

OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT EN SOL RENFORCÉ PAR DES GEOGRILLES : RETOUR D'EXPERIENCE MAROCAINE,

BRUHIER Johann

HUESKER Synthetic GmbH & Co., KG, Gescher, Germany

RÉSUMÉ

Le dédoublement de la voie ferroviaire Meknès -Fès nécessitait la construction d'un ouvrage de soutènement de plus de 400 m de long. Le maître d'oeuvre, l'Office National des Chemins de Fer, opta pour la construction d'un massif renforcé à l'aide de géogridde Fortrac* pour sa rapidité d'exécution et son coût très intéressant.,



Photo 1: Dédoublement de la voie ferroviaire Meknes-Fes : remblai temporaire renforcé 1. à l'aide de géogridde Fortrac.

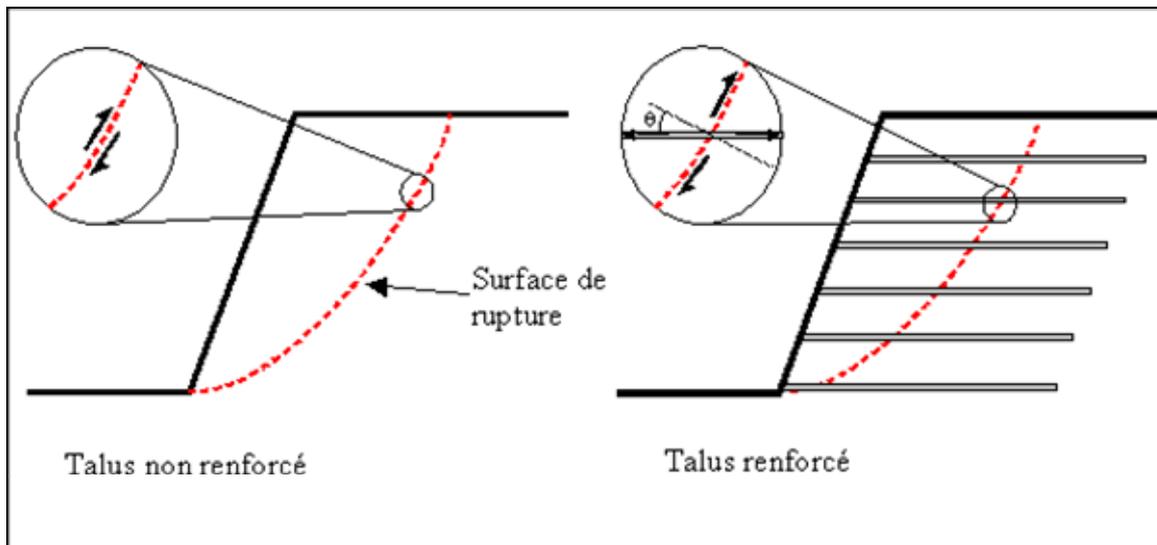
1. INTRODUCTION

Le dédoublement de la voie ferroviaire Meknès - Fès nécessitait la construction d'un ouvrage de soutènement de plus de 400 m de long. Cet ouvrage devait être construit sans interrompre la circulation des trains de la ligne principale et ceci dans des délais très courts. Devant ces impératifs nous avons proposé au maître d'œuvre un massif renforcé à l'aide de géogrille Fortrac®.

2. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT

2.1 Généralité

Dans son principe de fonctionnement, le remblai transmet par frottement aux inclusions géogrilles, les efforts qui se développent dans la masse ; ces inclusions se mettent alors en tension et tout se passe comme si le remblai possédait, dans les directions où sont placés les éléments de renforcement, une résistance à la traction dont la valeur est directement proportionnelle aux efforts repris par les géogrilles. Celles-ci reportent les efforts de la zone active, à l'aval vers la zone résistance à l'arrière du massif



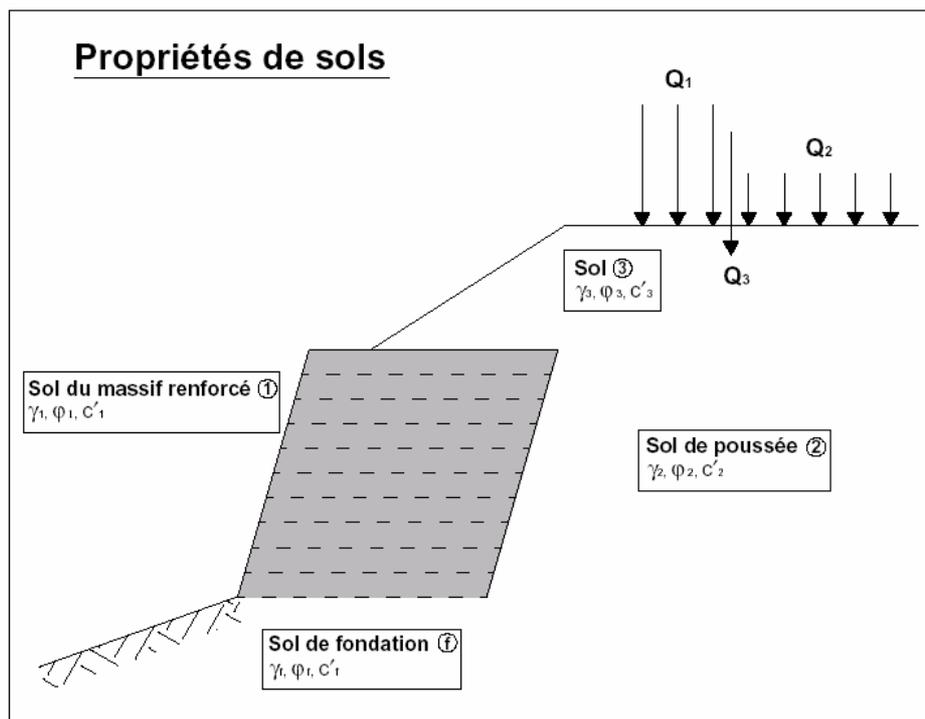
2.2 Eléments généraux de conception

2.2.1 Définition du projet :

Les données du projet fixées contractuellement par le maître d'œuvre recouvrent, le site d'implantation, la durée de service et la catégorie de l'ouvrage.

Les autres données nécessaires à la justification de l'ouvrage sont les suivantes :

- ✓ données géométriques
- ✓ données géotechniques



- ✓ éléments hydrologiques et hydrogéologiques,
- ✓ surcharges et /ou charges concentrées,
- ✓ actions sismiques

2.2.2 Durée de service

La durée de service doit être précisée par le maître d'œuvre. Elle vise la prise en compte de l'évolution des propriétés des matériaux avec le temps. Un ouvrage en terre renforcé par géogrilles doit satisfaire aux critères de résistance et de déformation définis pour sa justification pour une durée au moins égale à sa durée de service.

On définit 3 classes de durée de service :

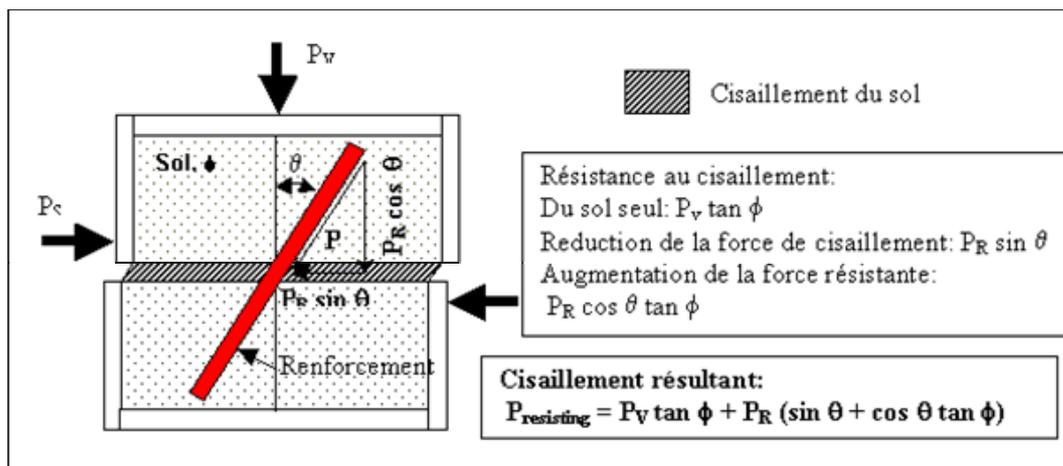
- ✓ ouvrage provisoire : durée de service inférieure ou égale à 2 ans
- ✓ ouvrage temporaire : durée de service supérieure à 2 ans et inférieure ou égale à 5 ans
- ✓ ouvrage permanent : durée de service supérieure à 5 ans et inférieure ou égale à 100 ans.

2.2.3 Température de service

La température de service, représentative d'une température moyenne du massif, est usuellement fixée à 20°C en France métropolitaine. Au Maroc, celle-ci est sensiblement plus élevée (en moyenne entre 25 et 30°).

2.3 Principes de justification

L'association d'un sol rapporté et de géogrilles crée un matériau composite, à la fois résistant et souple, dans lequel les géogrilles résistent essentiellement en traction. Ce matériau appelé remblai renforcé permet de réaliser des ouvrages de type « poids », où le poids propre du massif joue un rôle prépondérant dans la stabilité.



D'après Jewel & Wroth 1987

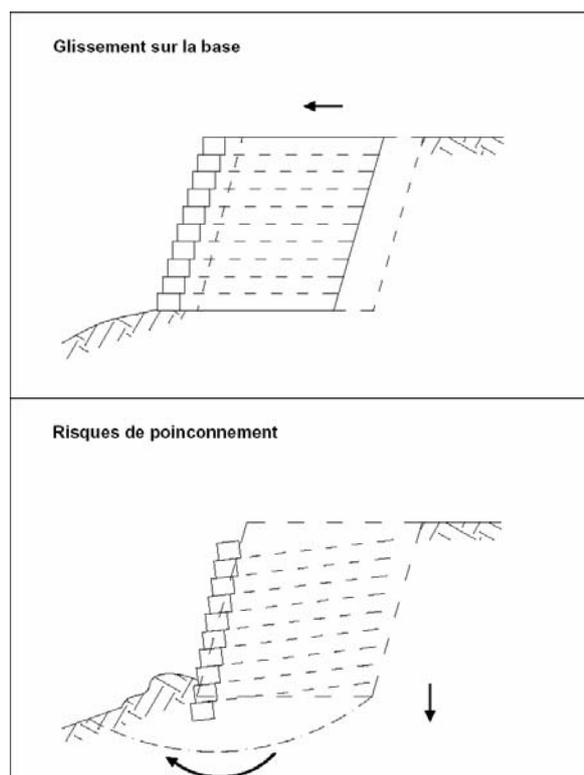
L'analyse d'un ouvrage de ce type consiste à vérifier sa stabilité externe, sa stabilité globale et sa stabilité interne.

2.3.1. Stabilité externe :

Par mesure de simplification, il est d'usage de considérer les massifs renforcés courants comme monolithiques pour le calcul de leur stabilité externe

Comme pour un mur de soutènement traditionnel (mur poids. ...), la stabilité externe d'un ouvrage renforcé concerne la stabilité vis à vis du glissement sur la base, le risque de poinçonnement et éventuellement une évaluation des tassements.

Les observations effectuées sur des ouvrages réels ont montré qu'ils se comportent comme des ouvrages constitués d'un matériau souple, qui peut admettre en général des déformations et des tassements différentiels importants. Le risque de basculement n'est pas pris en compte pour ce type d'ouvrage.



2.3.2 Stabilité globale :

La justification de la stabilité globale consiste à vérifier la stabilité du projet vis-à-vis de toutes les surfaces de rupture potentielles qui englobent entièrement l'ouvrage. Cette vérification est particulièrement importante pour les ouvrages sur pente.

La méthode de justification de la stabilité d'ensemble du site est identique à la stabilité globale. Par contre, alors que la vérification de la stabilité globale de l'ouvrage consiste à s'assurer que le coefficient de sécurité global est supérieur ou égal à 1,50, la vérification de la stabilité d'ensemble du site consiste à évaluer l'impact de l'ouvrage sur le site en comparant le coefficient de sécurité global avant le projet avec celui après le projet.

Lorsque l'ouvrage est destiné à améliorer la stabilité du site, il faut vérifier que l'objectif d'amélioration du coefficient de sécurité global (fixé par le maître d'oeuvre) est bien obtenu. Cet objectif est en général de l'ordre de 20 à 30% d'amélioration. Lorsque l'ouvrage n'est pas directement destiné à améliorer la stabilité du site, il faut vérifier que la diminution du coefficient de sécurité global induit par le projet est acceptable.

2.3.3 Stabilité interne :

La justification de la stabilité interne du massif renforcé consiste à vérifier le choix des géogrilles en type, nombre, longueur et disposition à l'intérieur du massif, de façon à assurer l'équilibre pour toutes les surfaces de rupture qui coupent un ou plusieurs lits de renforcement ou bien qui empruntent le plan d'un lit de renforcement

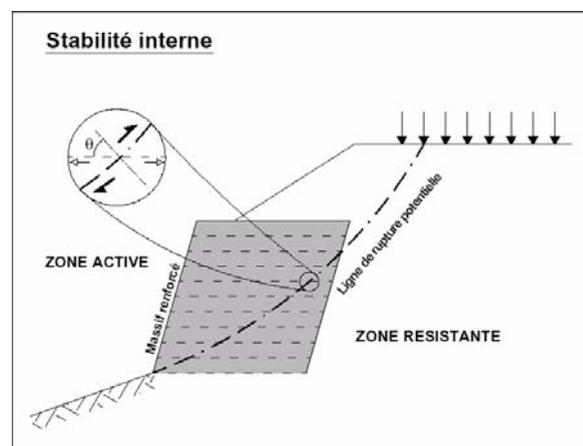
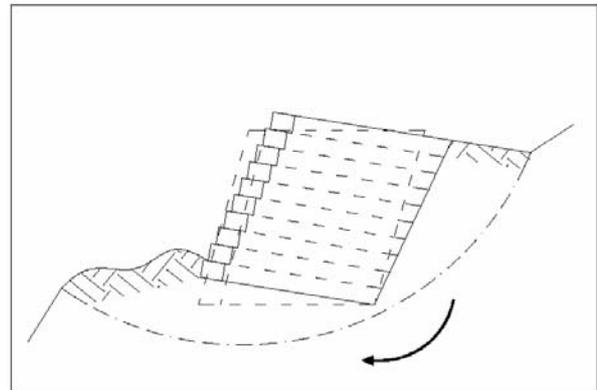
La justification consiste à vérifier que, pour chaque combinaison d'actions, les résistances de calcul des éléments constitutifs ou celles mobilisées par les phénomènes mis en jeu (interaction sol - géogrille, cisaillement du sol) génèrent un coefficient de sécurité supérieure à 1,5 selon la méthode de Bishop (DIN 4084) vis à vis des sollicitations de calculs.

3. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES GENERALES

Introduction

Les remblais renforcés par géogrilles constituent un matériau souple, ce qui leur permet d'accepter des déformations dues à des tassements généraux mais aussi différentiels. Cependant lorsque cette faculté de se déformer est nécessaire, les dispositions constructives et la technologie

Stabilité globale



adoptées (type de géogrilles, système de coffrage, type de parement et aspect esthétique, ...) ne doivent pas la compromettre.

3.1 Choix du matériau de remblai

Le matériau de remblai participe directement à la résistance de l'ouvrage en sol renforcé, son choix revêt donc une grande importance.

Conformément aux prescriptions du GTR, les matériaux doivent être acceptables pour la réutilisation en remblai et aptes à leur mise en œuvre avec les moyens matériels disponibles et pour les conditions météorologiques considérées.

En outre, le comportement dans le temps des matériaux doit être compatible avec la durée de service de l'ouvrage, en particulier pour les matériaux évolutifs et les matériaux gélifs.

D'autres critères, dus à l'emploi de géogrille doivent être vérifiés avant et après mise en œuvre et compactage du matériau. Ils visent trois objectifs principaux :

- ✓ maîtriser l'endommagement de la géogrille à la mise en œuvre du remblai
- ✓ assurer un frottement sol / géogrille suffisant pour la technique de renforcement envisagée
- ✓ limiter les déformations du parement, dans le cas où elles conditionnent l'intégrité du parement ou l'esthétique finale de l'ouvrage.

Pour cela, le matériau et sa mise en œuvre doivent satisfaire les exigences suivantes :

- ✓ Le diamètre maximal des éléments du sol doit rester inférieur à 2/3 de l'épaisseur des couches de compactage. Cette épaisseur est précisée par le GTR, en particulier en fonction de la puissance des engins de compactage que l'on pourra utiliser et du type de matériau.
- ✓ Le compactage doit être conforme aux spécifications normales de mise en œuvre des remblais, telles qu'elles sont définies dans le GTR, sur la base des essais classiques en laboratoire (Proctor, IPI). Un défaut de compactage pourra se traduire par des tassements, absolus et/ou différentiels, particulièrement préjudiciables pour le parement. Le compactage à proximité du parement doit respecter les limitations d'énergie à son approche, l'emploi d'engins plus légers pourra alors imposer une diminution de l'épaisseur des couches de compactage.

3.2 Choix du parement

En plus de son importance sur l'aspect visuel de l'ouvrage, le parement a deux rôles :

- ✓ un rôle de confinement des matériaux de remblai,
- ✓ un rôle de protection des géogrilles de renforcement.

3.3 Choix des renforcements géogrilles

Le choix de la géogrille doit s'effectuer en fonction :

- ✓ de sa résistance en traction de dimensionnement à long terme et de sa raideur,

- ✓ de son coefficient d'interaction par frottement à son interface avec le matériau de remblai,
- ✓ du polymère dont il est constitué, qui doit être compatible en terme de durabilité avec le matériau de remblai, et le cas échéant, avec les matériaux constitutifs du parement.

3.3.1 Résistance en traction à long terme :

La résistance en traction à long terme du géogrid, par rapport à sa résistance à la traction « à court terme », est réduite pour tenir compte du fluage, de l'endommagement et du vieillissement. Les différents coefficients partiels de réduction correspondants sont définis par des essais normalisés et validés par des avis techniques.

La résistance en traction à long terme de la géogrid doit être comparée à la tension de calcul déterminée par la justification de la stabilité interne de l'ouvrage, en tenant du coefficient de sécurité lié à l'emploi des géogrids.

3.3.2. Coefficient d'interaction à l'interface entre la géogrid et le matériau de remblai :

La géogrid de renforcement doit permettre d'obtenir le frottement requis sur l'interface sol – géogrid pour la justification de la stabilité interne de l'ouvrage. Cette valeur s'obtient par un essai d'arrachement suivant la norme NF EN 13738.

3.3.3. Polymère :

En terme de durabilité, le choix du ou des polymères constitutifs des géogrids doit être compatible avec le matériau de remblai employé, et éventuellement avec les matériaux constitutifs du parement..

3.4 Espacement des renforcements

L'espacement vertical entre lits de renforcement est nécessairement un multiple entier de l'épaisseur des couches de compactage. L'espacement vertical dépend aussi pour certains types de parement de la taille des éléments de façade et des accrochages des renforcements qu'ils comportent.

Dans le cas des nappes de géogrids, l'espacement vertical des lits de renfort normalement sera compris entre 0,20 m et 0,60 m pour permettre de garder au massif renforcé son caractère de matériau composite.

3.5. Drainage du massif

Il convient de prévoir un drainage efficace et pérenne de l'ouvrage, en particulier à l'amont des ouvrages à parement vertical ou situés sur pente.

Il s'agit de dériver les eaux d'infiltration, et le cas échéant de rabattre la nappe, afin de prémunir l'ouvrage :

- ✓ de l'apparition éventuelle de pressions hydrostatiques, généralement très pénalisantes pour la stabilité de l'ouvrage lorsqu'elles n'ont pas été prises en compte,
- ✓ de l'altération éventuelle des matériaux de remblai, en particulier de la diminution de la résistance mécanique des sols fins suite à l'augmentation de leur teneur en eau,

- ✓ des risques de diminution du frottement à l'interface sol / géogrille lorsque les infiltrations circulent de façon préférentielle le long des lits de renforcement,
- ✓ des dégradations possibles d'aspect du parement dues aux suintements.

3.6 Profondeur de fiche

Les ouvrages doivent comporter une fiche D supérieure ou égale à la fiche minimale 0,40m :

Pour des raisons pratique, il faut prévoir une plate-forme horizontale d'au moins 1 mètre à l'aval du massif renforcé.

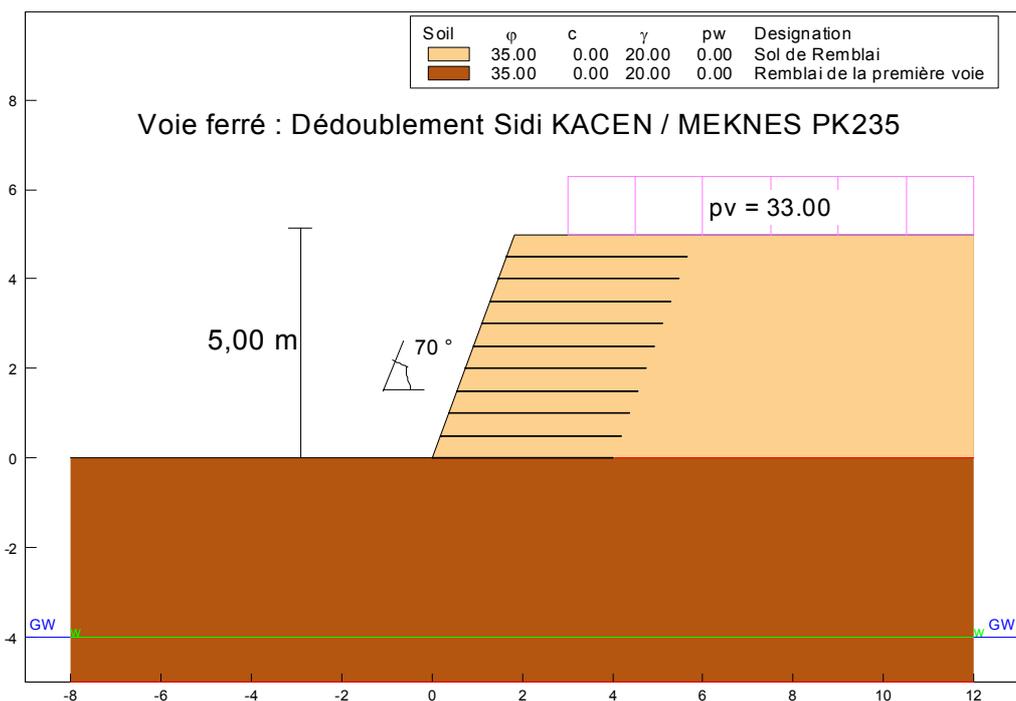
4. DEDOUBLEMENT DE LA VOIE FERROVIAIRE : MEKNES-FES

4.1 Généralité

4.2 Eléments généraux de conception

4.2.1 Définition du projet :

- ✓ données géométriques



- ✓ données géotechniques

Le sol de fondation est constitué du corps de remblai de la voie ferroviaire existante ayant comme caractéristique à long terme :

Masse volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

$C' = 0 \text{ kN/m}^2$

$\phi' = 35^\circ$

Le matériau prévu pour le massif renforcé et le sol retenue à comme caractéristique à long terme du matériau :

Masse volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

$C' = 0 \text{ kN/m}^2$

$\varphi' = 35^\circ$

- ✓ éléments hydrologie et hydrogéologiques,

La nappe phréatique à été considéré à la côte $-4, 0 \text{ m}$ vis à vis de de l'ancienne voie ferroviaire.

- ✓ surcharges et /ou charges concentrées,

Une surcharge uniformément répartie de 33 kN/m^2 a été considérée pour tenir compte de la circulation ferroviaire.

- ✓ actions sismiques

Aucune action sismique n'a été considérée

4.2.2 Durée de service

Il s'agit ici d'un ouvrage provisoire dont la durée de service est comprise entre 2 et 5 ans. En effet, le mur de soutènement a pour but d'assurer la circulation des trains le temps de remblayer la voie actuelle à la côte désirée.

4.2.3 Température de service

La température de service a été considérée inférieure à 30° .

4.3 Principes de justification

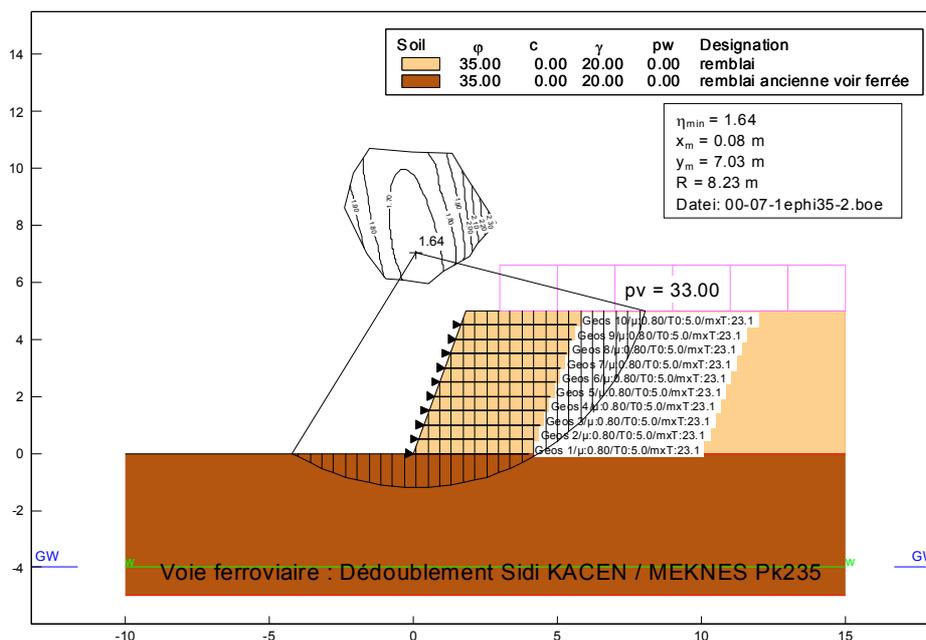
4.3.1. Stabilité externe :

La géométrie du massif étant simple, il est évidemment que le massif considéré comme monolithique de base ne peut glisser sur sa base de largeur $4,00 \text{ m}$. Le matériau de fondation étant de bonne qualité (ancien remblai ferroviaire), le problème de poinçonnement ne se pose pas. L'utilisation de géogrille ne change en rien les problèmes éventuels de tassement liés directement à la surcharge du remblai.

4.3.2 Stabilité globale :

La stabilité globale et d'ensemble a été examinée selon la méthode de Bishop en observant des cercles de glissement potentiels à l'extérieure du massif renforcé. Le coefficient de sécurité obtenu grâce à la mise en œuvre 10 nappes de géogrille ayant une tension de calcul de $23,1 \text{ kN/m}$ et un coefficient d'interaction avec le sol de $0,9$, vaut $1,64$ ce qui est satisfaisant.

Examen des cercles de rupture potentielle selon la méthode de Bishop (DIN 4084)

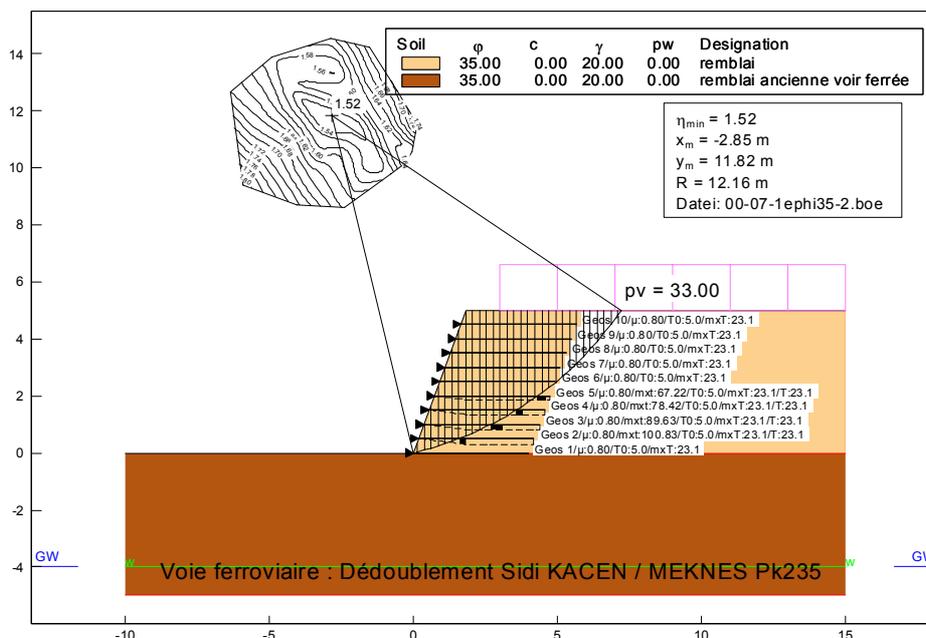


4.3.3 Stabilité interne :

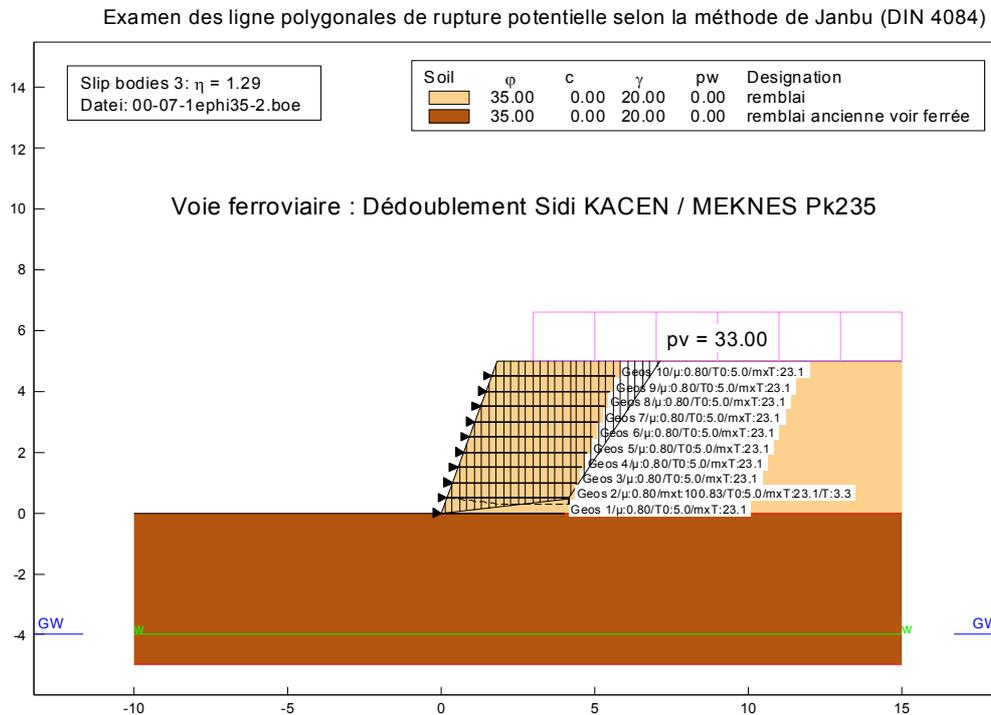
La stabilité interne a été examinée selon la méthode de Bishop (rupture ce type circulaire) et la méthode de Janbu (rupture de type ligne polygonale) selon la norme DIN 4084.

Le coefficient de sécurité selon la méthode de Bishop sur plus de 800 cercles de glissement potentiels examinés, grâce à la mise en œuvre 10 nappes de géogridle ayant une tension de calcul de 23,1 kN/m et un coefficient d'interaction avec le sol de 0,9, vaut 1,52, ce qui est satisfaisant.

Examen des cercles de rupture potentielle selon la méthode de Bishop (DIN 4084)



Le coefficient de sécurité selon la méthode de Janbu sur plus de 800 lignes polygonales potentielles examinées grâce à la mise en œuvre 10 nappes de géogridde ayant une tension de calcul de 23,1 kN/m et un coefficient d'interaction avec le sol de 0,9, vaut 1,29 ce qui est satisfaisant.



4.4 Choix des renforcements géogrilles

Il est nécessaire que la géogridde est une tension de service à long terme supérieure à 23,1 kN/m pour la durée de service et un coefficient d'interaction avec le sol supérieure ou égale à 0,9.

La justification de la résistance des renforcements choisis, consiste à s'assurer que leur traction de dimensionnement à long terme vérifie :

$$T_{LTD} \geq T_{CALC} * \gamma_{géo}$$

T_{DLT} : Résistance à la traction à long terme

T_{CALC} : Tension requise issue du dimensionnement

$\gamma_{géo}$: Coefficient de sécurité sur les géogrilles

La résistance en traction à long terme d'une géogridde (T_{DLT}) est la résistance en traction du produit installé dans un remblai compacté, pour un chargement constant appliqué pendant la durée de service de l'ouvrage, à la température de dimensionnement. T_{DLT} est défini par l'équation suivante :

$$T_{DLT} = \frac{T_{ik}}{\Gamma_{flu} \times \Gamma_{vieil} \times \Gamma_{instal}}$$

dans laquelle :

- T_{ik} Représente la résistance en traction minimum garantie de la géogridde "à court terme" conformément à la norme NF EN ISO 10319.
- Γ_{flu} Est le coefficient partiel lié au comportement en fonction du temps des géogriddes. Pour une durée de 5 ans et pour les géogriddes Fortrac[®] vaut 1,49. Ce coefficient est validé par l'avis technique européen BBA N° 97/R096 L'application de ce coefficient permet, pour la durée de service de l'ouvrage, de considérer l'influence du fluage sur la résistance en traction des géogriddes et de limiter les déformations post construction.
- Γ_{vieil} Est le coefficient partiel lié au vieillissement des produits géogriddes, par exemple par hydrolyse ou oxydation, dépendant des conditions d'environnement du produit. Pour la géogridde Fortrac[®] 55/30-20 ce coefficient vaut 1,0. Ce coefficient est validé par l'avis technique européen BBA N° 97/R096 pour des sols dont le PH est compris entre 4,1 et 8,9.
- Γ_{instal} Est le coefficient partiel correspondant à l'endommagement des renforcements géogriddes produit par leur installation et le compactage des remblais. Pour la géogridde Fortrac[®] 55/30-20 ce coefficient vaut 1,10. Ce coefficient est validé par l'avis technique européen BBA N° 97/R096 pour des sols dont la granulométrie est comprise entre 20 et 60.
- $\Gamma_{géo}$ Est le coefficient de sécurité lié aux géogriddes (Qualité de la production, contrôle, extrapolation des donnée, ...). Pour la géogridde Fortrac[®] 55/30-20 ce coefficient vaut 1,2. Ce coefficient est validé par l'avis technique européen BBA N° 97/R096 pour une durée de service inférieure à 60 ans..

On obtient donc pour la géogridde Fortrac 55/30-20 : une valeur de T_{LTD}

$$T_{DLT} = \frac{T_{ik}}{\Gamma_{flu} \times \Gamma_{vieil} \times \Gamma_{instal}} = \frac{55}{1,49 \times 1,0 \times 1,10} = 33,5 \text{ kN / m}$$

La géogridde Fortrac[®] 55/30-20 permet donc d'assurer la stabilité de l'ouvrage :

$$T_{LTD} = 33,5 \text{ kN / m} \geq T_{CALC} * \gamma_{géo} = 23,1 \times 1,2 = 27,7 \text{ kN / m}$$

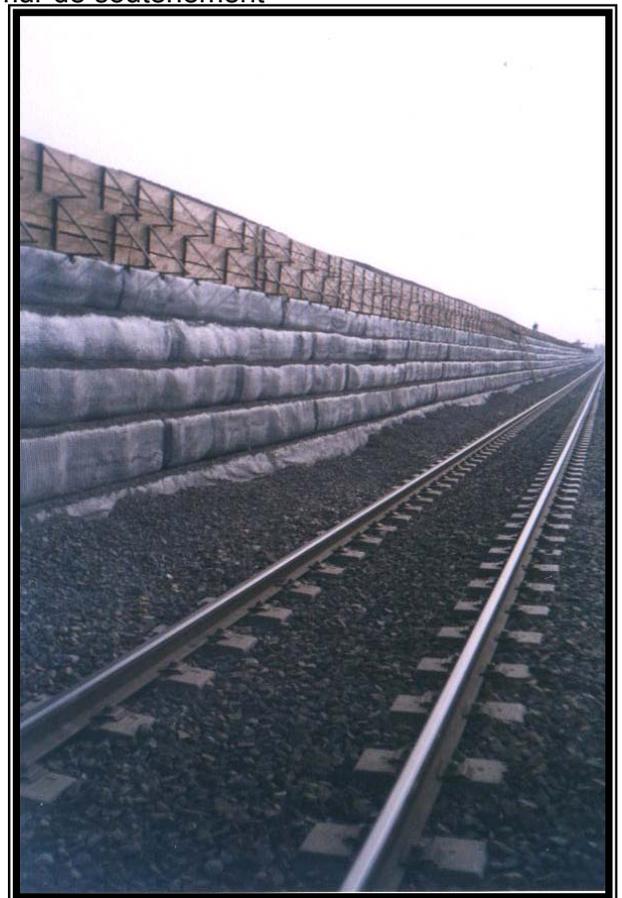
Le coefficient d'interaction entre les géogriddes Fortrac[®] et un remblai granulaire est supérieure à 0,9 grâce à l'interaction et l'imbrication des particules.

4.4 Quelques photos du chantier



Photo 2 :Vue sur le coffrage permettant de monter le mur de soutènement

Photo 3 ; vue en long lors de la construction des nappes supérieures



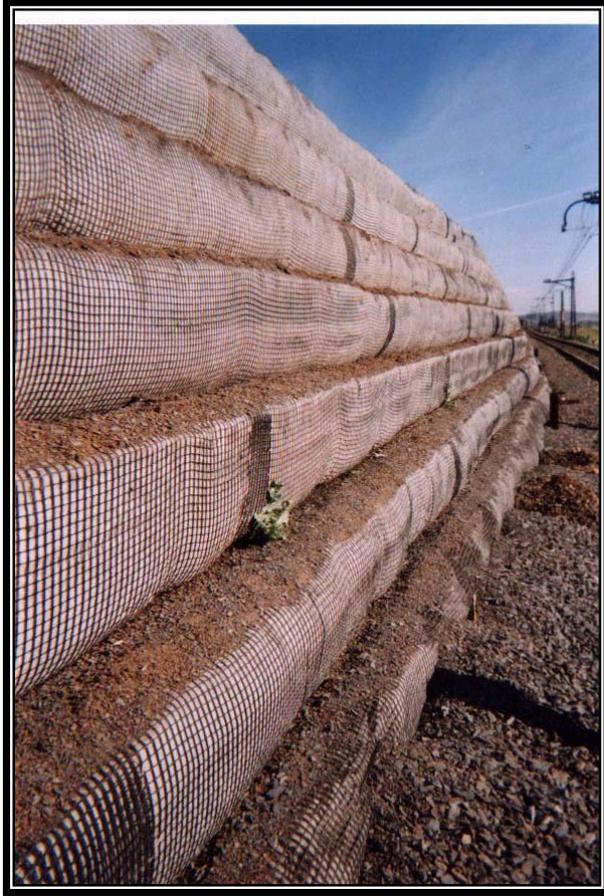


Photo 3 : Détail du massif fini



Photo 4 : Vue approchée du massif fini

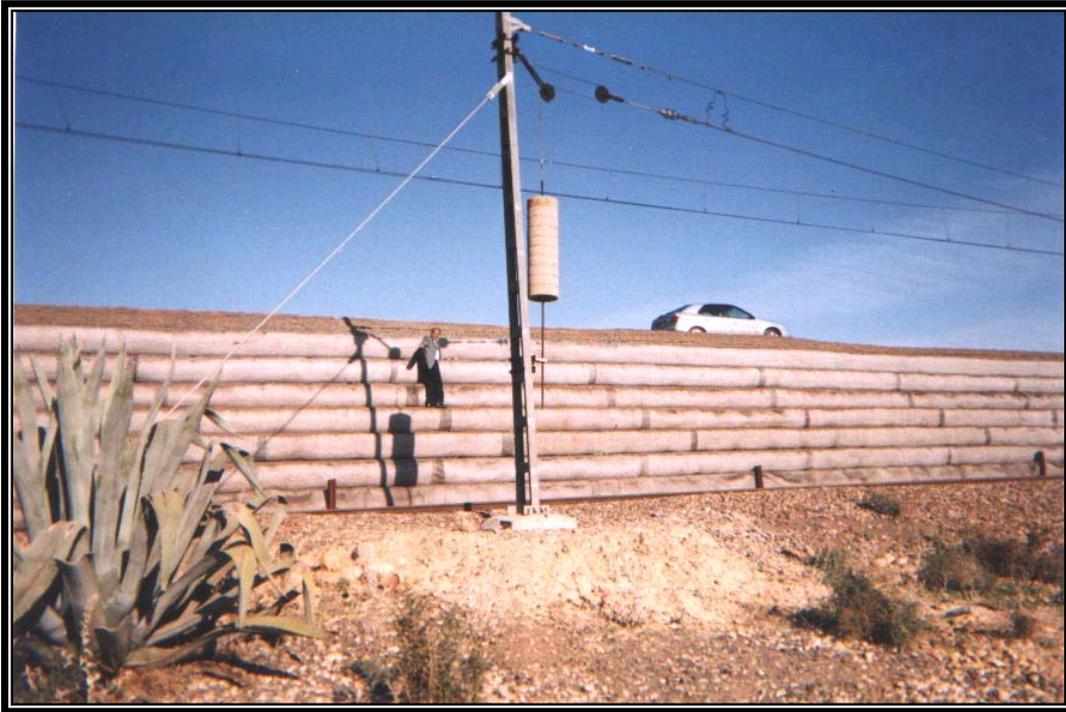
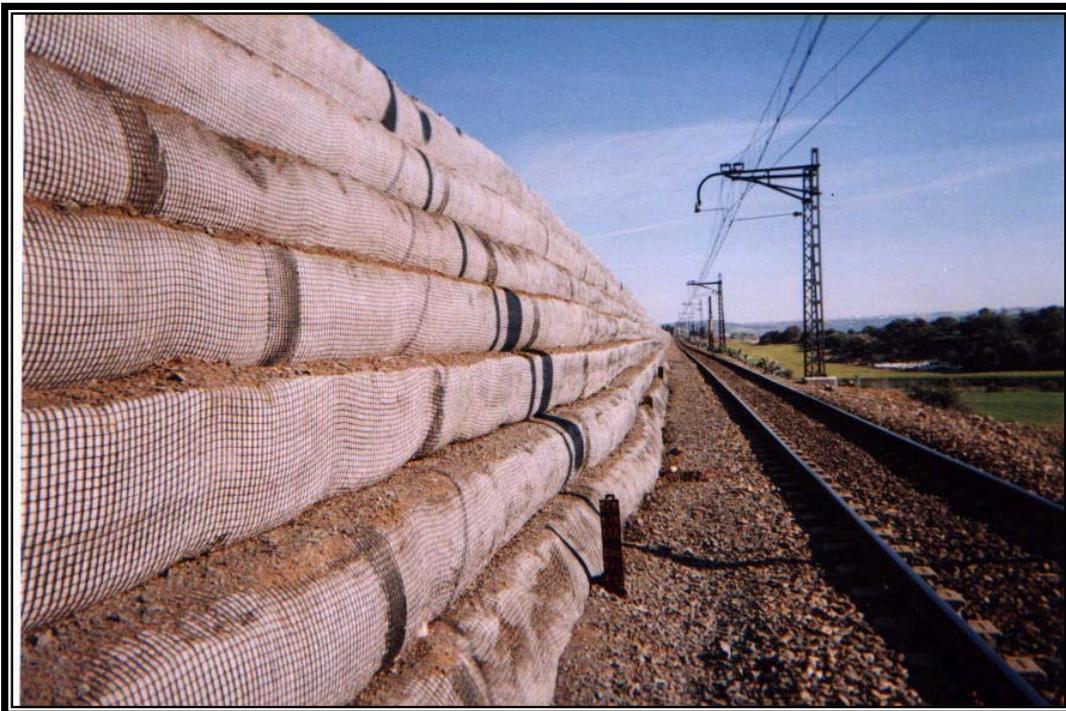


Photo 5 et 6 : Vue d'ensemble du projet de 400 m de long



5. CONCLUSION

Une fois les premiers préliminaires acquis, dû à cette nouvelle technologie, la rapidité d'exécution et la qualité de l'ouvrage obtenu ont agréablement surpris l'entreprise et le maître d'œuvre. Le massif renforcé a été construit de 400 m de long et environ 5,00 m de haut, a été construit en l'espace de 4 semaines.