

RÉTRO ANALYSE DE L'INSTABILITÉ DU VERSANT « PETIT D15 » SITUÉ SUR L'AUTOROUTE MARRAKECH – AGADIR AU MAROC

RETRO ANALYSIS OF THE INSTABILITY OF THE "PETIT D15" SLOPE LOCATED ON THE MARRAKECH - AGADIR HIGHWAY IN MOROCCO

Hakim AHMARI, Gabriel J. ASSAF

hakim_ahm@hotmail.ca

gabriel.assaf@etsmtl.ca

Département de génie de la construction, École de technologie supérieure
1100, Notre-Dame Ouest Montréal Québec, Canada H3C 1K3

1. INTRODUCTION

L'autoroute Marrakech/Agadir, d'une longueur de 233 km, se développe dans un contexte géologique difficile, avec un relief accidenté, entraînant des déblais et remblais de grande hauteur. L'excavation des déblais lors des travaux a fait apparaître des désordres et des instabilités de talus, dont le plus important est celui du déblai D15 dans les sections montagneuses du Haut Atlas. Il s'agit de l'un des points les plus difficiles du projet de l'autoroute Marrakech-Agadir avec un volume à excaver de l'ordre de 3,5 millions de m³ dans un terrain principalement rocheux. Les expertises réalisées sur le déblai D15 ont permis de distinguer trois zones (figure1) : zone 1, zone 2 et

zone 3 selon le mécanisme du glissement, la taille des masses instables ainsi que le type de sol.

- La zone 1 qui se situe dans l'extrême nord du D15 et qui a subi un glissement profond est caractérisé par la prédominance d'un sol argileux.
- La zone 2 : Constituée d'une alternance de grès et d'argilites.
- La zone 3: Constituée d'éboulis d'épaisseur importante et reposant sur les mêmes formations que la zone 2, elle était le siège de glissements plans des terrains superficiels.

Cette étude a pour objet d'effectuer une rétro analyse de l'instabilité de la pente «petit D15» située dans la zone 1 et de proposer une solution pour son confortement. Nous présentons d'abord une description sommaire du site étudié ainsi que les désordres



Figure 1 : Localisation du petit D15 par rapport au déblai D15

survenus dans le passé, par la suite nous allons effectuer une rétro analyse de l'instabilité de cette pente en utilisant premièrement la méthode des équilibres limites sur le logiciel Slide et deuxièmement la méthode des différences finies par le logiciel Flac. Nous discuterons enfin quelques solutions de confortement du versant permettant de parer à d'éventuelles instabilités.

1.1. Présentation du site et historique des désordres

Le « petit D15 » est un talus de 20 m de hauteur et d'une pente 1H/2V dans une argilite compacte à bloc, il a subi un glissement profond en phase d'exploitation (fin décembre 2010). Au moment de la rupture, la pente n'était pas instrumentée, il n'y a donc pas de mesures de déplacements disponibles avant la rupture. Mise à part la chute de blocs de roches observée quelques minutes avant l'effondrement global, peu de signes peuvent être associés à la rupture. Pour cette raison, la rupture analysée dans le cas d'étude est considérée comme étant

relativement soudaine. Le glissement s'est produit au niveau de formation d'argile, vraisemblablement du fait d'une surestimation de la résistance au cisaillement à long terme. Ceci illustre les difficultés d'appréciation de la résistance au cisaillement dans les formations argileuses à long terme, et notamment des variations de pressions interstitielles générées par l'excavation, qui augmentent les contraintes effectives à court terme, mais se dissipent sur de longues périodes du fait de la très faible perméabilité des argilites.

2. RÉTRO ANALYSE DE LA RUPTURE DU PETIT D15

La rétro analyse de l'événement met l'accent sur les différents aspects entourant la dégradation de cette pente. Elle présente en premier lieu les résultats d'analyses en utilisant la méthode des équilibres limites sur le logiciel SLIDE et numérique des différences finies par le logiciel FLAC.

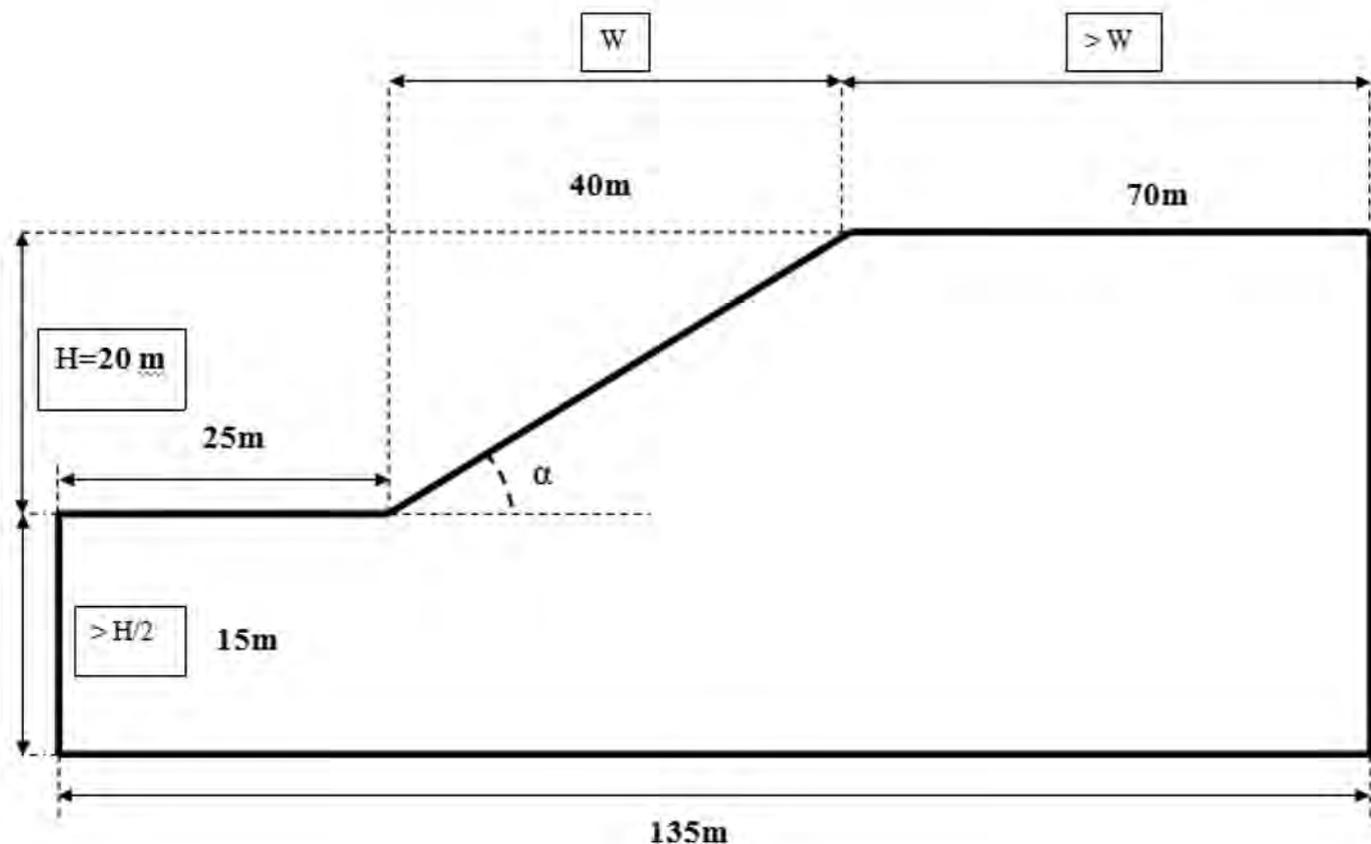


Figure 2 : Dimensions minimales pour un modèle en deux dimensions

2.1. Construction du modèle

La conception d'un modèle numérique requiert la définition de la géométrie et des limites physiques de la zone d'analyse. Elle correspond à la partie du talus qui sera l'objet d'une modélisation. Ceci nous incite à ne considérer qu'une partie de la structure, car la modélisation de la totalité du massif entraînerait d'une part des temps de calcul trop longs et d'autre part nécessiterait une mémoire informatique importante (plus la dimension d'un modèle sera importante, plus le temps de simulation sera long, Starfield et Cundall (1988)). Il est donc nécessaire de trouver un compromis et de se donner des critères pour déterminer les dimensions du volume à modéliser. Il s'agit d'un facteur important à considérer lors du dimensionnement de la zone d'analyse.

2.1.1. Définition de la zone d'analyse et position du problème

Les limites du modèle sont fonction des dimensions de la zone d'instabilité. Elles sont sélectionnées selon des considérations typiques de dimensionnement de modèle, Lorig (2000). Selon une coupe longitudinale (Figure 2), la hauteur de la base du modèle est plus élevée que la moitié de la hauteur de la projection de la pente selon la verticale (H). De plus, la longueur à l'arrière du sommet de la pente est plus élevée que la longueur de la projection de la pente selon l'horizontale (W). Ces règles de dimensionnement sont proposées pour des modèles numériques utilisant la méthode de résolution des différences finies.

Selon la figure 2, la hauteur de la projection de la pente selon la verticale (H) est 20 mètres alors que la hauteur déterminée de la base est d'environ de 15 mètres. De plus, la longueur de la projection de la pente selon l'horizontale (W) est de 40 mètres tandis que la longueur déterminée à l'arrière du sommet de la pente est d'environ 70 mètres. La largeur globale du modèle d'environ 135 mètres.

2.1.2. Localisation de la ligne de rupture

La nature du sol, les résultats de l'étude géotechnique ainsi que les constatations visuelles du site nous confirment que ce glissement est du type rotationnel qui se produit généralement dans la formation argileuse. De même, les calculs effectués en équilibre limite à l'aide du logiciel Slide (figure 3 (1)) et ceux effectués en différences finies à l'aide du logiciel Flac (figure 3 (2)) s'accordent avec les observations faites sur le terrain et confirment l'hypothèse d'une rupture circulaire. Notre étude sera basée sur l'hypothèse d'une rupture circulaire qui se développe au pied du talus.

2.2. Outils numériques utilisés

Les calculs ont été effectués à l'aide des deux logiciels suivants :

- Le logiciel Slide de calcul de stabilité des pentes rocheuses en ruptures circulaires et non circulaires par la méthode des tranches ;
- Le code de calcul FLAC en différences finies des ouvrages géotechniques par la méthode de réduction des paramètres de cisaillement.

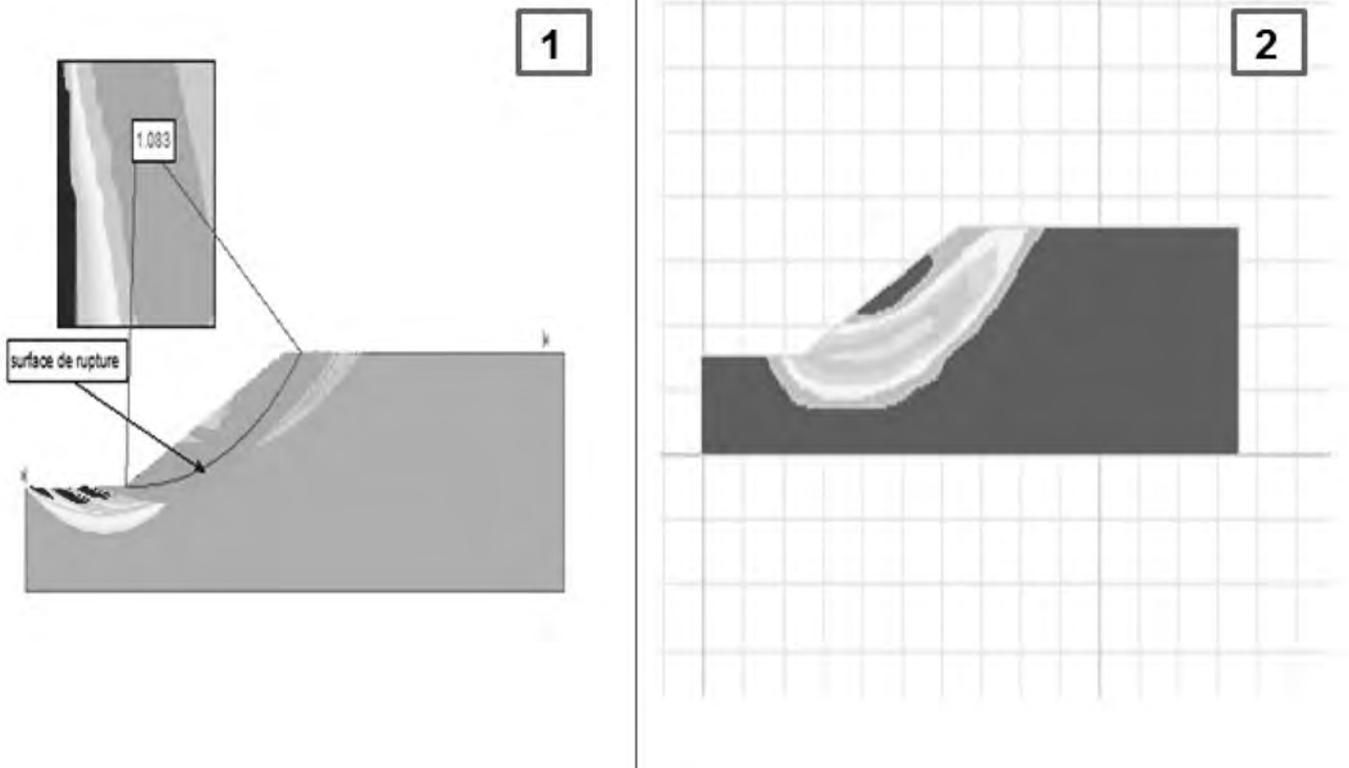


Figure 3 : Localisation de la ligne de rupture potentielle du talus à l'aide du logiciel slide (1) et à l'aide du logiciel Flac (2)

2.3. Analyse avec la méthode des équilibres limites (utilisation du logiciel SLIDE)

Le logiciel Slide, développé par Roc science inc. Toronto Canada est fréquemment utilisé pour l'analyse de la stabilité des talus rocheux. Ce logiciel est basé sur la méthode d'équilibre limite, qui peut être appliquée pour évaluer la stabilité des talus selon une surface de rupture circulaire ou non circulaire.

Une étude de stabilité statique et pseudo statique par le code de calcul Roc Slide a été menée sur le petit D15 dans le but d'étudier les causes qui ont conduit au déclenchement de cette instabilité. Les coefficients de sécurité ont été calculés en utilisant les méthodes de : Bishop simplifié, Fellenius, Spencer, Janbu simplifiée et Morgenstern-Price en considérant des surfaces de rupture circulaires.

Deux types d'analyse de stabilité ont été faits. Le premier est une analyse statique et le second une analyse pseudo-statique.

Le logiciel Slide ne permet pas d'introduire le schéma d'ondes dynamiques pour faire des analyses précises du comportement du massif lors d'un évènement sismique. Une analyse pseudo-dynamique doit donc être conduite avec une accélération sismique du site étudié. Par la suite, le facteur de sécurité est déterminé.

2.3.1. Caractéristiques mécaniques et hydrauliques du sol

Les caractéristiques mécaniques (tableau 1) et hydrauliques (tableau2) du sol ont été fixées à partir des données disponibles dans la littérature et des discussions avec des professionnels et des chercheurs qui ont participé au symposium international de la stabilité des talus rocheux fracturés qui s'est déroulé le mois d'avril 2014 à Marrakech, auquel j'ai eu l'occasion d'assister. Les résultats présentés dans cet article sont donc à prendre avec précaution, car ils sont largement dépendants des paramètres utilisés. Ils donnent des indications sur la stabilité de la pente étudiée.

Tableau 1 : Propriétés du sol formant le versant (petit D15)

Type de sol	Poids volumique (KN/m ³)	Angle de frottement (°)	Cohésion (kPa)	Bulkmodulus (Pa)	Shearmodulus (Pa)
Argile	18	29	10	10 ⁸	3*10 ⁷

Tableau 2 : Propriétés hydrauliques

Porosité	Perméabilité (m ² /Pa*s)	Water Bulk (Pa)	Water densité (kg/m ³)
0.3	10 ⁻¹⁰	10 ⁹	1000

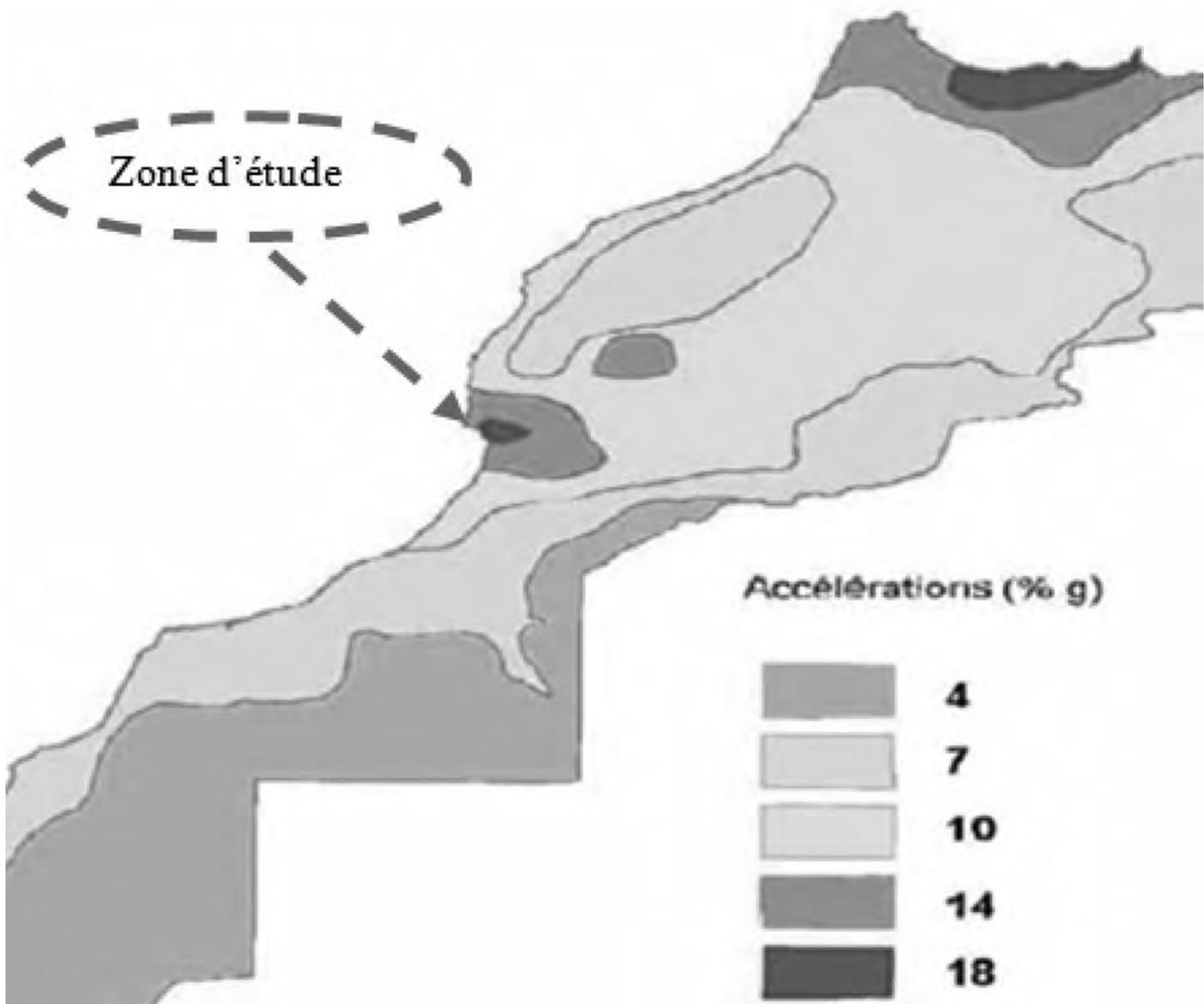


Figure 4 : Localisation du site selon la carte sismique marocaine

2.3.2. Caractéristiques sismiques du site d'étude

La zone du site (zone 5) est classée selon le règlement de construction parasismique marocain (RPS 2000-version 2011) comme une zone de sismicité élevée (figure 4).

Le tableau 3 ci-dessous donne les valeurs des coefficients pseudo-statiques horizontaux K_H et verticaux K_V pris en compte dans les calculs de stabilité sismique du versant.

2.3.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées pour l'ensemble des analyses sauf les analyses dynamiques sont choisies par défaut (les limites

verticales sont fixées horizontalement et la limite horizontale à la base du modèle est fixée horizontalement et verticalement. Pour l'analyse dynamique, la condition «free field» est utilisée.

2.3.4. Étude statique de stabilité du petit D15

2.3.4.1. L'effet du poids propre seul

Les résultats des analyses de la stabilité statique du petit D15 sous l'effet du poids propre seul en utilisant les différentes méthodes classiques utilisant la méthode des équilibres limites sont présentés dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 3 : Valeurs des coefficients sismiques K_H et K_V

Valeur de PGA (Peak Ground Acceleration)	0	0.06	0.12	0.18
Valeur de K_H	0	0.054	0.108	0.162
Valeur de K_V	0	0.0162	0.0324	0.0486

Tableau 4 : Résultats des différentes méthodes classiques

Méthode	Facteur de sécurité
• Bishop simplifié	1.590
• Fellenius	1.521
• Spencer	1.587
• Janbu simplifiée	1.505
• Morgenstern-Price	1.587
• Moyenne	1.558

Après calcul du coefficient de sécurité du versant par logiciel Slide sous l'effet de la charge gravitaire seule du talus, nous avons trouvé ($FS_{moy} = 1.558$), cette valeur montre clairement que le talus est stable sous l'effet du poids seul en l'absence de la nappe. Nous allons analyser par la suite sa stabilité sous l'effet combiné du poids et de l'eau.

2.3.4.2. Effet de la nappe

Dans notre cas d'étude, l'eau semble a priori avoir joué un rôle déterminant dans le déclenchement de cette instabilité dans la mesure où les mesures de résistivité électriques et les observations réalisées sur le site ont permis de mettre en évidence la présence d'un écoulement d'eau au niveau de couronnement de la montagne sur laquelle a été effectué le déblai D15.

Dans cette analyse, nous allons mener une analyse paramétrique avec quatre profondeurs de nappe différentes (H=5; 10; 15 et 20 m), ce qui permet d'une part de tenir compte des effets de l'eau sur la stabilité du talus, et d'autre part de savoir si le rabattement de la nappe pourrait être une solution de stabilisation. Cette analyse paramétrique est réalisée avec les différentes méthodes classiques pour les quatre profondeurs envisagées. Les différents résultats obtenus sont illustrés dans le graphique de la figure 5 ci-dessous.

D'après les résultats du graphique ci-dessous, nous remarquons que le facteur de sécurité diminue avec l'augmentation du niveau de la nappe, nous pouvons donc penser que l'eau a joué un rôle non négligeable dans le déclenchement de cette instabilité, d'autant plus que le déblai est constitué en son sommet d'un replat qui permet en cas de pluie de recueillir les eaux qui ne peuvent que s'infiltrer dans la masse en direction des couches les plus profondes. Ceci va faciliter l'affaiblissement des paramètres mécaniques et aussi l'apparition des pressions interstitielles agissant comme forces déstabilisatrices sur la zone en équilibre limite. Nous pensons donc que le rabattement de la nappe est une solution envisageable et recommandée pour la stabilité du talus petit D15.

2.3.5. Étude sismique de la stabilité du petit D15

L'analyse de stabilité sismique du versant a été effectuée par l'approche pseudo statique. Dans un premier temps nous allons calculer le facteur de sécurité sous l'effet du poids propre et du séisme, et par la suite nous allons analyser la réponse du talus à l'effet combiné à la fois du poids propre, du séisme et de l'eau. Le calcul du coefficient de sécurité pseudo-statique du versant repose sur les règles (RPS 2000, version 2011) qui permettent de définir les valeurs des coefficients pseudo-statiques horizontales et verticales à prendre en compte dans un calcul de stabilité.

2.3.5.1. Effet du poids propre et d'un séisme

Nous allons étudier le comportement sismique de notre talus afin de tenir compte du mécanisme des actions d'un séisme. Dans cette analyse de stabilité du talus sous sollicitation sismique, la méthode pseudo-statique avec le logiciel Slide est utilisée. Le tableau 5 ci-dessous regroupe les coefficients de sécurité (FS) calculés par cette méthode selon la variation des facteurs sismiques. Ces calculs ont été réalisés en supposant que les pressions d'eau sont nulles dans le talus.

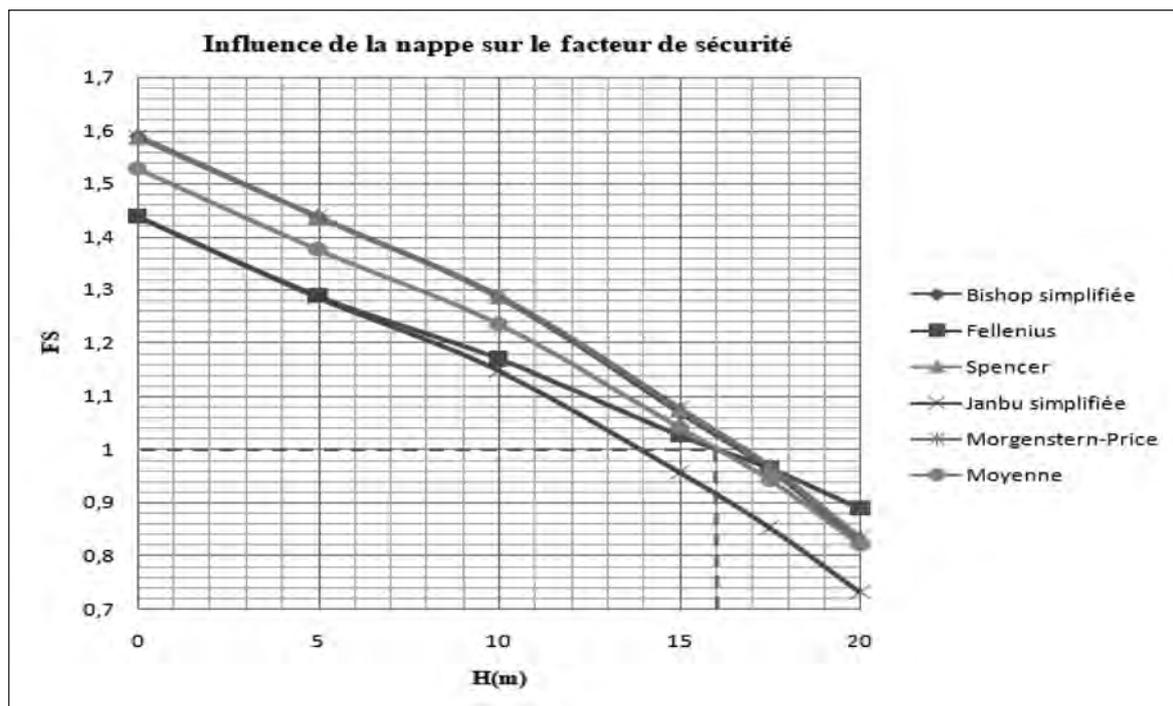


Figure 5 : Variation du FS par rapport au niveau de la nappe

Tableau 5 : Facteurs de sécurité en cas de séisme et sous l'effet du poids propre

Méthodes	Bishop simplifiée	Fellenius	Spencer	Janbu simplifiée	Morengstern-Price	Moyenne
PGA=0,06						
FS	1,406	1,343	1,402	1,328	1,401	1,376
PGA=0,12						
FS	1,258	1,201	1,255	1,187	1,257	1,231
PGA=0,18						
FS	1,137	1,083	1,136	1,071	1,14	1,113

Selon les résultats du tableau 5 ci-dessus, nous constatons que le facteur de sécurité est toujours supérieur à 1, par conséquent, le talus reste encore stable en cas du séisme. Nous pouvons donc penser que seule l'eau pourrait donner lieu à une déstabilisation du talus. Et c'est ce que nous allons prouver dans la section suivante.

2.3.5.2. Effet combiné du poids propre, d'un séisme, et de la nappe

La prise en compte des effets du séisme par la méthode pseudo-statique en présence des pressions interstitielles peut avoir un effet dramatique sur la stabilité du talus. Même relativement

faibles, les coefficients sismiques K_H et K_V peuvent engendrer des modifications de condition d'équilibre géotechnique et abaisser considérablement le facteur de sécurité. Le logiciel Slide offre la possibilité de prendre en compte l'effet des coefficients sismiques pour déterminer le facteur de sécurité.

Dans cette partie, nous avons considéré les effets combinés des profondeurs des nappes envisagées ($H=5m$, $H=10m$, $H=15m$ et $H=17.5m$) et des coefficients sismiques K_H (0 à 0.162) dans le modèle pseudo-statique par équilibre limite dans le logiciel Slide. Les résultats de ces analyses sont donnés dans le tableau 6 et la figure 6 représente graphiquement la tendance observée dans ce tableau.

Tableau 6 : Variation du FS en fonction de H et PGA

PGA	K_H	FS				
		H=0m	H=5m	H=10 m	H=15m	H=17,5m
0	0	1,5278	1,3766	1,2352	1,0404	0,9428
0,06	0,054	1,346	1,2138	1,0908	0,9194	0,833
0,12	0,108	1,201	1,0852	0,9766	0,8234	0,7448
0,18	0,162	1,084	0,9796	0,8846	0,7464	0,6742

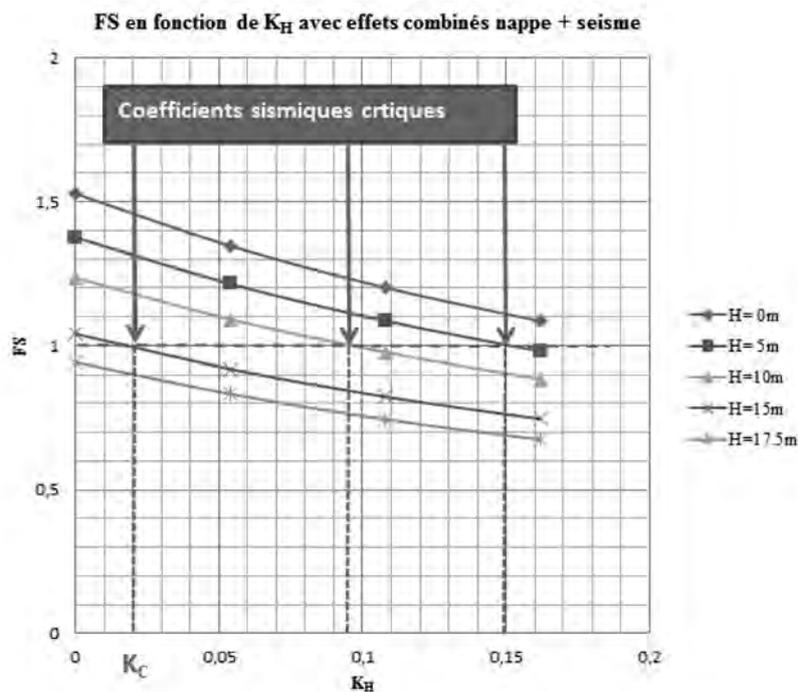


Figure 6 : Facteur de sécurité en fonction du paramètre sismique KH et variation de la nappe

Nous constatons que le coefficient sismique critique K_c (figure 6) change selon les cas considérés. Il passe de $K_c=0.15$ (Séisme + nappe avec $H=5m$) à $K_c=0.095$ (Séisme + nappe avec $H=10m$) et ensuite à $K_c=0.02$ (Séisme avec $H=15 m$). Les coefficients sismiques supérieurs à ces valeurs critiques présentent un facteur de sécurité inférieur à 1. Dans le cas des effets combinés de séisme plus la nappe avec $H=17.5 m$, tous les facteurs de sécurité sont inférieurs à 1, en dessous de la ligne critique. Ces observations montrent que les effets combinés de nappe et de séisme peuvent affecter considérablement le facteur de sécurité. Elles révèlent en fonction des cas examinés (nappe avec $H=17.5$ et nappe avec $H=15m$ – cas les plus probables sur notre site), que la stabilité du talus (petit d15) peut ne pas être assurée pour un séisme non perceptible par l'homme ou faible ($K_H=0$ à 0.02).

2.3.6. Causes probables de glissement

Sous l'effet du chargement gravitaire seul, la valeur du facteur de sécurité obtenue est égale à $F=1,558$. Nous pouvons alors penser que le versant est stable. Toutefois, sa rupture a déjà eu lieu. Pour la justifier, nous allons donc examiner, pour différentes accélérations sismiques plausibles comprises entre $PGA=0$ (sans séisme) et $PGA=0,18g$ (caractéristique sismique du site), les effets réels d'une chute de résistance des sols et d'une variation éventuelle du niveau de la nappe.

2.3.6.1. Effets d'une chute de résistance du sol

Une analyse de sensibilité est menée afin de déterminer l'influence de la variation des paramètres mécaniques (angle de friction et la cohésion) sur la stabilité du petit D15 et à quelles valeurs de ces paramètres, la pente est en état limite de stabilité ($FS > 1$). En effet et comme illustré dans les figures 7 et 8 respectivement, la variation de la cohésion d'une valeur de plus ou moins 25 %, fait varier le facteur de sécurité (FS) d'une valeur de 4 à 5 % et la variation de l'angle de frottement interne effectif d'une valeur de plus ou moins 25 %, fait varier le facteur de sécurité d'une valeur de 20 à 21%. Par conséquent l'influence de la variation de l'angle de frottement sur la stabilité du talus petit D15 est plus importante que celle de la variation de la cohésion.

Nous remarquons également qu'un angle de frottement de 17° équivaut à un FS à l'unité pour un $PGA=0$, et au fur et à mesure que PGA augmente, la stabilité du talus nécessite un angle de frottement plus grand : pour un $PGA = 0.12g$ il faut un angle de frottement de 23° pour que le talus reste stable. Et pour un $PGA=0.18g$ le talus est stable pour un angle de frottement de 26° . En revanche l'influence de la variation de la cohésion reste limitée, en effet, le versant reste stable, même pour une valeur maximale de l'accélération maximale du séisme caractérisant le site.

Variation du FS selon la variation de la cohésion

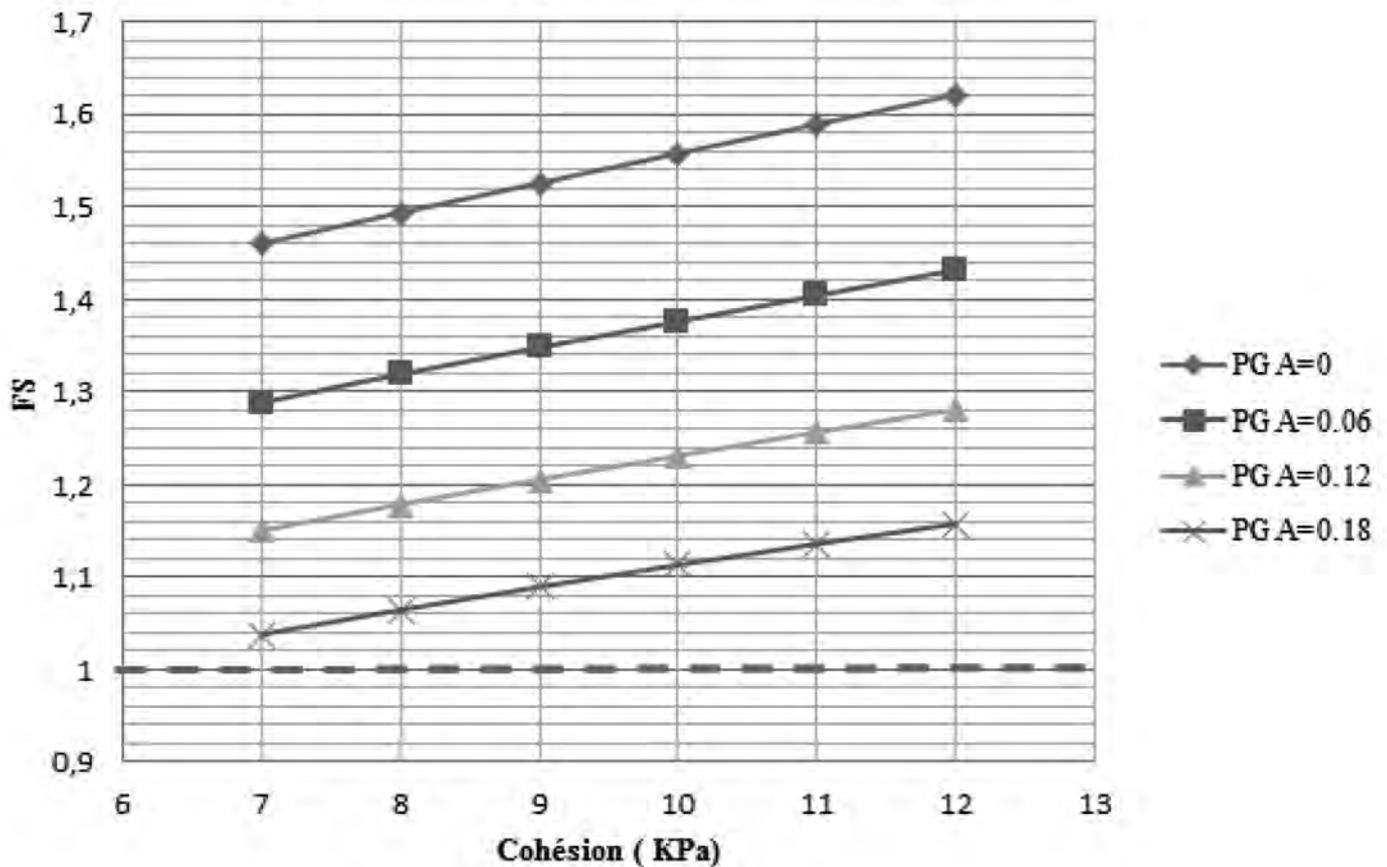


Figure 7 : Influence de la cohésion sur FS

Variation du facteur de securite en fonctionde l'angle de frottement

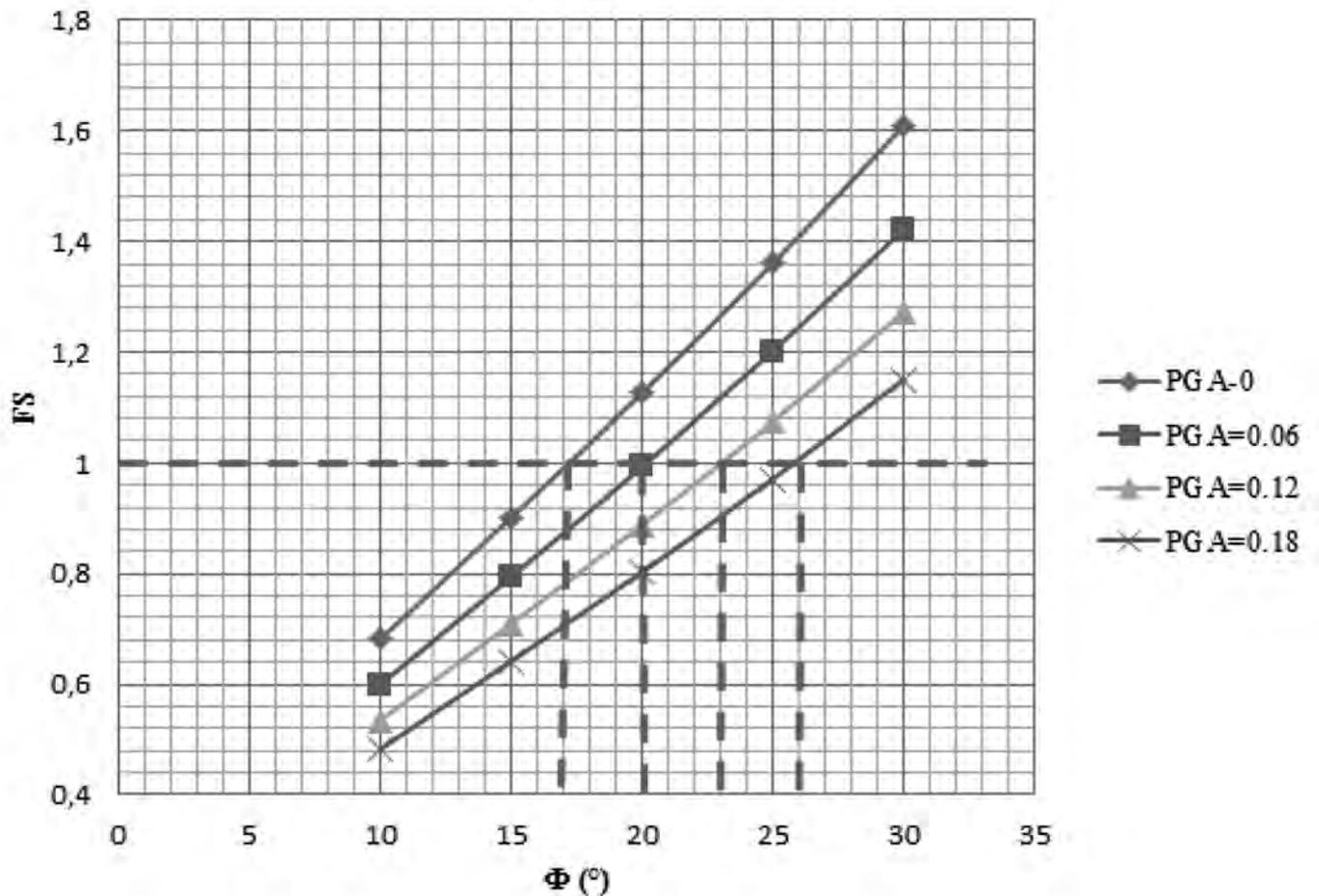


Figure 8 : Influence de l'angle de frottement sur FS

2.3.6.2. Effets d'éventuelles surpressions interstitielles

En raison des variations saisonnières dues à des phénomènes superficiels d'évapotranspiration et à un drainage par infiltration vers le contrebas du talus, des calculs ont été effectués dans l'hypothèse de fluctuations de la nappe entre l'état sec ($H=0$) et l'état saturé ($H=20$ m). A sec, le versant est stable même en cas de séisme. En présence de nappes, il devient instable et s'effondre sous l'action d'une faible secousse sismique ($PGA=0.06$ g) lorsque le niveau de l'eau atteint presque 13m de hauteur. Pour $PGA= 0.18g$, le talus s'écroule dès que le niveau de la nappe atteint 4 m environs (figure 9).

2.4. Analyse avec la méthode des différences finies

Les limitations de la méthode d'analyse des équilibres limites ne permettent pas d'expliquer complètement le phénomène et il a été jugé nécessaire d'approfondir l'étude des différentes

causes potentielles de l'instabilité. Dans ce qui suit, différents scénarios ont été analysés à l'aide du modèle FLAC de façon à mieux comprendre les mécanismes de ruptures.

2.4.1. Présentation du modèle FLAC

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group Inc., 1995) est un logiciel de modélisation mécanique de problèmes géotechniques qui utilise la méthode des différences finies.

La méthode des différences finies exploitée par le logiciel FLAC traite le problème comme un milieu continu, dont les caractéristiques mécaniques sont une moyenne établie sur un élément du maillage. Elle permet aussi d'introduire, en nombre limité, des discontinuités, mais la réponse globale du massif est cependant dominée par la déformation de la roche.

L'avantage de l'approche par milieu continu est qu'elle permet de simplifier considérablement la description géométrique du milieu, ce qui facilite la mise en œuvre informatique du modèle (petit nombre de nœuds, automatisation du maillage, convergence

Influence de la nappe sur le facteur de sécurité

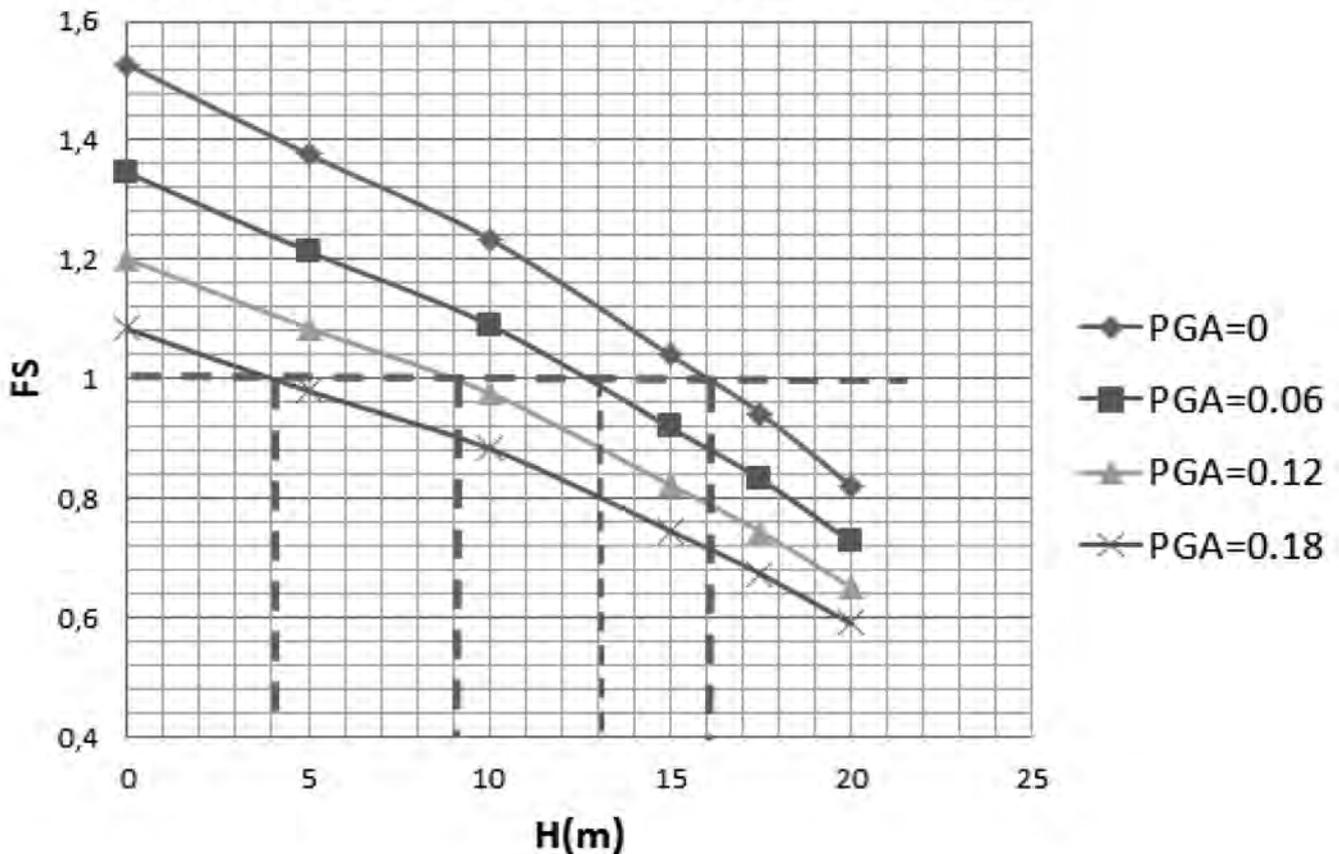


Figure 9 : Influence des fluctuations de la nappe sur le facteur de sécurité

rapide). La difficulté est de déterminer son domaine d'application, en particulier le taux de fracturation à partir duquel on peut admettre que le comportement d'un massif rocheux est assimilable à celui d'un milieu continu.

2.4.2. Étude de stabilité de petit D15 en condition statique et dynamique par le code de calcul FLAC 2D

Un modèle pratiquement identique à celui créé par la méthode d'équilibre limite est généré dans le logiciel FLAC qui utilise la méthode des différences finies. Les facteurs de sécurité et les déplacements pour différents scénarios (cas sec, humide, avec ou sans ancrages) sont à nouveau calculés.

2.4.2.1. Stabilité statique du petit D15

2.4.2.1.1. Condition sèche

L'analyse de la stabilité statique du versant (petit D15) en conditions sèches avec le logiciel FLAC 2D, conduit à une valeur de coefficient de sécurité minimum de 1.64 (figure 10). Cette valeur qui est presque la même que celle calculée avec la méthode d'équilibre limite (1.56) indique que la pente est stable. Nous remarquons également une concentration des contraintes maximales enregistrées le long de la surface de rupture circulaire.

Le calcul des déformations constitue le facteur le plus important pour évaluer le niveau de sécurité de n'importe quelle structure, notamment celle des versants rocheux. Les mesures des déformations avec le logiciel FLAC version 08 basée sur la méthode des différences finies, fournissent l'information sur les effets des perturbations entre les différents blocs constituant le talus du petit D15.

Les résultats montrent que les déplacements horizontaux maximaux sont enregistrés dans la partie centrale et superficielle du versant instable. Ils sont faibles et de l'ordre de 16 cm (figure 11 A). Dans la partie centrale profonde du versant est, les déplacements horizontaux maximums montrent une intensité très faible d'environ 4 cm, mais affectent une plus grande zone. L'observation des déplacements verticaux du modèle montre que ces derniers sont enregistrés dans la tête du talus avec une valeur de 19 cm (figure 11 B). Ces déplacements sont jugés très petits, d'où nous pouvons conclure que le comportement du versant petit D15 vis-à-vis déplacement est acceptable.

2.4.2.1.2. Condition humide

Pour prendre en compte l'effet de l'eau dans les analyses de stabilité du petit D15, nous utilisons souvent le niveau de la nappe phréatique critique (le plus élevé durant l'année). Pour cela, nous considérons un cas de saturation totale avec un écoulement d'eau en surface.

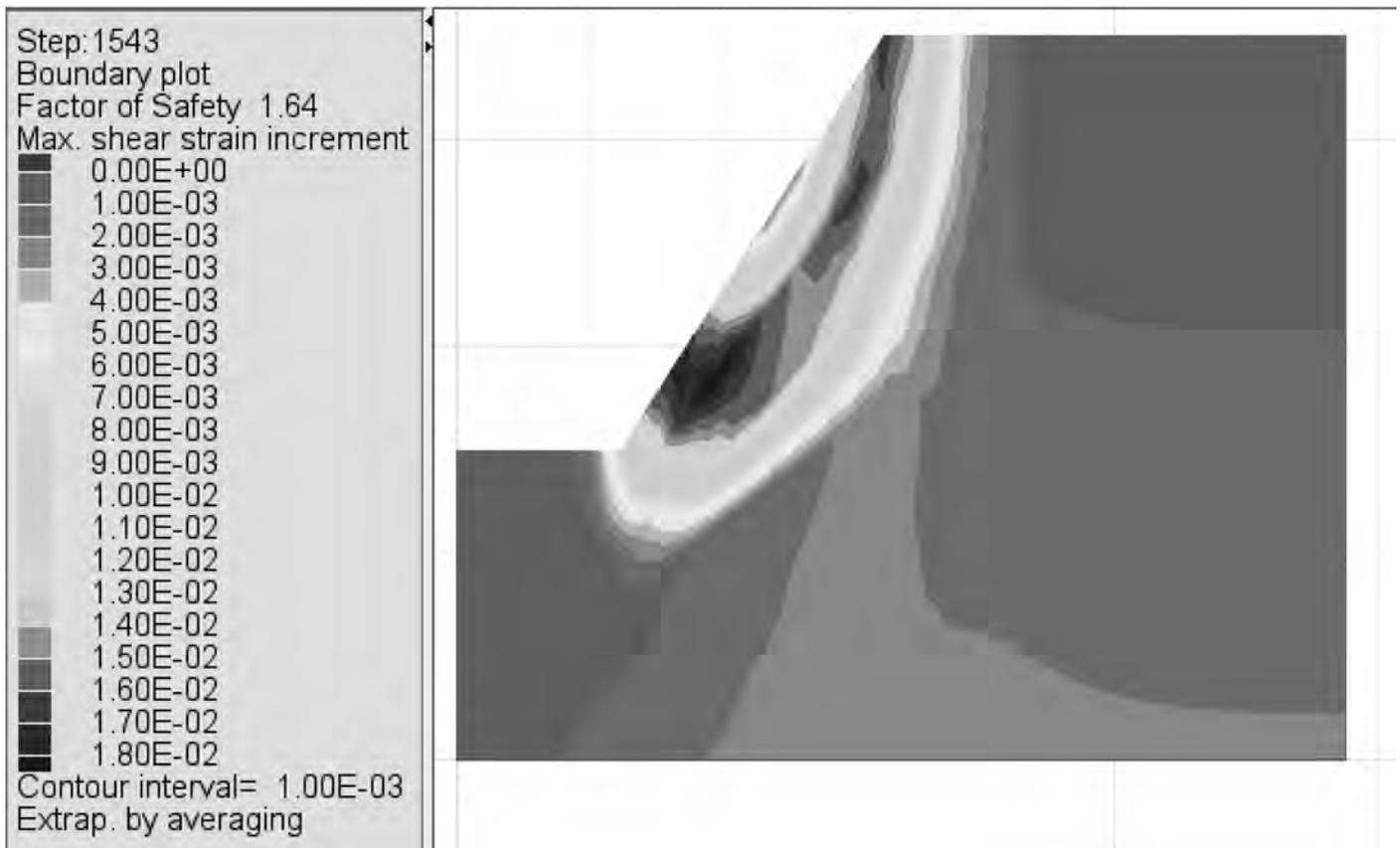


Figure 10 : Surface critique obtenue de l'étude de petit D15 lors de l'analyse statique

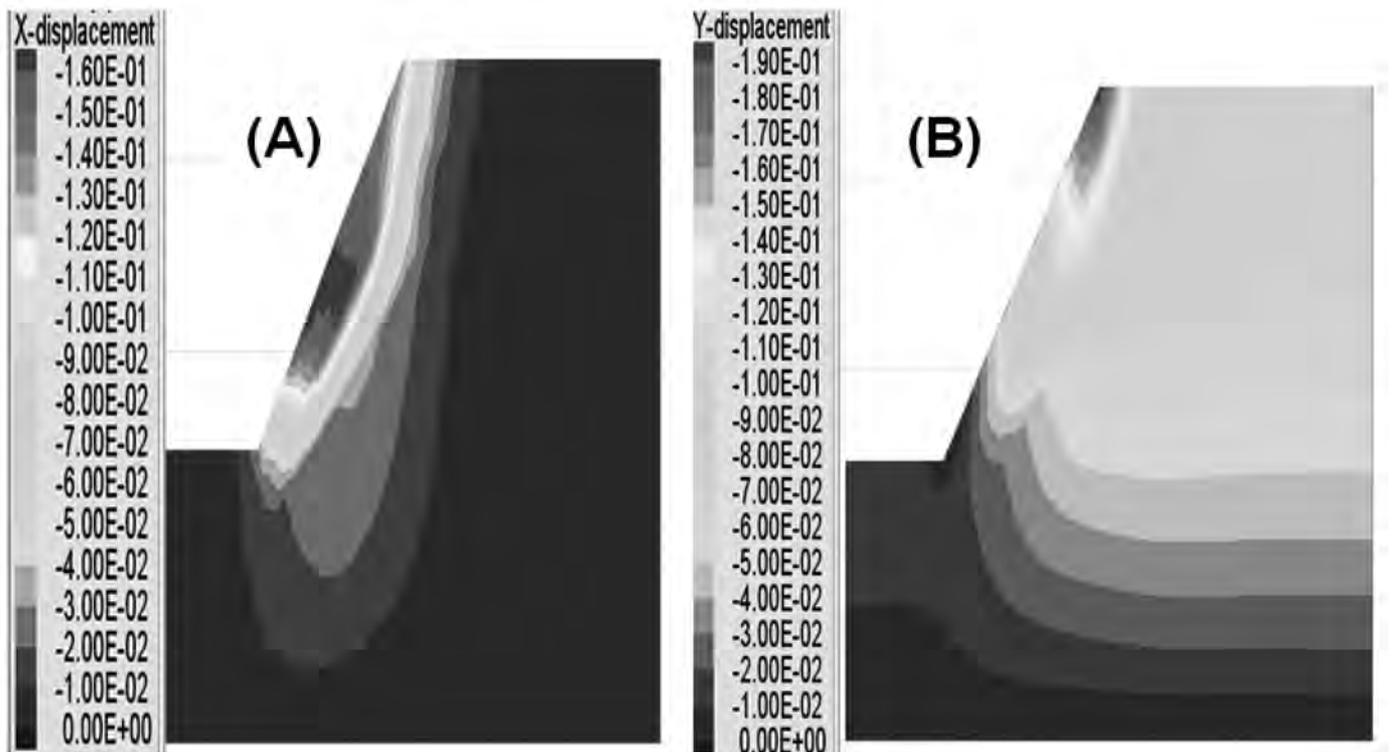


Figure 11 : Répartition des déplacements horizontaux (A) et verticaux (B) du modèle sous sollicitation statique

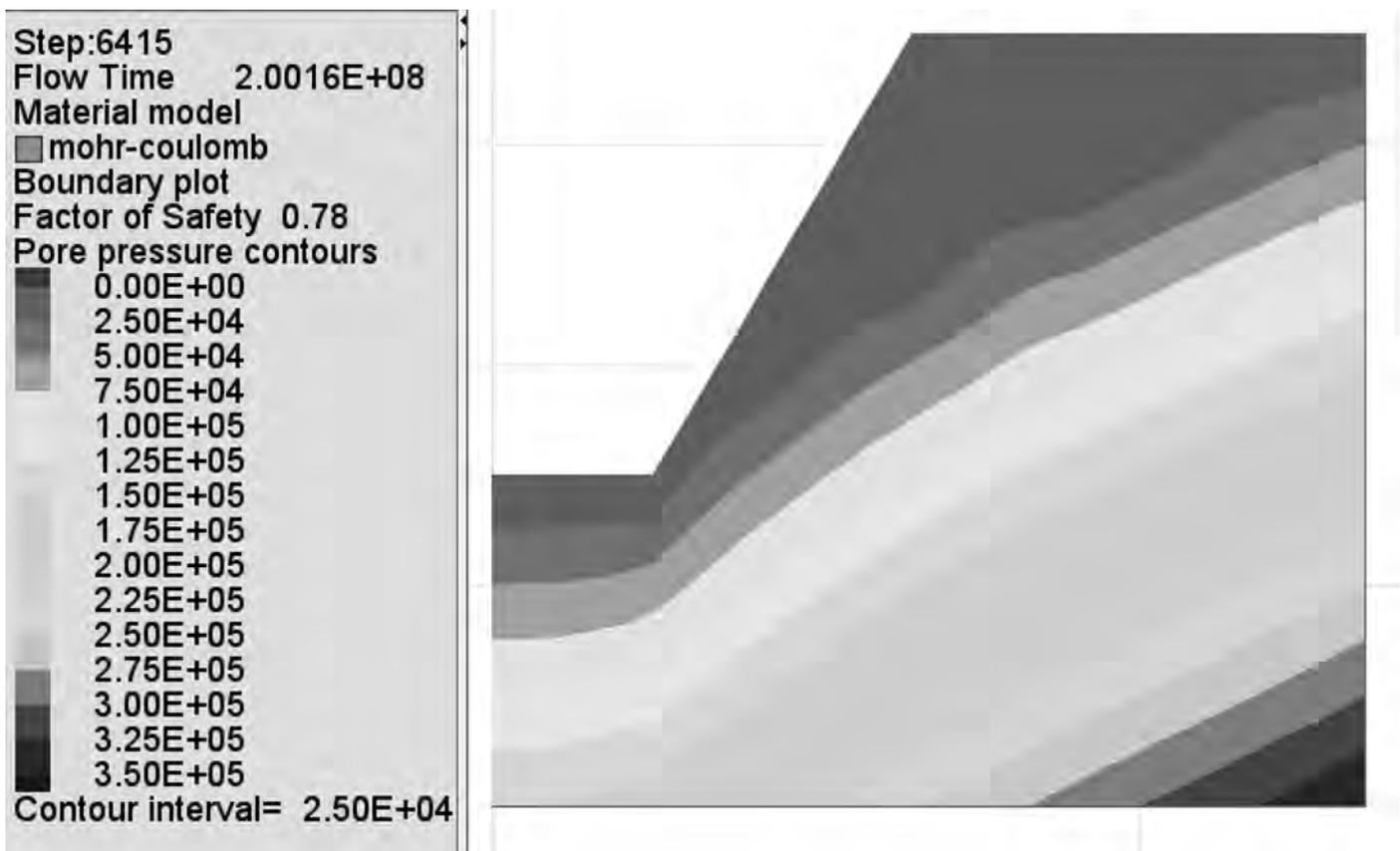


Figure 12 : Pressions interstitielles obtenues en fixant la nappe phréatique

Comme illustré dans la figure 12 ci-dessus, la valeur du coefficient de sécurité trouvé en conditions hydrauliques considérées (FS=0.78) indique que le talus est instable. Cette analyse vient de démontrer l'effet déstabilisateur provoqué par la nappe phréatique et approuve également les résultats trouvés en utilisant la méthode d'équilibre

limite. Le déplacement horizontal maximal enregistré a une valeur de 42.5 cm (figure 13 C), ce qui correspond à un accroissement de près de 165 %. Nous remarquons également une augmentation dans le déplacement vertical maximal (figure 13 D) d'une valeur de 97 % par rapport au cas du talus sans nappe d'eau.

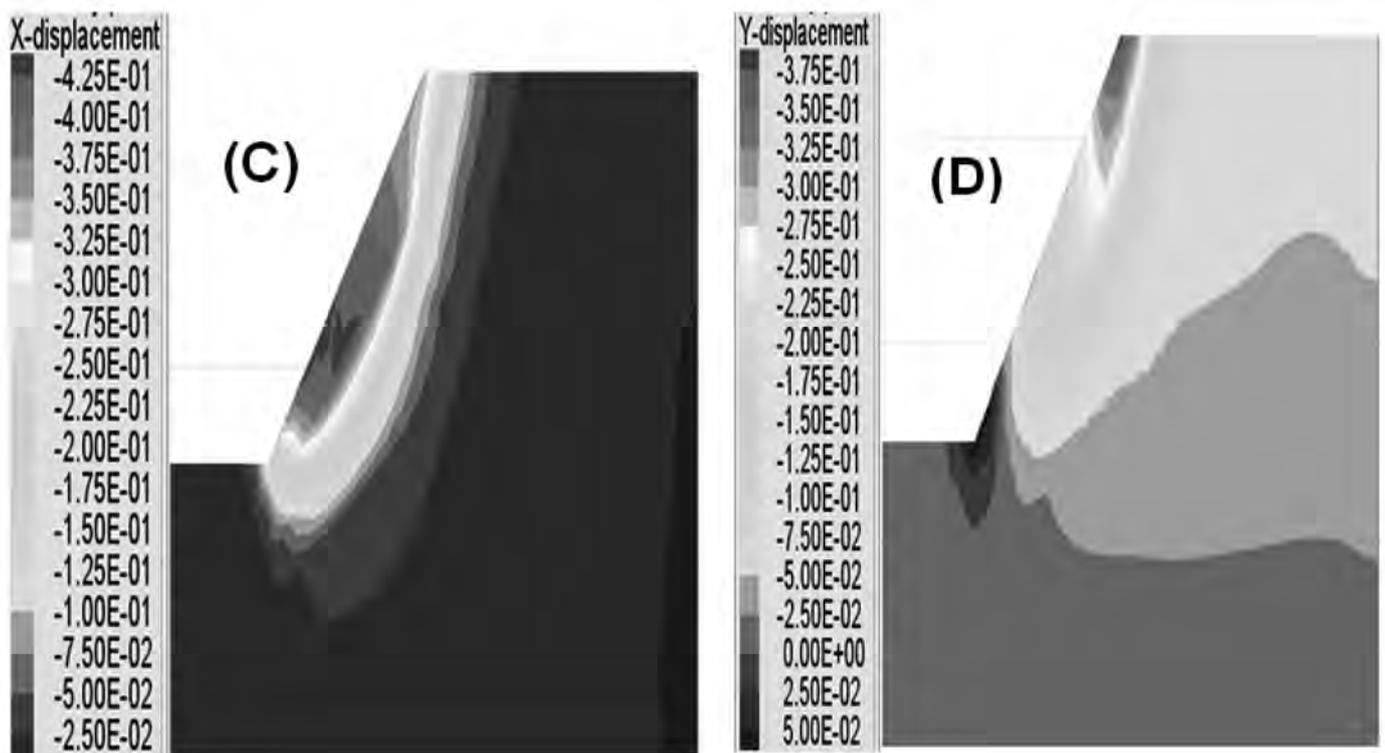


Figure 13 : Répartition des déplacements horizontaux (C) et verticaux (D) du modèle sous sollicitation statique avec présence d'eau

2.4.2.2. Stabilité dynamique du petit D15

Pour prendre en compte l'effet du séisme sur la stabilité du petit D15, une sollicitation dynamique est appliquée au modèle. À l'instar de ce que préconise Itasca pour les conditions aux limites dynamiques, un signal sismique est introduit sous forme d'une contrainte de cisaillement sinusoïdale (ou bien sous forme d'excitation en vitesse) sur toute la longueur de la base du modèle. Afin de simuler l'amortissement naturel de l'amplitude des

oscillations sous l'effet du frottement interne, un facteur d'amortissement de type Rayleigh, indépendant de la fréquence, est imposé de manière homogène à l'ensemble du modèle. Les propriétés de l'onde simulée se situent dans les gammes des paramètres correspondant au site d'étude et qui sont généralement indiquées dans la carte sismique marocaine conformément au règlement parasismique marocain (RPS 2000, version 2011). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessous.

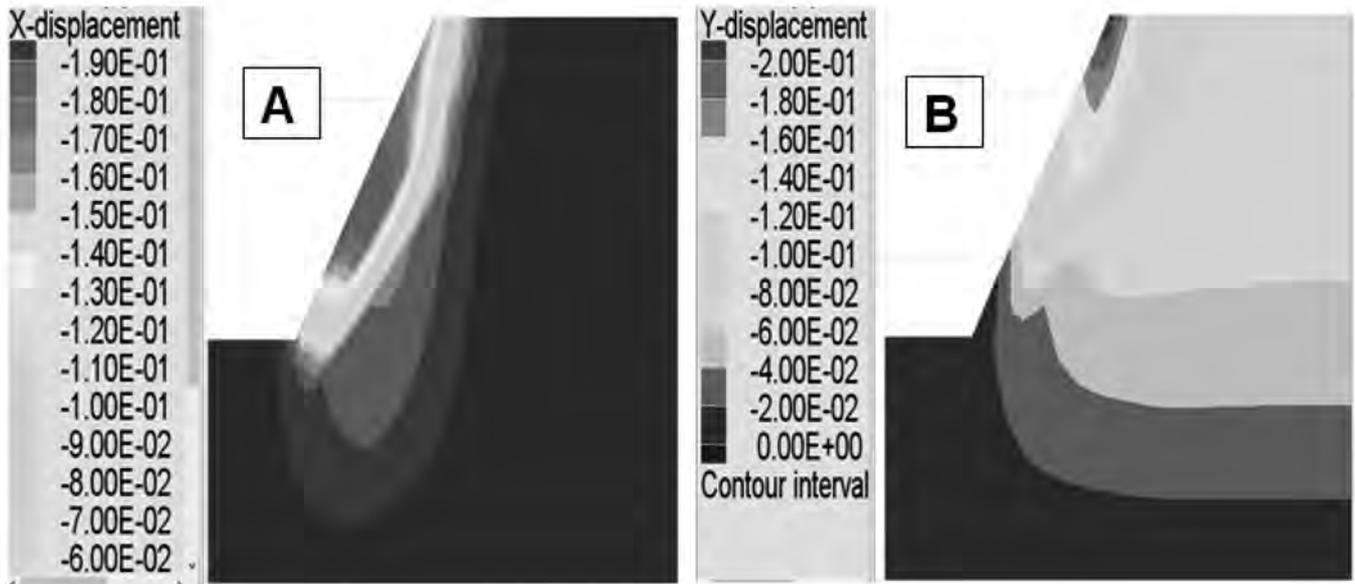


Figure 14 : Répartition des déplacements horizontaux (A) et verticaux (B) du modèle sous sollicitation dynamique (sans nappe d'eau)

Nous remarquons que les déplacements horizontaux de la partie centrale et superficielle du versant sont affectés de manière faible par l'onde de cisaillement, avec une valeur maximale de l'ordre de 19 cm (figure 14 A). Dans la partie centrale profonde du versant est, les déplacements horizontaux maximums montrent toujours une intensité d'environ 5 cm, mais affectent une plus grande zone. L'observation des déplacements verticaux du modèle montre que le versant est toujours stable. Le déplacement vertical maximal calculé est presque identique à celui enregistré dans le cas statique avec une valeur de presque 20cm (figure 14 B), Ceci correspond à un accroissement de près de 5 %, qui est relativement très faible. Ces déplacements faibles enregistrés sont loin d'être à l'origine de l'instabilité du petit D15. Nous pouvons donc conclure que l'action de secousses sismiques n'a pas eu vraiment beaucoup d'influences sur la stabilité du petit D15. Ceci coïncide avec les résultats obtenus avec la méthode d'équilibre limite d'où nous pouvons conclure que les conditions hydrauliques défavorables sont à la base du déclenchement de la rupture du petit D15.

2.4.2.3. Confortements utilisés pour assurer la stabilité du petit D15

Pour donner suite aux études de stabilité effectuées sur le versant petit D15 et qui ont montré que ce dernier est instable en présence de la nappe phréatique, le recours à une méthode de

confortement adéquate et sécuritaire est indispensable afin de garantir sa stabilité à long terme. Pour cela la solution de stabilisation par clouage s'est avérée comme la plus judicieuse. Le but est de déterminer un schéma de renforcement optimum garantissant un facteur de sécurité satisfaisant (≥ 1) et des coûts matériels minimisés.

2.4.2.3.1. Étapes de stabilisation de petit D15

2.4.2.3.1.1. Étape 1 : Mettre une risberme de 5m de largeur à mi-hauteur du talus

Après la mise en place d'une risberme de 5 m de largeur à mi-hauteur du talus, nous avons calculé le facteur de sécurité et les déplacements horizontaux et verticaux en état statique, premièrement sans présence d'eau et par la suite avec une nappe phréatique en surface.

En ce qui concerne le premier cas (cas sec) et comme illustré dans la figure 15 ci-dessous, la valeur du coefficient de sécurité obtenue est 1.74 avec une augmentation de presque 6% par rapport au cas du talus sans risberme. Le déplacement horizontal maximal enregistre une valeur de 27.5 cm (figure 16 G), ce qui correspond à un accroissement de près de 72 %. Nous constatons également une augmentation dans le déplacement vertical maximal (figure 16 H) d'une valeur de 58 % par rapport au cas du talus sans risberme.

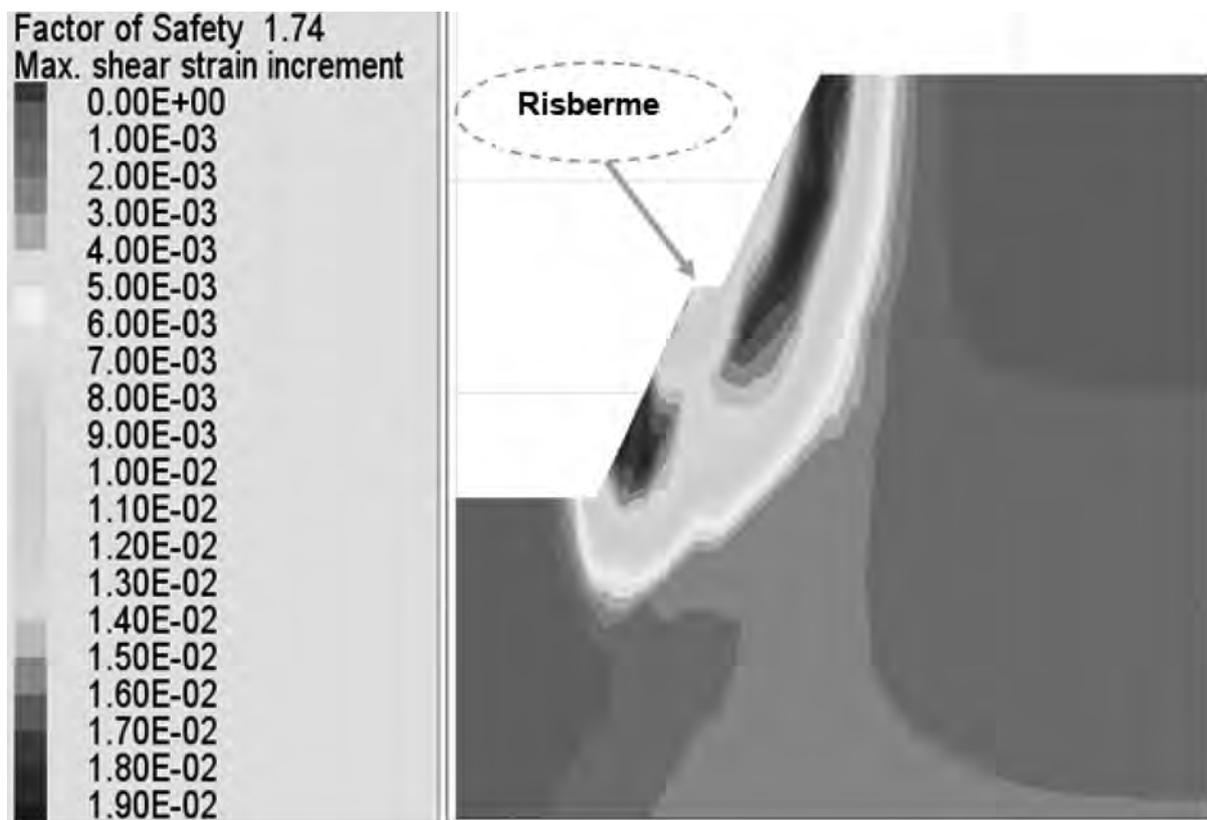


Figure 15 : Facteur de sécurité en état statique (sans eau)

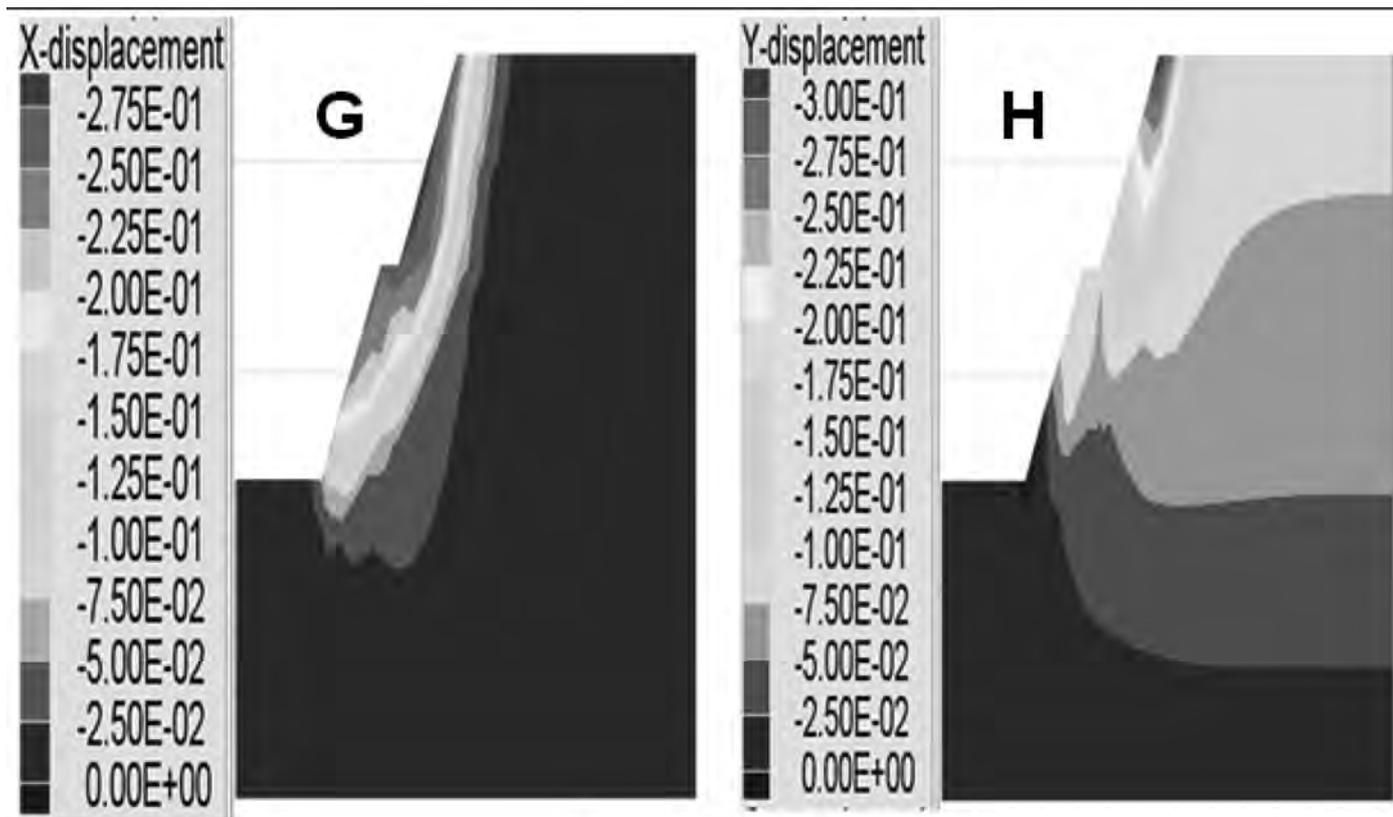


Figure 16 : Répartition des déplacements horizontaux (G) et verticaux (H)

Cependant pour le deuxième cas (cas avec une nappe en surface), nous remarquons que le facteur de sécurité est presque le même, avec une valeur de 0.77 (figure 17). Les déplacements

horizontaux (figure 18 K) et verticaux (figure 18 L) quant à eux ont connu une légère augmentation d'environ 7 % par rapport au cas d'un talus sans risberme.

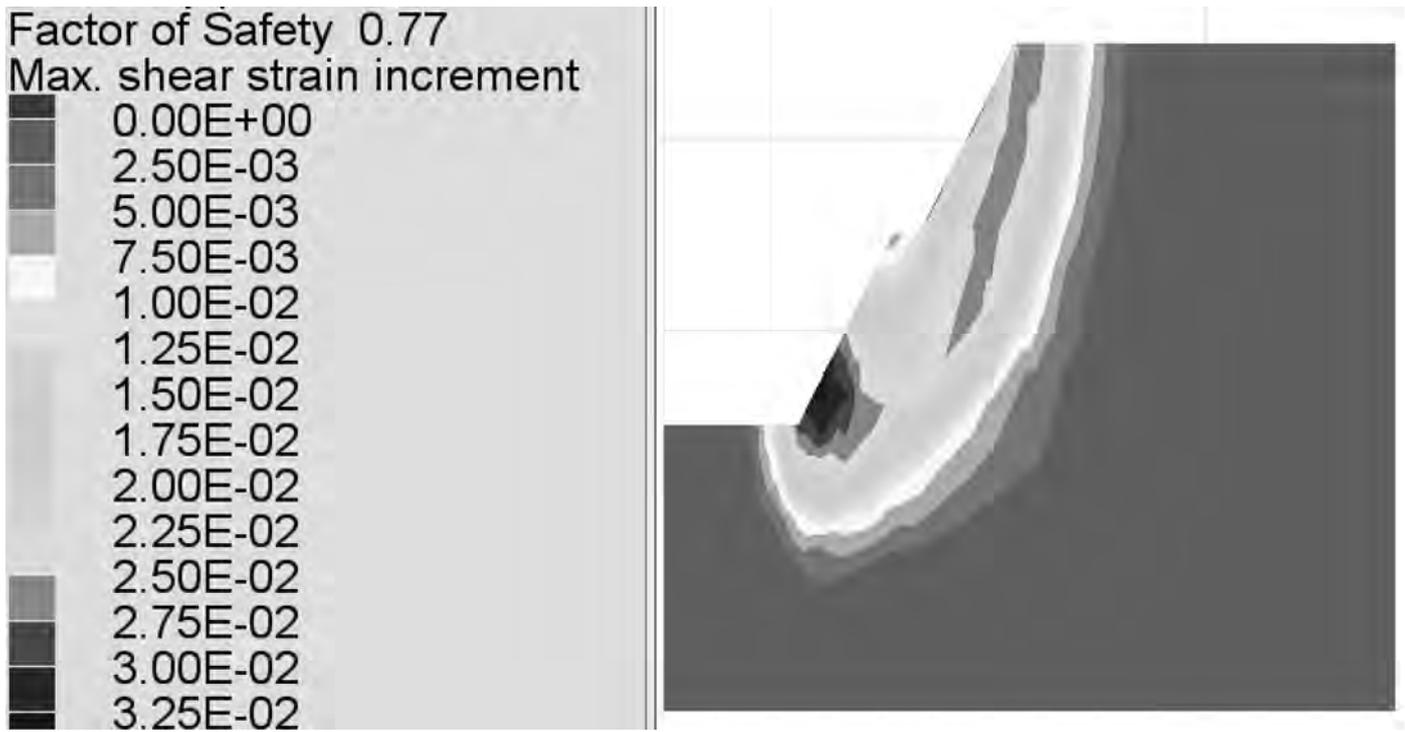


Figure 17 : Facteur de sécurité en état statique (avec eau)

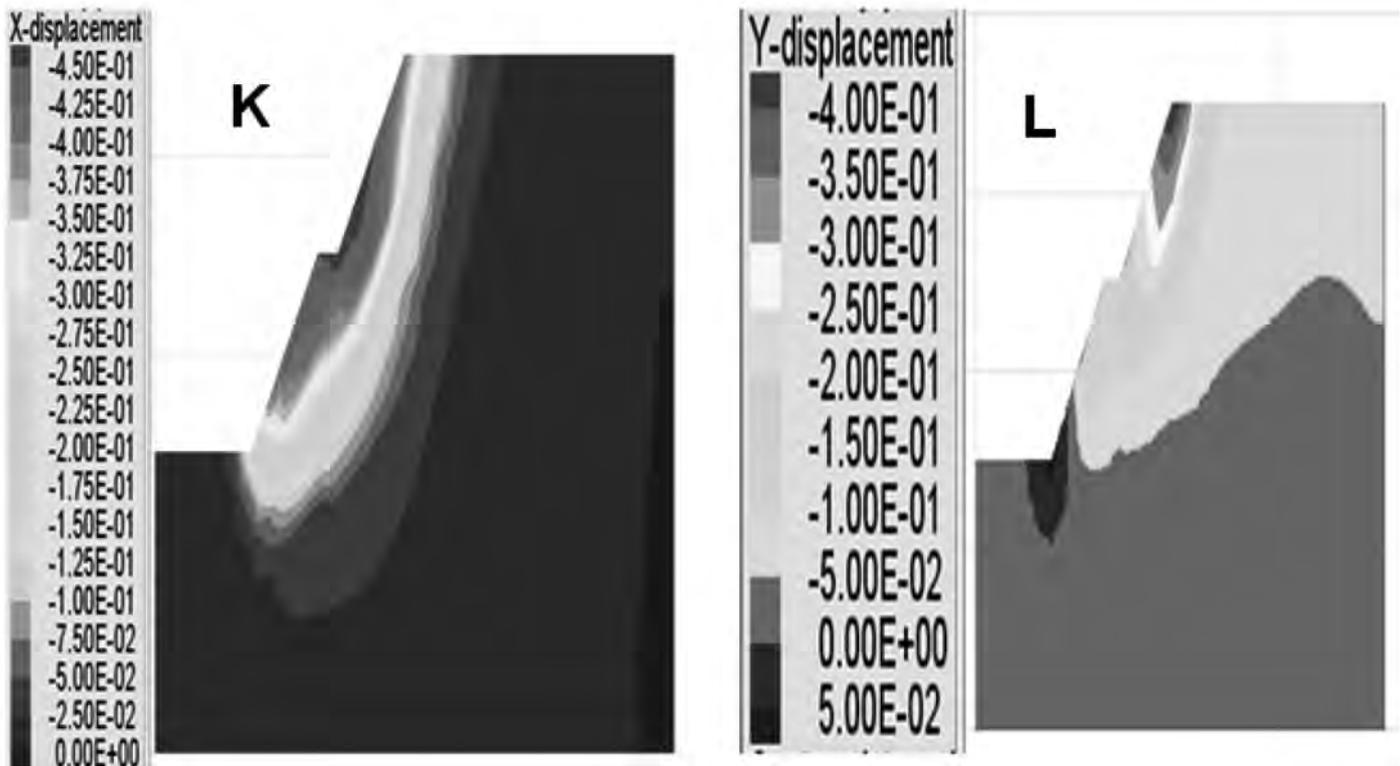


Figure 18 : Répartition des déplacements horizontaux (K) et verticaux (L) (avec eau)

De ce qui précède, nous pouvons conclure que la mise en place d'une risberme d'une largeur 5m à mi-hauteur du talus a permis d'améliorer la stabilité du talus en cas sec. Par contre en cas d'une nappe phréatique en surface, l'influence de cette

technique reste très modeste d'où la nécessité de penser à une autre technique de stabilisation. C'est l'objet de la deuxième étape qui consiste à clouer la surface amont de notre talus en plus de la mise en place d'une risberme (figure 19).

2.4.2.3.1.2. Étape 2 : clouage du petit D15

Le schéma de renforcement adopté pour le confortement du petit D15, qui est illustré dans la figure 19 ci-dessous est assuré par 8 rangs de clous de longueur de 14m. Ces clous

sont disposés selon une maille rectangulaire, avec un espacement vertical de 2m et un espacement horizontal de 2m. Les barres sont inclinées par rapport à l'horizontale d'un angle 15°.

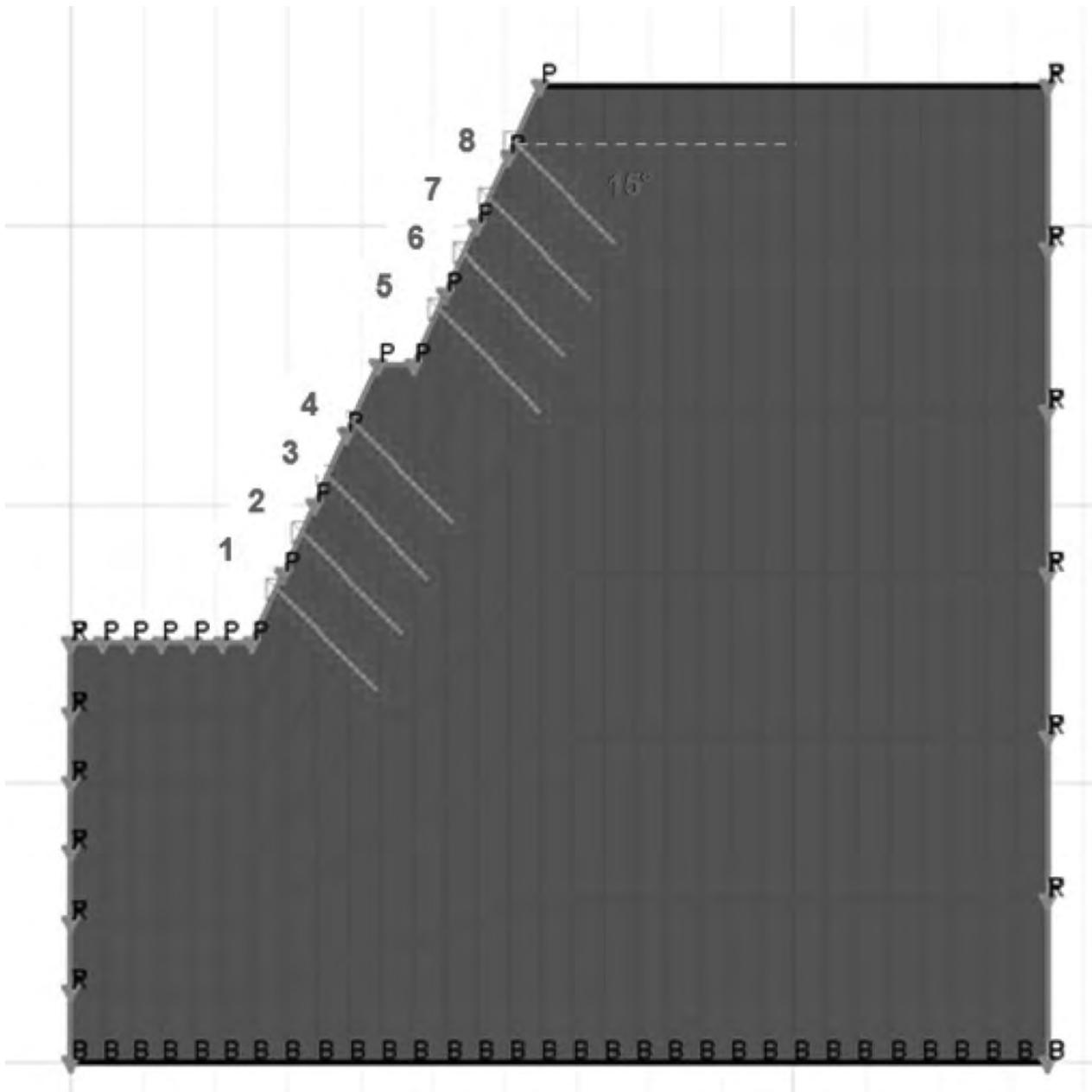


Figure 19 : Schéma de renforcement du petit D15

Les caractéristiques retenues des clous (représentés par les éléments-barres) et des parois constituées de béton projeté et de

treillis d'armature (représentées par des éléments poutre) sont données dans le tableau 7 ci-dessous :

Tableau 7 : Caractéristiques des clous

Paramètre	Valeur
Module d'Young (Pa)	$1e^{11}$
Aire (m ²)	$3e^{-3}$
Bond stiffnes (N/m ²)	$1.7e^{10}$
Bond strength (N/m)	$8e^5$
Tensile (N)	$1e^{10}$

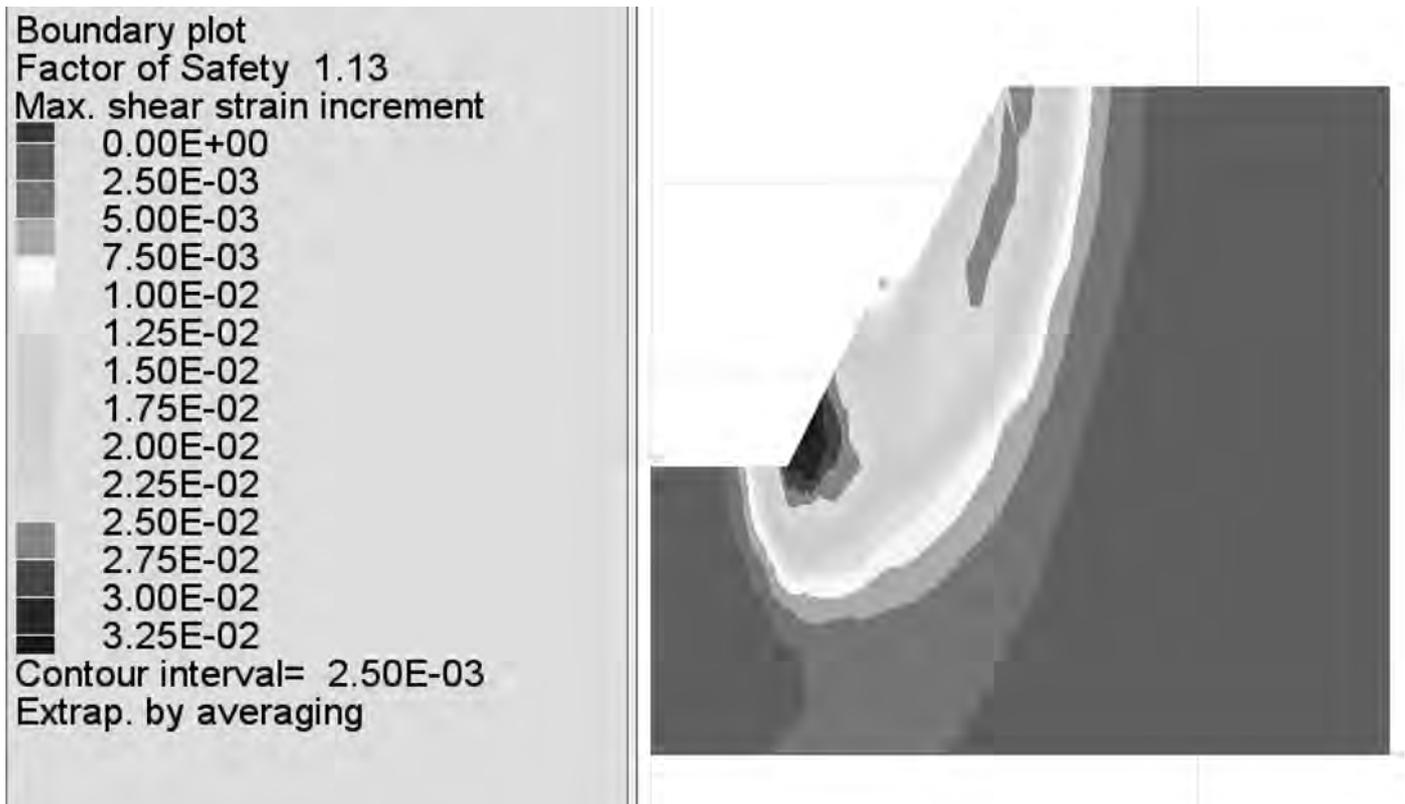


Figure 20 : Facteur de sécurité pour le petit D15 cloué avec une nappe en surface

Nous pouvons remarquer selon la figure 20 ci-dessus que le facteur de sécurité (FS=1.13) pour le petit D15 après le renforcement par les clous est considérablement amélioré avec une augmentation de presque 47 % par rapport au cas où le talus n'est pas cloué (FS=0.77). Ainsi, les barres de renforcement (1 et 2) situées dans la partie inférieure du talus et les barres 5,

6, 7 et 8 situées plus proche de la crête du talus sont celles qui contribuent plus à sa stabilité (figure 21). C'est le long de ces barres que se développent les plus forts efforts de traction, par contre l'ancrage le plus proche de la riserme (barres 3 et 4) est quant à lui peu sollicité.

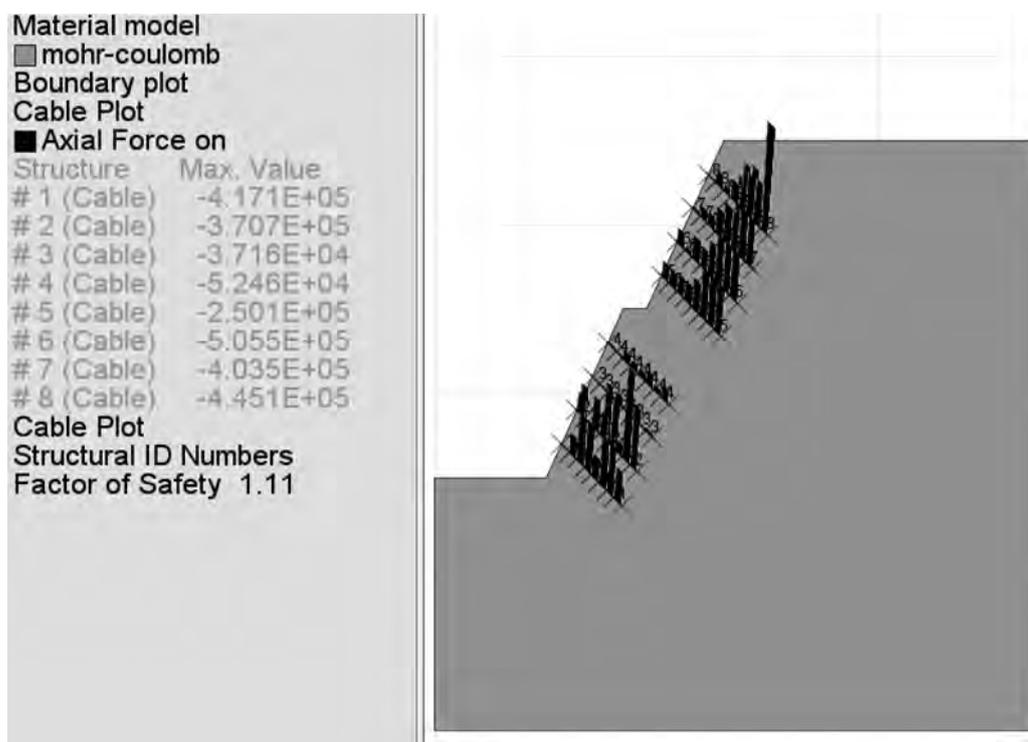


Figure 21 : Distribution des charges axiales le long des éléments de renforcement

2.4.3. Sensibilité par rapport à l'angle de frottement

Dans cette section, nous avons étudié l'influence de l'angle de frottement (Φ) sur le déplacement des blocs (formant le talus), et nous allons essayer de trouver à partir de quel angle de frottement Φ_c (angle de frottement critique) ; nous pouvons avoir un glissement des blocs. Pour cela nous avons fait varier l'angle de frottement en partant de 35° et en diminuant jusqu'à la valeur 15° ; et en cherchant la valeur de déplacement en cisaillement maximal qui correspond à chaque valeur de Φ . Le tableau 8 suivant englobe les valeurs obtenues par le logiciel FLAC et le graphique de la figure 22 ci-dessous montre l'allure du graphique

(déplacement des blocs versus l'angle de frottement). Selon ce dernier nous pouvons remarquer que le glissement aura lieu dès que l'angle de frottement est inférieur à 16° . Et c'est pratiquement les mêmes résultats obtenus lorsque nous avons étudié la variation du facteur de sécurité en fonction de l'angle de frottement (figure 23).

3. CONCLUSION

Après cette analyse de stabilité effectuée sur le versant petit D15 nous pouvons penser que la rupture provienne d'une modification

Tableau 8 : Déplacement des blocs en fonction de Φ

Φ°	15	16	17	18	19	20	22	24	25	30	35
Shir disp max (cm)	15.57	9.807	9.082	8.573	8.168	8.15	8.15	8.15	8.149	8.149	8.148

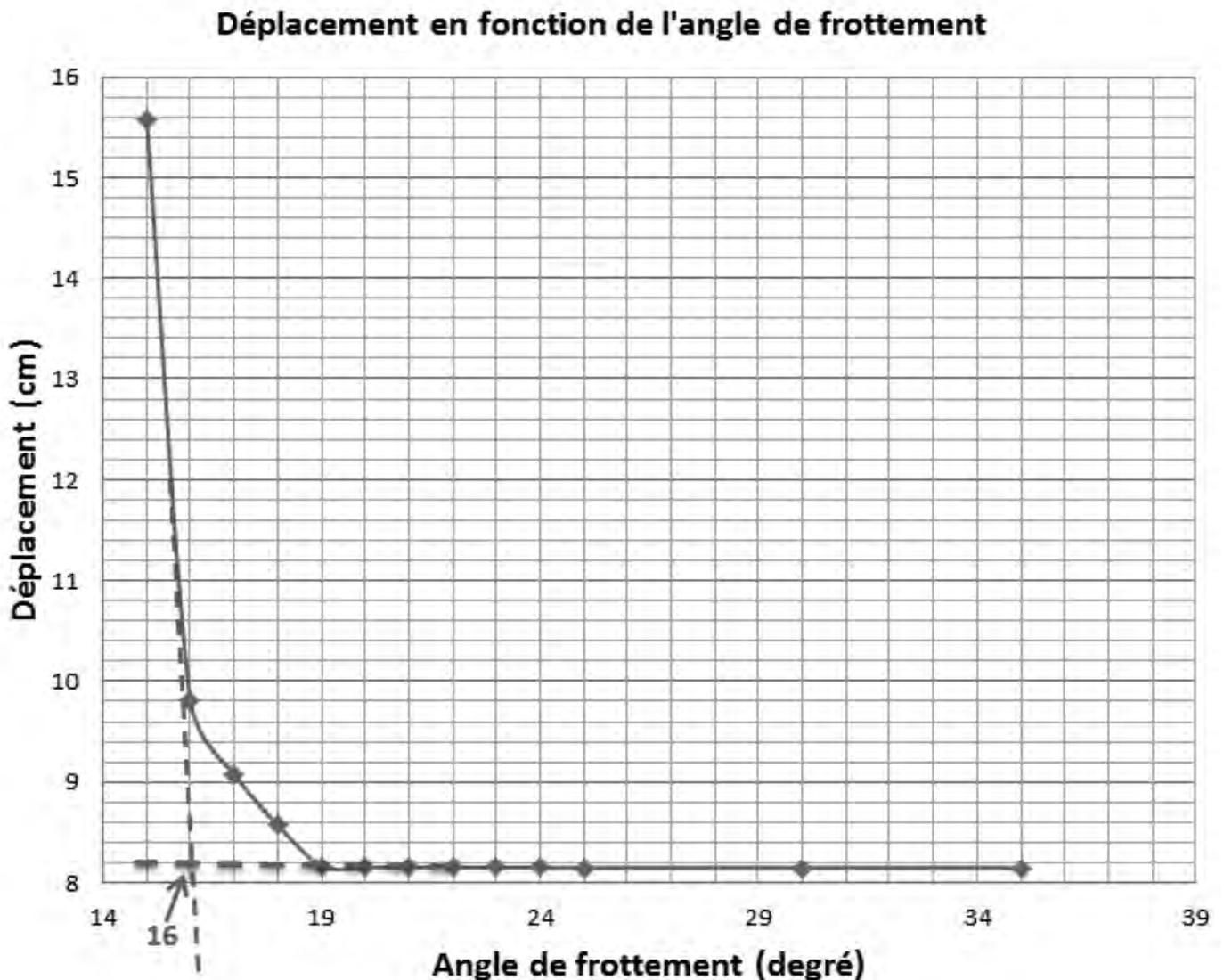


Figure 22 : Influence de Φ sur le déplacement des blocs

Variation du facteur de sécurité en fonction de l'angle de frottement

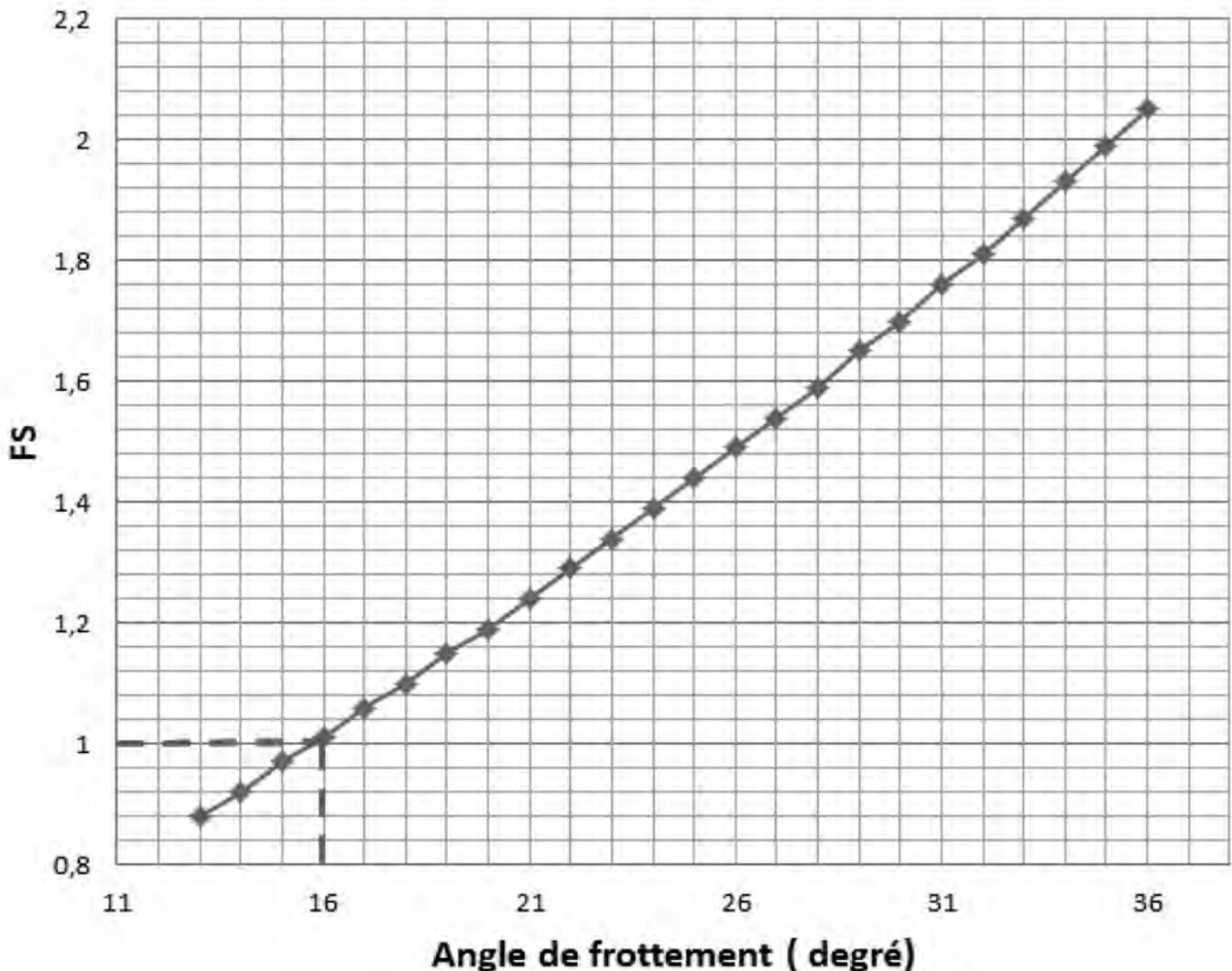


Figure 23 : Influence de l'angle de frottement sur le facteur de sécurité

notable des caractéristiques mécaniques du sol (perte de résistance au cisaillement). Cependant, il va de soi que, dans tous les cas, la rupture provient pour l'essentiel de la nature minéralogique du sol. Les argiles étant des roches évolutives, leurs comportements changent en présence d'eau et deviennent très plastiques. La rupture du versant peut donc être attribuée à une perte de résistance au cisaillement sans oublier bien sûr des conditions hydrauliques et probablement sismiques défavorables.

Pour prévenir les désordres liés au glissement du petit D15, le renforcement par ancrages s'avère être une solution adéquate. La méthode de réduction de la résistance implantée dans le logiciel FLAC a été utilisée pour produire un schéma de renforcement optimal par barre d'ancrage en faisant varier le nombre des ancrages, leur position le long de la pente, leur inclinaison, leur diamètre et leur longueur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bourdeau, C. (2005). Effets de site et mouvements de versant en zones sismiques: apport de la modélisation numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [2] Caumartin, R. (2008). "Rétroanalyse de l'instabilité d'une pente dans une mine à ciel ouvert assistée de la modélisation numérique utilisant la méthode des éléments distincts."
- [3] Cherkaoui, T.-E. and A. El Hassani (2015). "Évaluation et atténuation de l'aléa sismique au Maroc." Actes de la session plénière solennelle, 24-26 février 2015, Hassan II Academy of Sciences and Technology: 157-173.
- [4] Règlement Parasismique Marocain : RPS 2000-version 2011.
- [5] Yahiaoui, M. (2014). Contribution à l'analyse dynamique des terrains en pentes sous séisme par logiciel Plaxis.