

LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT DU PROJET KING SALMAN PARK A RIYADH

RETAINING SYSTEMS OF THE KING SALMAN PARK PROJECT IN RIYADH

Jamil SERHAL¹, Pierre-Christophe VELASQUE², Patrick BTEICH³, Wissem FRIKHA³, Olivier DUPOUY²

¹ Setec KSA, Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia

² Setec international, Vitrolles, France

³ Setec international, Paris, France

RÉSUMÉ – L'un des principaux défis relevés par les concepteurs du King Salman Park à Riyadh (Arabie Saoudite) a été de transcrire les intentions paysagères en ouvrages de génie civil. Les choix se sont portés sur des solutions standardisées, tel que le procédé de remblai renforcé par géogrilles avec parement en pierres qui est apparu comme le plus adapté aux contraintes architecturales, techniques et financières du projet.

ABSTRACT – One of the main challenges faced by the designers of King Salman Park in Riyadh (Saudi Arabia) was to translate the landscape intentions into civil engineering works. The choices were focused on standardized solutions, such as the geogrid reinforced backfill technique with natural stone facing which appeared to be the most suitable towards the architectural, technical, and financial constraints of the project.

1. Introduction

Situé au cœur de la capitale du Royaume – Riyadh –, le « *King Salman Park (KSP)* » est l'un des mégaprojets en cours de réalisation en Arabie Saoudite. Ce projet s'inscrit au sein d'un programme important de développement de la ville, et couvre une superficie de plus de 16 km², ce qui en fait l'un des plus importants parcs urbains au monde.

La conception du parc a été confiée au *Design Joint-Venture – GHS JV*, associant *Gerber Architekten International* (Allemagne, mandataire), *Buro Happold* (Grande Bretagne), *setec* (France), par la société d'ingénierie *Saudi Arabia Parson Ltd.* (Arabie Saoudite) qui assure la maîtrise d'ouvrage déléguée pour le compte du client *KSP Foundation*.

Le projet comprend la création de vastes espaces verts ouverts, de multiples infrastructures culturelles parmi lesquelles le « *Royal Art Complex* », le « *Museum of the Earth* », le « *National Theater* », un complexe de salles de cinéma extérieures, un centre équestre, un golf, des espaces récréatifs, des voies douces et des cheminements piétons.

Le *King Salman Park* (Fig. 1) est structuré par une voirie principale formant une boucle circulaire de 7,2 km de développée (*Multi-Modal Loop*) qui détermine la limite entre la partie centrale du parc (*Central Park*), où se développe notamment une vallée artificielle aménagée de multiples pièces d'eau (*Main Wadi*), et des extensions radiales qui pénètrent l'espace urbain (*Finger Parks*).

Avec la plantation de plus d'un million d'arbres, le projet KSP contribue de manière significative à la végétalisation de la ville, ce qui a un impact positif direct sur la qualité de l'environnement urbain et aussi sur le microclimat local.

Le parc est implanté sur l'emprise d'une ancienne base aérienne, si bien que la topographie initiale du site, globalement plane, nécessite la réalisation de terrassements importants pour obtenir le modelé de terrain souhaité par les paysagistes du projet (*Landscape Lead : Michael Van Valkenburg Associates, Inc.-MVVA, USA*).

En particulier, la morphologie créée autour du *Main Wadi* comporte des pentes relativement redressées sur des dénivelées pouvant atteindre plus de 30 m, justifiant de recourir à de nombreux dispositifs de soutènement pour exprimer le décor grandiose recherché, ainsi que pour dégager l'espace nécessaire aux plantations et cheminements sur les versants des reliefs artificiels.

Ainsi, au-delà des justifications habituelles, la conception géotechnique de ces ouvrages de soutènement a dû répondre à de forts enjeux vis-à-vis du respect des intentions architecturales et paysagères, de la volonté de valoriser largement les matériaux du site et d'une gestion complexe des interfaces avec les autres disciplines, notamment les réseaux.



Figure 1. Vue aérienne virtuelle du King Salman Park à Riyadh (Source: <https://kingsalmanpark.sa/en>)

Ces enjeux ont déterminé le choix des différentes techniques de soutènement et de traitement de talus appliquées sur le projet, ainsi que les situations à considérer dans le cadre des études menées pour justifier leur conception géotechnique. Ceci est présenté dans ce qui suit.

2. Données d'entrée et contraintes de conception

2.1. Cadre géologique et conditions de site

D'après la carte géologique de l'Arabie Saoudite N0. GM-121C établie par l'*United State Geological Survey* (USGS), les terrains en présence au niveau du site appartiennent à la Formation de Sulaiy (KJs) d'âge Jurassique supérieur - Crétacé inférieur.

La Formation de Sulaiy est constituée d'une série uniforme de calcaire aphanitique beige et massivement lité (Fig. 2).

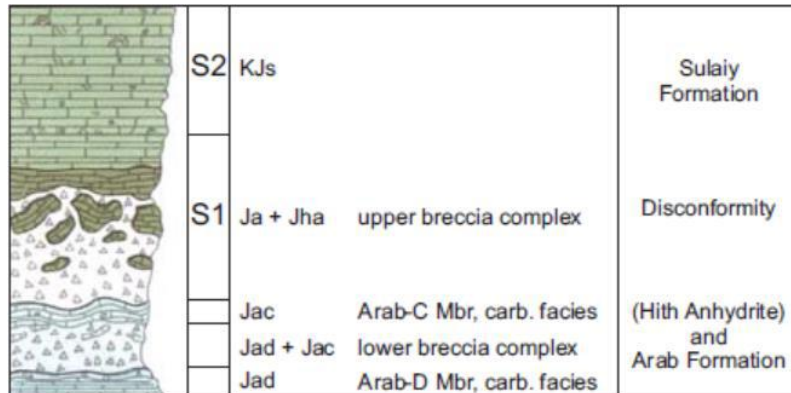


Figure 2. Log lithostratigraphique des formations en présence au niveau du site (Source : Wolpert et al., 2015)

La pluviométrie se caractérise par des périodes de courtes durées marquées par des précipitations de forte intensité responsables d'inondations, suivies par de longs mois de sécheresse. Concernant les eaux souterraines, il existe un aquifère relativement superficiel (Schlumberger Water Services, 2016) dont le fonctionnement hydrogéologique local est gouverné par des circulations fissurales au sein du substratum calcaire. La recharge de ce système est à la fois naturelle (infiltration des eaux de pluie) et artificielle (pertes des réseaux eau potable et eaux usées, infiltration des eaux d'irrigation). A noter que les assises calcaires appartenant à la Formation de Sulaiy sont réputées avoir subi une évolution karstique, mais aucun cavernement important n'a été mis en évidence sur le site.

Vis-à-vis de l'action sismique de référence, la région de Riyadh est classée en aléa très faible d'après le zonage sismique régional établi dans le cadre du *Global Seismic Hazard Assessment Program* (Shedlock et al., 2000), avec une accélération maximale du sol $PGA \leq 0,2 \text{ m/s}^2$, si bien que, en application des standards internationaux, la conception géotechnique des ouvrages en terre et des ouvrages de soutènement associés n'est pas soumise aux règles de dimensionnement parasismique.

2.2. Investigations et données géotechniques collectées

Le site a fait l'objet d'investigations géotechniques menées en 2 phases : en 2019 dans le cadre des pré-études du parc, puis en 2021 et 2022 pour les besoins des études de conception détaillée (phases *Scheme Design* et *Detailed Design*). Au total, ce sont environ 500 sondages, principalement de type carotté, régulièrement répartis sur l'ensemble du site et densifiés aux droits des ouvrages et des bâtiments. Leurs profondeurs sont comprises entre 15 m et 50 m.

Ces investigations comprennent également la réalisation d'essais in situ au SPT dans les sols de surface (notamment utilisés pour la dérivation de l'angle de frottement interne ϕ' selon Bowles, 1977), des essais in situ au pressiomètre, la pose de piézomètres, des mesures géophysiques par profils de résistivité électrique, des tests de perméabilité, la réalisation d'essais en laboratoire (essais d'identification géotechnique, mesures physico-chimiques, essais sur roche).

Sur l'ensemble du site, trois formations géotechniques principales sont distinguées, avec, du haut vers le bas, la succession suivante :

- *Remblais existants et sols superficiels* (épaisseur : 0 m à 7 m). Il s'agit le plus souvent d'une grave sablo-limoneuse à éléments grossiers, à l'état sec, moyennement dense à dense ($11 \leq N_{SPT} \text{ (blows)} \leq 50$) ;
- *Marnes* (épaisseur : 0 m à 4,5 m). Cette couche qui surmonte le substratum calcaire n'est pas présente partout sur le site. Décrite sous un faciès de marnes

raides et non plastiques, elle correspond plus généralement à l'horizon d'altération du calcaire ;

- *Substratum calcaire* (Bedrock). La formation de Sulaiy présente une structure subhorizontale à faiblement pentée vers l'Est, et se caractérise par une séquence de bancs calcaires tendres à résistants ($10 \leq RC(\text{MPa}) \leq 50$) admettant des intercalations marneuses décimétriques. La fracturation de la roche, majoritairement subverticale, y est plus ou moins bien exprimée ($10 \leq RQD (\%) \leq 75$).

2.3. Propriétés géotechniques des formations en présence

Les caractéristiques des trois principales formations mises en évidence au droit du parc sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Principales propriétés géotechniques des terrains

Paramètre	Remblais existants et sols superficiels	Marnes – Horizon d'altération	Substratum calcaire
Poids volumique γ	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$
Angle de frottement interne φ'	$\varphi' = 35^\circ$	$\varphi' = 36^\circ$	$\varphi' = 40^\circ$
Cohésion effective C'	$C' = 0 \text{ kPa}$	$C' = 0 \text{ kPa}$	$C' = 200 \text{ kPa}$
Plasticité	Non plastique	Non plastique	-
Résistance en compression simple RC	-	-	$RC_{\text{moy}} = 21 \text{ MPa}$

En remarque, il est fait observer que la cohésion attribuée au substrat calcaire ($C' = 200 \text{ kPa}$) est négligée dans les faciès altérés et fortement fracturés.

2.4. Intentions paysagères et architecturales

Comme indiqué en introduction, le modelé de terrain souhaité par les paysagistes du projet, avec notamment la création d'une vallée artificielle (*Main Wadi*) dans le *Central Park*, implique la réalisation de terrassements importants en déblai et en remblai avec la création de pentes variables en hauteur et en gradient.

L'intention paysagère étant de créer un modelé de terrain spectaculaire, rappelant une morphologie de canyon au niveau du *Main Wadi*, les choix en matière de traitement des pentes se sont orientés vers des solutions alliant minéral et végétal. Les échanges entre ingénieurs et paysagistes ont conduit à retenir quatre techniques pour le traitement des pentes et talus non végétalisés (voir Fig. 3) :

- *Type A* : talus rocheux naturel (*Exposed Bedrock*). Dans les zones de déblai en calcaire franc, la solution retenue consiste à créer un parement minéral stable dans le temps en dégageant les surfaces de stratification selon un profil enveloppe n'excédant pas une pente de 1H/1V sur une hauteur pouvant atteindre 10 m à 15 m ;
- *Type B* : murs de soutènement en sol renforcé à parement minéral en pierres naturelles (*MSE Wall*). Ce dispositif, dont la hauteur vue n'excède pas 7 m, est appliqué pour des profils de pente comprise entre 1H/1V et 1H/2V en remblai et déblai en terrain meuble, chaque ouvrage étant séparé par des banquettes aménagées de cheminements et de plantations ;
- *Type C* : revêtement de talus auto-stables en pierre naturelles (*Stone Revetment*). Ce type de traitement concerne surtout des talus de remblais de pente inférieure ou égale à 3H/2V dont la hauteur reste inférieure à 10 m ;
- *Type D* : murs poids en pierres naturelles (*Gravity Wall*). Cette solution s'applique dans les mêmes conditions que le type B (*MSE Wall*) mais pour des hauteurs vues n'excédant pas 2 m.

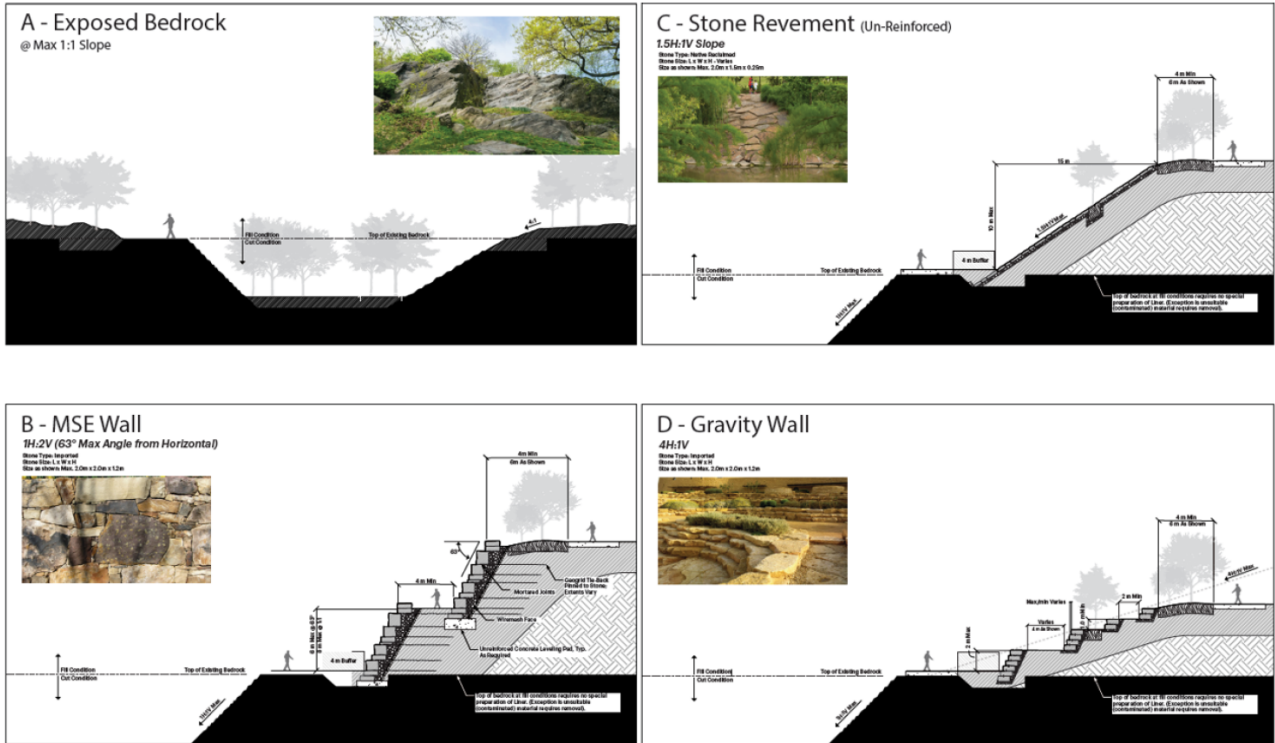


Figure 3. Typologie des dispositifs de soutènement et de traitement des talus

La coupe donnée en Fig. 4 ci-dessous illustre le traitement paysager souhaité au niveau du *Main Wadi*. Les pentes sont majoritairement aménagées de dispositifs de soutènement de type B (*MSE Walls*).

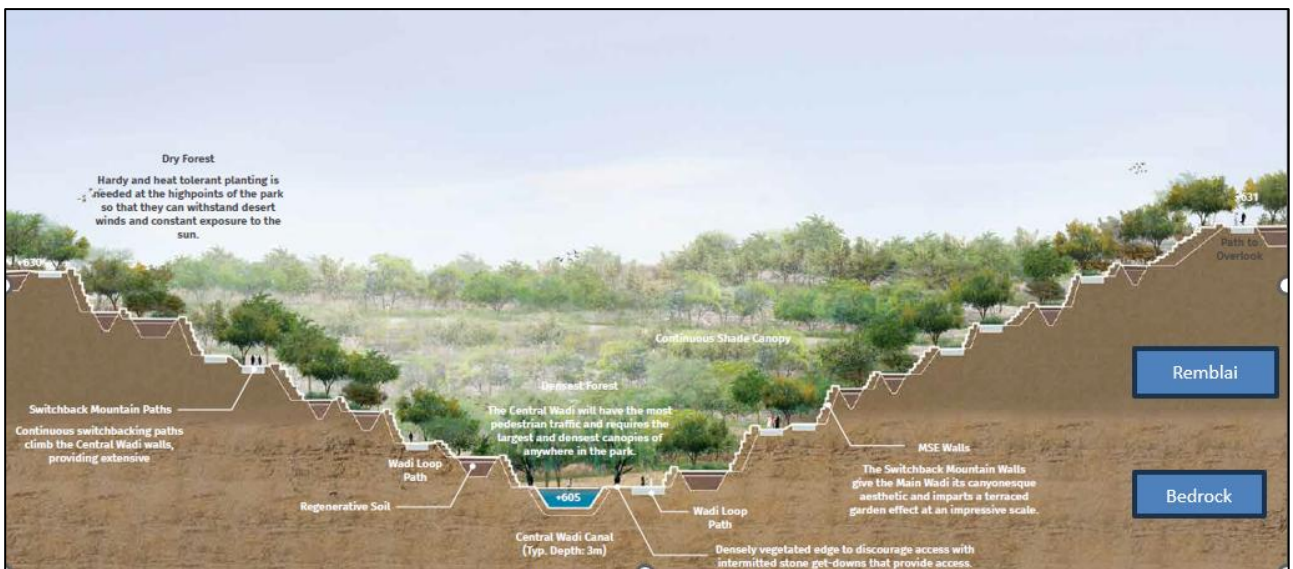


Figure 4. Coupe paysagère au niveau du Main Wadi

3. Focus sur les soutènements en sol renforcé (Type B : MSE Wall)

3.1. Principes de conception

Pour les talus remblais de pente supérieure à 3H/2V, la solution de mur en sol renforcé (*MSE Wall*) a été privilégiée car c'est celle qui présente le meilleur compromis technico-économique en permettant :

- De réutiliser les matériaux du site, essentiellement issus des extractions dans le substratum calcaire, à la fois en remblai courant et en matériaux sélectionnés après élaboration par concassage/criblage ;
- De produire le rendu architectural souhaité grâce au parement minéral constitué de dalles de pierres triées sur site ou bien importées depuis des carrières extérieures au chantier ;
- Un renforcement du sol au moyen de géogrilles pour la souplesse d'utilisation de ce procédé compte tenu des contraintes liées aux plantations et aux réseaux ;
- D'atteindre de grandes hauteurs (environ 30 m max) par l'introduction de bermes intermédiaires.

La coupe type des murs en sol renforcé prévus dans la zone du *Main Wadi* est donnée en Fig. 5 ci-après.

Un dispositif de connexion entre le parement en pierres naturelles et le massif renforcé est assuré par des tiges d'ancrage régulièrement réparties (*rod anchors*) pour offrir une sécurité supplémentaire vis-à-vis des déformations différentielles susceptibles de se produire au cours du temps.

Lorsqu'une voie (*pathway*) est aménagée au-dessus du mur, il est nécessaire de dégager un gabarit sur 1 m de profondeur pour permettre la mise en place des réseaux secs et humides ; ceci conduit à adapter le renforcement afin d'éviter que les tranchées n'interfèrent avec la nappe de géogrille supérieure.

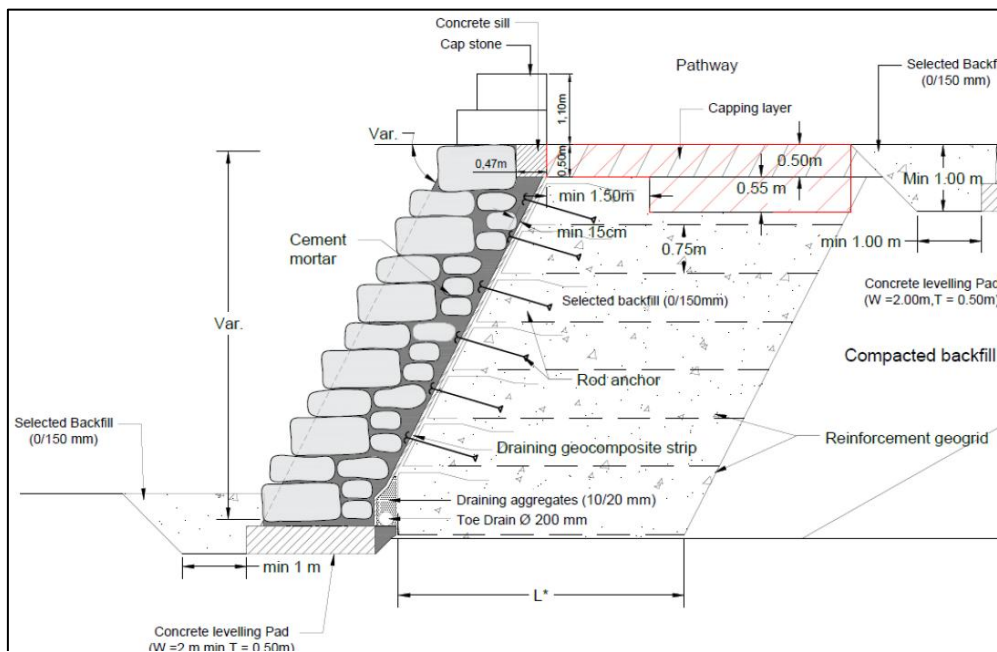


Figure 5. Coupe type d'un mur en sol renforcé (MSE Wall) avec parement minéral

Par ailleurs, cette conception est souvent adaptée en raison de la présence fréquente de fosses de plantation (*planting pit*) directement en pied de parement, imposant de descendre le niveau de fondation du mur plus bas que le fond de la fosse, via un massif de fondation en béton (*plain concrete footing*), ceci afin de garantir la stabilité de l'ouvrage en phase transitoire avant que le substrat horticole ne soit mis en place par l'entreprise chargée des plantations.

Il en est de même lorsque des plantations sont prévues directement en crête de mur, ce qui ne permet plus la mise en place du renforcement en arrière du parement. Dans ce cas, l'ouvrage est dit composite et comprend 2 parties : sol renforcé (*MSE Wall*) en partie inférieure et mur poids (*Gravity Wall*) en partie supérieure comme représenté sur la coupe type donnée en Fig. 6.

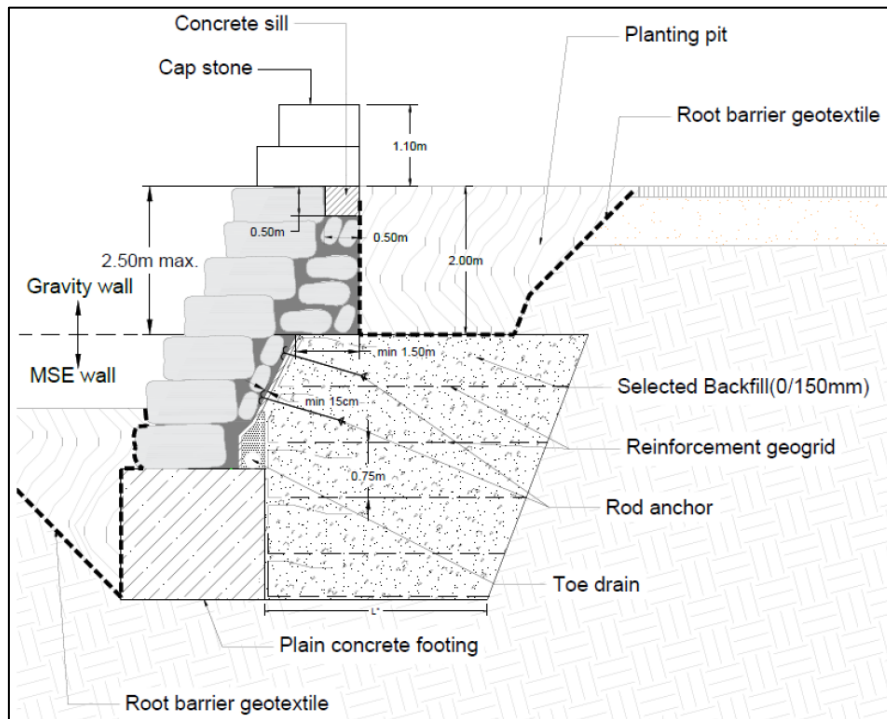


Figure 6. Coupe type d'un mur composite : sol renforcé (MSE Wall) et mur poids (Gravity Wall)

3.2. Justification des conditions de stabilité

L'étude justificative de la stabilité des murs de soutènement en sol renforcé et composite a été principalement conduite en application des codes et standards suivants :

- Saudi Building Codes.
- Universal Accessibility, Built Environment Guidelines for the Kingdom of Saudi Arabia.
- EN 1997 Parts 1 & 2 – Eurocode 7: Geotechnical Design (EC7) and Annexes.
- EN 1997: Part 3: Design assisted by field testing.
- British Standard BS 8006-1:2010 & BS8006-2:2011: Code of practice for strengthened/reinforced soils.

Les calculs de stabilité ont été menés aux ELU vis-à-vis de la stabilité générale, mixte interne et externe en considérant l'approche de calcul GEO DA3-A2 de l'Eurocode 7.

Les propriétés mécaniques des différents éléments de dimensionnement (propriétés du sol, géogrid, tiges d'ancrage) sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2. Propriétés utilisées dans le modèle numérique

	Type de sol	Densité (γ kN/m ³)	Angle de frottement (φ°)	Cohésion (c' kPa)
Propriétés des sols	Sol horticole	18.0	28.0	0.0
	Couche de forme	19.5	38.0	0.0
	Bordure béton	25.0	45.0	50.0
	Remblai sélectionné	19.5	38.0	0.0
	Remblai compacté	19.5	35.0	0.0
	Remblai existant	19.0	35.0	0.0
	Horizon d'altération du Bedrock	24.0	40.0	0.0
	Substrat rocheux sain (Bedrock)	24.0	40.0	200.0 (négligée dans les calculs)
	Parement en pierre du mur	25.0	45.0	50.0

Renforcement géogridde	Longueur (m)		Espacement (m)	Résistance à la traction (kN)
		3.5 to 4.0 (0.8 H) avec H hauteur du mur		0.75
Tiges d'ancrage (rod anchor)	Résistance en traction \geq 150 kN	Espacement vertical = 1.5 m	Espacement horizontal = 1.5 m	

La stabilité vis-à-vis de ruptures par glissement pseudo-rotationnel a été analysée selon la méthode de Bishop à l'aide du logiciel de calculs géotechniques Talren V6®.

La justification des ouvrages a également été vérifiée vis-à-vis des situations suivantes :

- Situations transitoires en fonction du phasage de construction, et en particulier le cas correspondant à la situation avant remplissage des fosses de plantation par le sol horticole (situation dimensionnante lorsque la fosse de plantation se situe directement en pied du mur) ;
- Prise en compte d'une saturation du sol au niveau des fosses de plantation (simulation d'une défaillance du système d'irrigation) ;
- Prise en compte d'une cohésion nulle dans le substratum calcaire (hypothèse d'une sur-profondeur du front d'altération du bedrock).

Au final, 25 sections correspondant aux contextes les plus sensibles en termes de stabilité auront été étudiées sur l'ensemble du parc, pour une surface cumulée de murs à parement minéral d'environ 65 000 m².

Un exemple de modélisation numérique d'une section de calcul sur les pentes du *Main Wadi* est représenté sur le profil donné en Fig. 7 (vérification de la stabilité générale).

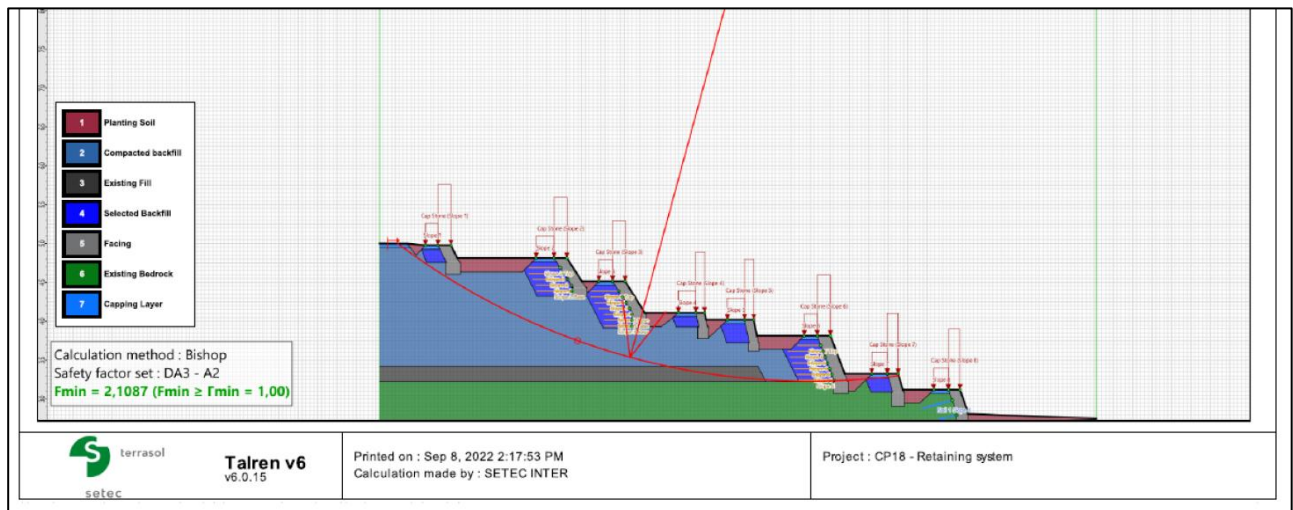


Figure 7. Modélisation numérique d'une section de calcul

4. Principales conclusions

L'un de principaux défis auquel a dû répondre la conception géotechnique des terrassements du projet King Salman Parc a été de transcrire les intentions paysagères et architecturales en ouvrages de génie civil.

Les nombreux échanges entre les ingénieurs et les paysagistes au cours des phases de *Scheme Design* et *Detailed Design* ont permis d'aboutir à une standardisation des ouvrages de soutènement et des traitements de talus répondant au mieux aux attentes des concepteurs du parc et aux enjeux technico-économiques du projet.

Ainsi, pour les ouvrages les plus importants, notamment ceux qui contribuent à créer le motif topographique spectaculaire de canyon recherché au niveau du *Main Wadi*, le

procédé de remblai renforcé par géogrilles associé à un parement minéral en pierres naturelles est apparu comme étant la solution la plus pertinente pour atteindre les objectifs paysager tout en permettant une construction basée sur des techniques de terrassement industrialisables et sur une valorisation large des déblais du chantier.

En outre, du fait de sa souplesse d'utilisation, cette technique s'avère bien adaptée aux contraintes de phasage des travaux, en particulier celles liées à la réalisation différée des fosses de plantation prévues par les paysagistes et à la mise en place des réseaux pouvant interférer avec les massifs en sol renforcé.

La justification géotechnique des conditions de stabilité de ces ouvrages, menées selon les dispositions prévues par l'Eurocode 7, a été vérifiée sur 25 sections de calcul représentant les contextes les plus sensibles sur l'ensemble du parc, en prenant en compte ces contraintes de construction via des situations transitoires.

5. Références bibliographiques

- Bowles J.E. (1977). Foundation analysis and design. McGraw-Hill, Inc., New York.
- British Standard BS 8006-1:2010 & BS8006-2:2011: Code of practice for strengthened/reinforced soils.
- EN 1997 Parts 1 & 2 – Eurocode 7: Geotechnical Design (EC7) and Annexes.
- EN 1997: Part 3: Design assisted by field testing.
- Saudi Building Codes.
- Shedlock K.M., Giardini D., Grunthal G., Zhang P. (2000). The GSHAP Global Seismic Hazard Map. USGS Publications Warehouse.
- Shlumberger Water Services (2016). ArRiyadh groundwater monitoring project – Technical Report # 6. High Commission for the Development of ArRiyadh.
- Universal Accessibility, Built Environment Guidelines for the Kingdom of Saudi Arabia.
- US Geological Survey (USGS). Map of Saudi Arabia, map n° GM-121C.
- Wolpert P., Bartenbach M., Suess P., Rausch R., Aigner T. et Le Nindre Y.M. (2015). Facies analysis and sequence stratigraphy of the uppermost Jurassic-Lower Cretaceous Sulaiy Formation in outcrops of central Saudi Arabia. *Geoarabia*, 2015, v.20, n° 4, p. 67-122.