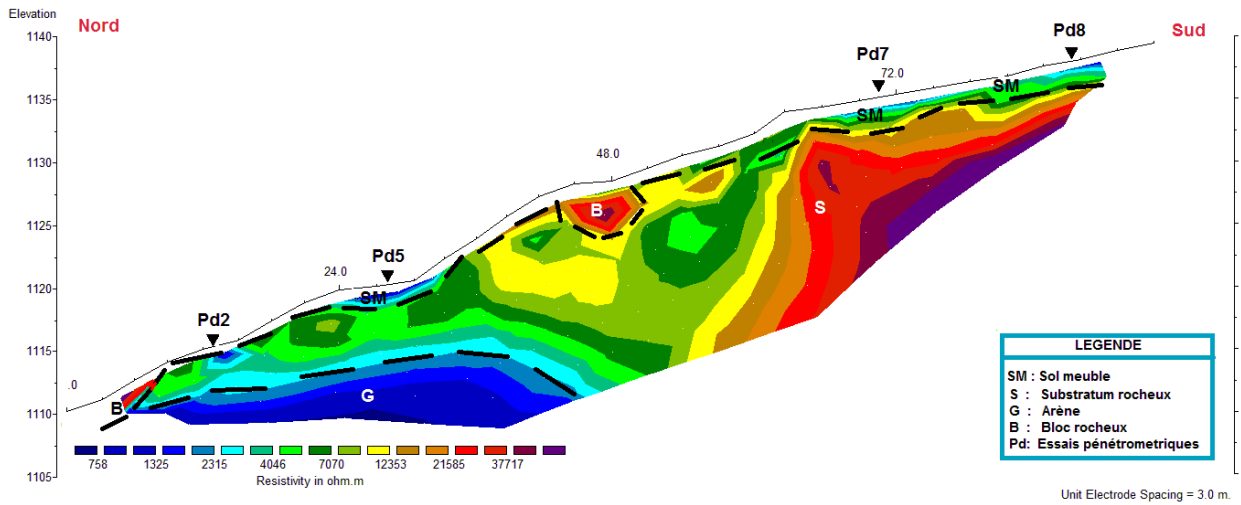


Figure 3. Coupe géo-électrique de la configuration Wenner

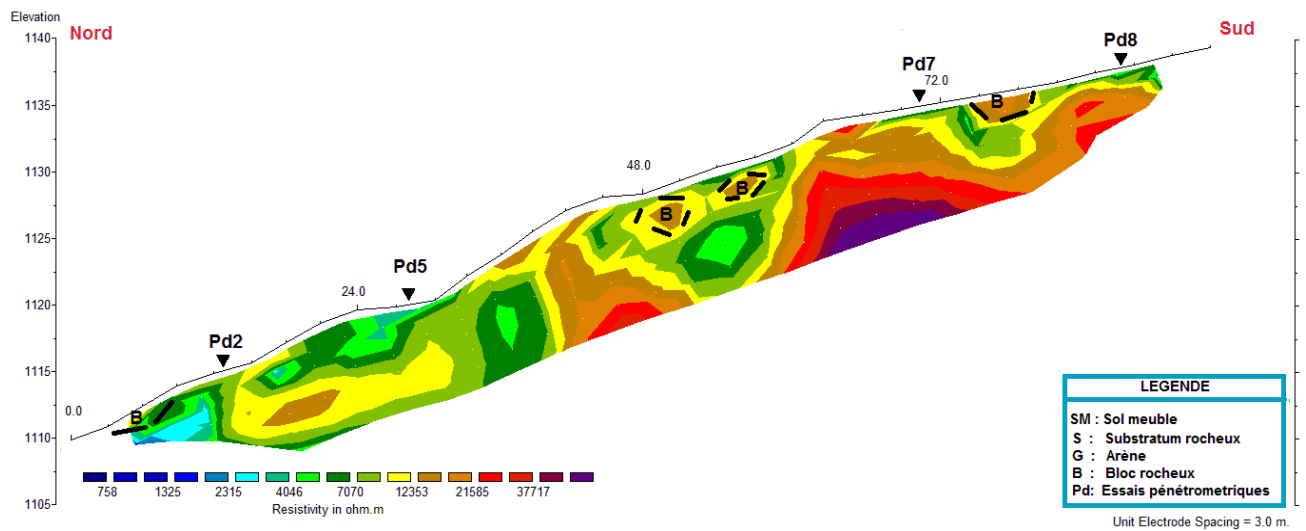


Figure 4. Coupe géo-électrique de la configuration dipôle

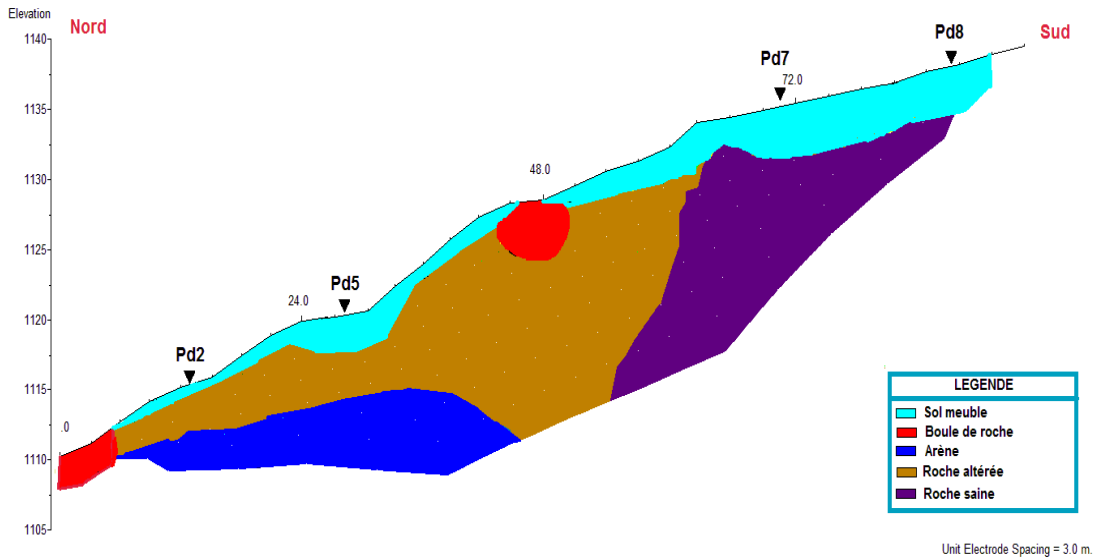


Figure 5. Coupe synthétique

3. Causes probables de l'instabilité

Les principaux facteurs d'instabilité sont : la pluviosité annuelle de 1400mm à plus de 2800mm dans la région perhumide (Raunet, 1997), la pente des versants supérieure à 30° (Ramasiarino, 2012), la forte anisotropie mécanique planaire des formations gneissiques, les caractéristiques mécaniques des altérites : allotérites et isaltérites (Ramasiarino, 2012 ; Edou Minko, 1992).

Les résultats ont montré que le glissement rotationnel intéresse surtout les zones d'altération : allotérites et isaltérites, au dessus de l'horizon résistant. C'est la raison pour laquelle, le mur de soutènement longeant la voie ferrée se fissure.

4. Solutions

La première variante consiste à ériger un mur de soutènement en béton armé (Figure 6) ayant un coefficient de sécurité le plus défavorable ($FS=0.81$), le mur étant ancré dans la couche résistante.

La deuxième variante comprend l'édification d'un mur en gabions (Figure 7) avec une hauteur de 6,50m, ancré au niveau de l'horizon résistant.

La troisième variante (Figures 8 et 9) consiste à ériger un massif de soutènement en terre armée dont l'emplacement est à peu près la même que pour les solutions précédentes. Cette technologie est encore d'usage restreint à Madagascar.

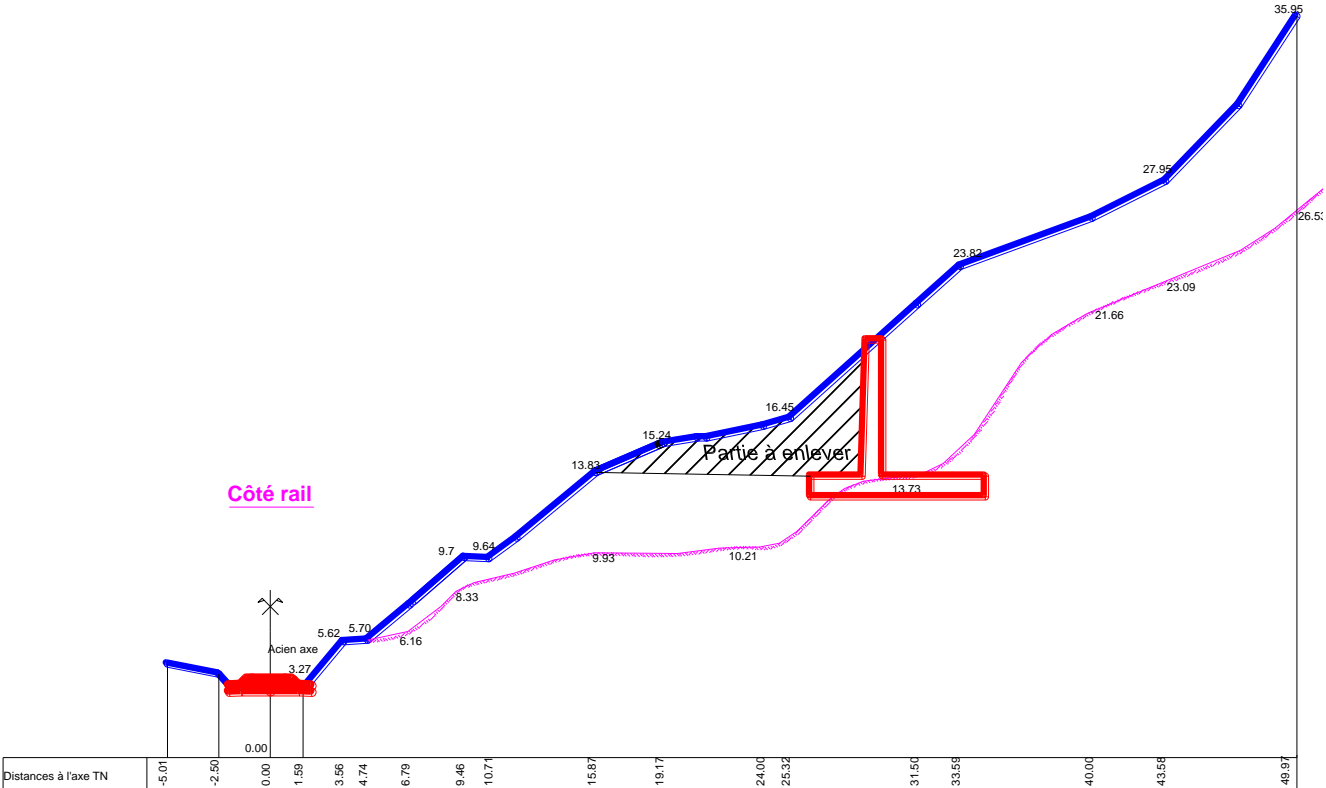


Figure 6. Emplacement du mur en béton armé

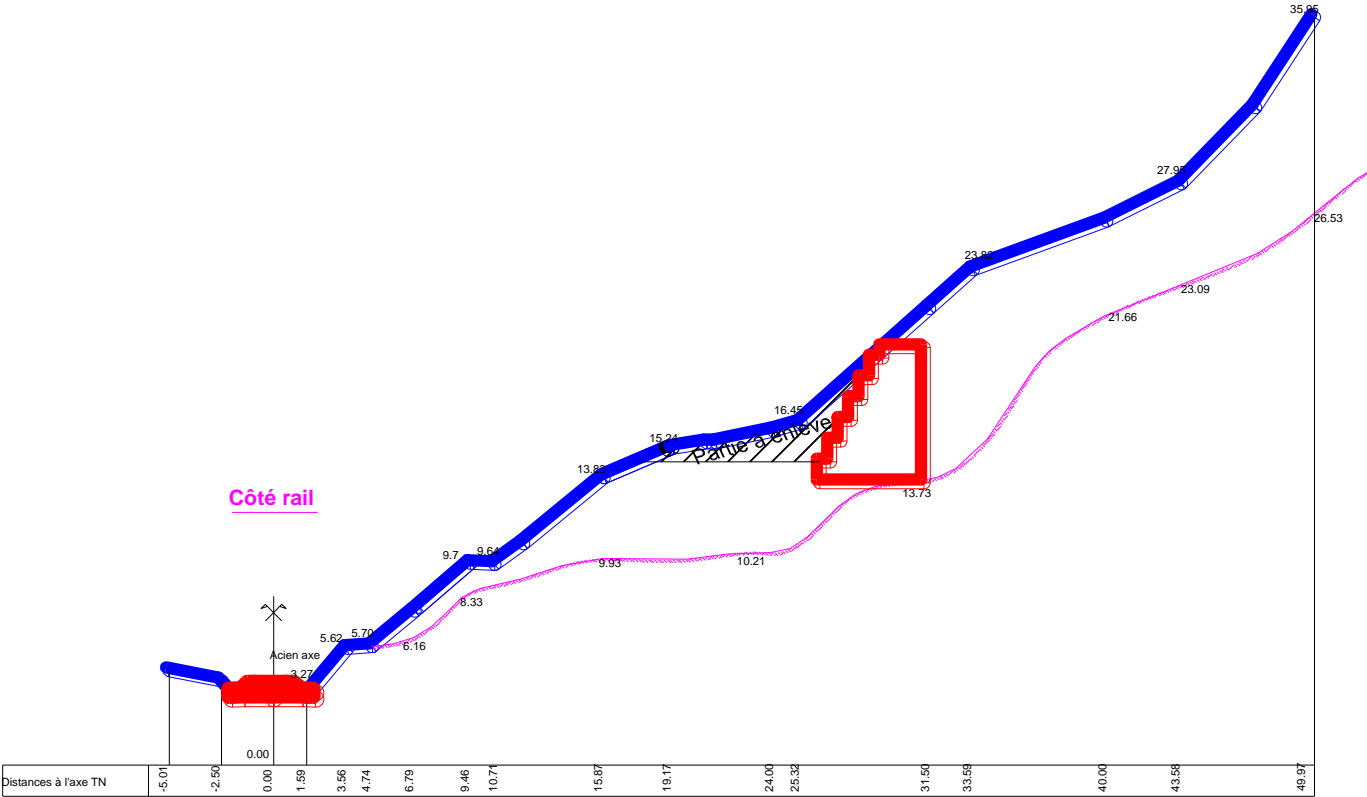


Figure 7: Implantation du mur en gabions

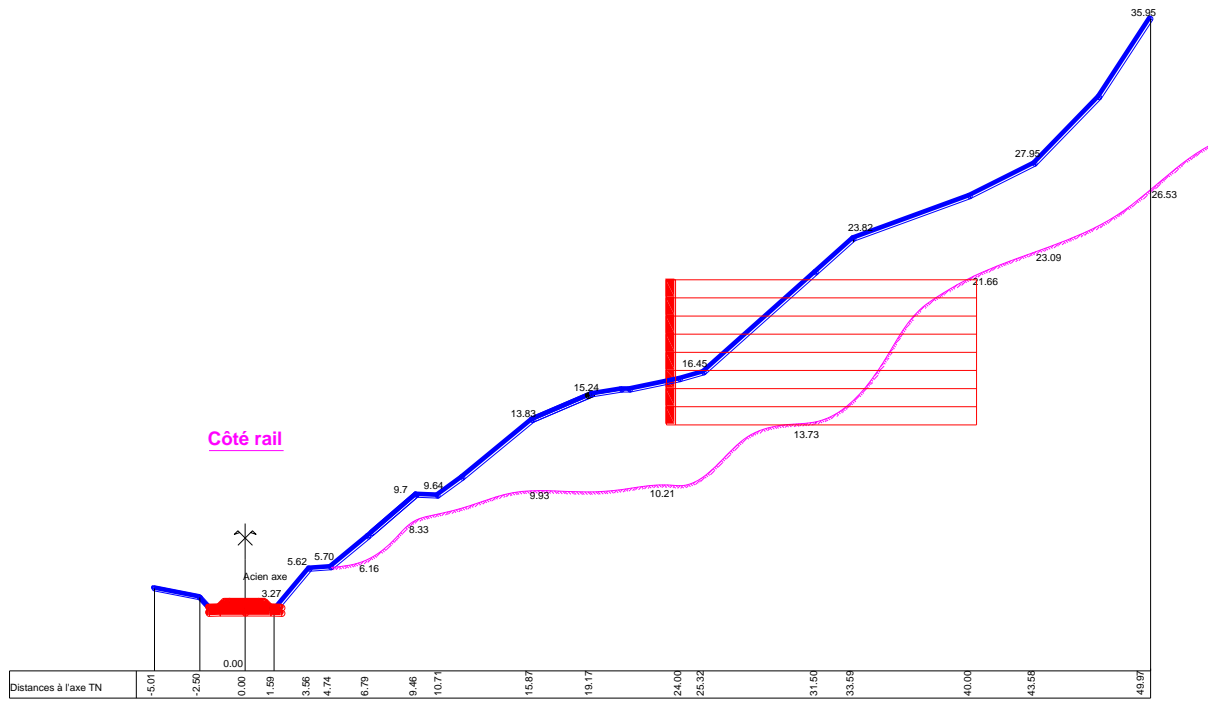


Figure 8: Soutènement en terre armée

5. Dimensionnement

5.1. Murs en béton armé et en gabions

Les coefficients de sécurité du mur en béton armé vis-à-vis du renversement ($2.11 > 1.5$) et du glissement ($19.29 > 1.5$) témoignent sa stabilité.

Les murs en gabions sont stables vis-à-vis du renversement (coefficient $9.79 > 1.5$) et du glissement (coefficient $3.16 > 1.5$).

5.2. Massif en terre armée

L'ouvrage a été dimensionné selon la méthode de calcul spécifiée par la norme NF P 94-220-0.

La figure 8 résume les détails de calcul ainsi que les caractéristiques de l'ouvrage.

N°	Xc	Yc	R	Fs	Fso	TA1 trac.	TA2 trac.	TA3 trac.	TA4 trac.	TA5 trac.	TA6 trac.	TA7 trac.	TA8 trac.	TA9 trac.	TA10 trac.	TA11 trac.	TA12 trac.	TA13 trac.	TA14 trac.
1	28.920	34.220	21.580	1.574	1.567	1.9600	1.4200	0.8300	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	28.980	34.230	21.520	1.575	1.562	2.8200	2.1700	1.5800	1.0000	0.5400	0.2100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	28.870	34.210	21.830	1.575	1.571	1.2700	0.8700	0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	27.030	34.240	21.470	1.577	1.557	3.6600	2.9000	2.3000	1.7200	1.1400	0.8400	0.5000	0.1700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	28.820	34.200	21.680	1.577	1.575	0.5200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	28.780	34.190	21.740	1.580	1.579	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	27.090	34.250	21.410	1.581	1.553	4.4600	3.5900	2.9900	2.4100	1.8300	1.4400	1.0900	0.7800	0.4400	0.3700	0.2500	0.1400	0.1300	0.1900
8	28.710	34.180	21.790	1.583	1.583	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	28.650	34.170	21.850	1.587	1.587	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	27.140	34.280	21.360	1.588	1.548	5.2600	4.3800	3.6800	3.0900	2.5100	2.0400	1.6900	1.3500	1.0200	0.8700	0.7500	0.6300	0.5200	0.6200

TA15 trac.	TA16 trac.	TA17 trac.	TA18 trac.	TA19 trac.	TA20 trac.	TA21 trac.	TA22 trac.	TA23 trac.	TA24 trac.
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0900	0.4200	0.7400	1.0600	1.4500
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1600	0.4300	0.7600	1.0800	1.3900	1.6900
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0800	0.4100	0.7200	1.1600
0.0000	0.0000	0.1300	0.3300	0.5400	0.7300	1.0800	1.4000	1.7100	2.0100
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0700	0.3900
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1500	0.5900
0.2500	0.3100	0.4900	0.6900	0.8900	1.0900	1.3800	1.7000	2.0100	2.3000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0200
0.6800	0.7300	0.8500	1.0500	1.2500	1.4400	1.6900	2.0000	2.3100	2.6000

Figure 8: Caractéristiques du soutènement en terre armée (logiciel GEOSTAB)

6. Bilan technique

Pour les soutènements en béton armée et en gabions, leur édification nécessite des fondations sur micro-pieux ou puits ancrés aux horizons résistants.

La construction d'un massif en terre armée doit être conforme à l'exigence de la norme NF P 94-220-0 en vigueur non seulement sur la mise en œuvre mais également sur le critère de choix des matériaux. On devra prévoir une correction des pentes afin d'éviter le glissement des terrains durant l'édification du mur.

La durabilité de chacun de ces ouvrages de soutènement est liée aux éléments stabilisateurs, armatures et protection métallique. Leur comportement à long terme fait l'objet de spécifications.

6. Bilan économique

Pour chaque variante, le coût au mètre linéaire est basé sur le prix au mètre cube de matériaux. Il tient également compte de la distance de transport des matériaux par rapport au site (Tableau 1).

Tableau 1 : Estimation du coût des trois variantes

Type d'ouvrage	Prix m ³ (Ariary)	Quantité en m ³ pour 1ml de l'ouvrage	Montant pour 1 ml (Ariary)
Mur de soutènement en gabions	90 650.20	60.00 + (2.35 en béton)	6 618 975.60
Mur de soutènement en béton armée	502 112.17	16.79	8 430 463.33
Mur de soutènement en terre armée	166 667.67	45.78	7 631 713.61

On constate que le coût de la variante 1 est moindre par rapport à la variante 3 bien que la solution en gabions est plus économique. Cependant, nous avons choisi la solution en terre armée. L'économie de l'ordre de 15 % est essentiellement à mettre en compte sur la pérennité et la sécurité de l'ouvrage vis-à-vis du vandalisme, et de la durée de vie même de l'ouvrage.

7. Conclusion générale

Les bilans techniques et économiques justifient la confrontation d'un soutènement par gabions et en terre armée.

Du point de vue économique, le choix de mur en gabions est rentable à court terme mais sur la durée de vie de l'ouvrage, le mur en terre armée est beaucoup plus intéressant à long terme.

Si la terre armée est actuellement un procédé bien connu et généralisé dans le monde entier, son emploi à Madagascar reste encore restreint.

8. Références bibliographiques

- Edou Minko A., Colin F., Trescases J. J., Lecomte P., (1992). Altération latéritique du gîte d'Ouvala (Gabon), et formation d'une anomalie superficielle de dispersion. *Mineral deposita*, 27, 90-100.
- Jaquelin M., (2005-2006). Conception et calcul des murs de soutènement en Terre armée. Institut Supérieur des Bâtiments et Travaux Publics, 44p.
- Philipponnat G., Bertrand H., (1979) : Fondation et Ouvrage en Terre. Edition Eyrolles, 61 Boulevard Saint-Germain 75005 Paris, 399p.
- Ramasiarino, V.J., (2012). Etudes géotechniques des mouvements de terrain et du comportement des argiles dans certains sols de Madagascar.HDR, Université d'Antananarivo.
- Raunet M., (1997). Les ensembles morphopédologiques de Madagascar. Rapport CIRAD-FOFIFA-ANAE, Antananarivo, 106p.