

**Projet de réalisation des travaux de la voie express Taza – Al Hoceima :
Lot n° 2 : du PK 6+000 au PK 34+956 - Description géotechnique du
déblai D27 et solutions de traitement et de confortement**

Siham HOUARI

DR- DAT- Service Chaussées et Géotechnique

Résumé :

Le déblai D27, objet de cette présentation, fait partie de la section reliant Taza et Aknoul de la Voie Express Taza-Al Hoceima. Au cours des travaux de terrassement entamés dans le cadre du projet de la Voie Express, un grand glissement est survenu en rive gauche (sens vers Al Hoceima) du déblai, s'agissant d'une réactivation d'un ancien glissement daté de 2014.

Il s'agit d'un déblai dépassant les 40m de hauteur, renfermant des formations marneuses et ayant fait l'objet d'études de stabilité, appuyées par des campagnes de reconnaissances géotechniques. Ces dernières ont été réalisées suite à chaque glissement majeur déclenché.

La première étude a consisté en un adoucissement de pente avec un aménagement de surlargeurs pour servir de surface de stockage des matériaux glissés. Ensuite, une autre analyse a fait ressortir une solution de confortement par la mise en place de butée stabilisatrice avec allègement en crête du talus.

En exposant l'enchaînement des études précitées et les données géotechniques de chacune, la présentation comportera les éléments suivants :

- Contexte géologique et géotechnique de la zone objet de l'étude ;
- Synthèse des résultats des campagnes géotechniques ;
- Présentation des solutions proposées sur la base de diagnostic et d'analyse des données géotechniques ;
- Analyse comparative des différentes approches d'étude.

Mots clés :

Déblai D27 ; glissement ; marne ; butée ; calcul de stabilité, Voie Express Taza-Al Hoceima...

I. PROBLEMATIQUE

Le déblai D27 se situe sur la Voie Express Taza-Al Hoceima et plus précisément au niveau de la section reliant Taza et Aknoul. De multiples désordres ont affecté la rive gauche (sens vers Al Hoceima) du déblai. Un premier glissement s'est déclenché en janvier 2014 au cours des travaux de terrassement. Des campagnes géotechniques complémentaires aux données géotechniques issues du projet d'exécution initial ont été réalisées. Il en découle une étude de confortement du talus instable du D27. Encore et lors des travaux de terrassement, un deuxième grand glissement s'est survenu en octobre 2016. Une nouvelle expertise géotechnique a donc été établie. Basée, en plus des données citées précédemment, sur une reconnaissance géotechnique complémentaire, l'expertise du talus a conduit à une solution de confortement par butée stabilisatrice. Au cours de l'exécution de cette solution et encore une fois, le glissement s'est réactivé en mai 2018.

II. CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE

Le site du déblai appartient à la zone prérfaine qui constitue la partie méridionale du sillon externe de la chaîne du Rif. Cette zone est le domaine de nappes de charriage dont la nappe prérfaine qui est constituée de matériaux déposés dans la partie méridionale du sillon sud-rifain.

Des indices de mouvements tectoniques se notent dans la stratigraphie des dépôts de la partie méridionale du sillon externe depuis le Jurassique. De ces bouleversements tectoniques résulte un désordre extrême dans l'ordonnement des différentes formations sédimentaires de la zone prérfaine. D'une manière générale, l'ensemble rigide et cassant constitué par la série du Jurassique a été fracturé en multiples dalles ou écaillés se chevauchant les uns les autres pour former des rides pseudo-anticlinales qui ont percé la couverture marneuse du Crétacé et du Miocène ; cette dernière, très plastique, s'est désolidarisée de son substratum jurassique et a comblé les pseudo-synclinaux qui se creusaient entre les reliefs précédents.

Série stratigraphique : Les Jurassique moyen et supérieur sont schisto-gréseux. Le Crétacé inférieur est marneux et souvent gypsifère, le Cénomaniens et le Crétacé supérieur sont marneux, plus ou moins armés de minces assises calcaires. L'Eocène est réduit et se trouve sous forme de marnes et calcaires marneux parfois détritiques, blancs, à silex. Dans la nappe prérfaine, le Tortonien inférieur marneux succède directement à l'Eocène. Ultérieurement aux dernières phases tectoniques importantes (Tortonien moyen) s'est déposé le Tortonien supérieur transgressif, généralement déritique à la base (grés et conglomérats) puis marneux (épaisse série des marnes bleues).

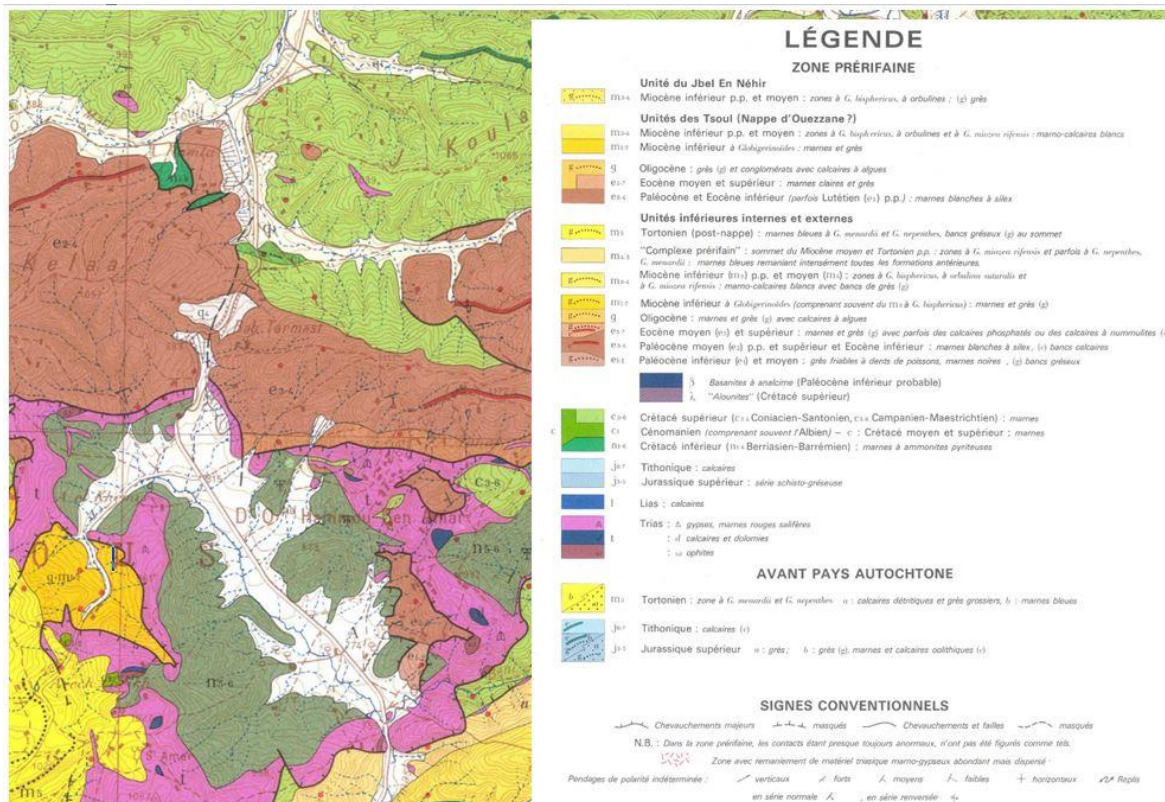
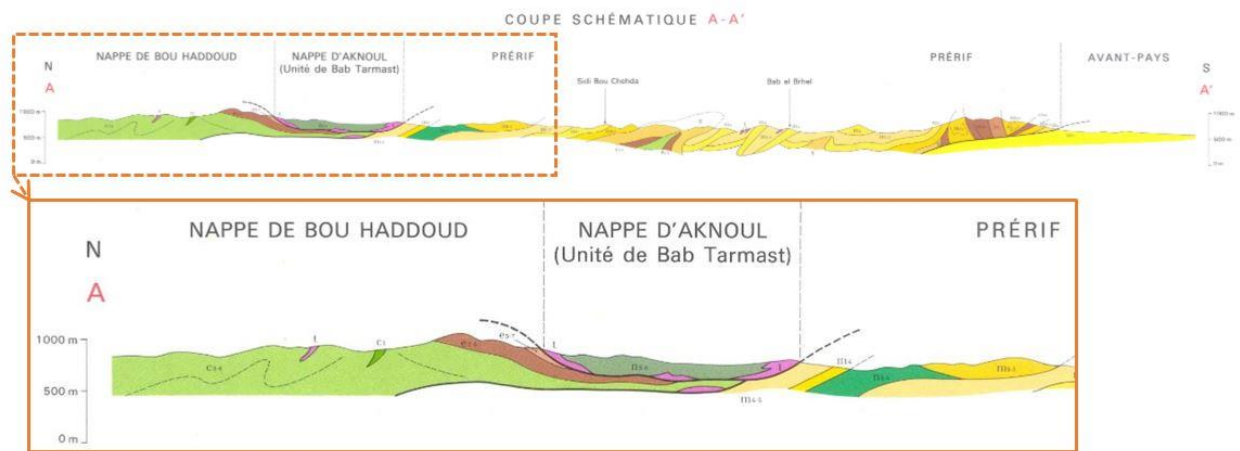


Figure 1 : Extrait de la carte géologique du Rif – AIN BOU KELLAL-MSOUN (1/50 000)



A partir de l'extrait de la carte et de la coupe ci-dessus, on note au niveau de l'Unité de Bab Tarmast, à l'emplacement du déblai D27, successivement du haut vers le bas la présence de marnes à ammonites pyrithées (Crétacé inférieur) sur de grandes hauteurs, des gypses et marnes rouges salifères par endroit (Trias), et puis des marnes blanches à silex à bancs calcaire (Paléocène moyen et supérieur) ...

III. RAPPEL ET DIAGNOSTIC DES DESORDRES CONSTATES

D'une hauteur dépassant les 40m, le déblai D27 a connu une péripiétie de désordres, en rive gauche, notamment :

- En janvier 2014 : un grand glissement est survenu, d'étendu latérale de 90m, affectant toute la hauteur du talus et laissant des indices de propagation de désordres de part et d'autre de la zone glissée. Les amorces du glissement apparaissent au niveau du fossé de crête et affectent l'ensemble des risbermes aménagées. La limite avale du cercle de glissement se voit avoisinante de la limite de la plateforme existante. Il a été noté que le glissement est localisé dans une section de points bas dans laquelle une accumulation des infiltrations des eaux de surface et souterraines a été constatée.



Photos 1 [4]

- En octobre 2016 : Au cours des travaux de terrassement et lors de la réalisation de la dernière risberme de 5m en amont du talus, un nouveau glissement s'est produit et affecte principalement la zone délimitée par les PT 1360 et 1368. Il s'étend sur un linéaire de 60m et atteint environ 6m de hauteur. La sortie du cercle de glissement se voit entre la 1ère et la 2ème risberme. Le glissement a affecté la couche de marne sableuse jaunâtre à passages de marno-calcaire.



Photos 2 [6]



Photos 3 : Etat du talus en avril 2017 [5]

- En mai 2018 : le glissement s'est réactivé et e affecté toute la hauteur du déblai. Des fissures, signes d'extension du glissement se voient en amont du talus.



Figure 2 : Photo aérienne : Etat actuel du déblai D27

IV. CAMPAGNES GEOTECHNIQUES : PRESENTATION ET SYNTHESES

1. Campagne de reconnaissance géotechnique du Projet d'Exécution initial

Dans le cadre du projet d'aménagement et de reconstruction de la RR505 entre Taza et Kacetta, une première campagne de reconnaissance géotechnique de la zone de glissement entre Taza et Aknoul a été établie en 2011, le tableau ci-après récapitule l'ensemble des investigations sur site et des essais de laboratoire réalisés :

Nombre de sondages	Profondeur (m)	Investigations in-situ	Essais de laboratoire
10 sondages couplés	25	Essais pressiométriques	Essais d'identification (AG ; IP)

* AG : Analyse granulométrique par tamisage ; IP : Essai pour la détermination des limites d'Atterberg

Les sondages réalisés ont été implantés le long de la zone de glissement située aux PK 20+694 et PK 23+437.

Les sols rencontrés sont globalement de nature marneuse graveleuse ou schisteuse verdâtre à grisâtre en profondeur, qui appartiennent dans la plupart des cas aux classes des argiles peu à très plastiques selon la classification LPC.

2. Diagnostic géotechnique suite au premier glissement

Après le premier glissement du déblai D27, survenu en début de 2014, un diagnostic géotechnique a été établi. L'état des lieux a mis en évidence des formations marneuses jaunâtres à concrétions calcaire au niveau du déblai. L'analyse de la morphologie du site a conduit aux constats suivants :

- La zone est connue par des glissements qui se manifestent dans les versants avoisinants ;
- Une variation latérale du faciès dans les sols qui montre une argile marneuse très plastique bariolée à rougeâtre qui mobilise le versant ;
- La bande de talus en mouvement constitue un point bas de la couche et elle est visible dans le talus en face ;
- En profondeur, le terrain est en marne grisâtre.

Il s'en suit les recommandations suivantes :

- Soulagement de la surcharge du talus par un décaissement qui consiste principalement en une bande de stockage des produits glissés de 10m au pied puis un talus de 5m puis une bande de 15m de largeur et de porter les talus à 1V/2H ;
- Un drainage en arc à 3 niveaux (au niveau du fossé de crête, à 15m puis à 30m) ;
- Décalage des aménagements existants en crête de 50m en amont par rapport de sa situation actuelle ;
- Etablir une campagne de reconnaissance géotechnique complémentaire.

3. Reconnaissance géotechnique de la zone de glissement (2014)

Campagne de reconnaissance :

Une campagne de reconnaissance géotechnique a été établie suite au premier glissement de 2014 au niveau du profil 1350 (PK 26). Pour l'établissement d'une étude de confortement du talus glissé, le programme de reconnaissance a été défini comme suit :

Nombre de sondages	Profondeur (m)	Essais de laboratoire
3 sondages carottés	40 à 50	○ Essais d'identification (AG ; IP) ○ Essais mécaniques de cisaillement

Lithologie du site :

A partir des sondages réalisés en crête du talus, on relève comme illustré dans le profil géotechnique ci-dessous une succession généralement uniforme de quatre principales couches, notamment une couverture de marne calcaire blanchâtre de faible épaisseur, une formation marneuse blanc-verdâtre graveleuse sur les premiers 10m, ensuite une couche de marne sableuse verdâtre indurée jusqu'à une profondeur moyenne de 23m qui surmonte une formation de marne schistosée grisâtre, dure et très fracturée, qui continue en profondeur.

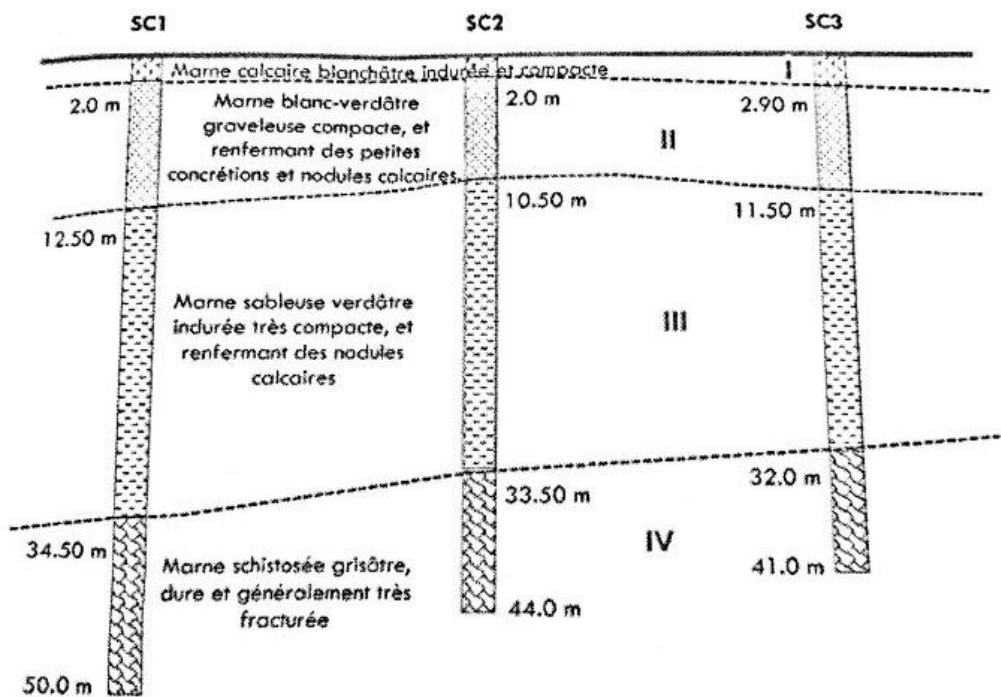


Figure 3 : Profil géotechnique

Il est à noter qu'aucune trace d'eau n'a été relevée au niveau des sondages entrepris.

Synthèse des résultats d'essais de laboratoire :

A partir d'essais d'identification et d'essais mécaniques, les caractéristiques géotechniques des formations rencontrées sont données comme suit :

Formation	Profondeur (m)	W (%)	γ_d (kN/m ³)	C' (kPa)	Φ' (°)
Marne blanc-verdâtre graveleuse, et renfermant des concrétions et nodules calcaires	2,00 – 10,50	7	15,5	41,2	26,7
Marne sableuse verdâtre indurée très compacte et renfermant des nodules calcaire	10,50 – 33,50	6,8	15,8	41,2	23,6
Marne "schistosée" grisâtre, dure et généralement très fracturée	33,50 – 44,00	7,3	16,9	53,4	34,3

4. Campagne géotechnique complémentaire - Phase 1

Afin de permettre une modélisation correcte du profil géotechnique et d'affiner le calcul de stabilité du talus, des sondages complémentaires ont été réalisés au pied du déblai.

La coupe lithologique déduite des deux sondages carottés réalisés en rive gauche du déblai est la suivante :

Profondeur (m)	Formation
0.00 – 3.00/3.50	Marne limoneuse indurée jaunâtre
3.00/3.50 – 6.50/7.00	Marno-calcaire induré grisâtre
6.50/7.00 – 8.00/12.00	Marno-calcaire induré et fracturé grisâtre

Des eaux souterraines ont été relevées au niveau des deux sondages à des profondeurs variant de 2.50 à 3.50m par rapport au niveau de la plateforme.

5. Campagne géotechnique complémentaire - Phase 2

Cette reconnaissance géotechnique a été réalisée dans le but de juger d'une manière rationnelle sur la stabilité de la chaussée. Elle a pour objectif de délimiter le niveau du substratum et d'évaluer les caractéristiques mécaniques des sols en dessous de la plateforme de chaussée. Pour ceci, dix sondages pressiométriques ont été implantés sur la plateforme.

La lithologie déduite des sondages réalisés du côté du déblai affecté par le glissement est présentée dans le profil ci-après :

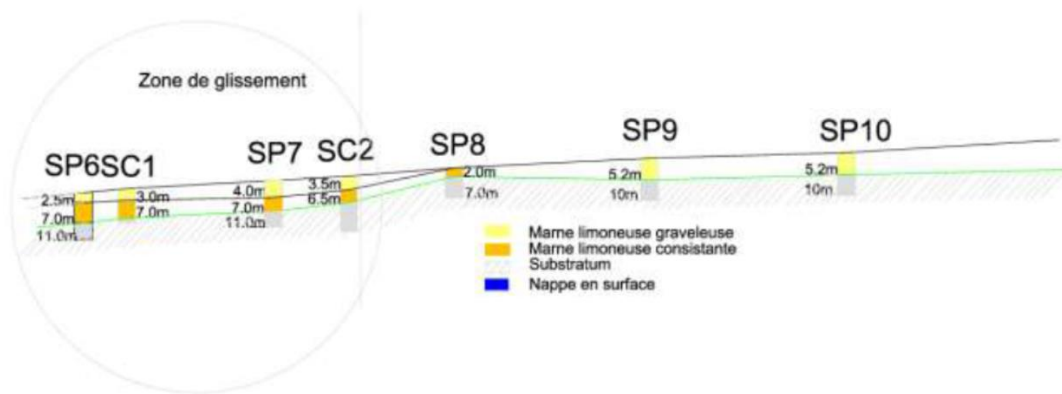


Figure 4 : Profil géotechnique

Le substratum, composé de marno-calcaire induré grisâtre (Pélite rocheuse) est relevé à partir de 5 à 7m/TN, cette formation enregistre des valeurs de pression limite $Pl \geq 4,5\text{MPa}$ et de module pressiométriques $Em \geq 80\text{ MPa}$. La couche en dessus du substratum, sur une épaisseur de 3,5 à 4m, est composée de marne calcaire consistant correspondant au produit d'altération du substratum où les essais pressiométriques indiquent des valeurs élevées avec $Em \geq 30\text{ MPa}$ et $Pl \geq 2\text{ MPa}$. La couche de surface, constituée de marne limoneuse jaunâtre à verdâtre, reconnue sensible à l'eau est extrêmement évolutive, annonce des valeurs de pression limite nettement plus faibles par rapport aux couches adjacentes. Ainsi, le glissement pourrait atteindre en pied de talus une profondeur de 3 à 3,50m, ce qui revient à dire à partir des investigations et résultats des essais pressiométriques que les glissements circulaires n'affecteront pas la chaussée.

V. PRESENTATION DES SOLUTIONS PROPOSEES SUR LA BASE DE DIAGNOSTIC ET D'ANALYSE DES DONNEES GEOTECHNIQUES

1. Inventaire des solutions de traitement et/ou de confortement du talus

Des solutions de traitement ou de confortement du déblai instable D27 ont été proposées sur la base des données géotechniques provenant des différentes études et reconnaissances géotechniques présentées ci-haut.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des traitements effectués au niveau du déblai D27 sur la base des campagnes géotechniques réalisées :

Reconnaissance géotechnique	N°	Nature de traitement du talus
Reconnaissance géotechnique de l'étude initiale (2011)	1	Adoption de pente de talus 3H/2V
Reconnaissance géotechnique de la zone de glissement (2014)	2	- Adoption de pente de talus 2H/1V avec des risbermes intermédiaires (première de 15 m et les autres de 5 m) - Prévoir un système d'assainissement efficace : fossés de crête et tranchées drainantes au niveau des risbermes

		▪ Prévoir une tranchée drainante à la base du déblai qui permettra de réduire les infiltrations sous la plate-forme
Campagne géotechnique complémentaire (Phases 1 et 2)	3	▪ Zone centrale de glissement (PR1361 à PR 1367) : ○ Mise en place à la base d'un tapis drainant en matériaux granulaires enveloppés dans un géotextile ; ○ Mise en place d'une butée stabilisatrice en matériaux insensibles à l'eau. ▪ Zone de pélite grise (PR1350 à PR 1361) : ○ Adoption de pente de talus de 2H/1V afin d'alléger le talus en tête en assurant une couche superficielle (en dessus de la surface du talus) en matériaux non érodables de 0.30m d'épaisseur ○ Prévoir une tranchée drainante en continuité de celle prévue dans la zone centrale de glissement ▪ Zone de pélite altérée (PR1367 à PR 1380) : ○ Respecter la solution de traitement actuelle en assurant une couche superficielle en matériaux non érodables de 0.30m d'épaisseur mis en œuvre sur la surface du talus ○ Prévoir une tranchée drainante en continuité de celle prévue dans la zone centrale de glissement

2. Analyses de stabilité du talus

Les vérifications de stabilité présentées ci-après sont établies moyennant le logiciel Talran4 et Talran5.

Traitement N°1 :

Du fait de leur nature généraliste, les investigations géotechniques relevant du Projet d'Exécution initial n'ont pas permis d'établir une analyse de stabilité détaillée du déblai D27 et de relever les différents faciès existants au niveau du talus. Une pente de talus de 3H/2V a été ainsi préconisée sur toute la hauteur du talus.

Traitement N°2 :

La deuxième solution de traitement du talus a été basée sur une analyse de stabilité établie à partir des paramètres mécaniques suivants :

Formation	γ_h (kN/m ³)	C' (kPa)	Φ' (°)
Marne calcaire de surface	16.58	0	38
Marne blanc-verdâtre graveleuse	16.58	41.2	26.7
Marne sableuse verdâtre indurée	16.87	41.2	33.6
Marne "schistosée" grisâtre	18.13	53.4	34.3

Les conditions hydrauliques prises en compte dans le calcul de stabilité considèrent un niveau piézométrique superficiel.

Sur la base des données citées ci-haut, la vérification de stabilité permet d'avoir un coefficient $F_s = 1.84$ en cas statique et un $F_s = 1.34$ au cas sismique.

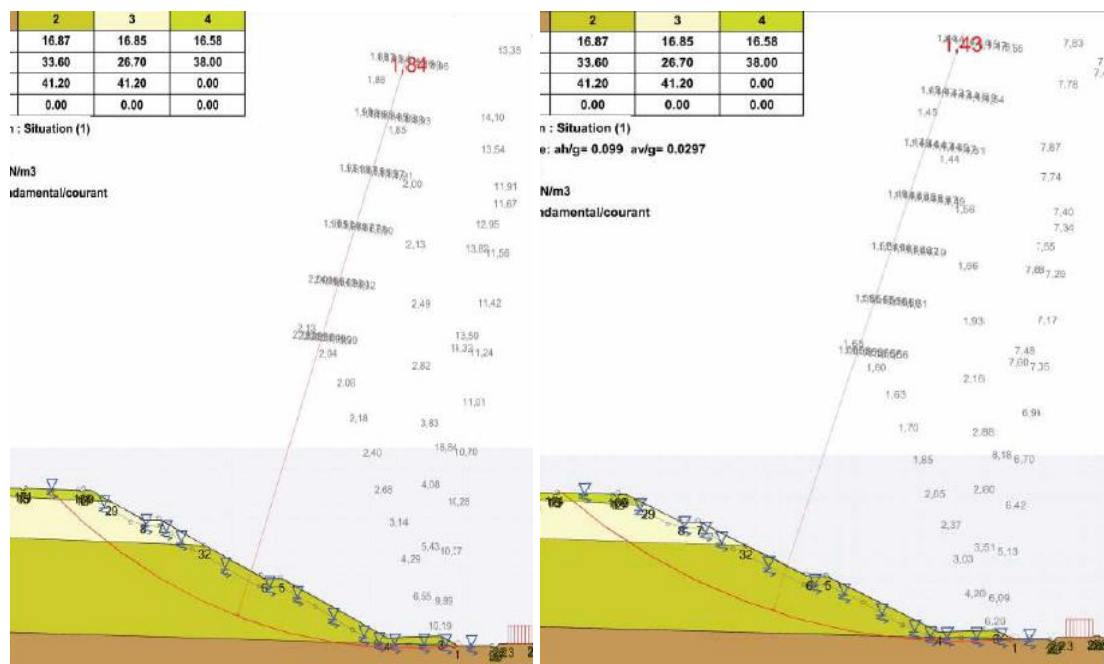


Figure 5 : Feuilles de présentation Talran4 – Traitement N°2

Traitement N°3 :

Sur la base du diagnostic du talus et des investigations géotechniques établies, le talus gauche du déblai a été divisé en 3 zones différentes :

- Zone 1 (PT 1350 – PT 1361) : cette zone est caractérisée par la présence de la formation de marno-calcaire grisâtre sur une grande partie du talus. Cette zone n'affiche aucun signe d'instabilité ;
- Zone 2 (PT 1361 – PT 1367) qui constitue la zone centrale du déblai, la plus affectée par les désordres et les glissements, est caractérisée par des formations marneuses ;
- Zone 3 (PT 1367 – PT 1380) : caractérisée par des formations marneuses indurées et consistantes, cette zone ne présente pas de signe majeur d'instabilité.

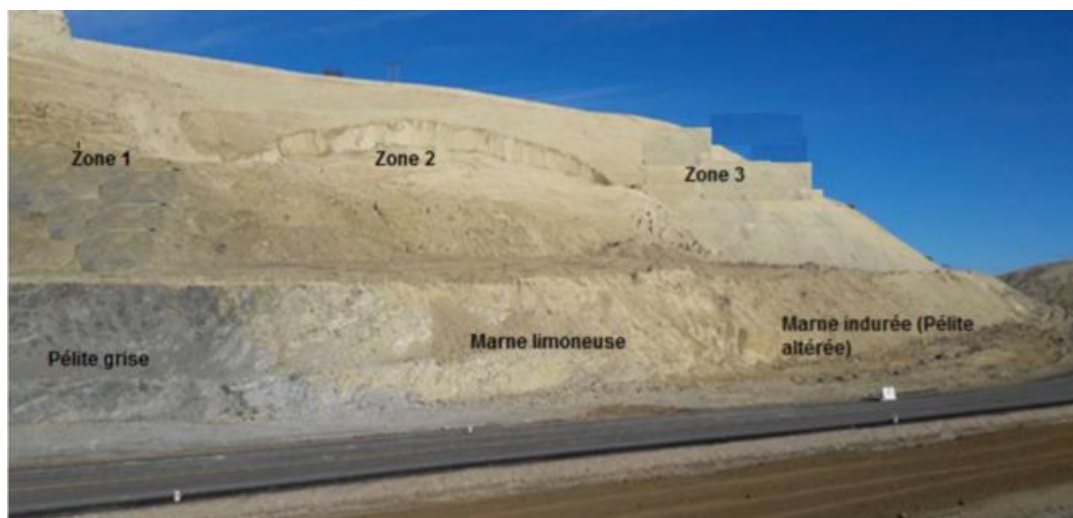


Photo 4

La démarche adoptée pour le dimensionnement du 3^{ème} traitement consiste à affecter aux formations glissées des caractéristiques minimales résiduelles en considérant un coefficient de sécurité initial relatif à la situation actuelle. Les paramètres résiduels retenus sont :

Formation	γ_h (kN/m ³)	C' (kPa)	Φ' (°)
Marne calcaire de surface	19	0	27
Marne blanc-verdâtre graveleuse	20	5	26
Marne sableuse verdâtre	20	10	26
Marno-calcaire grisâtre	Substratum		

Le niveau d'eau considéré coïncide avec celui de la plateforme du projet.

Sur la base des caractéristiques de calage (résiduelles) sus-mentionnées, le calcul de stabilité du talus avec la nouvelle solution de traitement aboutit à un $F_s = 1.31$.

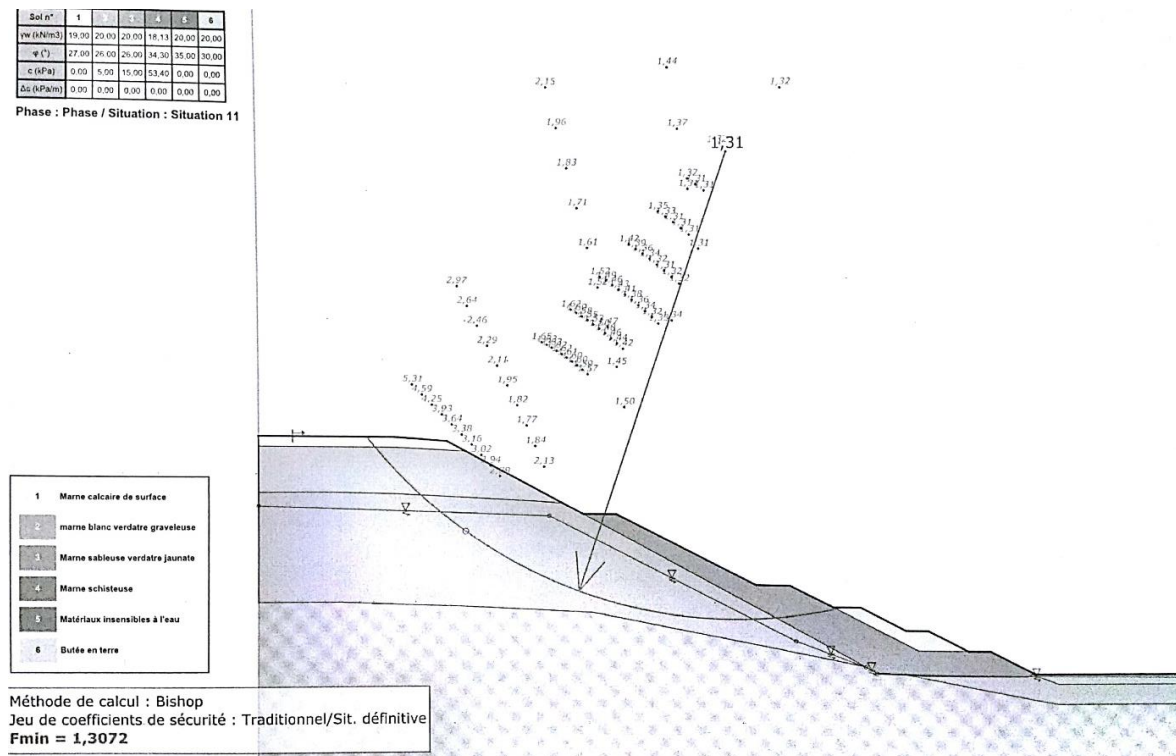


Figure 6 : Feuilles de présentation Talran5 - Traitement N°3

Le confortement de la zone centrale du déblai consiste à procéder en premier lieu à un allègement en tête, ensuite à mettre en place un tapis drainant en matériaux granulaires enveloppés dans un géotextile à la base de la butée sur une épaisseur de 0.50m, avant d'installer la butée stabilisatrice en matériaux granulaires insensibles à l'eau. L'assainissement des eaux en crête du talus est assuré par un fossé de crête en béton. Une tranchée drainante de 3m de profondeur est prévue en pied de talus en vue de permettre le rabattement de la nappe.

Pour les zones 1 et 3, il a été recommandé de garder la solution de traitement N°2, en respectant une pente de 2H/1V, de mettre en place une couche superficielle en matériaux non érodables de 0.25m d'épaisseur sur la surface du talus et de prévoir une tranchée drainante de 3.50m de profondeur en continuité avec celle prévue au niveau de la zone centrale.

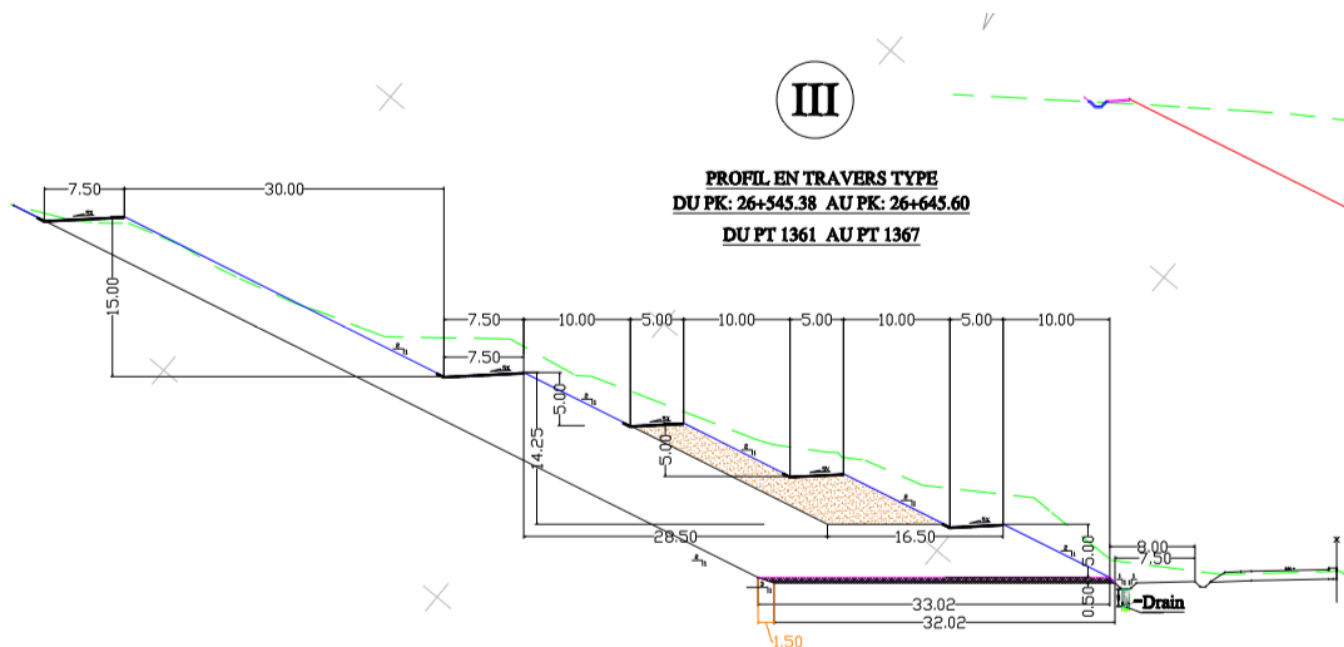


Figure 6 : Schéma de principe de la solution de confortement (Traitement N°3 – zone 2)

VI. ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFERENTES APPROCHES D'ETUDES

A ce stade, il n'est pas sans intérêt de rappeler que le déblai D27 objet de cette analyse, se situe dans une zone connue par des perturbations et des glissements qui sont matérialisés dans les versants avoisinants.

La campagne de reconnaissance géotechnique de la zone du déblai, établie en 2014 a été basée sur des sondages exécutés tous en crête du talus. Pour permettre une modélisation correcte du profil géotechnique au niveau de la zone de glissement, il a fallu développer davantage la reconnaissance géotechnique et la compléter par des sondages en pied du déblai. En outre, la présence des eaux souterraines n'a été relevée qu'au niveau de la campagne géotechnique complémentaire.

Bien que la dernière modélisation du déblai soit la plus proche de la configuration réelle du terrain, puisque basée sur une caractérisation géotechnique des sols plus complète, le glissement de 2018 est survenu au cours des travaux d'exécution de la dernière solution de traitement. Ainsi se pose la question de la stabilité provisoire ou à court terme du déblai.

En effet, les travaux de terrassement engendrent un enlèvement provisoire de la butée en vue de l'exécution de la solution de confortement, ce qui peut causer la déstabilisation du talus. En plus, de part la grande sensibilité à l'eau des formations marneuses constituant le déblai, il convenait de prendre en compte les conditions météorologiques lors de l'exécution des travaux et d'établir des vérifications de stabilité à court terme du déblai.



Figure 7 : Implantation des sondages de reconnaissance géotechnique

VII. CONCLUSION

Compte tenu de l'analyse présentée ci-dessus, l'expérience des études de stabilité du déblai D27 soulèvent plusieurs questions sur la consistance de la campagne géotechnique et sur l'adaptation de l'étude de stabilité, des solutions de traitement et de phasage des travaux à la configuration géotechnique du site et à la nature des terrains.

VIII. REFERENCES

- [1] Ressources en eau du Maroc (Editions du service géologique du Maroc, Rabat, 1972). *Tome I : Domaine du Rif et du Maroc oriental* ;
- [2] Rapport de reconnaissance géotechnique - LPEE (2011). *Projet d'étude d'aménagement et de reconstruction de la RR505 entre Taza et Kacetta - Variante glissement PK 20+694 et PK 23+437 (Réf. : 2011-271-1-025)* ;
- [3] Rapport de reconnaissance géotechnique - LPEE (2014). *Voie Express Taza-Al Hoceima lot n°2 - Glissement au niveau du profil 1350 (PK26), (Réf. : 2014-270-07599-2014-0306)* ;
- [4] Etude de stabilité du déblai D27 sur la voie express Taza-Al Hoceima - CID (Avril 2015). *Note de synthèse* ;
- [5] Expertise du déblai D27 - L3E (2017) ;
- [6] Expertise géotechnique du glissement du déblai D27 - MAHARAT (2017).