

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE**

**ENSMM-Annaba-**



DÉPARTEMENT GÉNIE MINIER

Mémoire de fin d'études

Master : Génie Minier

**THEME :**

**APPORT DE LA MODELISATION DANS  
L'OPTIMISATION DES PENTES**

**CAS DE LA CARRIERE D'ARGILE DE BIR MADHI-EST  
(HAMMAM DALAA, M'SILA)**

Présenté par : - Guettouche Romayssa

Encadré(e) par : - Dr. A. Aissi

Membres du jury : président : Dr H.CHENITI

Examineur : Dr H.MEHTALI

septembre 2017

## *Remerciements*

*J'adresse en premier lieu mes sincères remerciements à notre dieu qui ma guidé dans mes pats pour arriver à ce niveau.*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.*

*Je voudrais adresser toute ma gratitude à celui qui a tout fait pour m'aider à finir ce travail, mon prof, encadreur et tuteur, Dr AISSI ADEL.*

*Je désire aussi ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.*

*Je remercie ma famille pour leurs encouragements.*

*Enfin, je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.*

## *Dédicace*

*A celui qui ma indiqué la bonne voie.*

*Mon père.*

*A celle qui a attendu avec patience les fruits de sa  
bonne éducation.*

*Ma Mère.*

*A ma sœur : Fati.*

*A ma nièce : Meriem.*

*A mes frères : Tadjou, Adam , Ali et Mehdi.*

*A mes meilleures tantes et oncles.*

*A mes chers amis.*

*Vous qui êtes toujours là pour aider, cette dédicace est là  
pour remercier votre patience et pour m'avoir aidé,  
chaque jour à avancer.*

*GUETTOUCHE Romayssa.*

## Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier la stabilité d'un talus de la carrière de Bir Madhi Est. L'analyse de la stabilité a été effectuée en utilisant la technique de modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le PLAXIS 8.2.

Une étude paramétrique a été faite afin de voir l'influence des différents paramètres géotechniques sur la stabilité de la carrière et d'observer le mécanisme de rupture de la carrière pour différents cas.

Les résultats montrent que le talus est stable dans son état actuel avec un coefficient de sécurité de 1.5 et que la production peut s'augmenter pour une hauteur de gradin comprise entre 5m et 8m et un angle de talus  $>45^\circ$ .

**Mots clés :** stabilité, PLAXIS, modélisation numérique, paramétrique.

## Abstract :

The aim of this work is to study the stability of the slope of Bir Madhi Est. The stability analysis was carried out using the numerical modelling technique based on the finite element method using PLAXIS 8.2.

A parametric study was made to see the influence of different geotechnical parameters on the stability of the slope and observed the mechanism of the rock sliding in different cases.

The results show that the slope is stable in its current state with a safety coefficient of 1.5 and that the production can increase with a bench of 5m to 8m and a slope angle of  $> 45^\circ$ .

**Keywords:** stability, PLAXIS, numerical modelling, parametric.

## ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة استقرار منحدر محجر بئر ماضي الشرقي. تم تحليل الاستقرار باستخدام تقنية النمذجة العددية على أساس طريقة العناصر المحددة باستخدام PLAXIS 8.2. أجريت دراسة بارامترية لمعرفة تأثير المعلمات الجيوتقنية المختلفة على استقرار المحجر، ولاحظت آلية الاختراق الوظيفي للحالات المختلفة.

وأظهرت النتائج أن المنحدر مستقر في حالته الحالية بمعامل أمان قدره 1.5 وأن الإنتاج يمكن أن يزداد مع ارتفاع خطوة بين 5 م و 8 م وزاوية ميل أكثر من 45 درجة.

كلمات مفتاحية: النمذجة العددية PLAXIS، بارامترية، الاستقرار.

## Liste des figures

### Chapitre I :

Figure 1: Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique. ....	4
Figure 2: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb .....	5

### Chapitre II :

Figure 1: Image Google Earth du gisement. ....	6
Figure 2: Carrière vue du Nord (du côté de la route) .....	6
Figure 3 : Géométrie du talus .....	8
Figure 4: Maillage du modèle .....	9
Figure 5: Définition de la nappe.....	10
Figure 6: Définition du multiplicateur pour la procédure K0 .....	10
Figure 7: Contrainte initiale avant d'accéder au module calcul .....	11
Figure 8: Déformation du maillage après application de la gravité (Phase1). ....	12
Figure 9: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité (Phase2).....	13
Figure 10: évolution du Fs en fonction du type de maillage .....	14
Figure 11: évolution du Fs en fonction de la cohésion .....	15
Figure 12: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité( $c=30 \text{ KN/m}^2$ ).....	16
Figure 13: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité( $c=20 \text{ KN/m}^2$ ).....	16
Figure 14: évolution du Fs en fonction de l'angle de frottement interne .....	17
Figure 15: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité ( $\varphi=10^\circ$ ).....	17
Figure 16: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité ( $\varphi=20^\circ$ ).....	18
Figure 17: géométrie du talus.....	19
Figure 18: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité.....	20
Figure 19: géométrie du talus.....	21
Figure 20: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité.....	21

## Liste des tableaux :

### Chapitre II :

Tableau 1: propriétés du matériau .....	8
---	---

# SOMMAIRE

Introduction .....	1
<b>Chapitre I : la méthode des éléments finis et l’outil de modélisation</b>	
II.1. Aperçu sur la méthode des éléments finis (MEF) : .....	2
II.2. Présentation de l’outil de simulation par élément finis : .....	3
II.2.2. Objectifs : .....	3
II.2.3. Modèle de comportement utilisé dans PLAXIS : .....	3
II.2.3.1. Comportement élasto-plastique : .....	4
II.2.3.2. Modèle élastique linéaire : .....	5
II.2.3.3. Modèle de Mohr-Coulomb : .....	5
<b>Chapitre II : étude de cas</b>	
II.1. Géologie de la carrière : .....	6
II.1.1. Introduction : .....	6
II.1.2. Réserve : .....	7
II.1.3. Aperçu climatique : .....	7
II.1.4. Lithologie et stratigraphie .....	7
II.1.5. Propriétés physiques .....	7
II.2. Evaluation de la stabilité de la carrière de Bir Madhi Est par éléments finis : .....	8
II.2.1. Etapes de la modélisation : .....	8
II.2.1.1. Géométrie du modèle : .....	8
II.2.1.2. Caractéristique des matériaux : .....	8
II.2.1.3. Génération du maillage : .....	8
II.2.1.4. Définition des conditions initiales .....	9
II.2.1.5. Procédure de calcul : .....	11

II.2.1.6.Examen des résultats : .....	12
II.3. Etude paramétrique : .....	14
II.3.1.Introduction : .....	14
II.3.2.Influence des paramètres de calcul : .....	14
II.3.3 Influence des paramètres géotechniques : .....	15
III.3.3.1 La cohésion : .....	15
III.3.3.2 L'angle de frottement $\varphi$ : .....	17
II.4.Evaluation de la stabilité de la carrière de Bir Madhi en différents scénario d'exploitation : .....	19
II.4.1. 1 <sup>er</sup> scénario : .....	19
II.4.2.2 <sup>ème</sup> scénario : .....	20
II.4.3.Recommandation : .....	22
Conclusion générale : .....	23
Bibliographie : .....	24
ANNEXE.....	25

## Introduction

L'analyse de la stabilité des pentes est généralement réalisée avec la méthode d'équilibre limite basée sur des hypothèses concernant la forme de la surface de glissement. Ces méthodes restent populaires en raison de leur simplicité et le nombre réduit de paramètres dont ils ont besoin, qui sont la géométrie de la pente, de la topographie, la géologie, les charges statiques et dynamiques, les paramètres géotechniques et conditions hydrogéologiques. Cependant, ils ne prennent pas en compte le comportement du sol et le facteur de sécurité supposé être constant le long de la surface de rupture. (Athamena ,2013).

Cette limitation peut être surmontée en utilisant des contraintes calculées par éléments finis à l'intérieur du cadre conventionnel d'équilibre limite. En partant des contraintes d'éléments finis, on peut calculer le long de la surface de glissement la résistance totale au cisaillement de même que la contrainte totale de cisaillement mobilisée et les utiliser pour déterminer le coefficient de sécurité. (Medjitena Nasri, 2008).

Ces méthodes présentent plusieurs avantages : pour modéliser les pentes avec un degré très élevé de réalisme (de géométrie complexe, des séquences de chargement, présence de matériel pour le renforcement, l'action de l'eau, les lois de comportement complexes des sols ...) et de mieux visualiser les déformations dans les sols.

Les méthodes numériques ont pour but de décrire, d'expliquer ou de prédire le comportement d'une structure naturelle ou artificielle sur la base de lois physiques qui relient les variations des contraintes aux déformations et aux déplacements(Lefriki ,2015).

Dans ce travail, on applique la méthode numérique par (PLAXIS 8.2) pour étudier la stabilité des talus au niveau de la carrière de Bir Madhi (Hammam Dalaa, Wilaya de Msila).

Afin de mieux mener notre mémoire, nous avons scindé notre présent travail en deux chapitres principaux. Dans le premier chapitre on définit la méthode des éléments finis et on va présenter l'outil de modélisation utilisé dans notre étude. Et le deuxième chapitre a été consacré pour notre étude de cas.



## **Chapitre I :**

# **La méthode des éléments finis et l'outil de modélisation**

### II.1. Aperçu sur la méthode des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est une technique récente à caractère Pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances des trois disciplines de base :

1. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, Plasticité, ...etc.
2. L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires,...etc.
3. L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance de grands logiciels.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées.

Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique [3].

#### Elle nécessite :

- ❖ La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières de calcul n'influencent pas sur les résultats.
- ❖ le choix d'une loi de comportement du massif, de type Mohr-Coulomb,...etc.

#### Elle permet :

- ❖ D'effectuer les calculs d'écoulement ;
- ❖ De simuler toutes phases de travaux ;
- ❖ De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages ; des couches de terrain et de lits de boutons ou de tirants ;
- ❖ De calculer un Coefficient de sécurité.

#### Elle fournit :

##### A. Pour les ouvrages :

- Les déplacements des ouvrages,
- Les sollicitations internes des ouvrages,
- Les efforts dans les boutons ou tirants.

### **B. Pour le massif :**

- les déplacements,
- les déformations,
- les contraintes totales et effectives dans le massif,
- les pressions interstitielles,
- de calculer un coefficient de sécurité.

## **II.2. Présentation de l'outil de simulation par élément finis :**

### **II.2.1. Introduction :**

**PLAXIS** est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques.

Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier [6].

### **II.2.2. Objectifs :**

**PLAXIS** est un outil adéquat pour une analyse pratique dans le domaine de la géotechnique pour des utilisateurs qui ne soient pas nécessairement des spécialistes en calcul numérique. Souvent, les ingénieurs considèrent les calculs non-linéaires par élément fini sont laborieux et consomment beaucoup de temps. Le groupe de recherche et de développement de **PLAXIS** ont à cet effet, recherché à mettre à la disposition des utilisateurs un logiciel facile à utiliser, basé sur des procédures théoriques fortes [6].

**PLAXIS** permet d'effectuer de différents types de calculs aux éléments finis. Le programme de calcul ne traite que de l'analyse des déformations et il permet de réaliser un calcul plastique (Plastic calculation), une analyse de consolidation (Consolidation analysis), un calcul de coefficient de sécurité (Phi-c réduction) ou un calcul dynamique (Dynamics calculation) [6].

### **II.2.3. Modèle de comportement utilisé dans PLAXIS :**

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettent de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-viscoplastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis [4].

Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : D'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation. La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans ces codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est Généralement important [4].

**PLAXIS** peut apparaître Comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, où le micro - ordinateur a remplacé la règle. C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans **PLAXIS** sont des modèles qui peuvent apparaître simple, voir simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- Quel est le comportement principal à modéliser ?
- Utiliser un modèle qui décrit ce comportement ;
- Interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation.

### II.2.3.1. Comportement élasto-plastique :

L'élastoplasticité est la phase entre le comportement élastique et plastique, où le domaine d'élasticité est relativement limité.

Le comportement élasto-plastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur  $K$ , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil  $S_0$ . (Figure 1).

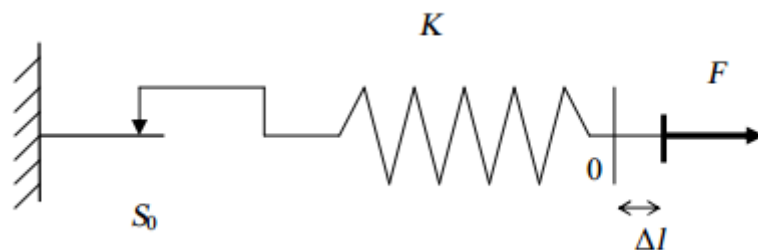


Figure 1: Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique.

**II.2.3.2. Modèle élastique linéaire :**

Le modèle élastique linéaire de **PLAXIS** peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

**II.2.3.3. Modèle de Mohr-Coulomb :**

Le modèle de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage, initialement développé pour décrire de manière approchée le comportement des métaux.

Le modèle Mohr-Coulomb est le plus utilisé dans la pratique de l’ingénierie pour décrire de manière approchée le comportement des sols pulvérulents (sable et gravier) et le comportement drainé, à long terme des sols fins saturés (limon et **argile**).

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma \tan \phi + c$$

$\sigma$ ,  $\tau$  sont respectivement les contraintes normale et de cisaillement ;

$c$ ,  $\phi$  sont respectivement la cohésion et l’angle de frottement du matériau. (Figure 2).

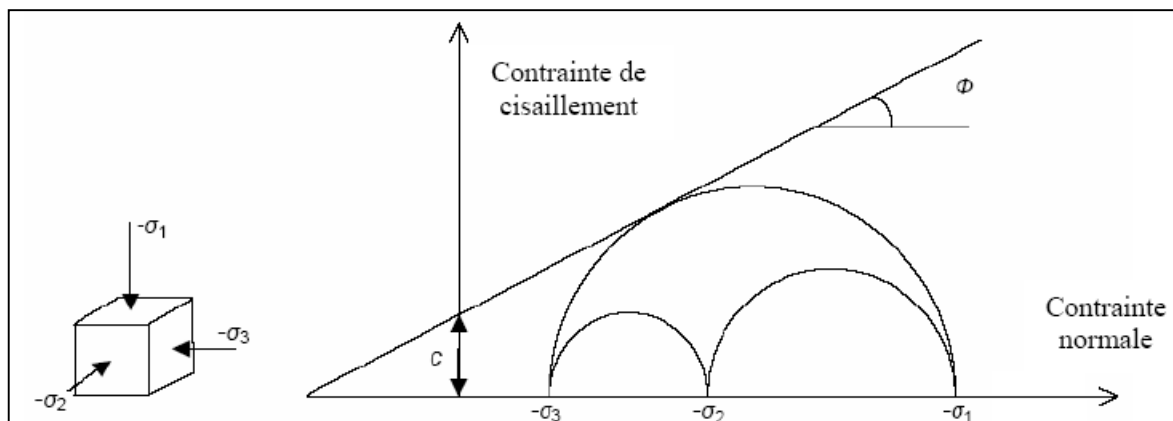


Figure 2: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres (Figure 3). Les deux premiers sont  $E$  et  $\nu$  (paramètres d’élasticité). Les deux autres sont  $C$  et  $\phi$ , respectivement la cohésion et l’angle de frottement interne et le dernier paramètre est l’angle de dilatance. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité [4].

## **Chapitre II :**

# **Etude de cas**

### II.1.Géologie de la carrière :

#### II.1.1.Introduction :

Le gisement d'argile de BIR MADHI a été étudié en 2001-2003 par CETIM Boumerdes dans le cadre du projet dénommé "Cimenterie de Msila". Le gisement se situe au lieu-dit « Bir Madhi », à environ 10 kms au Nord-Ouest de Hammam Dalaa.

Morphologiquement, le gisement occupe une partie d'une colline allongée sub-latitudinalement. L'altitude maximale atteinte au sommet, dans la partie centrale est de 970 m tandis que l'altitude minimum se situe au Nord à la cote 920 m du côté de la route soit une dénivelée générale d'une cinquantaine de mètres.



Figure 1: Image Google Earth du gisement.



Figure 2: Carrière vue du Nord (du côté de la route)

### II.1.2.Réserve :

Les réserves exploitables d'argile s'élèvent à plus de 22.7 Millions de tonnes. Ces réserves assurent une durée de vie de plus de 100 ans pour une capacité de production de 220,000 T/an d'argile exploitée en gradins de 5 m de hauteur.

### II.1.3.Aperçu climatique :

- La région est située sur le versant méridional des monts du Hodna a un relief formé de barres rocheuses parallèles typiques orientées globalement Est-Ouest ;
- Il n'y a pas de cours d'eau important dans la zone du gisement ;
- Le climat général de la région du site est de type continental, avec un hiver froid et peu pluvieux et un été très chaud et sec.
- Une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 200 à 300 mm

### II.1.4.Lithologie et stratigraphie

La formation formant le gisement est attribuée au Miocène marin (vindobonien). Elle est composée essentiellement **d'argiles marno-schisteuses, grisâtres devenant plus foncée en profondeur.**

### II.1.5.Propriétés physiques

Les principales caractéristiques physiques établies d'après des essais réalisés sur des échantillons prélevés sont comme suit :

Humidité naturelle : 3.4%

Poids Volumique : 2.36 T/m<sup>3</sup>

### Problématique :

L'objectif de ce travail est d'étudier la stabilité des gradins d'un cas réel par la modélisation numérique avec la méthode des éléments finies. Le modèle issu de notre évaluation est un composé de 11 gradins de 5 m de hauteur avec un terrain homogène.



**II.2.Evaluation de la stabilité de la carrière de Bir Madhi Est par éléments finis :**

**II.2.1.Etapes de la modélisation :**

**II.2.1.1.Géométrie du modèle :**

La géométrie du modèle étudié est représenté sur la Figure 3. La hauteur du talus H=50 m, la pente  $\beta=45^\circ$ . hauteur de gradin 5m.

Type de matériau : Argile

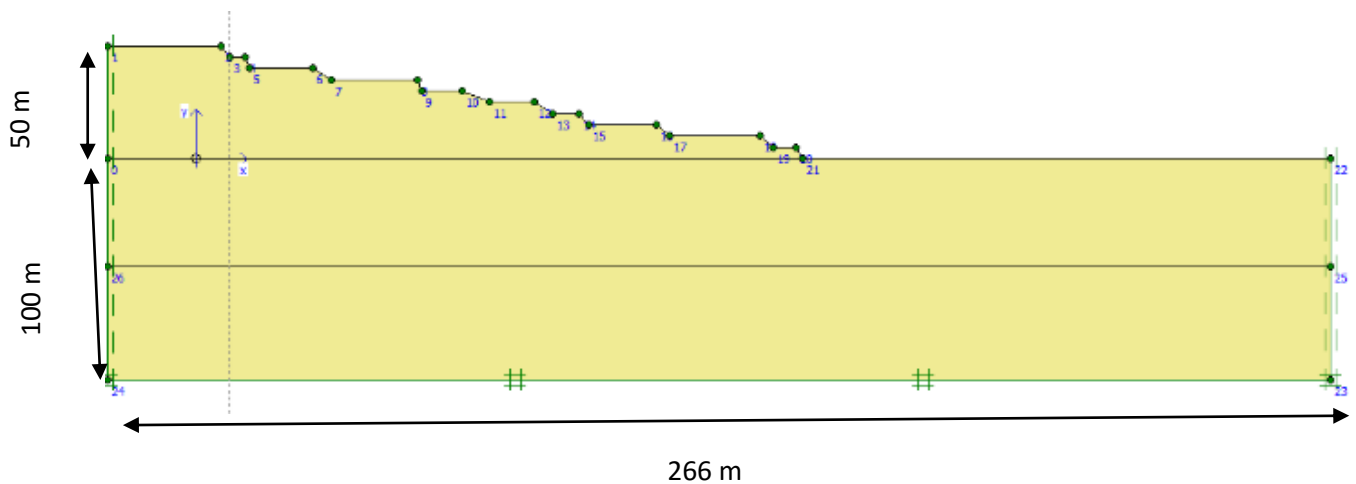


Figure 3 : Géométrie du talus

**II.2.1.2.Caractéristique des matériaux :**

Les propriétés du matériau sont résumées dans le Tableau 1

Tableau 1: propriétés du matériau

paramètres	Désignations	Argile
Modèle et type de comportement		Mohr-Coulomb drainé
Poids volumique apparent (KN/m <sup>3</sup> )		23.6
Poids volumique saturé (KN/m <sup>3</sup> )		24.5
Module d'Young (KN/m <sup>2</sup> )	E	25000
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.3
Cohésion (KN/m <sup>2</sup> )	C	25
Angle de frottement (°)	$\varphi$	15
Angle de dilatance (°)	$\psi$	0

**II.2.1.3.Génération du maillage :**

On règle la finesse du maillage (Global Coarseness) sur «Coarse ».le maillage ci-dessous est un maillage très fin afin d'augmenter la précision du calcul.

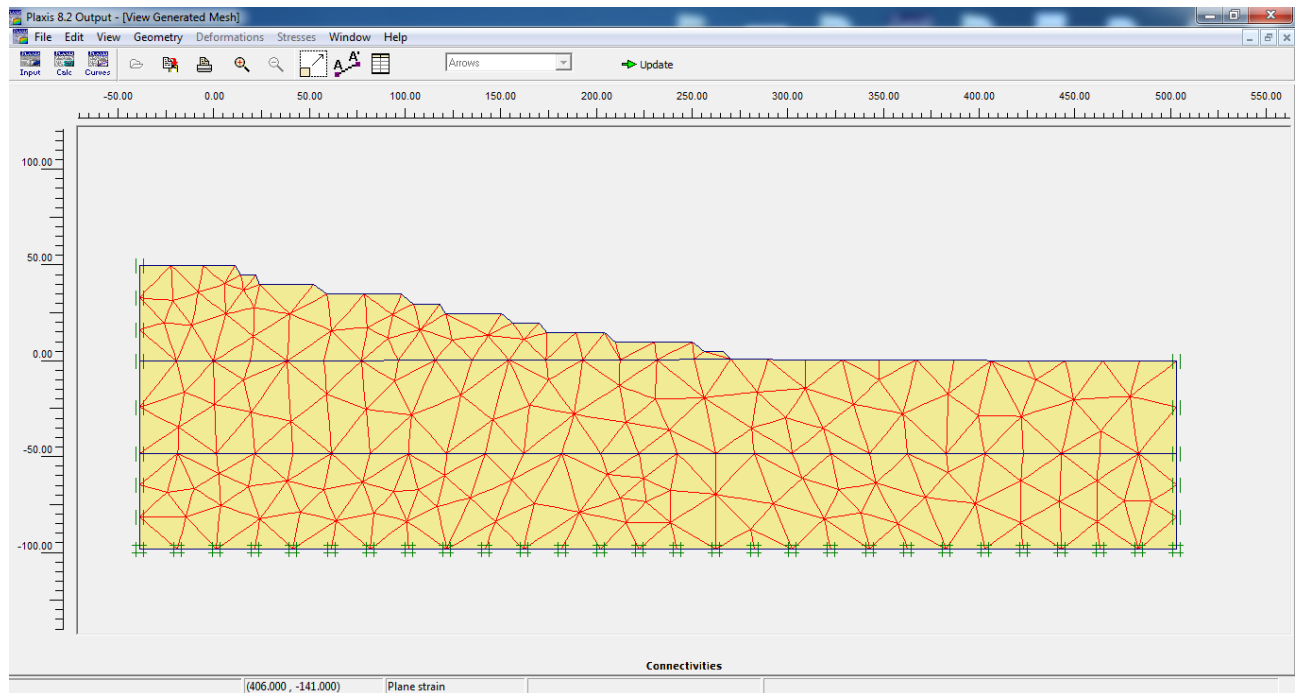


Figure 4: Maillage du modèle

#### II.2.1.4. Définition des conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles ainsi que les conditions initiales.

Comme la surface du talus n'est pas horizontale, les contraintes initiales ne peuvent pas être générées en utilisant les coefficients  $K_0$  : il faut recourir à une étape de chargement préalable pour appliquer la gravité au modèle.

Pour ne pas prendre en considération la pression interstitielle, la nappe phréatique a été définie lointe du talus.

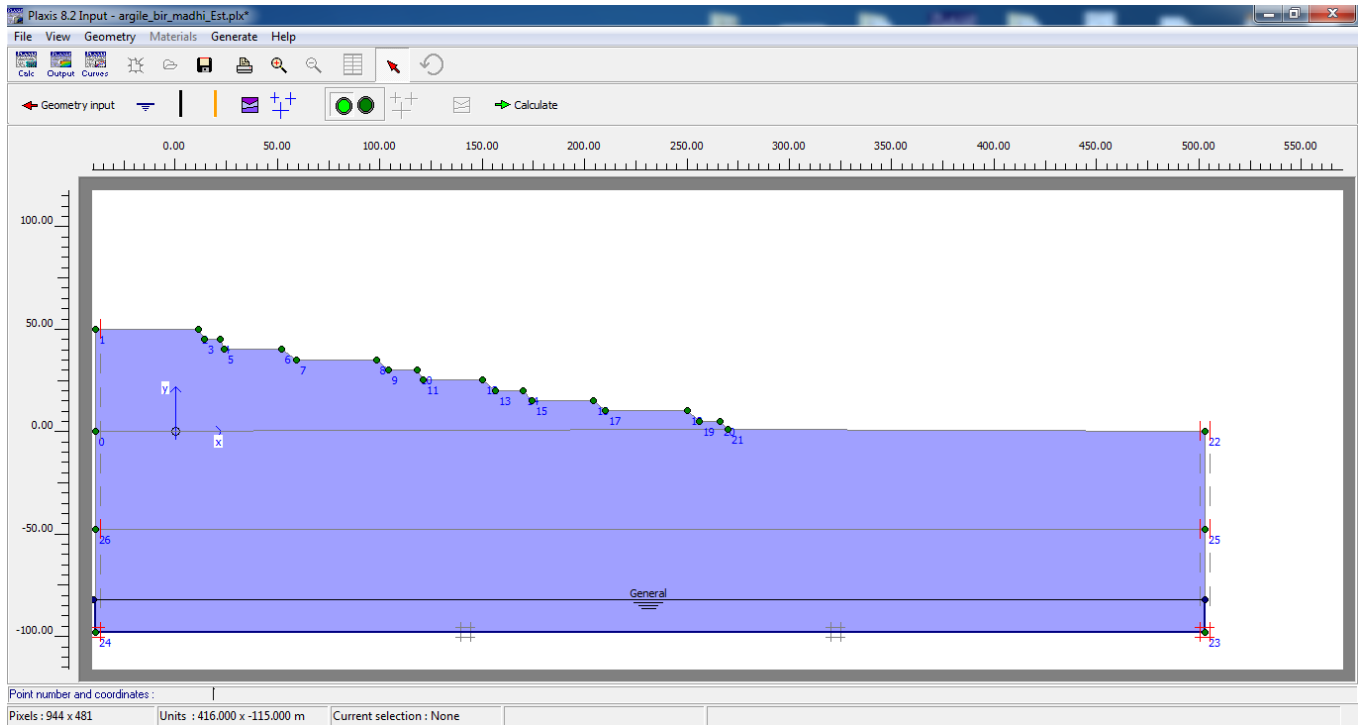


Figure 5: Définition de la nappe

Le calcul de procédure K0 est effectué en définissant un facteur  $\Sigma M_{weight} = 0$  (Figure 6). Aucune contrainte initiale n'est générée dans cette étape de calcul.

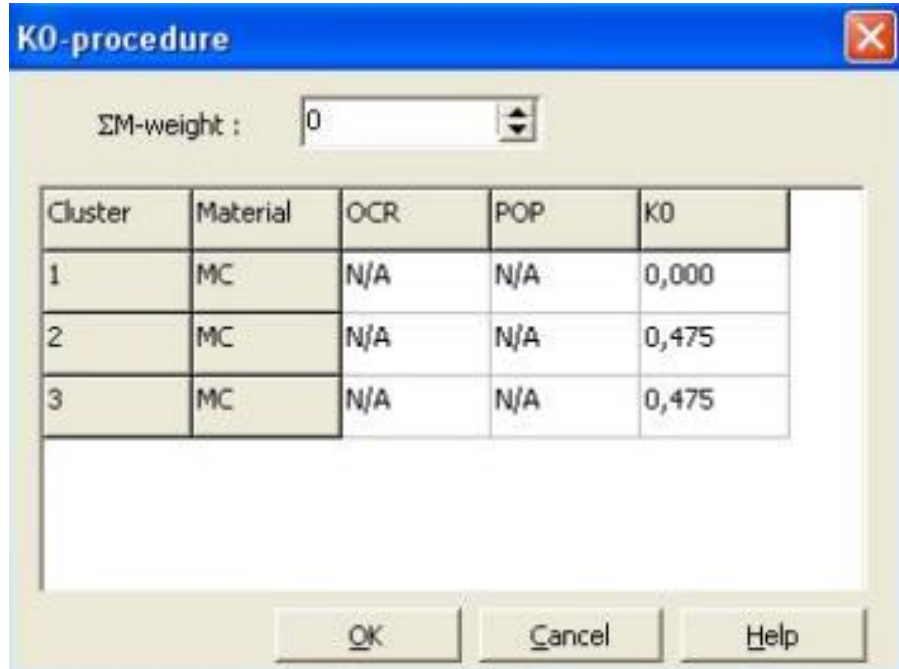


Figure 6: Définition du multiplicateur pour la procédure K0

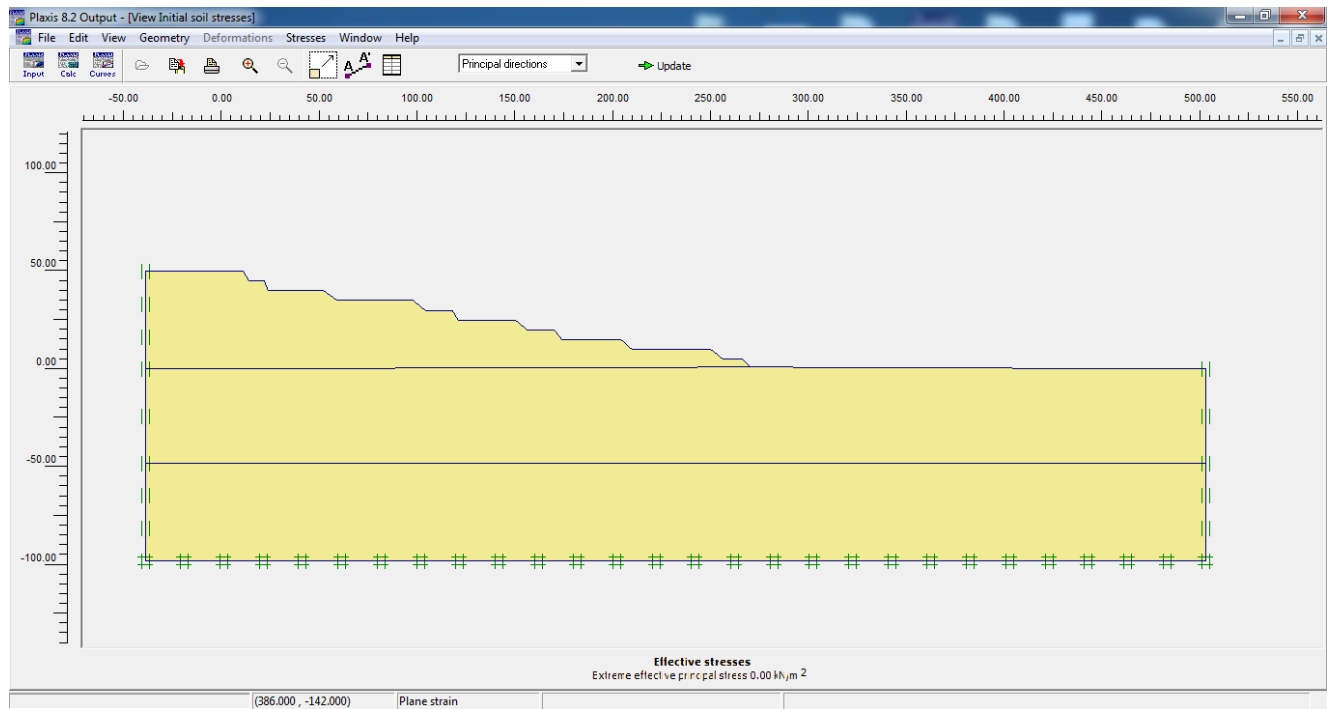


Figure 7: Contrainte initiale avant d'accéder au module calcul

### II.2.1.5.Procédure de calcul :

Le calcul du modèle de référence se fait en 2 phases.

#### Phase 0 :

Initiation des contraintes (procédure K0) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

#### Phase 1 : Application de la gravité

Celle-ci doit être appliquée de manière drainée puisque le sol, est depuis longtemps en équilibre sous cet état de contrainte. Cette phase est caractérisé par :

- Calcul plastique
- Activer l'option Ignore undrained behaviour ;
- Entrer 'Total multipliers'  $\sum = 1$  ;
- Choisir des points de suivi des déplacements en tête et au pied du talus.

#### Phase 2 : Calcul du coefficient de sécurité dans les conditions initiales

- Calcul Phi-c réduction
- Activer les deux options Reset displacements to zero et Ignore undrained behaviour
- Accepter le choix de l'incrément standard = 0,1

### II.2.1.6.Examen des résultats :

Après avoir lancé les calculs, les résultats peuvent être examinés pour chacune des phases avec le programme Output.

#### A. Application de la gravité

La déformation du maillage est représentée sur la (Figure 8).

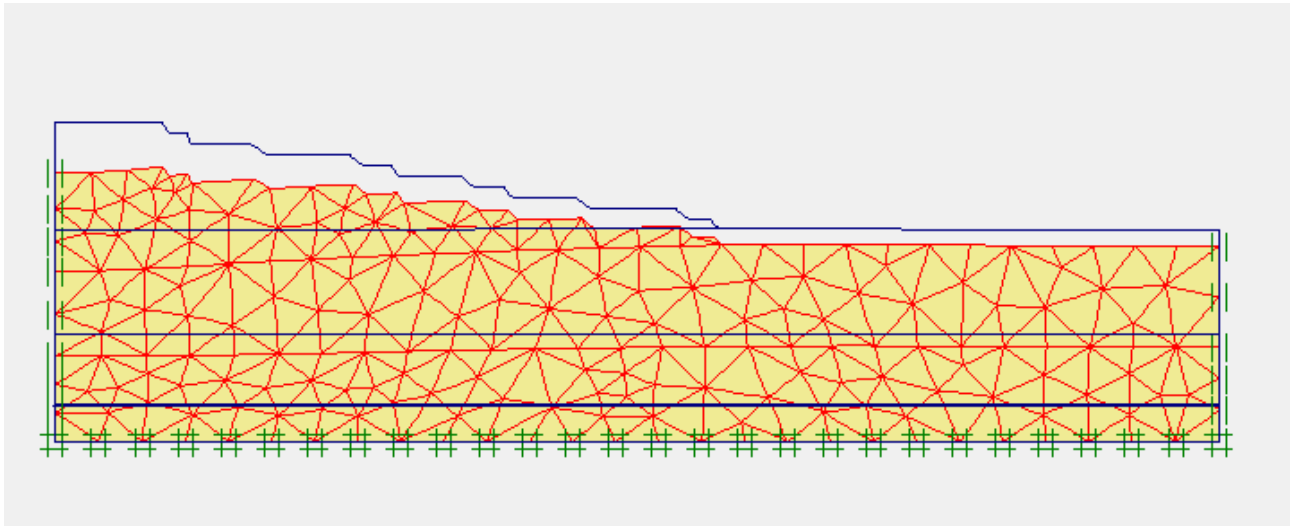


Figure 8: Déformation du maillage après application de la gravité (Phase1).

#### B. Calcul du coefficient de sécurité dans les conditions initiales :

Seuls l'allure du champ des incréments de déplacements (Figure 9) est significative dans un calcul Phi-c Reduction. Celle-ci fournit une indication du mécanisme de rupture qui serait obtenu par un calcul traditionnel de type équilibre limite pour des surfaces de rupture circulaires.

Le coefficient de sécurité est obtenu en examinant la valeur finale du facteur  $\sum -Mfs$  après sélection de la phase de calcul appropriée (module Calculation, Multipliers, Reached values ou bien dans le module Output, View, Calculation Info.).

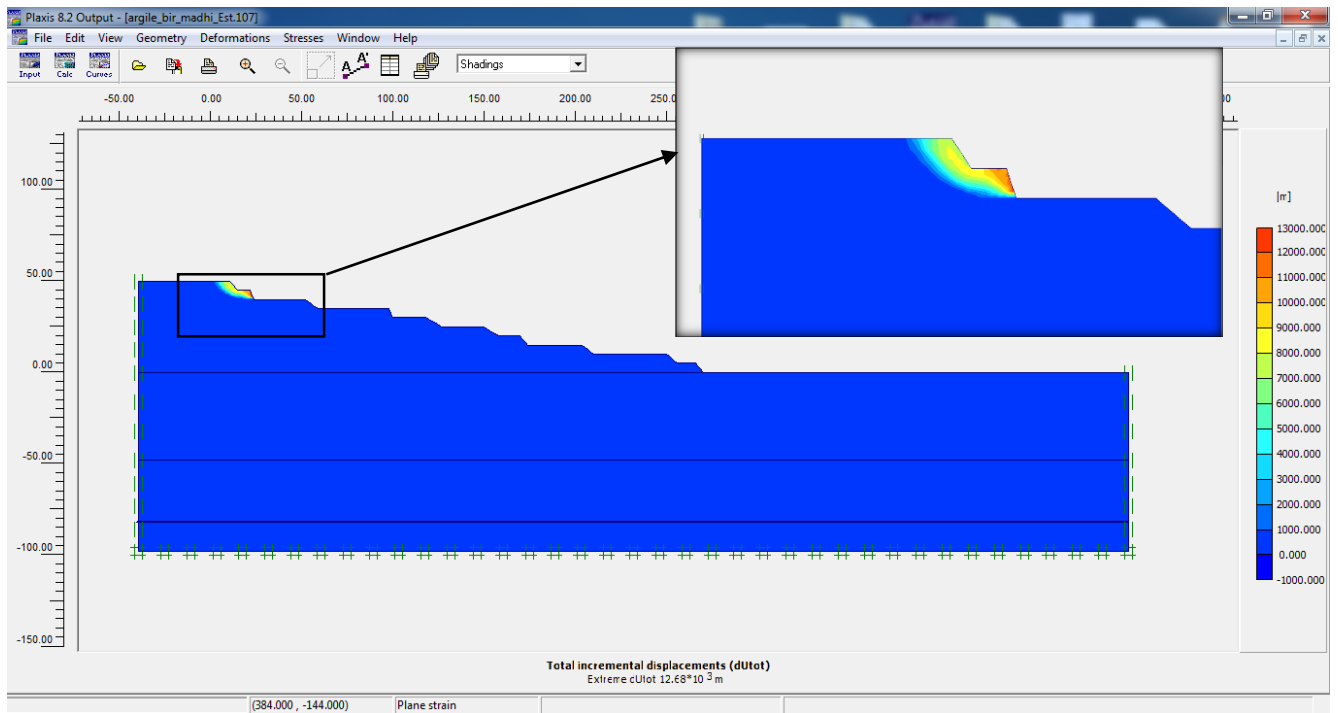


Figure 9: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité (Phase2)

Cette figure donne une simulation du cercle de glissement qui peut se produire dans ce cas.

Le coefficient de sécurité calculé pour ce talus est  $\sum -Msf = 1.50$ .

### II.3. Etude paramétrique :

#### II.3.1.Introduction :

Cette étude a pour but de montrer l'effet des différents paramètres sur le comportement du sol, avec les mêmes données et on change à chaque fois le paramètre à comparer (les paramètres ont été modifiés un par un), et toujours dans des fourchettes raisonnables.

On a deux types de paramètres :

- Les paramètres de calcul (modélisation).
- Les paramètres géotechniques.

Dans cette étude, la comparaison sera faite sur :

-Le coefficient de sécurité.

#### II.3.2.Influence des paramètres de calcul :

- **Influence du type de maillage :**

On propose l'étude de l'effet du maillage sur le comportement du sol.

Le code PLAXIS utilise fournit 5 type de maillage selon leurs finesse (very coarse, coarse, medium, fine et very fine).

Dans cette étude on a évalué la stabilité en selon le Fs suivant 3 type de maillage (grossier, medium, très fin).

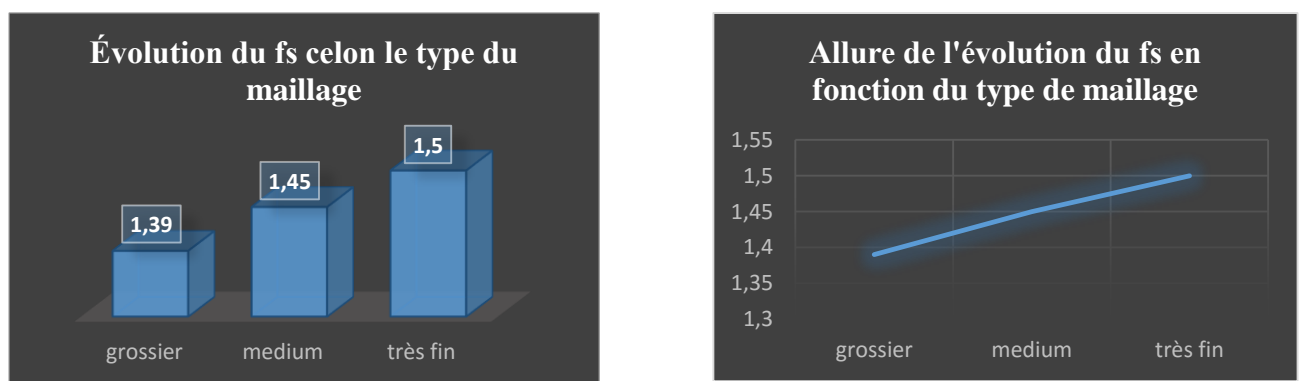


Figure 10: évolution du Fs en fonction du type de maillage

Cette figure illustre la variation du facteur de sécurité en fonction du type de maillage adapté lors de la modélisation.

L'allure montre une augmentation du  $F_s$  en augmentant la finesse du maillage dont cette dernière est caractérisée par le nombre des éléments triangulaire que subdivise le modèle, que fait une augmentation des points d'évaluation de la stabilité.

### II.3.3 Influence des paramètres géotechniques :

Pour ce qui concerne les paramètres géotechniques on a étudié l'influence des deux paramètres suivants :

- La cohésion  $c$
- L'angle de frottement  $\phi$

#### III.3.3.1 La cohésion :

La cohésion du modèle de référence est  $c=25 \text{ KN/m}^2$ . Pour l'étude paramétrique on fait les calculs pour :  $c=20 \text{ KN/m}^2$  et  $30 \text{ KN/m}^2$ .

Après avoir évalué la stabilité du talus avec différentes valeurs de cohésion, les valeurs du facteur de sécurité  $y$  attachés sont montrés dans l'histogramme qui suit :

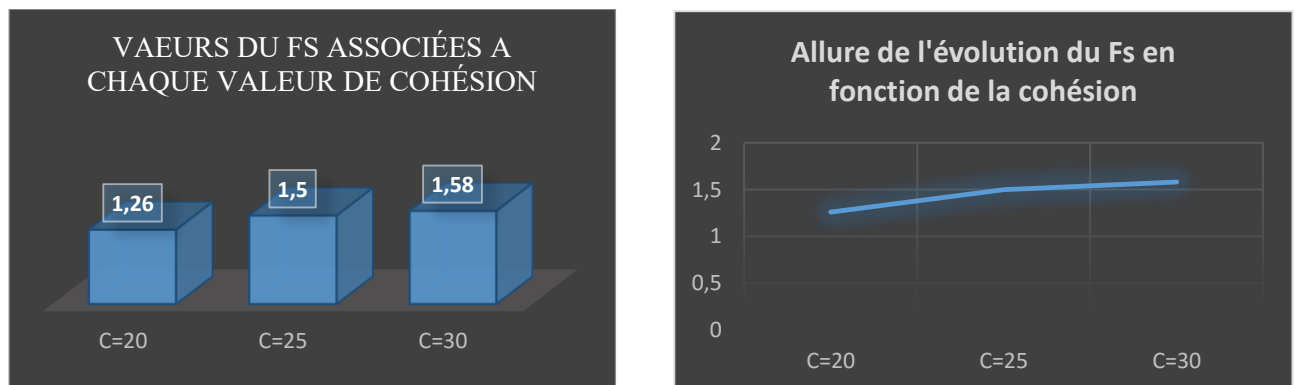


Figure 11: évolution du  $F_s$  en fonction de la cohésion

Cette allure montre une diminution du  $F_s$  en diminuant la cohésion à cause de la diminution de la résistance propre de matériau d'où ce fait la rupture pour des faibles valeurs de la cohésion.

$$F_s = \frac{\text{forces résistantes aux glissements}}{\text{forces motrices aux glissement}}$$

Donc l'augmentation de la surface de glissement.



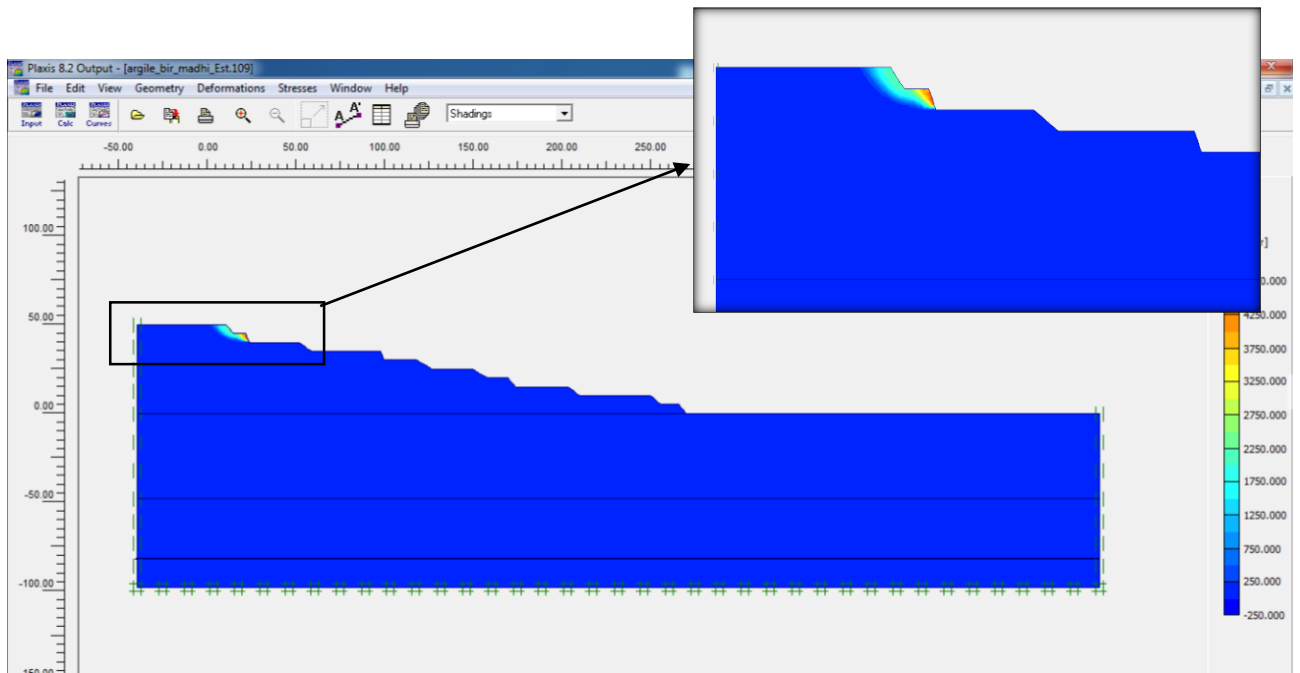


Figure 12: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité( $c=30 \text{ KN/m}^2$ )

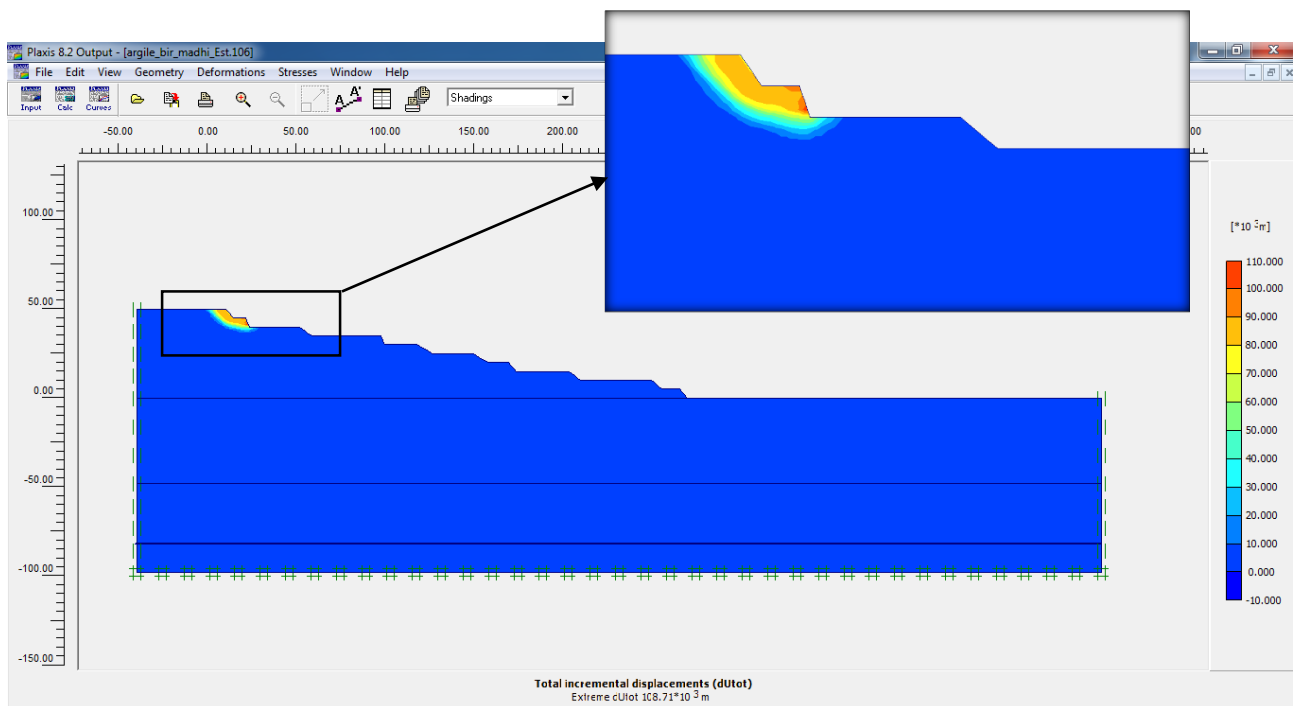


Figure 13: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité( $c=20 \text{ KN/m}^2$ )

On remarque une augmentation de la surface de glissement en diminuant la cohésion (Figure 12 V Figure 13).

III.3.3.2 L'angle de frottement  $\varphi$  :

Pour notre modèle de référence l'angle de frottement est  $\varphi=15^\circ$ . Donc pour l'étude paramétrique, on fait les calculs pour  $\varphi=10^\circ$  et  $20^\circ$ .

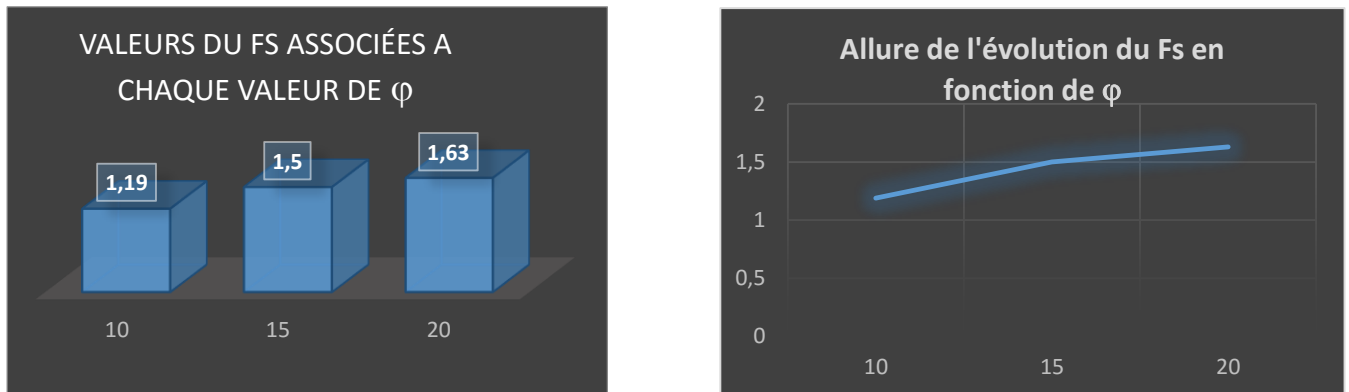


Figure 14: évolution du Fs en fonction de l'angle de frottement interne

Cette allure montre une diminution du Fs en diminuant l'angle de frottement interne à cause de l'augmentation du glissement en surface en diminuant l'angle de frottement interne du matériau.

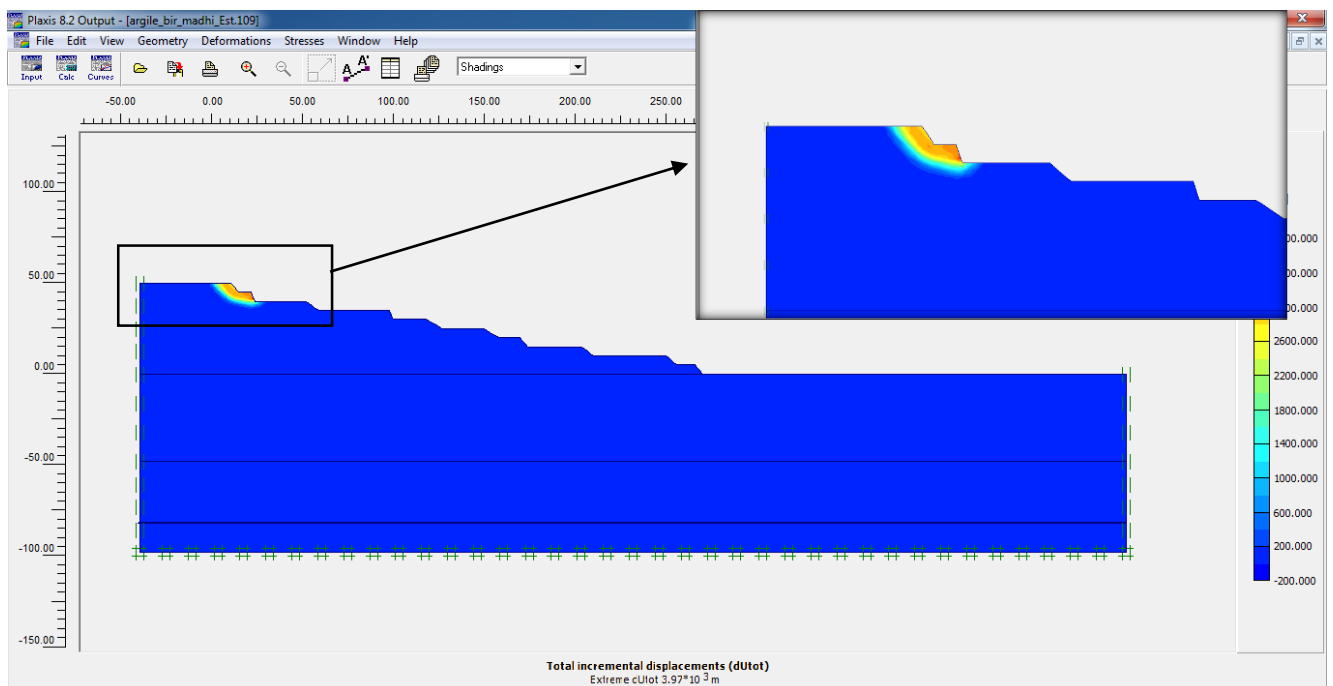


Figure 15: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité ( $\varphi=10^\circ$ ).

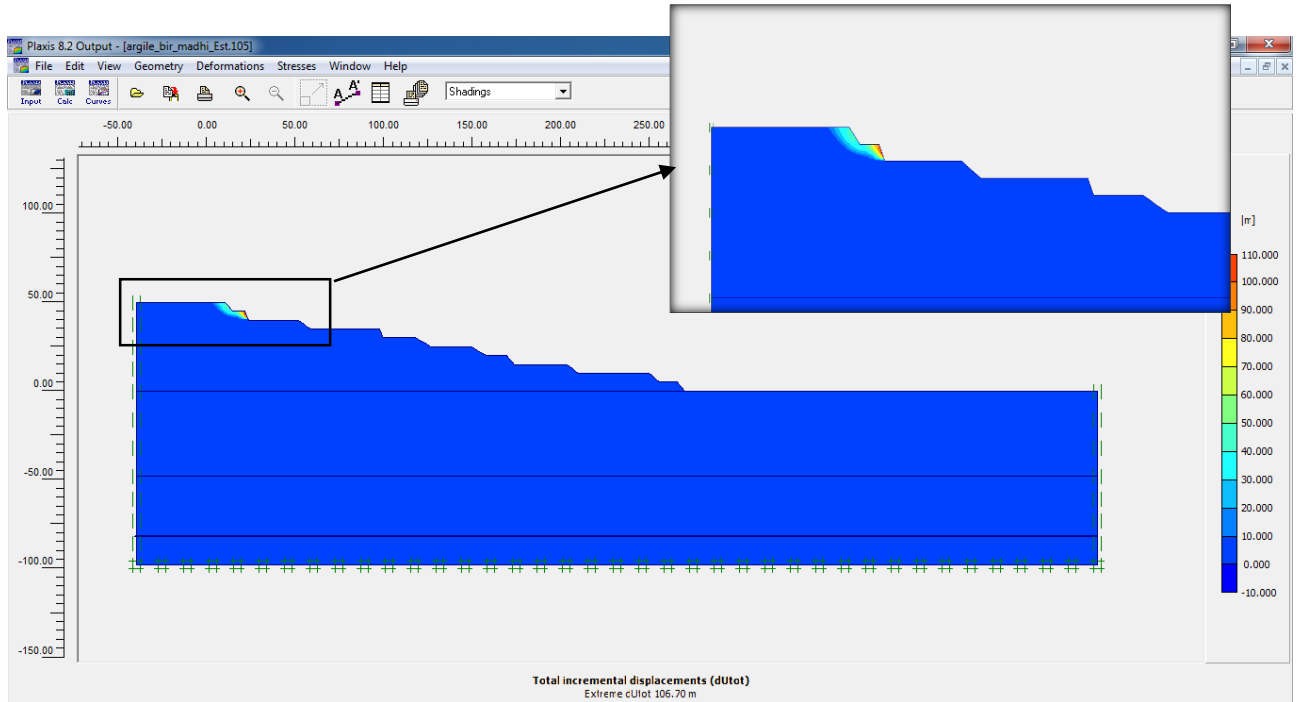


Figure 16: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité ( $\phi=20^\circ$ ).

On remarque une diminution du cercle de glissement en augmentant l'angle de frottement interne.(Figure 15 vs Figure 16).

**II.4.Evaluation de la stabilité de la carrière de Bir Madhi en différents scénario d’exploitation :**

L’exploitation actuelle dans la carrière de Bir Madhi se fait suivant 10 gradins de 5 m pour chacun d’où se fait un talus de 50 m de hauteur.

Les gradins ont des différentes plateformes avec une largeur qui varie entre 5m et 40 m.

Comme montré dans l’évaluation de la stabilité actuelle de la carrière, le Fs est de l’ordre de 1.51 d’où se fait une carrière stable.

Dans le but d’augmenter la production tout en respectant la stabilité réelle, on à proposer deux autres scénario de l’exploitation en évaluant leurs stabilité.

**II.4.1. 1ér scénario :**

Dans ce scénario on à proposer de diminuer le nombre des gradins en augmentant la hauteur de ces derniers afin d’obtenir un talus de 6 gradins avec 10 m de hauteur pour quelque uns.

La Figure 17 montre la géométrie du talus.

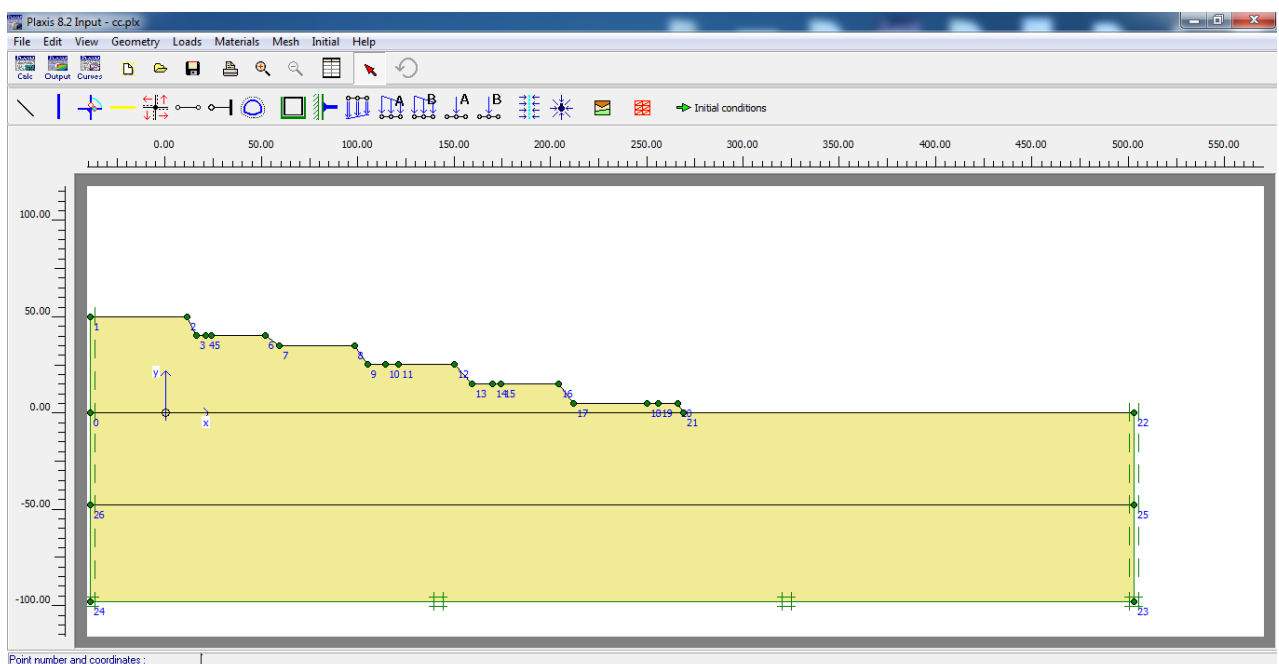


Figure 17: géométrie du talus.

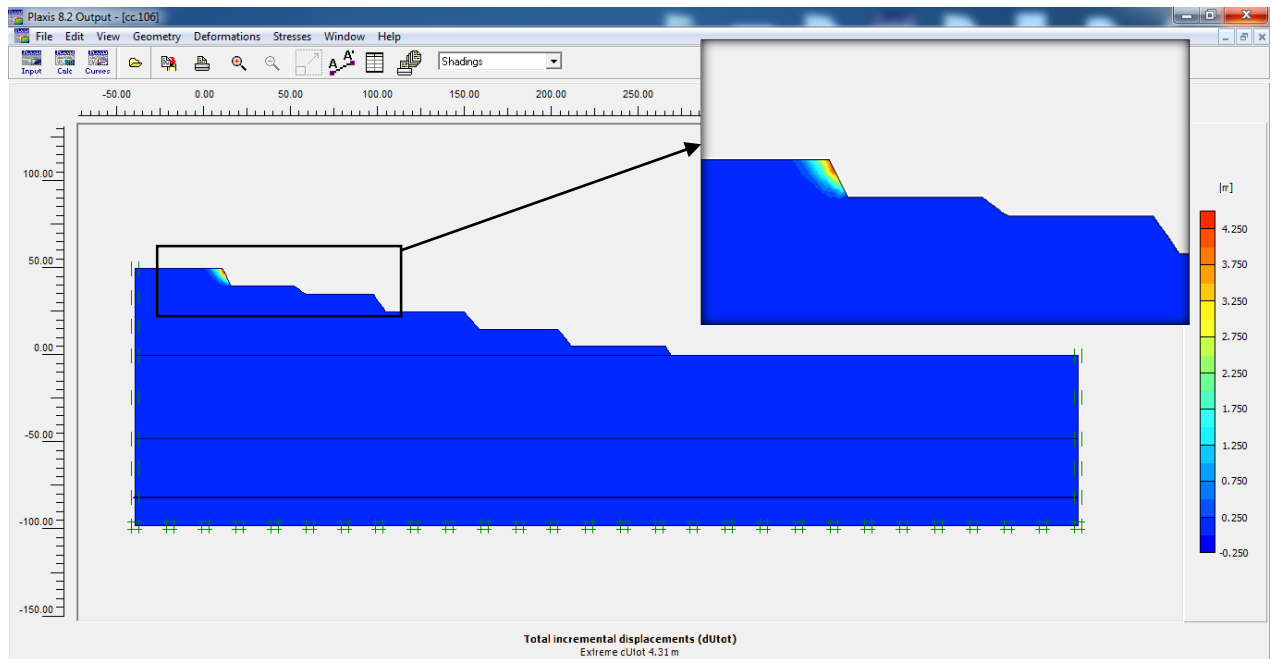


Figure 18: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité

La Figure 18 montre une instabilité au niveau de sommet du talus avec une possibilité d'un glissement circulaire.

Le facteur de sécurité associé à ce scénario est  $\Sigma\text{-Msf}=0.916$  d'où se fait une carrière complètement instable.

Cette instabilité est due à la grande hauteur du gradin que présente ce talus qui est inappropriée avec ce type du matériau (argile) qui est plus ou moins friable.

#### II.4.2.2ème scénario :

Ce scénario à une géométrie qui est entre le cas réel et le 1er scénario dont la hauteur du gradin est de 8m et ces derniers sont plus inclinés

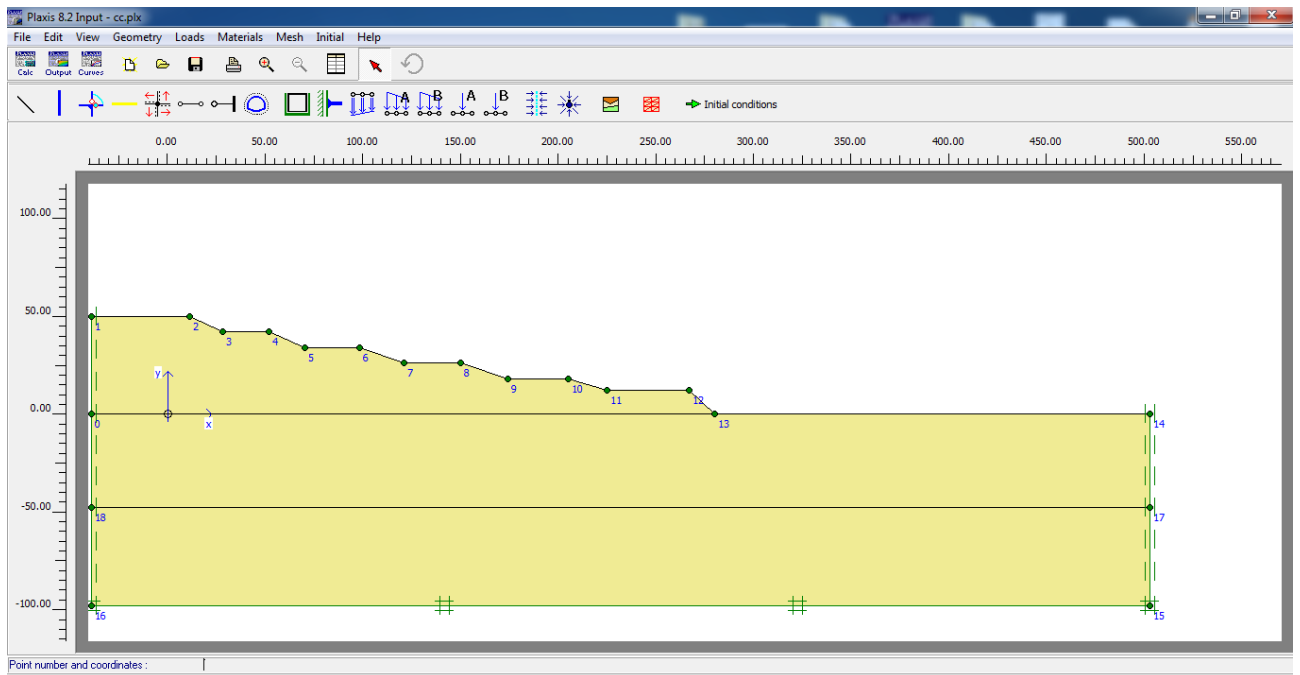


Figure 19: géométrie du talus

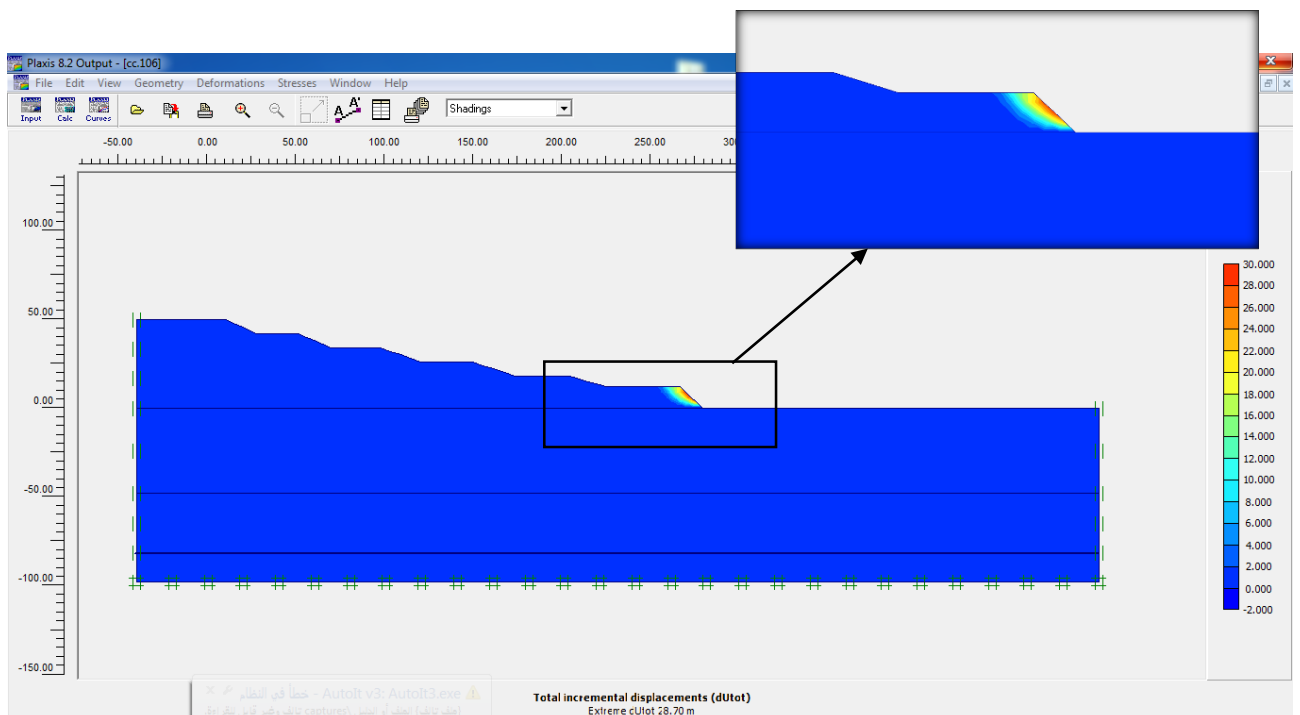


Figure 20: Incrément des déplacements après calcul du coefficient de sécurité

La Figure 20 montre une instabilité au niveau du gradin inférieur et une possibilité d'un glissement circulaire.

Le facteur de sécurité associé à ce scénario est  $\Sigma\text{-Msf}=1.11$ , ce qui fait une carrière stable contrairement au premier scénario car on a diminué la hauteur du gradin qui semble être compatible avec ce type de matériau (argile) et on a aussi incliné les gradins d'où ce fait un angle de talus  $>45^\circ$ .

### II.4.3.Recommandation :

A la fin de la réalisation de ces deux scénarios on a bien trouvé les dimensions adéquates à notre talus et au matériau de cette carrière (argile). Alors pour améliorer la production tout en gardant la stabilité de la carrière il nous faut :

- Un radin de hauteur entre 5m et 8m ;
- Un angle da talus $<75^{\circ}$  ;
- Un talus de  $>45^{\circ}$  d'inclinaison.

### Conclusion générale :

Ce travail a bien montré l'utilité de la modélisation par PLAXIS de la stabilité d'une carrière vu les différentes sorties que fournit cette méthodes qui sont plus sophistiquées et plus précises afin de bien garder la stabilité tout en assurant la continuité de la production.

L'évaluation de la stabilité de la carrière de Bir Madhi Est dans son état réel à montrer une stabilité au niveau des gradins de cette dernière ( $F_s=1.5$ ) avec un simple risque de glissement au niveau du sommet du talus.

Une étude paramétrique numérique a été menée afin d'analyser l'influence des paramètres de modélisation et des propriétés du sol du PLAXIS sur le mécanisme de glissement de talus.

Cette étude paramétrique met en évidence l'influence majeure de l'angle de frottement interne et de la cohésion du sol sur le coefficient de sécurité et sur les déplacements en surface.

Plus l'angle de frottement est grand, plus les déplacements en surface sont faibles. L'augmentation d'une cohésion permet d'augmenter les propriétés mécaniques du sol, plus la cohésion est grande plus les déplacements sont réduit, et la rupture est alors atteinte pour de faible cohésion.

Le changement de la géométrie du talus selon deux scénario à montré que la carrière peut être à la fois rentable et stable avec des gradins de hauteur entre 5 et 8m et plus inclinés qu'en son état réel.



# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] **Athamena Abdelaziz** , étude de renforcement des talus au niveau de la route r.n16(tronçon mechrouha w.de souk ahras), mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister en Génie civil, option géotechnique.2013.
- [2] **Baba Khadidja**, slope stability evaluation by limit equilibrium and finit elements method applies to a railway in the Moroccan riff. Rabat, Maroc : open journal of civil engeneering.2012
- [3] **Dr.Aissi**, cours de CAO.
- [4] **Haouam Houda**, étude numérique d'un mur de soutènement en sol stabilisé et renforcé avec fibres et geogrilles, mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de magister en Génie civil, option géotechnique.2010.
- [5] **Houcemeddine Guerfi**, stabilisation des talus renforces par pieux, mémoire présenté pour obtenir le diplôme de magister en génie civil, option : mécanique des sols à l'université Hadj Lakhdar, Batna.
- [6] **Lefriki Souad**, effet de la variation de la cohésion sur le Comportement des pentes, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master en Génie civil option Conception et Calcul des Structures.2015.
- [7] **Manuel de référence PLAXIS** version 8.
- [8] **Medjitna Nasri Lamia**, les glissements de terrain en 2D et 3D étude comparative entre FLAC et PLAXIS, mémoire présentée pour l'obtention de diplôme de magister en génie civil, université 20 Aout 1955, Skikda.2008
- [9] **Rapport géologique**, gisement d'argile pour ciment « Bir Madhi est » - w. Msila.2017

# **ANNEXE**

**ANNEXE**

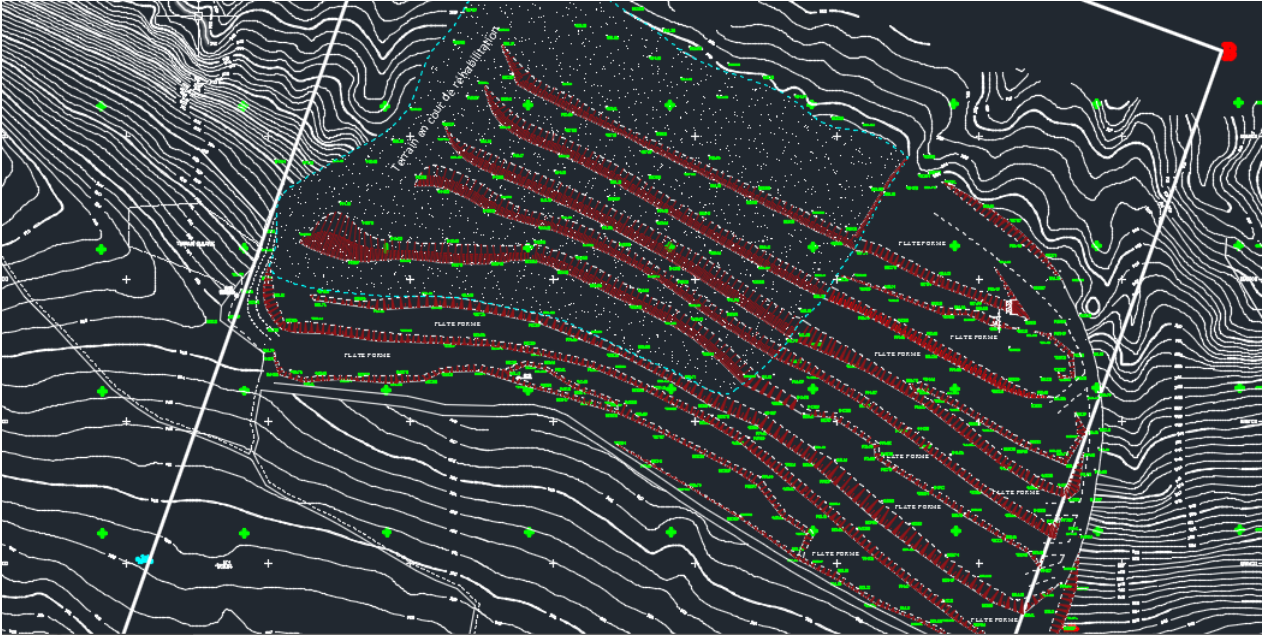


Figure 1: plan topographique actualisé en 2017 de la carrière Bir Madhi Est