

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة سعد دحلب – البليدة 1 -
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil

مذكرة نهاية التخرج

MEMOIRE DE MASTER EN GENIE CIVIL

Spécialité : Géotechnique

Thème

CONTRIBUTION A L'ETUDE NUMERIQUE DES REMBLAIS SUR DES
SOLS MOUS RENFORCES PAR DEEP MIXING

Présenté par :

M^r. AMRANE Nacef

M^r. SEDDIKI Merouane

Devant les membres de jury :

D^r: GRINE KHALED	U. Saad Dahleb-Blida	President
D^r: TOUMI ILHEM	U. Saad Dahleb-Blida	Examineur
D^r: AMAR BOUZID. Dj	U. Saad Dahleb-Blida	Promoteur

Blida, Novembre 2021

ملخص

تطرح هندسة الردم على التربة الطينية القابلة للانضغاط العديد من المشاكل (الاستقرار، انضغاط، التشوه، الانزلاق). يتمثل التعزيز عن طريق الخلط العميق في إنشاء أعمدة في التربة يتم الحصول عليها عن طريق خلط في الموقع مع مادة رابطة تعمل على تحسين قدرة التحمل التربة وتقليل انضغاط التربة. يتم معالجة تحليل ثبات منحدرات باستخدام عدة طرق تحليلية (طرق حدود التوازن) والرقمي باستخدام برنامج (PLAXIS 2D)

تم تقديم دراسة رقمية حول ثبات والاستقرار الردم على تربة لينة معززة بأعمدة الخلط العميق في هذا العمل. تم تنفيذ هذا العمل باستخدام برنامج (PLAXIS 2D) وتم اعتماد معيار Mohr-Coulomb للتربة والردم ولأعمدة، تم إجراء هذه الدراسة من خلال تغيير درجة انحدار الردم والأطوال والعدد ومسافات الأعمدة تسلط نتائج هذه الدراسة الضوء على تأثير طول وعدد وتباعده أعمدة على عامل الأمان وكذلك الأسطح المنزلة.

RESUME

La construction des remblais sur sol compressible posent de nombreux problèmes (Stabilité, tassement, déformation, glissement) sur des ouvrages en terre. Le renforcement par deep mixing consiste à créer dans le sol des colonnes obtenues en mélangeant le sol sur place avec un liant hydraulique qui permettent d'améliorer la portance du sol d'assise et réduire les tassements excessifs des structures.

L'analyse de la stabilité des talus en remblais est traitée à l'aide de plusieurs méthodes analytiques (méthodes d'équilibres limites) et numérique (utilisation du logiciel PLAXIS 2D).

Une étude numérique sur la stabilité d'un remblai sur un sol mou renforcé par des colonnes en deep mixing a été présentée dans ce travail.

Ce travail a été effectué à l'aide d'un programme d'éléments finis PLAXIS 2D, le critère de Mohr-Coulomb a été adopté pour le sol et le remblai et pour les colonnes DM cette étude a été effectuée en faisant varier le degré de la pente du remblai et les longueurs et le nombre et les espacements des colonnes DM. Les résultats de la présente étude permettent de mettre en évidence l'influence de la longueur, le nombre et les espacements des colonnes DM sur le facteur de sécurité ainsi que les surfaces de glissement.

Mots clés : deep mixing, modélisation numérique, stabilité de la pente, cercle de glissement profond, amélioration du sol

ABSTRACT

The construction of embankments on compressible soil poses many problems (Stability, settlement, deformation, sliding) on earth structures. Deep mixing reinforcement consists of creating columns in the soil by mixing the soil in situ with a hydraulic binder to improve the bearing capacity of the soil and reduce excessive settlement of the structures.

The analysis of the stability of embankment slopes is treated using several analytical methods (limit equilibrium methods) and numerical methods (use of PLAXIS 2D software).

A numerical study on the stability of an embankment on soft soil reinforced with deep mixing columns was presented in this work.

This work was carried out using a PLAXIS 2D finite element program, the Mohr-Coulomb criterion was adopted for the soil and the embankment and for the DM columns this study was carried out by varying the degree of slope of the embankment and the lengths and number and spacing of the DM columns. The results of the present study show the influence of the length, number and spacing of the DM columns on the factor of safety as well as the sliding surfaces.

Keywords: deep mixing, Numerical analysis, slope stability, deep-seated, ground improvement

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier spécialement notre encadrant Mr : **AMAR BOUZID** qui est le premier à nous faire découvrir le sujet qui a guidé notre mémoire et pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nous réflexion.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et nous reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

DÉDICACE

Je Saisie l'occasion du cet humble mémoire pour exprimer mon profond amour à mes grands-parents, mes parents et mes frères, ma famille, mes proches et tous ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

Que Dieu Vous Protège et Vous Bénisse.

AMRANE NACEF

DÉDICACE

Je dédie ce travail à toute ma famille pour m'avoir soutenu durant toutes ces années, mon père, ma mère, ma sœur et mes grands-parents et mes oncles, mes amis et amies qui n'ont cessé de m'encourager.

Un remerciement particulier est réservé pour ceux et celles qui m'ont encouragé à réaliser ce mémoire.

Que Dieu Vous Protège et Vous Bénisse.

SEDDIKI MEROUANE

Table des matières

ملخص.....
RESUME
ABSTRACT.....
REMERCIEMENTS.....
DÉDICACE
DÉDICACE
table des matières.....

Introduction généraleErreur ! Signet non défini.

CHAPITRE 1 : METHODE DE RENFORCEMENTS DE REMBLAI SUR SOLS MOUS

1.1. Introduction.....	3
1.2. Renforcement et amélioration du sol	3
1.3. Renforcement des sols par les colonnes ballastées	4
1.3.1. Définition de colonnes ballastées	4
1.4. Renforcement des sols par inclusions rigides	6
1.4.1. Définition des inclusions rigides	6
1.5. Renforcement des sols par méthode de deep mixing.....	7
1.5.1. Définition	7
1.5.2. Malaxage mécanique.....	8
1.5.3. Malaxage hydraulique	11
1.6. Géométrie et mis en place des colonnes en deep mixing.....	12
Dans le cas du traitement de terrains pollués, le matériau d'apport peut être spécialement choisi afin de neutraliser la pollution.....	12
1.6.1. Colonne	13
1.6.2. Voie humide et voie sèche (Mélange humide et sec).....	13
1.6.2.1. Deep soil mixing voie humide.....	14
1.6.2.2. Deep soil mixing voie sèche :.....	15
1.7. Caractéristiques du deep soil mixing :.....	15
1.8. Méthodes et outils.....	16
1.9. Les avantages du deep soil mixing	16
1.10. Conclusion.....	17

CHAPITRE 2 : INVESTIGATION GEOTECHNIQUE EN UTILISANT LE CODE D'ELEMENT FINIS PLAXIS 2D

2.1. Introduction.....	18
------------------------	----

2.2.	Description sommaire de l'outil de modélisation (PLAXIS)	18
2.2.1.	Définition	18
2.2.2.	Le programme d'entrée de données (Input)	18
2.2.3.	Le programme de calcul (Calculation).....	19
2.2.4.	Le programme de résultats (Output)	20
2.2.5.	Le programme courbe (Curves) :	20
2.3.	Les modèles de calcul	21
2.3.1.	Les paramètres	21
2.3.1.1.	Le module d'Young E :	21
2.3.1.2.	Le coefficient de Poisson ν :	21
2.3.1.3.	La cohésion c :.....	21
2.3.1.4.	L'angle de frottement interne ϕ :.....	21
2.3.1.5.	L'angle de dilatance ψ :.....	21
2.3.2.	Les comportements drainé et non drainé :	22
2.4.	Comparaison de la méthode LE et FE	22
2.5.	Description et mise en œuvre de PLAXIS 2D	23
2.5.1.	Configuration et densité des maillages	23
2.5.2.	Modèle constitutif du sol.....	24
2.5.3.	Éléments d'interface	24
2.5.4.	Éléments de géo grille (Geogrid)	25
2.5.5.	Éléments de plaque (plate)	26
2.5.6.	Rangées de poutres encastées (EBR) embedded beam rows	27
2.5.7.	Phases de calcul.....	29

CHAPITRE 3 : VALIDATION EN SE SERVANT D'UN EXEMPLE DE CALCUL 29

3.1.	Introduction.....	30
3.2.	Modes de rupture des colonnes deep mixing.....	30
3.3.	L'instabilité des pentes de remblais.....	32
3.4.	Modélisation par le logiciel d'éléments finis.....	32
3.4.1.	Etude de cas et modélisation par PLAXIS	32
3.4.2.	Présentation de la géométrie du sol et du remblai.....	32
3.4.3.	Modélisation numérique par PLAXIS 2D.....	34
3.5.	Facteur de sécurité	38
3.6.	Surfaces de glissement.....	39
3.7.	Conclusion	41

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING	42
4.1. Introduction.....	43
4.2. Présentation de la géométrie du modèle et de l'étude numérique	43
4.2.1. Géométrie du remblai et du sol et les colonnes.....	43
4.2.2. Modélisation du modèle avec logiciel PLAXIS 2D.....	44
4.2.3. Les étapes de modélisation du modèle.....	45
4.2.4. Modélisation du modèle sans renforcement.....	46
4.2.4.1. Discussion des résultats :.....	53
4.2.5. Modélisation du modèle avec renforcement du sol aux colonnes en deep mixing	54
4.2.5.1. Modélisation avec sh=0.5m, Eeq=52359,87 KN/m ² pour une pente 30°	54
4.2.5.2. Modélisation avec sh=1m, Eeq = 26179,93 KN/m ² pour la pente 45°	87
4.2.5.3. Modélisation avec sh=2m, Eeq = 13089,96KN/m ² pour la pente 60°	87
4.3. Résultats et discussion	87
4.3.1. Déformation des colonnes et du sol	87
4.3.2. Surface de glissement.....	88
4.3.3. Facteur de sécurité.....	88
4.3.3.1. Pour sh=0.5m, Eeq=52359,87 KN/m ²	88
4.3.3.2. POUR sh=1m, Eeq= 26179,93 KN/m ²	92
4.3.3.3. POUR sh=2m, Eeq= 13089,96 KN/m ²	96
4.4. CONCLUSION.....	100
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	Erreur ! Signet non défini.
REFERENCES

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide.....	5
Figure 1. 2: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche.....	5
Figure 1. 3: Schéma de principe de renforcement par inclusion rigides.....	6
Figure 1. 4: Domaines d'application du renforcement par inclusions rigides.	7
Figure 1. 5: Outil de malaxage standard utilisé dans les pays nordiques, et outil pour la stabilisation de masse.....	10
Figure 1. 6: Soil mixing par voie humide.	10
Figure 1. 7: Schéma des 3 types de jet-grouting.....	11
Figure 1. 8: Différentes configurations d'amélioration de sol : a) colonnes sol-ciment, b) panneaux, c) barrière continues tranchée, et d) stabilisation en masse.....	12
Figure 1. 9: Exemple des colonnes réalisé par deep mixing méthode.....	13
Figure 1. 10: Procède de deep soil mixing voie humide.....	14
Figure 1. 11: Procédé de DSM en voie sèche ; Le liant est injecté sous forme de poudre. .	15
Figure 2. 1: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique).	19
Figure 2. 2: Fenêtre principale du programme de calcul.	19
Figure 2. 3: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.	20
Figure 2. 4: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves.	20
Figure 2. 5: Éléments FE dans PLAXIS.	23
Figure 2. 6: Interfaces utilisées dans PLAXIS 2D.....	24
Figure 2. 7: Géo grille en combinaison avec des interfaces, tracé à partir de PLAXIS 2D.	25
Figure 2. 8: Plaque en combinaison avec des interfaces, tracée à partir de PLAXIS 2D.	26
Figure 2. 9: EBR implémenté dans PLAXIS 2D, et maillage déformé.....	28
Figure 2. 10: Principe 2D de l'interaction de la poutre encastree avec le sol.	28
Figure 2. 11: Principe des interfaces.....	29
Figure 3. 1: Modes de rupture des colonnes DM.....	31
Figure 3. 2: Ruptures potentielles de la stabilité des pentes.	32
Figure 3. 3: Géométrie du sol et du remblai avec des colonnes enfoncé dans le sable.	33
Figure 3. 4: Maillage déformé du remblai sur sol mou sans colonne DM.	35
Figure 3. 5: Cercle de glissement du remblai sur sol mou sans colonne DM.....	36
Figure 3. 6: Facteur de sécurité du remblai sur sol mou sans colonne DM.....	36
Figure 3. 7: Maillage déformé du modèle avec des colonnes DM à faible module.	37
Figure 3. 8: Maillage déformé du modèle avec des colonnes DM à module élevé.	38
Figure 3. 9: Surface de glissement dans le modèle avec colonnes DM à faible module.	40
Figure 3. 10: Surface de glissement dans le modèle avec colonnes DM à Module élevé. ..	41
Figure 4. 1: Géométrie du modèle.	44
Figure 4. 2: Géométrie du modèle sans colonnes DM avec une pente de 30 °.....	47
Figure 4. 3: Maillage déformé du modèle avec une pente de 30°.	47
Figure 4. 4: Cercle de glissement du modèle pour une pente de 30°.....	48

Figure 4. 5: Facteur de sécurité pour une pente de 30°	48
Figure 4. 6: Géométrie du modèle sans colonnes DM avec une pente de 45°	49
Figure 4. 7: Maillage déformé du model avec une pente de 45°	49
Figure 4. 8: Cercle de glissement du model pour une pente de 45°	50
Figure 4. 9: Facteur de sécurité pour une pente de 45 °	50
Figure 4. 10: Géométrie du modèle sans colonnes dm avec une pente de 60 °	51
Figure 4. 11: Maillage déformé du model avec une pente de 60 °	51
Figure 4. 12: Cercle de glissement du modèle pour une pente de 60 °	52
Figure 4. 13: Facteur de sécurité pour une pente de 60 °	52
Figure 4. 14: Déplacement horizontal du remblai et du sol	53
Figure 4. 15: Déplacement vertical du remblai et du sol	53
Figure 4. 16: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.	54
Figure 4. 17: Le maillage déformé du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur	55
Figure 4. 18: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur	55
Figure 4. 19: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur	56
Figure 4. 20: Géométrie du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.	56
Figure 4. 21: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur	57
Figure 4. 22: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur	57
Figure 4. 23: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur	58
Figure 4. 24: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.	58
Figure 4. 25: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur	59
Figure 4. 26: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur	59
Figure 4. 27: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur	60
Figure 4. 28: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°	60
Figure 4. 29: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.	61
Figure 4. 30: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur	61
Figure 4. 31: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur	62

Figure 4. 32: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.	62
Figure 4. 33: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.	63
Figure 4. 34: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.	63
Figure 4. 35: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.	64
Figure 4. 36: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.	64
Figure 4. 37: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.	65
Figure 4. 38: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.	65
Figure 4. 39: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.	66
Figure 4. 40: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 12 m de longueur.	66
Figure 4. 41: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°.....	67
Figure 4. 42: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.	67
Figure 4. 43: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.	68
Figure 4. 44: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.	68
Figure 4. 45: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 4 m de longueur.	69
Figure 4. 46: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.	69
Figure 4. 47: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.	70
Figure 4. 48: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.	70
Figure 4. 49: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 6 colonnes de 8 m de longueur.	71
Figure 4. 50: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.	71
Figure 4. 51: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.	72
Figure 4. 52: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 12m de profondeur.....	72
Figure 4. 53: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 12 m de longueur.	73

Figure 4. 54: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°	73
Figure 4. 55: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.	74
Figure 4. 56: Maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.	74
Figure 4. 57: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.	75
Figure 4. 58: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 4 m de longueur.	75
Figure 4. 59: Géométrie du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.	76
Figure 4. 60: Maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.	76
Figure 4. 61: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.	77
Figure 4. 62: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 8 m de longueur.	77
Figure 4. 63: Géométrie du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.	78
Figure 4. 64: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.	78
Figure 4. 65: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.	79
Figure 4. 66: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 12 m de longueur.	79
Figure 4. 67: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°	80
Figure 4. 68: Géométrie du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.	80
Figure 4. 69: maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.	81
Figure 4. 70: cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.	81
Figure 4. 71: facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 12 m de longueur.	82
Figure 4. 72: géométrie du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.	82
Figure 4. 73: maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.	83
Figure 4. 74: cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.	83
Figure 4. 75: facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 8 m de longueur.	84
Figure 4. 76: géométrie du modèle pente 30° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.	84

Figure 4. 77: maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.	85
Figure 4. 78: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.	85
Figure 4. 79: facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 12 m de longueur.	86
Figure 4. 80: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°	86
Figure 4. 81: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	89
Figure 4. 82: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	89
Figure 4. 83: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	89
Figure 4. 84: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	90
Figure 4. 85: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	90
Figure 4. 86: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	91
Figure 4. 87: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	91
Figure 4. 88: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	92
Figure 4. 89: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	92
Figure 4. 90: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	93
Figure 4. 91: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	93
Figure 4. 92: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	93
Figure 4. 93: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	94
Figure 4. 94: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	94
Figure 4. 95: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	95
Figure 4. 96: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	95
Figure 4. 97: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	96
Figure 4. 98: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	96
Figure 4. 99: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	97
Figure 4. 100: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	97
Figure 4. 101: graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.	97
Figure 4. 102: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	98
Figure 4. 103: graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.	98
Figure 4. 104: graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.	99
Figure 4. 105: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	99
Figure 4. 106: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	100
Figure 4. 107: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.....	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. 1: Phases de calcul pour $[[FOS]]$ _FE dans PLAXIS 2D.....	29
Tableau 3. 1: Propriétés des matériaux.....	33
Tableau 3. 2: Facteurs de sécurité calculés par PLAXIS et par l'exemple de calcul (ABAQUS).....	39
Tableau 4. 1: Propriétés des matériaux.....	44
Tableau 4. 2: Détail du matériau équivalent.....	45
Tableau 4. 3: Facteur de sécurité pour les pentes 30°, 45°, 60°.....	53
Tableau 4. 4: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	88
Tableau 4. 5: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	90
Tableau 4. 6: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	91
Tableau 4. 7: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	92
Tableau 4. 8: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	94
Tableau 4. 9: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	95
Tableau 4. 10: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	96
Tableau 4. 11: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	98
Tableau 4. 12: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.....	99

Tous les sols sont compressibles du moment qu'on leur applique une charge verticale. Les sols très compressibles sont appelés « sols mous ». Ce sont des sols, en principe, inaptes à supporter des ouvrages d'art, mais avec quelques dispositions pourront servir d'assise à un remblai ou à un ouvrage.

Malgré toute l'expérience acquise au cours des dernières décennies, concevoir un remblai sur un sol mou encore soulève plusieurs préoccupations liées à la caractéristique géotechnique du sol mou (faible résistance au cisaillement...).

Le passage parfois par des sols possèdent des faibles caractéristiques physique et mécanique (les sols mous) pose un problème de stabilité ou déformation des ouvrages en terre. Pour résoudre ces problèmes les ingénieurs géotechniciens disposent et développent de nombreuses techniques d'amélioration de sol.

Un certain nombre de technique sont disponibles pour améliorer le comportement géotechnique du remblai sur sol mou comme le renforcement avec, inclusions rigides, les colonnes ballastées et la deep mixing etc.

Le renforcement des sols consiste à modifier les caractéristiques d'un sol par une action Physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un Matériau plus résistant dans le but de :

- Augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement ;
- Diminuer les tassements, et les déformations ;
- Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou des vibrations importantes.

La méthode de deep mixing initialement développée au Japon, cette technique trouve un très vaste domaine d'application comme le confinement des sols pollués, le soutènement des fondations et le renforcement des sols sous les remblais pour augmenter la résistance, contrôler la déformation et réduire la perméabilité.

La deep mixing consiste à mélanger mécaniquement in situ, au moyen d'un outil spécial, le sol à un liant par un procédé permettant simultanément la désagrégation du sol sans extraction, l'injection du liant à basse pression et le malaxage du liant avec le terrain en créant des colonnes de sol renforcé.

L'analyse de la stabilité des remblais sur sol mous est traitée à l'aide de plusieurs méthodes. La modélisation par éléments finis permet d'étudier l'effet de nombreux phénomènes sur la stabilité des pentes, cette modélisation permet de définir un facteur de sécurité en réduisant simplement les caractéristiques de résistance jusqu'à ce que la rupture se produise.

Ce projet constitue une contribution à l'étude numérique des remblais sur des sols mous renforcés par deep mixing, la méthode numérique (en utilisant le logiciel PLAXIS 2D) ce travail a été effectuée en faisant varier les pentes du remblai, les espacements entre les colonnes et la longueur des colonnes (profondeur de renforcement), les résultats de la présente étude permettent de mettre en évidence les facteurs qui influent sur le facteur de sécurité.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : une analyse bibliographique, un aperçu sur renforcement et amélioration des sols mous et nous présentons en générale les techniques de traitement de sol par colonne ballastées et inclusion rigide et en particulier la méthode de renforcement des sols par deep mixing

Chapitre 2 : une présentation du programme d'éléments finis PLAXIS 2D qui permet de réaliser des analyses de déformation et de stabilité des ouvrages géotechniques et qui déterminent le facteur de sécurité et la surface critique de glissement.

Chapitre 3 : nous présentons une validation en utilisant un exemple de calcul, la modélisation et faite avec le code d'éléments finis PLAXIS 2D pour voir les modes de rupture des colonnes et les facteurs de sécurité

Chapitre 4 : est consacré à la réalisation d'une étude paramétrique en utilisant le logiciel PLAXIS du remblai sur sol mous renforcé par deep mixing en variant les pentes du remblai et l'espacement des colonnes et à chaque fois le nombre et la longueur des colonnes et voir l'effet de ses facteurs sur l'augmentation du facteur de sécurité et sur la surface de glissement

Enfin, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats lors de cette étude.

**CHAPITRE 1 : METHODE DE
RENFORCEMENTS DE REMBLAI
SUR SOLS MOUS**

1.1. Introduction

Si une structure à construire serait instable dans des conditions données de charges et du sol d'origine, ou si les déformations attendre pendant et /ou après la construction dépasserait la valeur admissible du point de vue de la fonction de la structure, les contre-mesures nécessaires doivent être pris. Ce qui suit quatre approches peuvent être appliqué :

- (a) Changer le type de structure et/ou le type de sa fondation.
- (b) Remplacer le sol meuble par un sol de meilleure qualité.
- (c) Améliorer les propriétés de sol meuble.
- (d) Introduire un matériau de renforcement dans un sol meuble.

« Amélioration du terrain » couvre (b), (c) et (d) ci-dessus, et défini comme toute contre-mesure donnée au sol afin d'atteindre la performance réussie de la structure si autrement inaccessible.

Les techniques d'amélioration des sols sont classées, sur la base de leurs principes de fonctionnement, en remplacement, densification, consolidation/assèchement, jointoiment, stabilisation des adjuvants, stabilisation thermique, renforcement et divers.

Dans ce chapitre l'étude est consacrée aperçu sur amélioration du sol et une technique d'amélioration du terrain appelé deep mixing.

1.2. Renforcement et amélioration du sol

De nos jours, l'industrie de la construction est souvent confrontée à la problématique de la qualité géotechnique des terrains disponible. La forte compressibilité de beaucoup de ces sols impose alors la nécessité de développer des techniques de renforcement permettant de rendre ces terrains utilisables.

Il existe de nombreuses méthodes utilisées pour renforcer les sols de mauvaise qualité. Ces méthodes permettent de réduire les tassements des remblais édifiés sur sols compressibles. La fiabilité, les contraintes et la rentabilité du renforcement varient suivant la méthode utilisée.

On peut citer parmi ces méthodes (pré-chargement ; colonne ballastée et colonne de sable compacté ; colonne de jet grouting ; inclusions rigides et deep mixing autrement dit soil mixing ou bien mélange en profondeur).

1.3. Renforcement des sols par les colonnes ballastées

1.3.1. Définition de colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement du sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent aucun liant sur toute leur profondeur.

Le procédé est adapté pour traiter les sols présentant des caractéristiques mécaniques faibles à très faibles (sables limoneux, argiles, limons, remblais hétérogènes...), mais il doit être exclu dans les sols présentant un caractère évolutif (matériaux organiques, tourbes...) dans lesquels l'étreinte latérale autour des colonnes n'est pas garantie à long terme. La réalisation des colonnes ballastées se fait suivant deux différentes techniques :

- Par voie sèche : On utilise le lançage à l'air.
- Par voie humide : On utilise le lançage à l'eau.

Le choix de l'outil et de la méthode de réalisation des colonnes dépend de la nature et de l'état de saturation du sol, des caractéristiques du matériau d'apport ainsi que du domaine d'utilisation du terrain renforcé. Les matériaux d'apport doivent donc être de qualité et de granulométrie contrôlée et doivent être les plus homogènes possibles (graves naturelles, roulées ou concassées).

La réalisation des colonnes par voie humide consiste à saturer le sol dans la zone du renforcement et à faire descendre un outil vibreur. La saturation du sol ainsi que les vibrations générées provoquent un phénomène local et temporaire de liquéfaction du sol. Cela permet à l'outil de s'enfoncer dans le sol sous l'effet de son poids propre.

Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte, le lançage à eau est réduit, de telle façon que l'espace annulaire autour du vibreur et ses extensions reste ouvert grâce à la pression hydrostatique. Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur et que les particules fines du sol en place sont bien évacuées à l'extérieur du trou.

En remontant et en redescendant le vibreur de façon contrôlée par passes successives jusqu'à la surface, le matériau d'apport est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée.

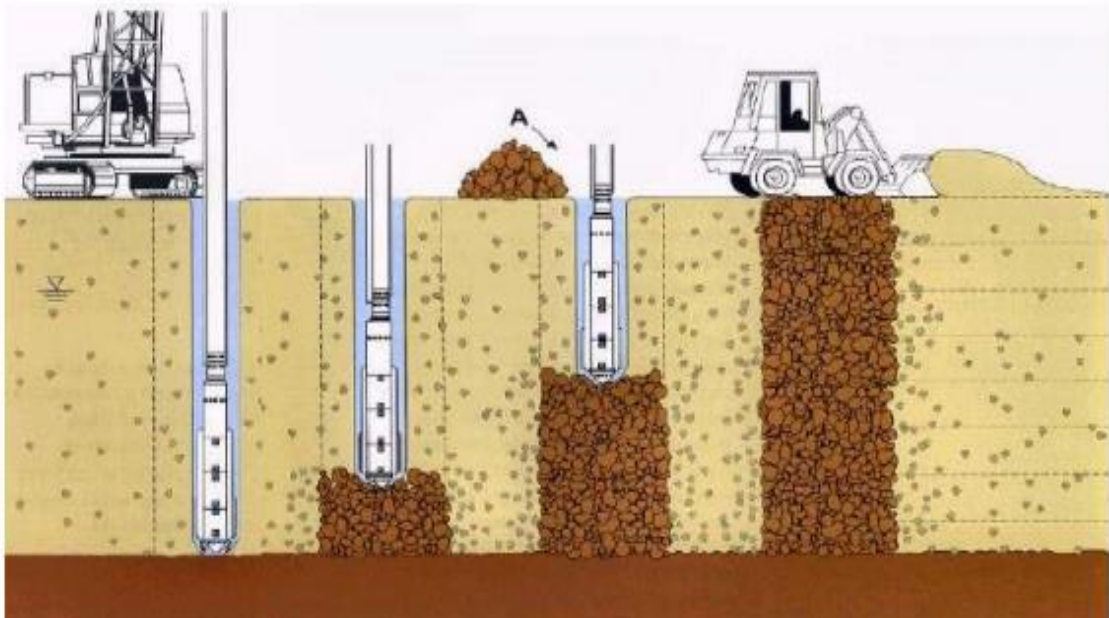


Figure 1. 1: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide.

Dans le cas de la réalisation des colonnes par voie sèche, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie. Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil. Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Le vibreur redescend pour expansé le matériau latéralement dans le sol et le compacter. La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu.

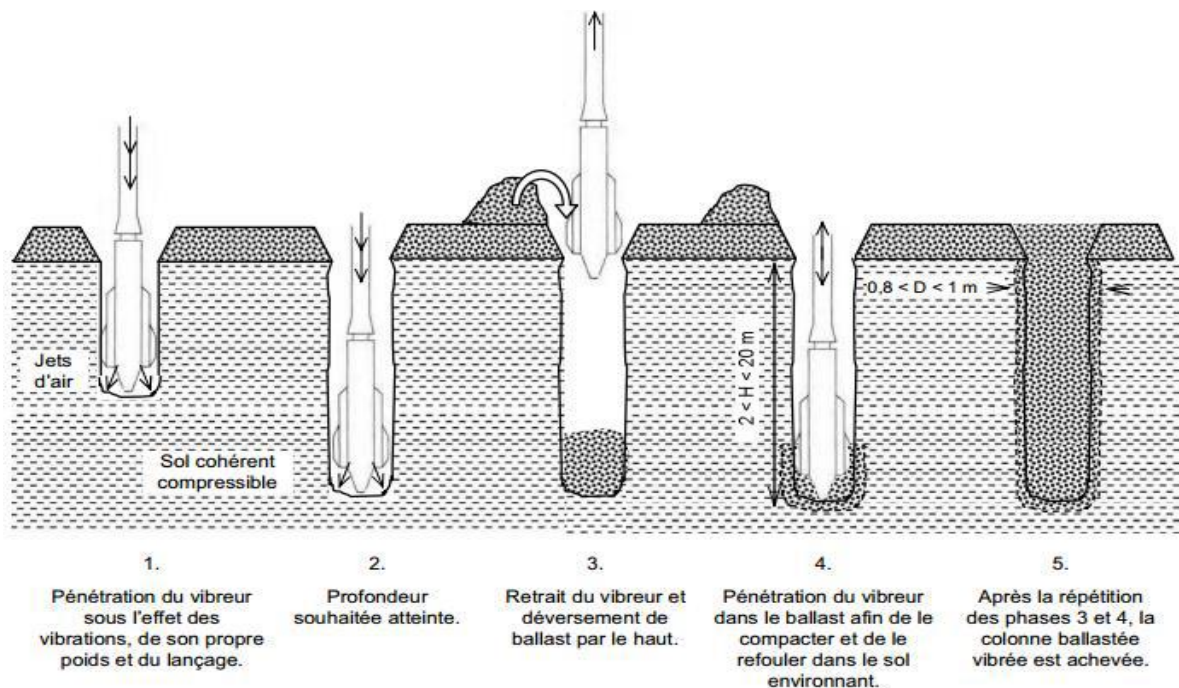


Figure 1. 2: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche.

1.4. Renforcement des sols par inclusions rigides

1.4.1. Définition des inclusions rigides

Le renforcement de sols compressibles par inclusions rigides est une technique développée dans les années 1970. Cette technique est devenue courante dans le monde afin de remplacer beaucoup d'autres techniques traditionnelles qui sont longues et coûteuses telle que le pré-chargement, le remplacement de sols, etc. Cette technique est basée sur le principe de transmission de charge à travers des inclusions vers un horizon porteur et ceci afin d'améliorer la portance du sol de mauvaise qualité et de réduire les tassements excessifs.

Le principe de cette technique de renforcement est basé sur trois éléments principaux qui résument son fonctionnement (Figure 1.3) :

- Les inclusions rigides installées dans le sol compressible qui développent des efforts de frottement le long du fût de l'inclusion ainsi que des efforts en pointe. La possibilité de coiffer les inclusions par de petites dallâtes permet d'optimiser l'efficacité de cette technique.
- Le matelas de transfert de charge permettant d'assurer le mécanisme de répartition de charges et la transmission des efforts jusqu'aux têtes des inclusions.
- La nappe de géo synthétique permet d'augmenter les efforts pris en charge par les inclusions. Le tassement différentiel entre le sol du matelas granulaire et la tête des inclusions met cette nappe en tension, ce qui favorise l'efficacité des inclusions due au report de charge par effet membrane.

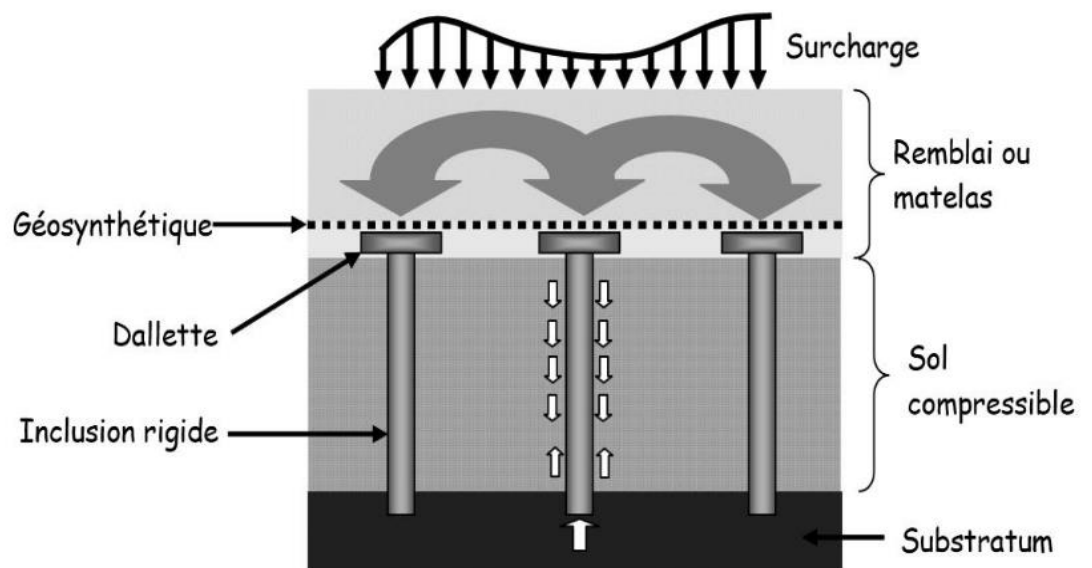


Figure 1. 3: Schéma de principe de renforcement par inclusion rigides.

Cette technique de renforcement présente de nombreuses applications qui sont assez variées. Divers exemples que l'on trouve dans la littérature mettent en valeur l'intérêt de cette technique :

- Renforcement des dallages et des plates-formes industrielles et commerciales (figure 1.4.a).
- Renforcement des réservoirs de stockage et des ouvrages de stations d'épuration (figure 1.4.b).
- Renforcement des remblais d'accès aux ouvrages d'arts, permettant de réduire les tassements différentiels entre la voie et la culée (figure 1.4.c).
- Renforcement des voiries et des remblais ferroviaires (figure 1.4.d).

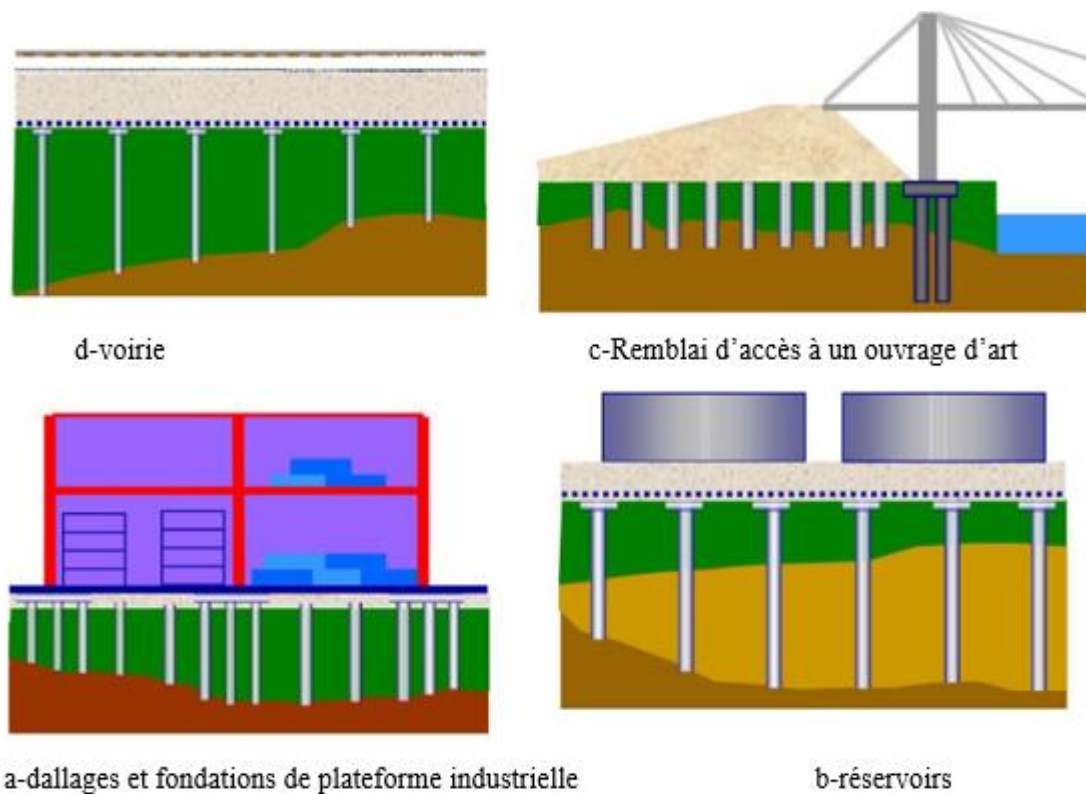


Figure 1. 4: Domaines d'application du renforcement par inclusions rigides.

1.5. Renforcement des sols par méthode de deep mixing

1.5.1. Définition

Une technique efficace et souple pour apporter des solutions innovantes pour de nombreuses configurations géotechniques.

Créée dans les pays scandinaves et au Japon pendant les années soixante, la technique de soil mixing est utilisée comme une méthode de traitement de sol permettant d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et environnementales. Elle constitue une solution dans les domaines des fondations spéciales pour le secteur de la construction ; un moyen rentable d'améliorer les sols.

Il s'agit de mélanger mécaniquement le sol sur place avec un liant hydraulique en utilisant un outil approprié. Cette méthode de renforcement de sol présente de nombreux avantages qui font qu'elle est en plein essor depuis le début années 1990. En effet, cette technique ne nécessite pas d'avoir à gérer de déblais et de mise en décharge, ce qui la rend plus économique et écologique.

Ce procédé permet d'obtenir une amélioration significative des propriétés mécaniques et physiques des sols traités en place, appelés soil mix (ou sol-ciment) après malaxage avec du ciment ou d'autres liants. Ces sols présentent en général une plus grande résistance, une perméabilité moindre et une plus faible compressibilité que les sols d'origine. Afin de préserver l'environnement, des agents oxydants chimiques ou autres réactifs peuvent également être utilisés pour confiner ou neutraliser les polluants.

De plus, cette technique est polyvalente, vu qu'elle peut être utilisée pour la stabilisation des pentes, la réalisation de parois étanches ainsi que le renforcement des terrains.

Les mélanges de sol sont fabriqués directement in situ en mélangeant le sol en place avec un liant hydraulique. L'avantage avec ce type de procédé est que l'on peut construire sans avoir besoin d'excaver le sol. Ces conditions de fabrication n'impliquent également pas de compactage.

Contrairement aux méthodes de traitement de sols en surface, le matériau étant généralement considéré comme auto plaçant. Le grand nombre de techniques mises au point au cours du dernier demi-siècle s'explique par un élargissement du domaine d'application, mais aussi par la nécessité de s'adapter aux différents types de sol et aux conditions locales.

1.5.2. Malaxage mécanique

Lorsque le malaxage est mécanique, l'outil est positionné soit en tête soit le long de la tige de forage. Un effort de malaxage localisé résulte en une variation des caractéristiques du matériau suivant la hauteur de l'élément. En revanche, un malaxage global permet une meilleure homogénéisation, notamment lorsque les travaux sont effectués à travers plusieurs couches de sol dont les caractéristiques intrinsèques varient considérablement. En pratique,

le sol intégré dans la matrice sol-ciment de la colonne comme matériau de construction reste à la même profondeur suite au malaxage. En « soil-mixing » une zone de transition au niveau du changement de type de sol est par ailleurs souvent rencontrée. Elle correspond à une certaine section de la colonne pour laquelle le matériau est constitué des deux sols initialement superposés et du liant.

À partir des années 70 apparaissent les techniques de mélange par voie sèche, dont les deux principaux procédés sont le Dry Jet Mixing (DJM) mis au point au Japon, et les colonnes chaux-ciment originaires des pays nordiques (Figure 1.4.a). En Europe, un système appelé TREVIMIX a également été développé en Italie dans les années 1980 (diamètre de colonne = 0,4 à 0,8 m ; profondeur de traitement = 20 à 25 m). Ces différentes méthodes sont économiques. Pour des raisons pratiques, leur application est cependant cantonnée aux sols meubles à forte teneur en eau. En effet, pour ce type de terrain et de traitement, la teneur en eau doit être au moins de 20 % afin d'assurer les réactions d'hydratation. Le principe consiste à faire pénétrer l'arbre de mélange jusqu'à la profondeur désirée tout en désagrégeant le sol grâce aux lames de l'outil qui tournent dans le sol. Ensuite, l'outil est remonté en injectant le liant sous forme de poudre avec de l'air comprimé, et de manière rotative suivant un plan horizontal. Au Japon, différentes extensions de cette méthode proposent d'utiliser deux arbres mélange ou un mélange bidirectionnel afin d'améliorer le rendement et la qualité du malaxage. Aux États-Unis utilisent un outil de mélange rotatif à axe horizontal situé à l'extrémité du bras mécanique de l'engin. Ce système permet la réalisation d'éléments massifs (Figure 1.5.b).

Ces différentes méthodes d'introduction du liant par voie sèche sont finalement vraiment attractives pour des cas d'applications spécifiques. Autrement, elles procurent une moins bonne homogénéité que les méthodes par voie humide qui permettent une meilleure dispersion du coulis, une pré-hydratation du ciment et un temps de malaxage plus long. Cela se traduit généralement par une plus grande variabilité de résistance et de densité du matériau. Néanmoins, la méthode par voie sèche modifiée a récemment été développée pour rendre la méthode applicable aux sols avec une très faible teneur en eau, notamment en ajoutant aux équipements actuels une buse permettant l'injection d'eau.

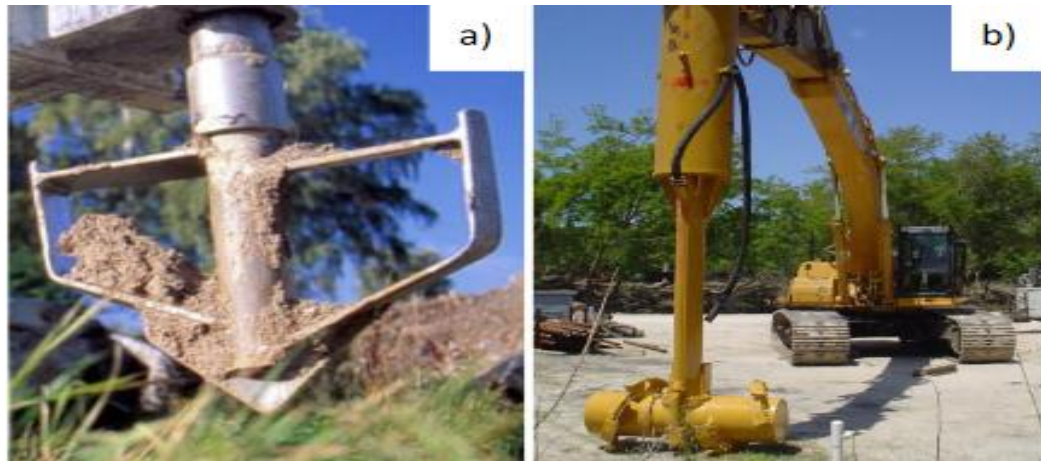


Figure 1. 5: Outil de malaxage standard utilisé dans les pays nordiques, et outil pour la stabilisation de masse.

La méthode de malaxage par voie humide est la méthode la plus fréquemment utilisée et donc logiquement celle qui compte le plus grand nombre de procédés. Cette méthode d'exécution est adaptée aux argiles, limons et sables fins, et généralement préférée à la voie sèche lorsque la résistance initiale du sol est élevée et sa teneur en eau faible.

Le liant est injecté sous la forme d'un coulis préparé directement dans une centrale installée sur chantier. Ce dernier sort à l'extrémité de l'outil de malaxage à travers un orifice, en général, à la fois pendant la phase de descente et d'extraction de l'outil. Dans certains cas, il est possible d'associer au coulis du sable ou des additions afin d'améliorer les caractéristiques du mélange. Les outils de malaxage et le type de foreuse utilisés qui permettent la réalisation de colonnes sont fortement similaires à ceux présentés précédemment lorsque le liant est injecté à sec (Figure 1.5). Cependant, les entreprises poussées à innover pour répondre à un nombre croissant de cas spécifiques ont développé une plus grande variété d'outils de mélange pour les méthodes par voie humide.



Figure 1. 6: Soil mixing par voie humide.

1.5.3. Malaxage hydraulique

Le « jet-grouting » utilise un jet de fluide (coulis, air, eau) à haute énergie cinétique comme moyen de mélange. La méthode consiste à réaliser dans un premier temps un forage jusqu'à une cote prédéfinie. La colonne de béton de sol est ensuite créée en érodant le sol et en le mélangeant avec un coulis de ciment. Cette action est possible grâce à la remontée progressive et rotative du train de tige, qui par ailleurs oscille pendant l'injection à très haute pression du coulis (300 à 500 bars).

Au final, les éléments formés sont des colonnes de forme cylindrique dont le diamètre est compris entre 0,8 et 3,5 mètres selon la technique d'injection utilisée. En pratique, les colonnes formées ont une surface vraiment irrégulière, dont la géométrie peut être approchée à partir d'un modèle fractal. Comme la montre (la figure 1.7), il existe au total 3 types de jet-grouting

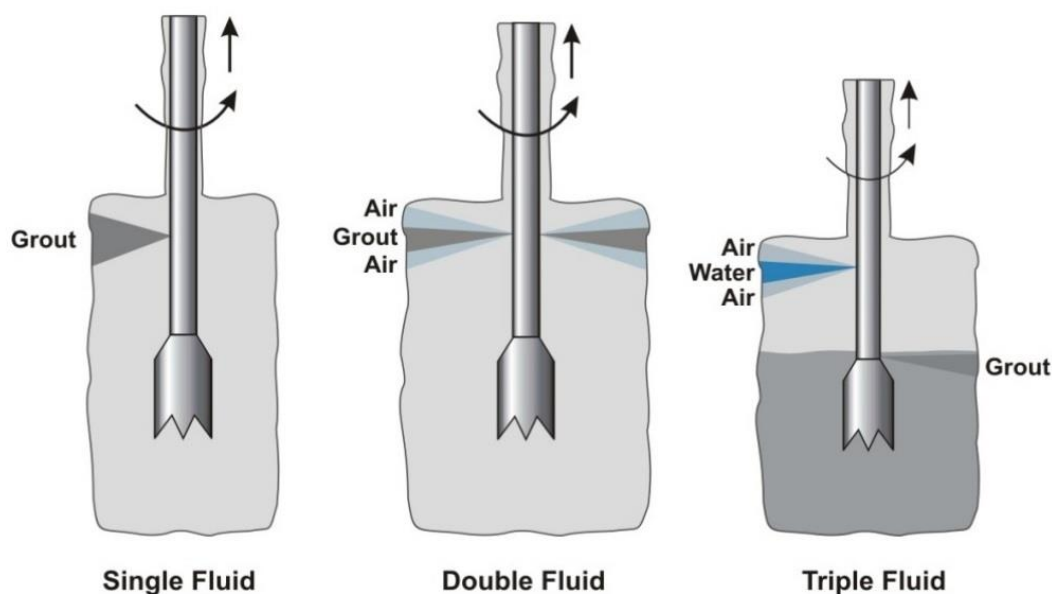


Figure 1. 7: Schéma des 3 types de jet-grouting.

Le système par jet simple consiste à injecter dans le sol un coulis de ciment à travers un ou plusieurs orifices. Dans ce cas, le coulis permet à la fois le malaxage et la cimentation du mélange. Pour le système à jet double, le jet de coulis est focalisé par un jet d'air qui améliore l'efficacité du mélange et le rayon d'action du coulis. L'introduction de l'air facilite par ailleurs la remontée des spoils (phénomène d'air lift). Enfin, avec le système triple jet la déstructuration du sol est clairement dissociée de la cimentation. Un jet d'eau focalisé par un jet d'air placé en amont permet en effet de désagréger le sol, avant l'introduction du coulis qui a pour unique fonction de cimenter le sol.

L'avantage propre au jet-grouting réside en sa capacité à réaliser des colonnes de béton de sol malgré une empreinte au sol dérisoire et des conditions difficiles d'accès. Cela s'avère souvent très utile en travaux de renforcement (plates-formes de voies ferrées, fondations existantes de bâtiment).

1.6. Géométrie et mis en place des colonnes en deep mixing

La méthode de soil-mixing initialement utilisée en traitement des sols pour réduire les tassements et améliorer la stabilité des sols compressibles, est aujourd'hui de plus en plus adoptée pour la réalisation de murs de soutènement, d'écrans d'étanchéité de fondations, de caisson contre la liquéfaction des sols, de reprises en sous-œuvre, et pour le confinement de sols pollués. La Figure 1.8 montre différentes géométries que l'on peut rencontrer dans le domaine des améliorations de sol. Colonnes, les panneaux, les tranchées et la stabilisation de masse.

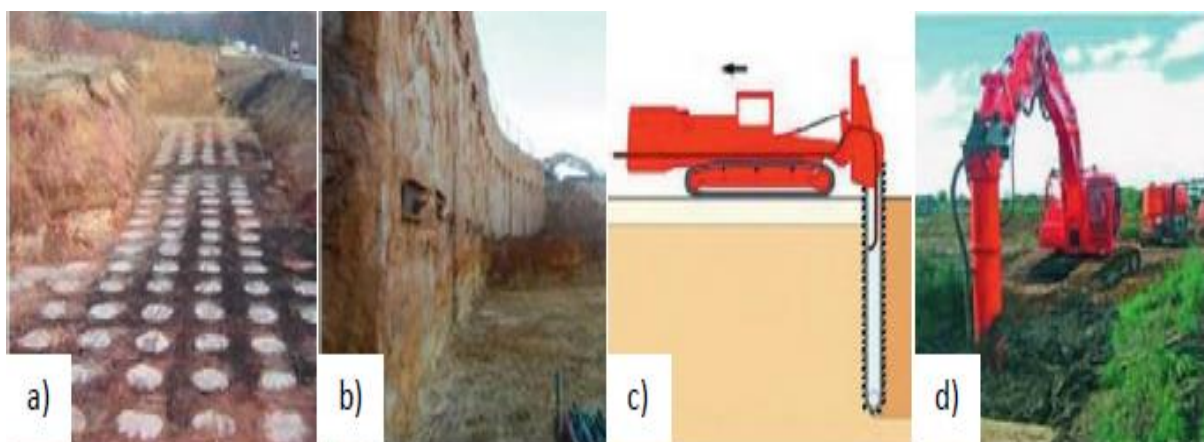


Figure 1. 8: Différentes configurations d'amélioration de sol : a) colonnes sol-ciment, b) panneaux, c) barrière continues tranchée, et d) stabilisation en masse.

Le soil mixing profond ou « Deep soil mixing », consiste à créer des éléments de soil mixing en profondeur sans aucun remaniement de matériaux après avoir été mis en place (maturation et durcissement du mélange in-situ).

Les divers procédés comportent généralement trois étapes de réalisation : déstructuration mécanique du terrain en place, incorporation et homogénéisation du mélange. La réalisation de ces étapes est très souvent simultanée.

Le matériau d'apport est un liant dont le choix et le dosage sont ajustés de manière à obtenir les caractéristiques hydrauliques ou mécaniques requises par le projet.

Dans le cas du traitement de terrains pollués, le matériau d'apport peut être spécialement choisi afin de neutraliser la pollution.

1.6.1. Colonne

Dans le domaine des fondations, les colonnes ont toujours été une géométrie les plus utilisées. En deep soil mix, elles peuvent servir isolées en maillage à de l'amélioration "globale" du sol pour servir d'appuis à un radier, dans un maillage plus serré pour des sols plus faibles ou pour se passer de radier elles peuvent former un bloc ou encore côte à côte de façon sécante pour former des parois étanches ou non.

Les colonnes sont formées à l'aide de machines qui font tourner une vis sans fin dans le sol. Lors de la phase de descente, la vis tourne de manière à ne pas s'enfoncer "optimal ment" dans le sol (comme une vis par exemple), mais plutôt de manière à bousculer le sol pour le déstructurer. Ensuite, la vis est remontée de la même façon avec en plus une injection soit de coulis soit de liant sous forme de poudre.



Figure 1. 9: Exemple des colonnes réalisé par deep mixing méthode.

1.6.2. Voie humide et voie sèche (Mélange humide et sec)

Deux types de deep mixing méthode sont utilisés : le mélange humide et le mélange sec. Le mélange humide consiste à injecter des liants sous forme de lisier (humide) pour se mélanger au sol.

Le mélange à sec utilise des liants sous forme de poudre (sèche) qui réagissent avec l'eau déjà présente dans le sol.

1.6.2.1. Deep soil mixing voie humide

La méthode humide est plus appropriée dans les argiles molles, les limons et les sables à grains fins avec une teneur en eau plus faible et dans des conditions de sol stratifiées comprenant des couches de sol molles et rigides ou denses intercalées.

Cette méthode consiste en un outil de mélange spécial qui est inséré dans le sol sur place. Cet outil de mélange comprend une tige de forage, constitué d'un tube central, de « couteaux » transversaux et d'une pointe de forage. Le forage ne provoque aucune vibration, et est accomodé par l'écoulement du coulis de ciment provenant de buses placées intentionnellement à l'extrémité de la tarière. Lorsque la profondeur de conception est atteinte, la phase de construction des colonnes de mélange de sol profond est lancée.

Le mélange de sol humide en masse est effectué avec un outil de mélange rotatif à axe horizontal à l'extrémité d'un bras de pelle sur chenilles. La suspension de liant est injectée à travers un tuyau d'alimentation qui est fixé au bras.

Cette technique crée des colonnes individuelles en béton de sol, des rangées de colonnes superposées, qui ont toutes une résistance et une rigidité de conception spécifiques. Le mélange de sol humide convient à tous les types de sol, y compris même les sols organiques. Avec cette méthode, le traitement du sol est possible à des profondeurs allant jusqu'à 40 mètre.

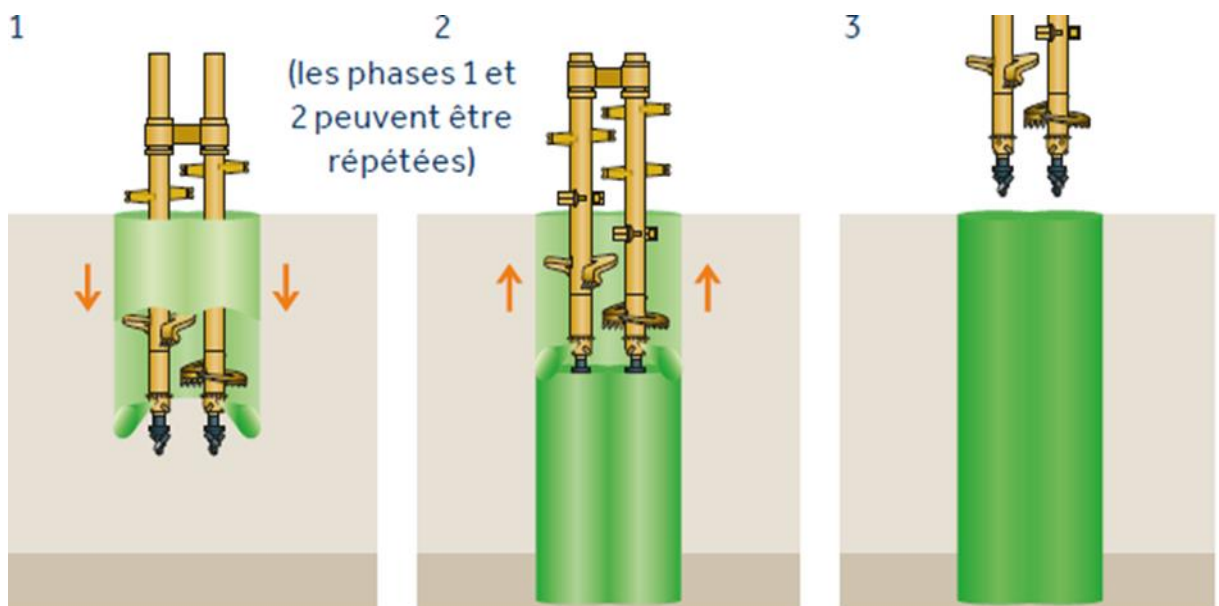


Figure 1. 10: Procède de deep soil mixing voie humide.

1.6.2.2. Deep soil mixing voie sèche :

La méthode sèche est plus adaptée aux sols mous avec une teneur en humidité très élevée, et donc appropriée pour le mélange avec des liants secs.

Le mélange de sol sec est une technique d'amélioration du sol qui mélange mécaniquement le sol avec un liant cimentaire sec pour créer du béton de sol afin d'améliorer les sols faibles tels que les argiles molles à haute humidité, les tourbes. Une perceuse à grande vitesse se déplace dans le sol avec une tige de forage qui a des lames de mélange radiales près du fond afin de construire les colonnes. Lors de la pénétration de l'outil dans le sol, il cisaille les sols pour les préparer au mélange. Au fur et à mesure que l'outil atteint la profondeur de conception spécifiée, le liant est injecté à travers l'acier de forage où il est assorti au sol au fur et à mesure que l'outil est sorti.

Le mélange de masse de sol sec est effectué avec un outil de mélange rotatif à axe horizontal positionné à l'extrémité d'un bras de pelle à chenilles. Le liant est injecté dans l'outil de mélange du sol par un tuyau d'alimentation qui est fixé au bras de la pelle sur chenilles. Avec un mélange de sol sec, le traitement du sol est possible jusqu'à des profondeurs de 30 mètre.

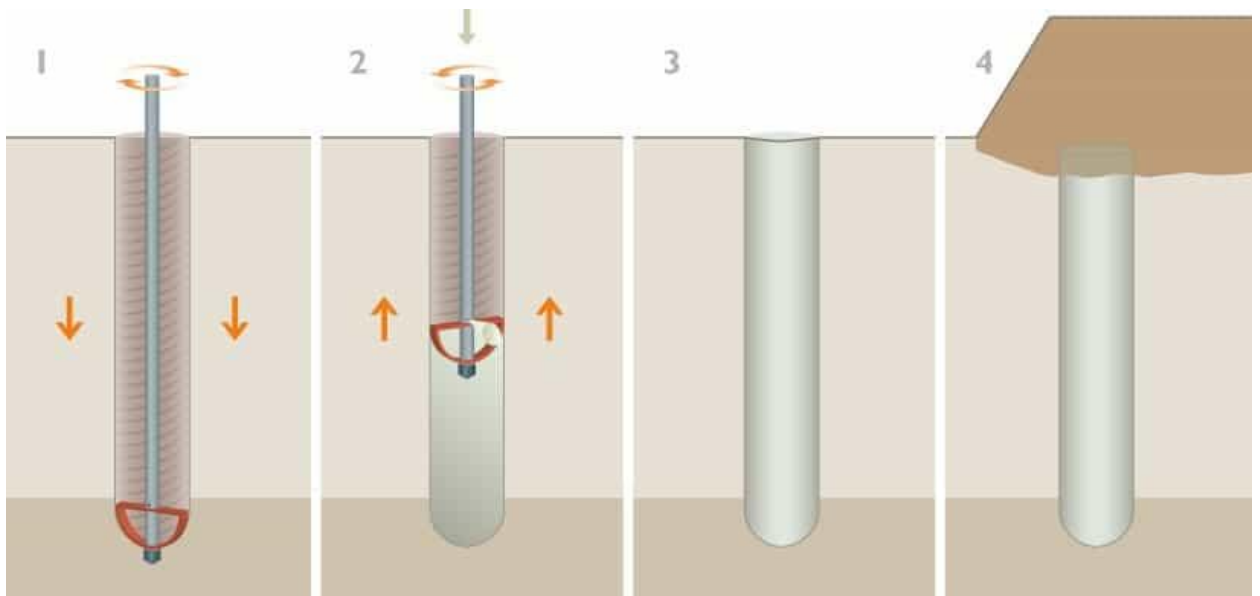


Figure 1. 11: Procédé de DSM en voie sèche ; Le liant est injecté sous forme de poudre.

1.7. Caractéristiques du deep soil mixing :

Les différentes caractéristiques du soil mixing qui constituent des atouts pour que cette méthode de renforcement prenne le dessus sur beaucoup d'autres conventionnelles. Parmi ses avantages, on peut citer :

- La rapidité de la construction des structures de renforcement.

- La possibilité de calibration des caractéristiques mécaniques du renforcement en contrôlant le dosage en ciment et en le choisissant d'une manière à ce qu'il convienne aux exigences des projets.
- La fiabilité et la précision au niveau des outils de soil mixing permettent de créer des éléments ayant des formes géométriques maîtrisables et homogènes.
- La variabilité des domaines d'application du soil mixing allant du renforcement des structures jusqu'au traitement des sols pollués, rend cette technique très attractive.
- L'utilisation efficace des ressources est un atout majeur de cette technique. Le soil mixing permet l'utilisation du sol existant sur place sans avoir recours au transport des matériaux granulaires.
- La technique de soil mixing est considérée comme écologique. Elle produit peu de déblais, de faible nuisance sonore en comparaison avec beaucoup d'autres techniques de renforcement, ainsi que peu de vibration.

1.8. Méthodes et outils

La méthode de soil mixing consiste à créer un mélange de sol, d'eau et d'un liant afin d'obtenir un matériau pouvant durcir dans le temps et monter en caractéristiques mécaniques. Lorsque la teneur en eau sur place est supérieure à la limite de plasticité du sol, le liant hydraulique est injecté par voie sèche sans apport d'eau. Cependant, lorsque la teneur en eau naturelle du sol est inférieure à la limite de plasticité du sol, il y aura une injection de coulis contenant un mélange d'eau et de liant.

1.9. Les avantages du deep soil mixing

Le deep Soil Mixing est basé sur le concept d'amélioration de sols naturels ou détritiques afin de respecter des critères de conception, de résoudre des problèmes de stabilité lors d'excavations, ou d'éviter de recourir à des fondations profondes plus coûteuses. Le champ d'application très large, ainsi que les différentes méthodes de réalisation du Soil Mixing, permettent d'obtenir des solutions géotechniques sécuritaires et économiques. La mise en œuvre de liants et adjuvants non toxiques ou encore un volume de rejets ou déblais très réduit par rapport à d'autres procédés, sont quelques-unes des caractéristiques qui permettent de qualifier le Soil Mixing de technologie respectant l'environnement.

- ❖ Économique.
- ❖ Alternative à des fondations profondes plus coûteuses.
- ❖ Quasiment pas de déblais.

- ❖ Absence de vibrations.
- ❖ Applications variées.
- ❖ Rapidité d'exécution.
- ❖ Bon bilan environnemental.

1.10. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre et d'une manière générale les techniques les plus utilisés en pratique pour l'amélioration des sols.

La méthode de traitement par colonnes ballastées est largement utilisée pour résoudre les problèmes de stabilité des ouvrages sur sols compressibles.

Cela avait pour but de placer le cadre de ce travail ainsi que de souligner la place du deep soil mixing dans les différentes méthodes.

Ont à présenter les différents Classification des méthodes de mélange en profondeur

1/ malaxage mécanique.

2/malaxage hydraulique.

Ensuite, les différentes méthodes d'exécution et de mise en place du soil mixing on était décrites de manière générale (panneaux ; tranchée ; stabilisation en masse) et de manière plus précise on a présenté les colonnes réalisées par la méthode du deep mixing pour le renforcement et l'amélioration des sols sois par voie humide ou par voie sèche.

Ainsi que les Caractéristiques et les Méthodes et outils et Les avantages du deep soil mixing a étai présenté d'une manière générale dans ce chapitre.

- ❖ Dans le cadre de notre étude on s'intéresse plutôt au « DEEP MIXING », dont l'utilisation est assez variée. Cette technique peut être considérée comme un bon moyen pour renforcer les remblais sur des sols mous, stabiliser les pentes, confiner des sols pollués, etc.
- ❖ Notre étude s'intéresse ou réalisation de colonne de mélange profond par malaxage mécanique (THE MECHANICAL DEEP MIXING COLUMN).

**CHAPITRE 2 : INVESTIGATION
GEOTECHNIQUE EN UTILISANT
LE CODE D'ELEMENT FINIS
PLAXIS 2D**

2.1. Introduction

Pour les problèmes géotechniques pratiques, la méthode conventionnelle de l'équilibre limite (EL) est généralement utilisée pour déterminer le facteur de sécurité.

Ces dernières années, l'utilisation pratique de la méthode des éléments finis (MEF) est en augmentation et est utilisée pour faire face à de nombreux problèmes de valeurs limites.

Pour les calculs numériques, le programme d'éléments finis PLAXIS 2D version 2015.02 est utilisé pour cette étude.

2.2. Description sommaire de l'outil de modélisation (PLAXIS)

2.2.1. Définition

PLAXIS est un programme d'élément finis a été développé en premier lieu à l'Université Technologique de Delft (Les Pays Bas), le code, initialement réalisé pour analyser les digues en terre, a vu son champ d'application se développer largement afin de pouvoir traiter différents types de problèmes géotechniques (fondations, tunnels, ouvrages de soutènement, etc.). PLAXIS permet de réaliser des analyses de déformation et de stabilité des ouvrages géotechniques.

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculation, Output et Curves) ; (Entrée, Calcul, Sortie et Courbes).

2.2.2. Le programme d'entrée de données (Input)



Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

CHAPITRE 2 : INVESTIGATION GEOTECHNIQUE EN UTILISANT LE CODE D'ELEMENT FINIS PLAXIS 2D

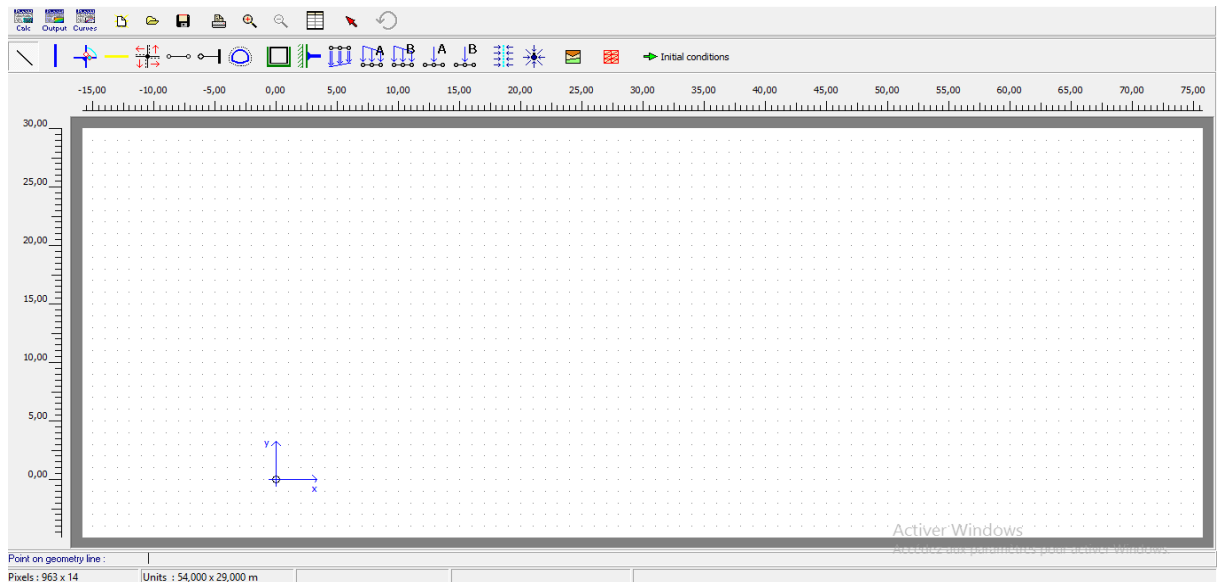


Figure 2. 1: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique).

2.2.3. Le programme de calcul (Calculation)



Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

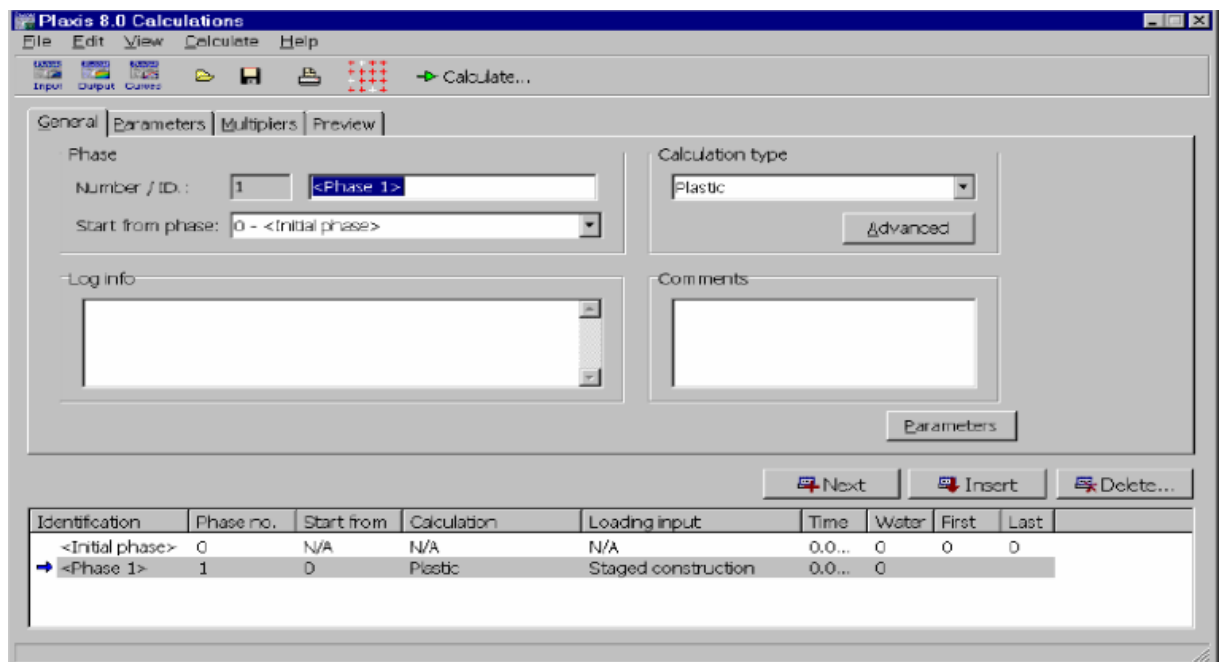


Figure 2. 2: Fenêtre principale du programme de calcul.

2.2.4. Le programme de résultats (Output)



Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés

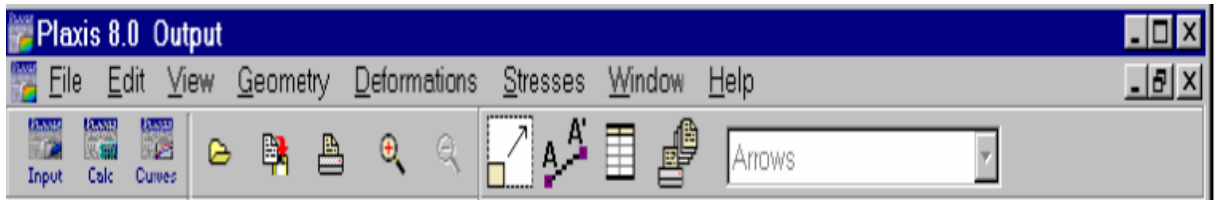


Figure 2. 3: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.

2.2.5. Le programme courbe (Curves) :



Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.



Figure 2. 4: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves.

La réalisation d'une modélisation avec PLAXIS se traduit en général, par l'enchaînement des étapes suivantes :

- Utilisation du préprocesseur « PLAXIS Input », pour la génération des données (Maillage, jeu des données et contraintes initiales).
- Lancement du code de calcul éléments finis « PLAXIS Calculate », pour effectuer La résolution numérique du problème étudié.
- Utilisation de post-processeur « PLAXIS Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
- Utilisation de post-processeur « PLAXIS Curve », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes,etc.).

2.3. Les modèles de calcul

Les modèles de calcul implémentés dans logiciel PLAXIS couvrent pratiquement l'ensemble des aspects théoriques et expérimentaux du comportement des sols courants :

- **Elasticité linéaire de Hooke** pour simuler le comportement des structures rigides massives placées dans le sol.
- **Plasticité parfaite isotrope de type Mohr-Coulomb** pour simuler le comportement de la plupart des sols fins.
- **Elasto-plasticité de type hyperbolique avec écrouissage en cisaillement** pour simuler le comportement des sables et des graves, mais aussi de l'argile et des limons.
- **Elasto-plasticité de type Cam-Clay** pour simuler le comportement des argiles molles normalement consolidées.
- **Viscoplasticité** pour simuler le comportement des sols mous en fonction du temps (fluage et consolidation).

2.3.1. Les paramètres

Ce modèle Mohr-Coulomb est utilisé comme une première approximation du comportement des sols.

Il comporte cinq paramètres :

- 2.3.1.1. Le module d'Young E** : défini soit par le module tangent initial E_0 , soit par le module sécant à 50% de la résistance en compression E_{50} .
- 2.3.1.2. Le coefficient de Poisson ν** : évalué par l'intermédiaire du coefficient de pression des terres au repos $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ pour un chargement gravitaire, dont les valeurs sont comprises entre 0.3 et 0.4.
- 2.3.1.3. La cohésion c** : nulle ($c=0$) pour les sables, mais constante non nulle ($c \neq 0$) ou évoluant avec la profondeur pour les argiles.
- 2.3.1.4. L'angle de frottement interne ϕ** : qui conditionne la résistance au cisaillement des sols.
- 2.3.1.5. L'angle de dilatance ψ** : nul ($\psi=0$) pour des sols argileux qui ne montrent aucune dilatance, mais non nul ($\psi \neq 0$) pour les sables dont la dilatance ne dépend de leur densité et de leur angle de frottement. Pour les sables siliceux, $\psi \approx \phi - 30$.

2.3.2. Les comportements drainé et non drainé :

Pour la prise en compte des interactions squelette - eau interstitielle dans la réponse du sol, logiciel PLAXIS distingue entre les comportements drainé et non drainé :

- Pour le comportement drainé, aucune surpression interstitielle n'est générée. C'est évidemment le cas pour des sols secs et pour des sols totalement drainés du fait de leur forte perméabilité ou à cause d'un faible accroissement du chargement. Cette option peut aussi être utilisée pour simuler le comportement des sols à long terme (fluage et consolidation).
- Pour le comportement non drainé, les surpressions interstitielles sont complètement générées. L'écoulement de l'eau interstitielle peut parfois être négligé du fait des faibles perméabilités ou à cause d'une vitesse de chargement élevée. Toutes les couches considérées comme non drainées se comporteront ainsi, même si la couche ou une partie de celle-ci se trouve au-dessus de la nappe phréatique.

2.4. Comparaison de la méthode EL et EF

L'EL est généralement préféré par la majorité des ingénieurs. Elle permet de calculer la FOS sans aucune connaissance des conditions d'état initial et est donc souvent utilisé pour évaluer l'analyse de stabilité. Pour résoudre la FOS, il est nécessaire d'estimer la distribution des forces internes (par exemple, la capacité d'arrachement). Contrairement aux approches LE, les méthodes par éléments finis considèrent une relation contrainte-déformation. La méthode de réduction de la force permet de résoudre le FOS, ce qui présente les avantages suivants :

- La surface de rupture critique est détectée automatiquement.
- Pas d'hypothèses sur la distribution des forces inter-tranches.
- Utilisable pour des conditions complexes.

Le principal inconvénient peut être le temps de calcul, qui peut être sensiblement réduit. La sélection d'un modèle constitutif et de conditions aux limites appropriés est bien sûr nécessaire.

Plusieurs recherches ont vérifié que EL et EF donnent des FOS similaires, en considérant des géométries simples avec des pentes de sol homogènes.

2.5. Description et mise en œuvre de PLAXIS 2D

PLAXIS version 2015.02 est un outil d'éléments finis à deux dimensions destinées à des applications commerciales pour effectuer des analyses de déformation et de stabilité pour une variété de problèmes géotechniques. Pour les calculs suivants, un modèle de déformation plane est employé. Outre la condition de déformation plane, un modèle axisymétrique est également disponible.

Pour les problèmes de stabilité des pentes, le FOS est obtenu au moyen de la routine de réduction ϕ -c.

La méthode de réduction de la résistance est conduite avec des forces mobilisées pour l'angle de frottement ϕ' et la cohésion c' . Une diminution incrémentale de $\tan \phi'$ et de la cohésion c' est effectuée en supposant un critère de rupture de Mohr-coulomb. Dans le code FE, le critère de résistance est réduit jusqu'à ce que l'équilibre ne puisse plus être maintenu et que la structure se rompe. Le FOS est régi par l'équation suivante :

$$FOS_{FE} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_{mob.}} = \frac{c'}{c'_{mob.}}$$

2.5.1. Configuration et densité des maillages

Pour modéliser les couches de sol, deux types d'éléments sont disponibles dans PLAXIS 2D, à savoir les éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds (figure 2.5). Le type d'élément influence la consommation de mémoire, la vitesse et la précision du calcul. Pour assurer une grande précision.

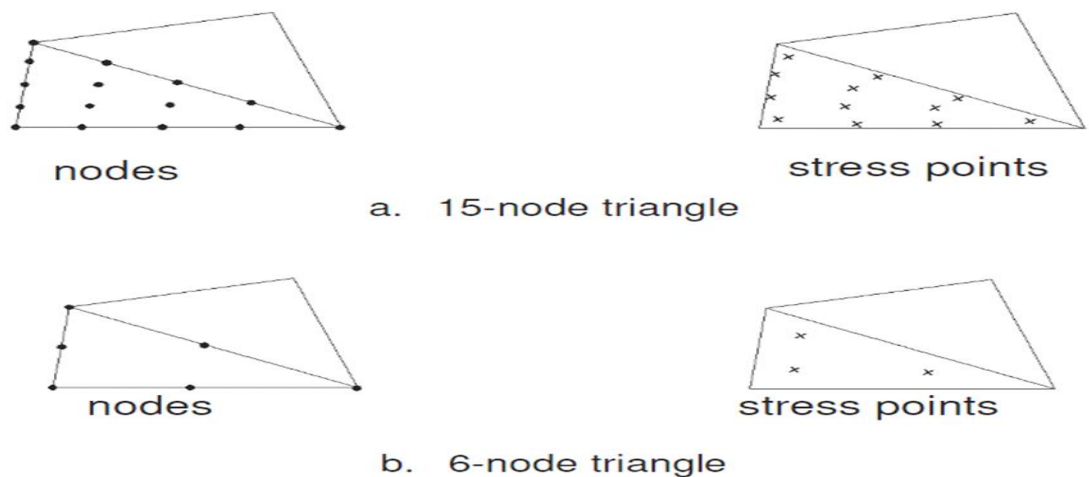


Figure 2. 5: Éléments FE dans PLAXIS.

Dans PLAXIS, le maillage est généré automatiquement avec la possibilité d'un raffinement global et local. La densité du maillage varie en fonction de la précision et du temps de calcul.

2.5.2. Modèle constitutif du sol

Pour la prédiction du comportement contrainte-déformation des sols, divers modèles de matériaux ont été développés. PLAXIS fournit plusieurs modèles qui diffèrent en complexité et en nombre de paramètres requis. Avec l'augmentation de la complexité des modèles utilisés, le nombre de paramètres pour la définition et la quantité de connaissances requises augmentent.

Pour les simulations numériques effectuées, l'utilisation du modèle de Mohr-coulomb est suffisante. Ce modèle simple, linéaire-élastique et parfaitement plastique, satisfait également à une comparaison avec les résultats de LE. Comparé à d'autres modèles constitutifs du sol, un petit nombre de paramètres d'entrée est nécessaire. Les paramètres élastiques (E , ν) et les paramètres plastiques (c' , ϕ' , ψ) sont utilisés dans le programme.

2.5.3. Éléments d'interface

Les éléments d'interface sont utilisés pour modéliser les déformations relatives entre le sol et les structures. PLAXIS utilise des formulations d'interface avec une épaisseur virtuelle. Si un élément de sol à 15 nœuds est utilisé, l'interface consiste en cinq paires de nœuds et les fonctions de forme sont compatibles avec les éléments de sol. Pour une évaluation des contraintes au niveau des éléments d'interface, une méthode de Newton le schéma d'intégration de Cotes est mise en œuvre. Une visualisation schématique des éléments d'interface est donnée dans la figure 2.6.

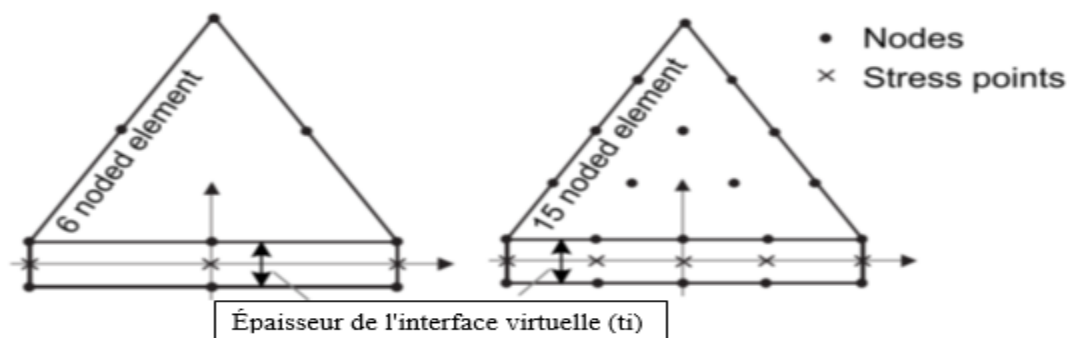


Figure 2. 6: Interfaces utilisées dans PLAXIS 2D.

2.5.4. Éléments de géo grille (Geogrid)

Les éléments de géo grille représentent des éléments droits (linéaire) avec une rigidité axiale mais sans raideur de flexion.

Par conséquent, ils ne peuvent supporter aucun moment de compression ou de flexion ; ils ne peuvent que recevoir une traction. Pour modéliser une interaction appropriée entre le renforcement et le sol, les éléments géo grilles doivent être définis avec un élément d'interface. Il y a un seul paramètre d'entrée, qui est la rigidité axiale (EA).

Les paramètres de matériaux requis pour les géogrille :

- Entrée de la rigidité axiale EA.
- Sélection du modèle de rigidité isotrope\anisotrope.
- Sélection d'un comportement élastique ou élastoplastique.
- Force de traction axiale maximale N_p (en cas de comportement élastoplastique).

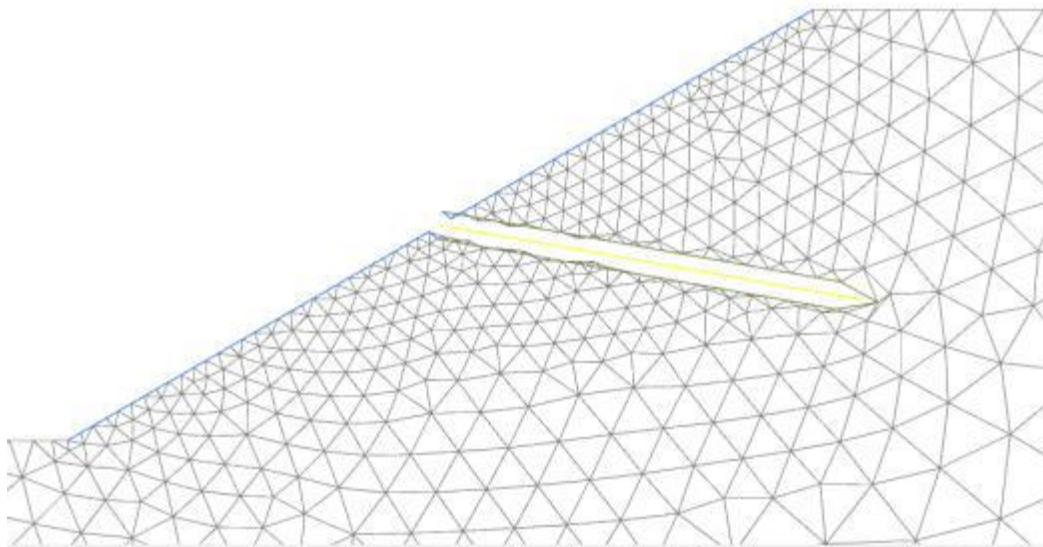


Figure 2. 7: Géo grille en combinaison avec des interfaces, tracé à partir de PLAXIS 2D.

Si le comportement des matériaux élastoplastiques du type de structure est sélectionné, l'entrée d'une capacité de traction maximale (N_p) doit être saisie. Les contraintes sont redistribuées au sol adjacent si la capacité maximale est dépassée.

2.5.5. Éléments de plaque (plate)

Les plaques ont des propriétés similaires à celles des géo grilles caractérisées ci-dessus. Elles sont également des éléments droits (linéaires), fournissant en plus une entrée de rigidité en flexion (EI) comme pour les géo grilles, la modélisation doit être combinée avec l'utilisation d'interfaces. Une nouvelle fonctionnalité est l'option de palier d'extrémité, qui permet une résistance de pointe à l'extrémité d'une plaque. Cette fonctionnalité est utile pour la modélisation de pieux ou de parois moulées mais est inappropriée pour la modélisation de clous de sol, puisqu'ils n'agissent généralement pas en compression.

Les caractéristiques de matériaux requis pour les éléments de la plaque :

- Rigidité à la flexion EI
- Rigidité axiale EA
- Sélection du modèle de rigidité isotrope/anisotrope
- Choix d'un comportement élastique ou élastoplastique
- Option de palier d'extrémité (négligée pour la modélisation des éléments de traction)
- Force de traction axiale maximale N_p et moment de flexion maximal M_p (en cas de comportement élastoplastique)

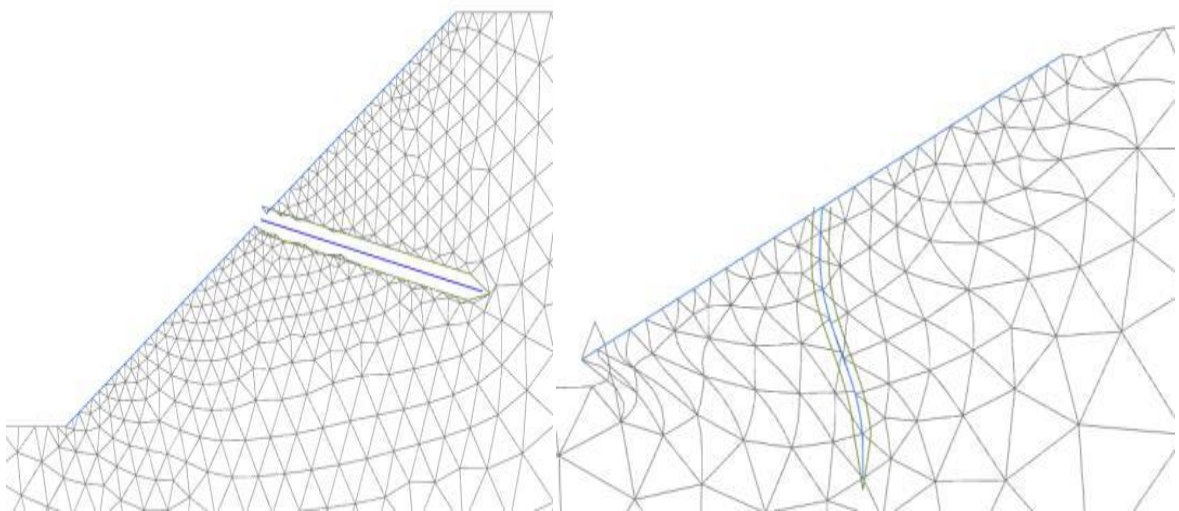


Figure 2. 8: Plaque en combinaison avec des interfaces, tracée à partir de PLAXIS 2D.

Si le comportement des matériaux élastoplastiques pour les plaques est choisi, la force axiale est limitée par N_p et le moment de flexion maximal est limité par M_p . Les contraintes sont redistribuées dans le sol adjacent lorsque les limites sont atteintes.

2.5.6. Rangées de poutres encastrées (EBR) embedded beam rows

Cette nouvelle fonction dans PLAXIS est implémentée pour simuler une rangée avec une distance hors plan perpendiculaire à la zone du modèle. De ce fait, les poutres encastrées sont schématisées comme une rangée d'éléments structurels en 2D. La figure 2.10 illustre les principes de la rangée de poutres encastrées en 2D.

Le BER est capable de supporter des forces axiales et des flexions. En raison de l'utilisation d'interfaces ligne à ligne spéciales, les éléments ne sont pas directement couplés au maillage. Les interfaces ligne à ligne sont constituées d'éléments à ressort et de curseurs figure 2.11, qui permettent un maillage continu (le sol peut s'écouler à travers l'EBR) et la prise en compte de la résistance. L'image de droite pour la figure 2.9 (tracé du maillage déformé) montre que le clou et le sol peuvent se déplacer indépendamment.

Avec une interface point à ligne, une résistance de base peut être simulée (négligeable pour les clous de sol). La capacité de charge dans la direction axiale de la poutre est fournie par (T_{skin}) et la résistance de pointe (F_{max}). Un comportement élastique, ainsi qu'élastoplastique, peut être défini pour ce type d'élément.

Avec l'introduction de nouvelles fonctionnalités dans PLAXIS 2D 2015, il est possible de manipuler la résistance latérale de l'EBR. Avec la manipulation de la résistance latérale et axiale, il est possible de permettre une prise en compte de l'effet 3D.

Les paramètres de matériaux requis pour les EBR :

- Module d'Young E
- Poids unitaire ν
- Diamètre D de la poutre
- Sélection d'une poutre (par exemple, circulaire ou carrée).
- Choix du comportement élastique ou élastoplastique.
- Espacement hors du plan L_s
- Force de traction axiale maximale N_p et moment de flexion maximal M_p . (en cas de comportement élastoplastique)
- Frottement latéral T_{skin}
- Résistance latérale T_{lat}
- Résistance de base F_{max}

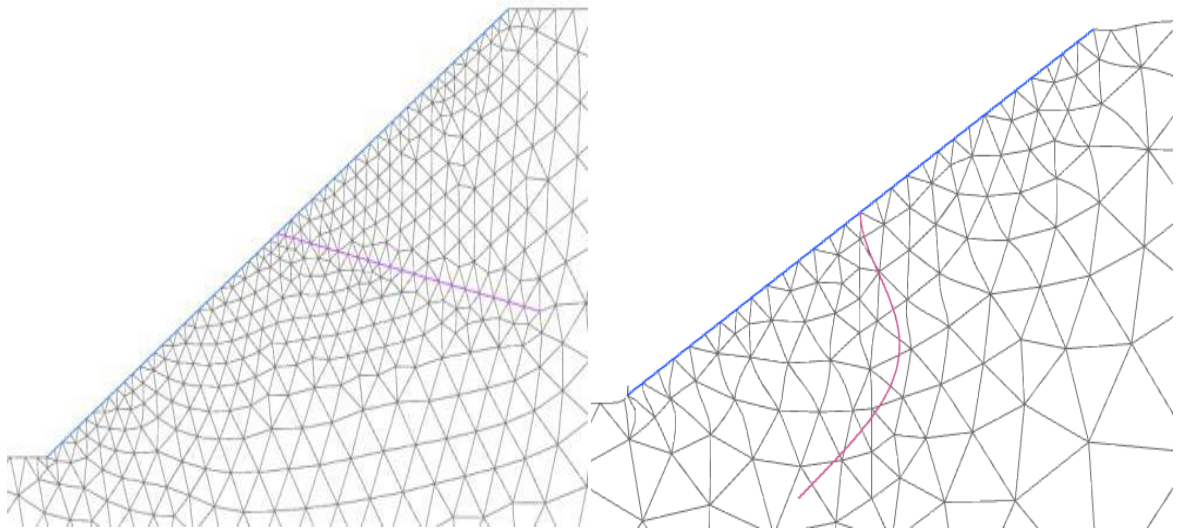


Figure 2. 9: EBR implémenté dans PLAXIS 2D, et maillage déformé.

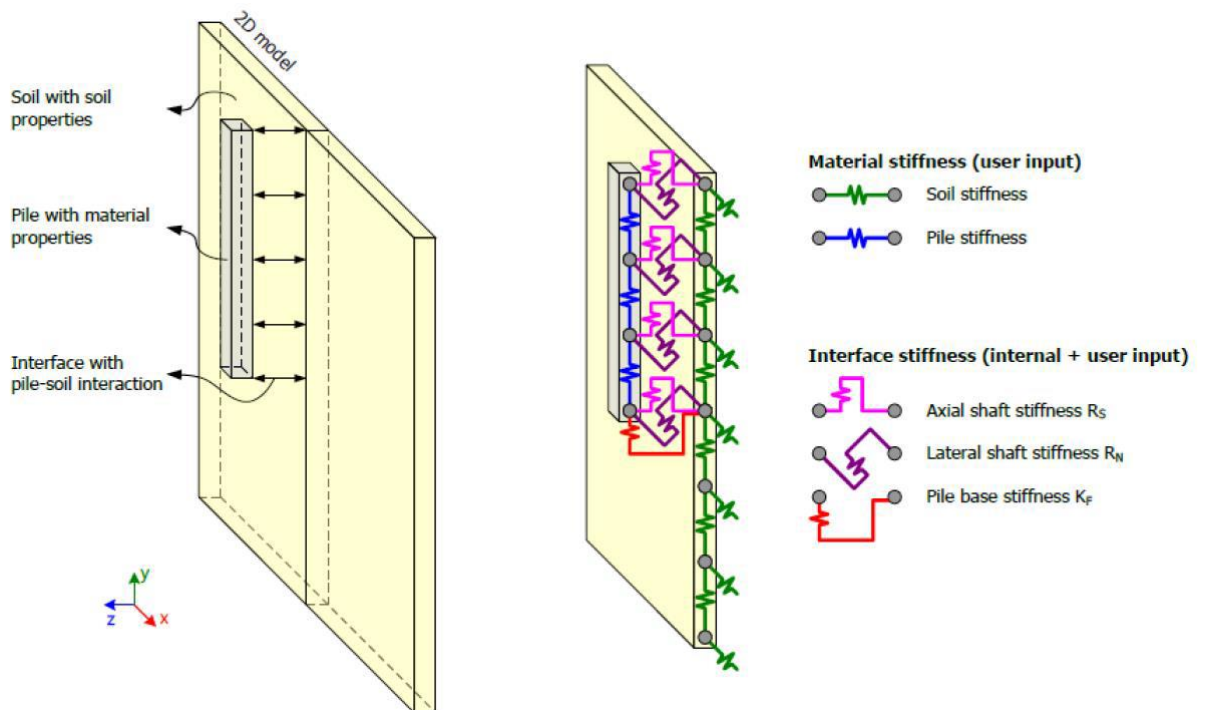


Figure 2. 10: Principe 2D de l'interaction de la poutre encastree avec le sol.

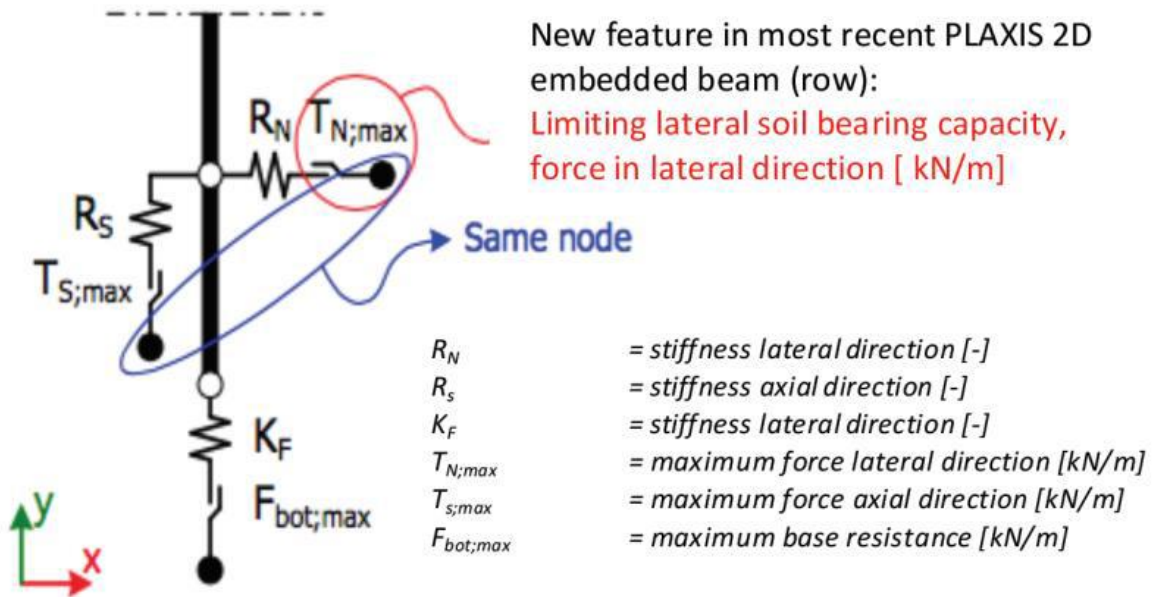


Figure 2. 11: Principe des interfaces.

2.5.7. Phases de calcul

Les phases de calcul pour l'analyse de sécurité dans PLAXIS 2D se trouvent dans le tableau.2.1. Quatre phases sont calculées pour les études de cas. Puisque l'état initial est simulé avec une procédure.

K_0 et qu'une géométrie non-horizontale est entrée. Une étape nulle est ajoutée.

Tableau 2. 1: Phases de calcul pour **【FOS】_FE** dans PLAXIS 2D.

Phase nr.	Phase ID	Calculation type	Loading type
Phase 0	Initial phase	K0-procedure	Staged construction
Phase 1	0-step	Plastic	Staged construction
Phase 2	Installation support	Plastic	Staged construction
Phase 3	Safety	ϕ/c -reduction	Incremental multipliers

CHAPITRE 3 : VALIDATION EN SE SERVANT D'UN EXEMPLE DE CALCUL

3.1. Introduction

Lorsque les remblais sont construits sur des sols mous, les géotechniciens confrontent des défis de conception, tels qu'un tassement excessif, une faible capacité portante et une instabilité de pente.

La stabilité de la pente devient souvent l'un des facteurs de contrôle dans la conception de remblais sur sol mou. Comme l'un des plus couramment et économiquement utilisés la technique des colonnes de mélanges profondes (DM) peut être utilisée pour augmenter la capacité portante, améliorer la stabilité des pentes et réduire le tassement.

3.2. Modes de rupture des colonnes deep mixing

Les colonnes DM peuvent avoir des modes de rupture possibles de cisaillement, flexion, glissement, rotation, ou une combinaison des modes de rupture ci-dessus sous un chargement de remblai, comme indiqué dans la Figure 3.1 Les modes de rupture en cisaillement et en flexion sont appelés rupture interne, tandis que les modes de rupture par glissement et rotation sont appelés rupture externe. La rupture possible des modes dépendent non seulement de la charge et des conditions du sol, mais aussi de la résistance et la disposition des colonnes DM.

Il est évident que les remblais supportés par des colonnes DM peuvent se rompre par au moins l'un des modes de rupture ci-dessus qui donnent le facteur de sécurité minimum sous certaines conditions.

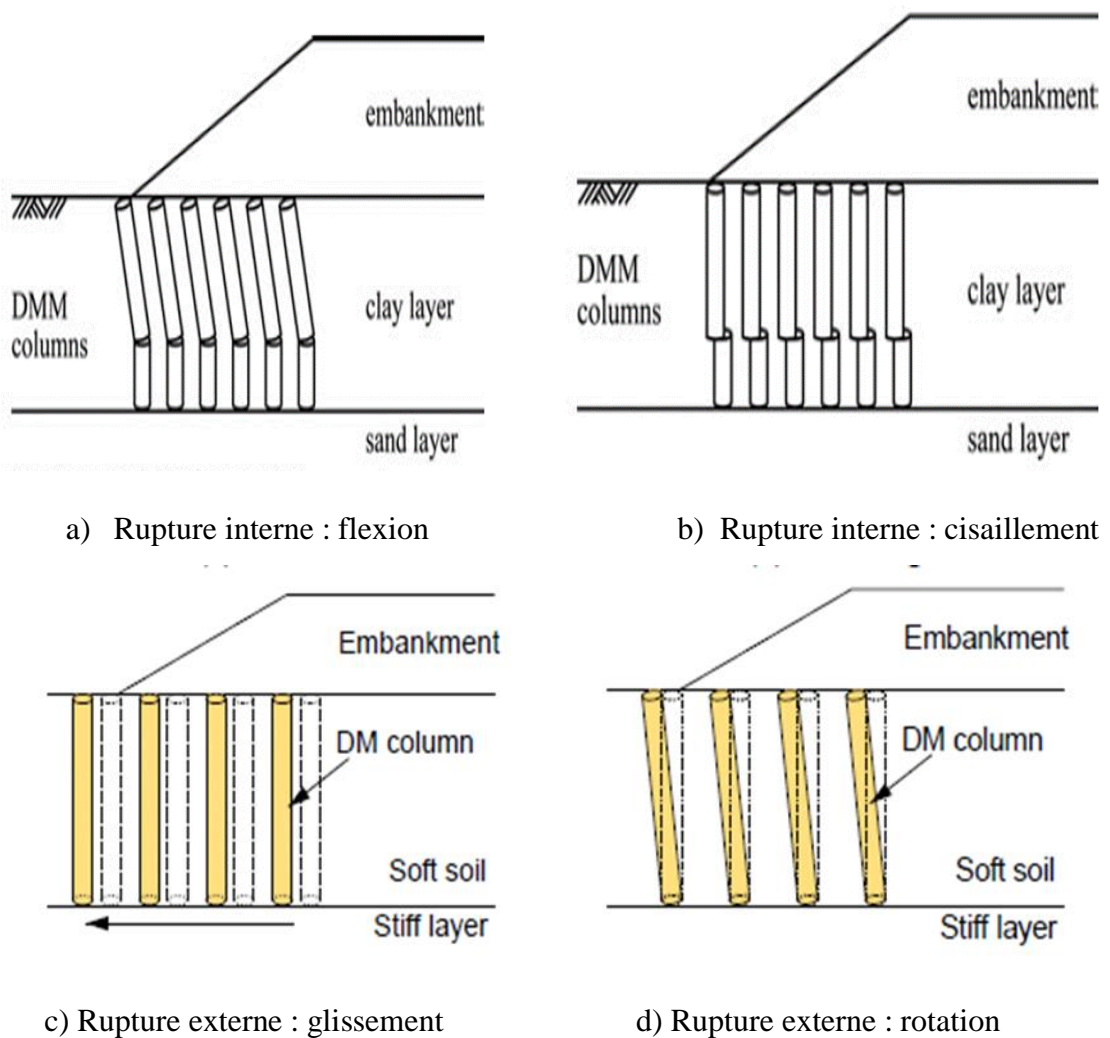


Figure 3. 1: Modes de rupture des colonnes DM.

Cependant, dans la conception actuelle de l'équilibre limite, l'analyse de la stabilité du remblai soutenu par des colonnes sur des sols mous ne tient compte que de la rupture en cisaillement. Comme la résistance à la traction et à la flexion des colonnes de DM est inférieure à leur résistance au cisaillement et à la compression non confinée, le fait de ne tenir compte que de la rupture en cisaillement dans l'analyse de stabilité peut surestimer le facteur de sécurité du remblai supporté par des colonnes de DM sur des sols mous.

Le sol amélioré par la colonne se rompt par la flexion de la colonne lorsque la résistance de la colonne est faible ou par rotation lorsque la résistance de la colonne était élevée sous le remblai.

3.3. L'instabilité des pentes de remblais

L'instabilité des pentes des remblais peut se développer localement, près du parement, à l'intérieur du talus ou à travers le sol de fondation sous le nom de rupture locale, superficielle, générale ou profonde, comme le montre la figure 3.2.

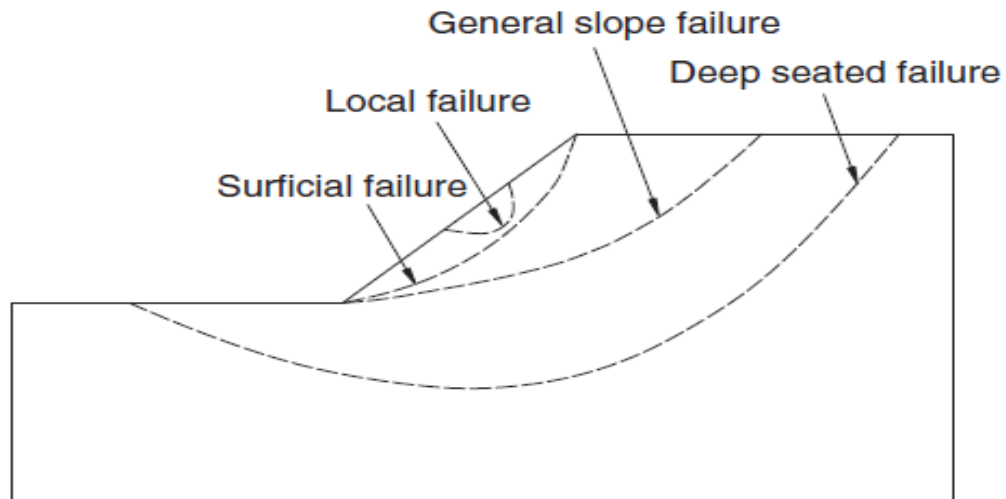


Figure 3. 2: Ruptures potentielles de la stabilité des pentes.

3.4. Modélisation par le logiciel d'éléments finis

3.4.1. Etude de cas et modélisation par PLAXIS

Le programme d'éléments finis PLAXIS a été utilisé pour étudier les modes de rupture des remblais soutenus par des colonnes DM sur des sols mous et étudier l'effet de la longueur des colonnes DM et le module d'élasticité sur le facteur de sécurité et les surfaces de glissements, et comparés nos résultats avec ceux obtenus par l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014.

3.4.2. Présentation de la géométrie du sol et du remblai

La géométrie du remblai et du sol est montrée dans la Figure 3.3 ; Comme on peut le voir sur cette figure le remblai a une largeur de 20 m et une hauteur de 5 m le remblai est constitué d'un sol avec une cohésion de 15 kPa, un angle de frottement de 35°, et un poids volumique moyen de 18 KN/m³.

Le sol consistait en une couche d'argile meuble de 10 m d'épaisseur et une largeur de 40 m avec une cohésion de 25kPa, un angle de frottement de 0°, et un poids volumique moyen 16 kN/m³ reposant sur une couche de sable dense de 2 m d'épaisseur avec un angle de frottement de 30° et une cohésion nulle et un poids volumique moyen 18 KN/m³.

Les colonnes de mélange en profondeur (DCM) ont soutenu le remblai sur sol mou est considérée pour cette simulation numérique.

Les colonnes DM ont été installées sous le remblai en pente ; Les colonnes DM d'un diamètre de 0,8 m disposées en élément simple carré à un espacement de 2m.

Les colonnes DM sous la pente du remblai sont notées en ordre du n° 1 à 6 comme le montre la Figure 3.3. Deux conditions ont été prises en compte dans le modèle numérique :

(A) Les colonnes de DM ont été enfoncé dans la couche de sable dense et (B) les colonnes DM étaient assises sur le dessus de la couche de sable, la figure 3.3 montre la configuration du modèle avec les colonnes DM enfoncé dans la couche de sable.

Le tableau 3.1 présente les propriétés des matériaux dans l'analyse numérique.

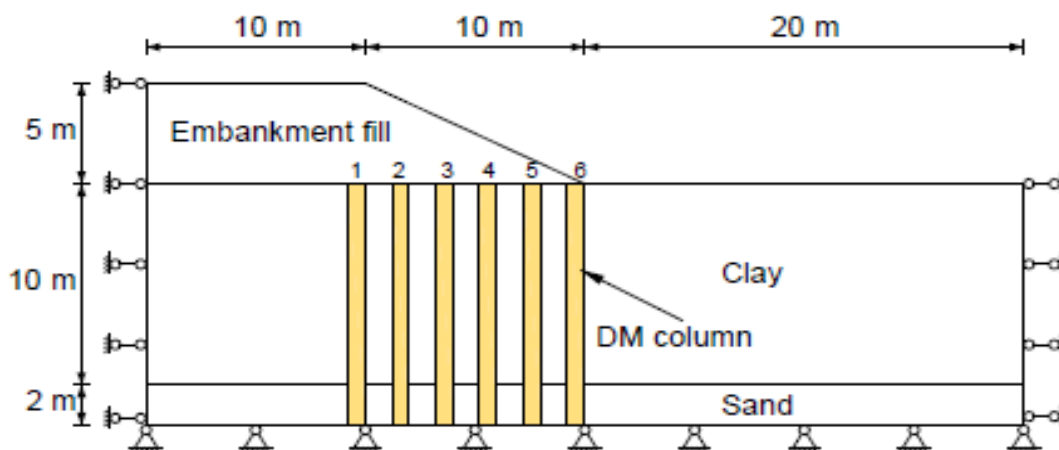


Figure 3. 3: Géométrie du sol et du remblai avec des colonnes enfoncé dans le sable.

Tableau 3. 1: Propriétés des matériaux.

Matériels	Propriétés
Remblais	$\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.3$, $E = 30 \text{ MPA}$, $c = 15 \text{ kPa}$, $\phi = 35^\circ$
Argile mou	$\gamma = 16 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.35$, $E = 10 \text{ MPA}$, $c = 25 \text{ kPa}$, $\phi = 0^\circ$
Sable	$\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.3$, $E = 50 \text{ MPA}$, $c = 0$, $\phi = 30^\circ$
Colonnes DM (faible module)	$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.3$, $E = 30 \text{ MPA}$, $c = 150 \text{ kPa}$, $\phi = 0^\circ$,
Colonnes DM (module élevé)	$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.3$, $E = 500 \text{ MPA}$,

3.4.3. Modélisation numérique par PLAXIS 2D

Un modèle de déformation plane bidimensionnel a été construit à l'aide d'éléments finis logiciel PLAXIS 2D adoptant l'analyse numérique 2D pour simuler DMC les colonnes supportaient le remblai. Tout en générant des résultats avec des précisions.

- ✚ On commence la modélisation par faire une simulation du remblai sur le sol mou sans renforcement (sans colonne DM) pour déduire les déformations et le cercle de glissement avec le facteur de sécurité.

Le remblai, le sol meuble et le sable ont été modélisés avec le critère Mohr-Coulomb.

- ✚ Ensuite on recommence la modélisation du remblai sur le sol mou renforcé par des colonnes DM.

Les colonnes DM à faible module ont été modélisées avec le critère Mohr-Coulomb.

Les colonnes DM à module élevé ont été modélisées comme un matériau élastique linéaire.

Les analyses du programme d'élément finis ont été effectuées dans une condition de déformation plane.

Les colonnes DM ont été simulées par des murs de déformation plane continue.

Les colonnes DM ont été converties en murs continus (matériaux équivalent) avec des propriétés équivalentes pour la modélisation sur PLAXIS.

Les propriétés équivalentes des colonnes ont été déterminées sur la base des équations suivante :

- $Eeq \times A = \frac{Ec \times Ac}{sh} \dots\dots\dots(1)$

- $Eeq \times I = \frac{Ec \times Ic}{sh} \dots\dots\dots(2)$

- $Eeq \times 1 \times d = \frac{Ec \times \frac{\pi D^2}{4}}{sh} \dots\dots\dots(3)$

- $Eeq \times \frac{1 \times d^3}{12} = \frac{Ec \times \frac{\pi D^4}{64}}{sh} \dots\dots\dots(4)$

Avec :

- E_{eq} = module d'élasticité équivalent.
- A = surface du matériau équivalent.
- I = moment d'inertie de matériaux équivalent ;
- d = largeur de matériaux équivalent.
- E_c = module d'élasticité de colonne.
- A_c = surface de la section de la colonne.
- I_c = moment d'inertie de la colonne.
- sh = espacement entre les colonnes dans le sens perpendiculaire à la figure 3.3.
- D = diamètre de la colonne.

De l'équation (3) on a : $E_{eq} = \frac{E_c \times \pi \times D^2}{sh \times d \times 4} \dots\dots\dots(5)$

➤ En remplace l'équation (5) dans l'équation (4) on obtient :

• $d^2 = \frac{3D^2}{4} \rightarrow d = D \sqrt{\frac{3}{4}}$ on a: $D=0,8 \text{ m}$; $\rightarrow d=0,7 \text{ m}$

➤ On remplace **d=0.7m** dans l'équation (3)

➤ On a pour des colonnes à faible module : $E_c=30 \text{ MAP}$, $D=0,8 \text{ m}$, $sh=2 \text{ m}$

1. $E_{eq} = \frac{E_c \times \pi \times D^2}{4 \times sh \times d} \rightarrow E_{eq} = \frac{30000 \times \pi \times 0,8^2}{4 \times 2 \times 0,7} \rightarrow E_{eq}=10771, 17 \text{ KN/m}^2$.

➤ On a pour des colonnes à module élevé : $E_c=500 \text{ MPA}$, $D=0,8 \text{ m}$, $sh=2 \text{ m}$.

2. $E_{eq} = \frac{E_c \times \pi \times D^2}{4 \times sh \times d} \rightarrow E_{eq} = \frac{500000 \times \pi \times 0,8^2}{4 \times 2 \times 0,7} \rightarrow E_{eq}= 179519, 58 \text{ KN/m}^2$.

La figure 3.4 présente un maillage déformé du remblai sur le sol mou sans renforcement et amélioration.

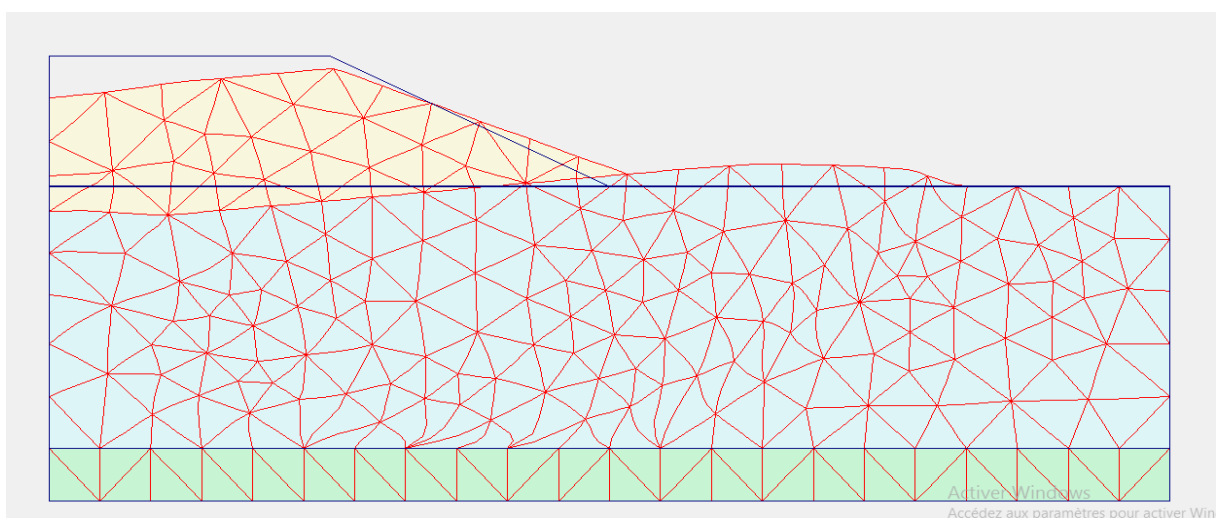


Figure 3. 4: Maillage déformé du remblai sur sol mou sans colonne DM.

La figure 3.5 présente la surface de glissement de la pente du remblai sur sol mou l'instabilité de la pente de remblai est développé à travers le sol de fondation comme on peut voir sur cette figure un cercle de glissement profond continu (DEEP SEATED FAILURE).

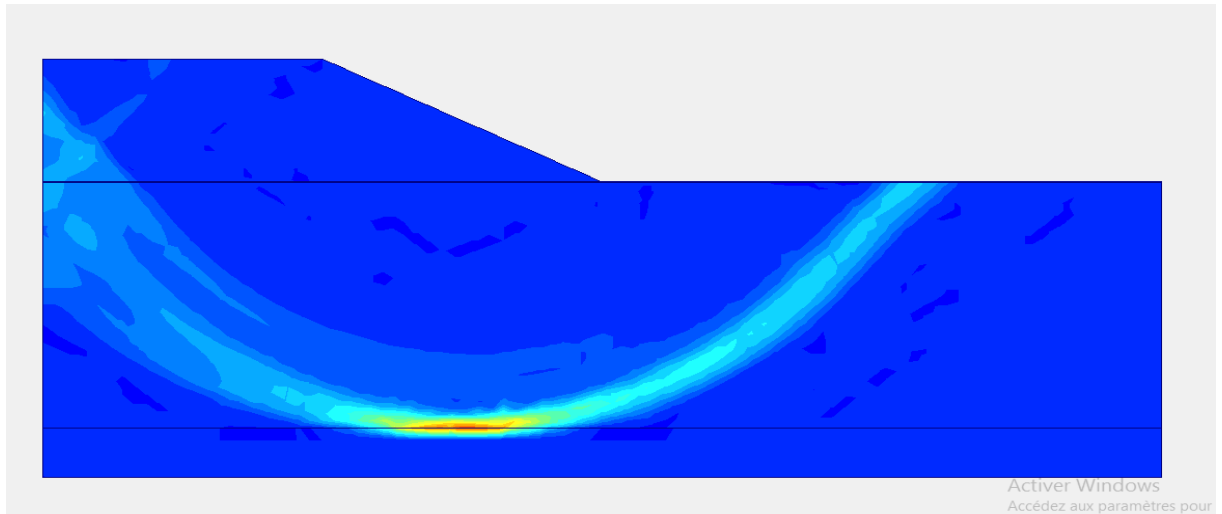


Figure 3. 5: Cercle de glissement du remblai sur sol mou sans colonne DM.

Figure 3.6 présente le facteur de sécurité du remblai sur sol mou sans colonne DM qui est égale à 1,720.

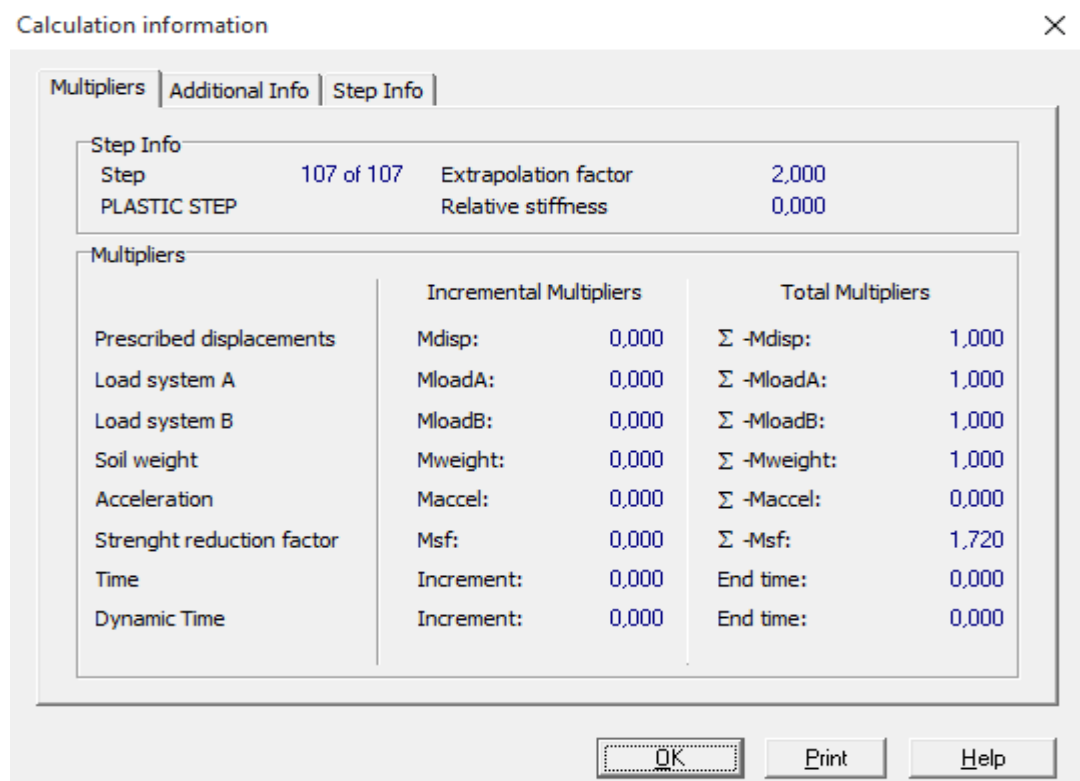
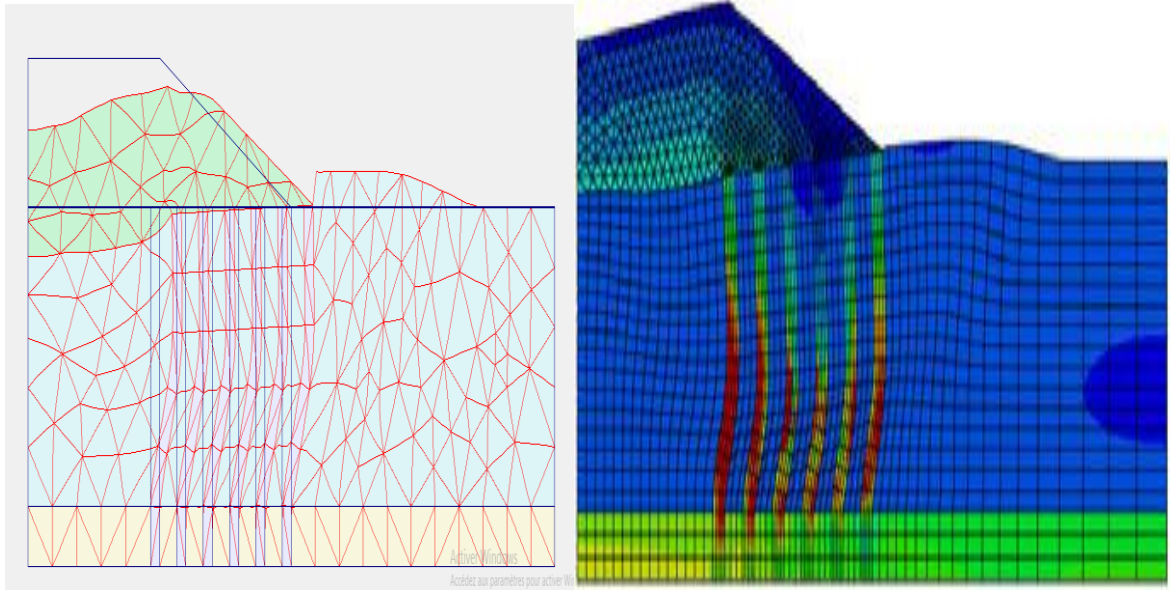


Figure 3. 6: Facteur de sécurité du remblai sur sol mou sans colonne DM.

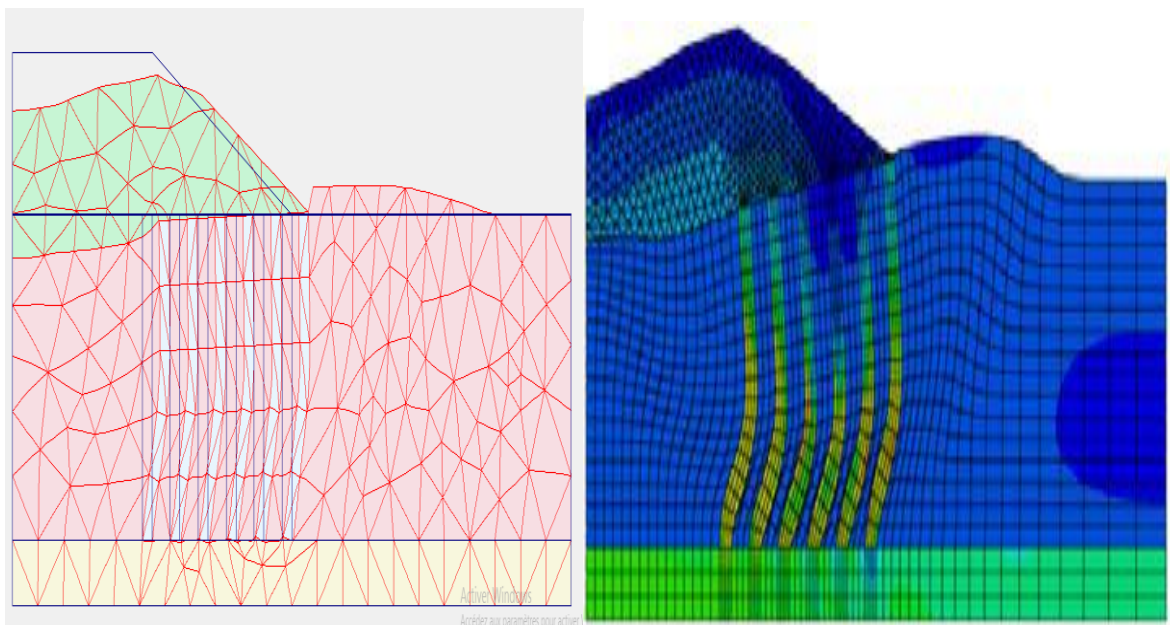
- La figure 3.7 présente le maillage déformé du modèle avec des colonnes DM à faible module obtenu par la modélisation par PLAXIS, et par l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014.



Méthode présente

Méthode d'Zhang et al.2014

(A) enfoncé



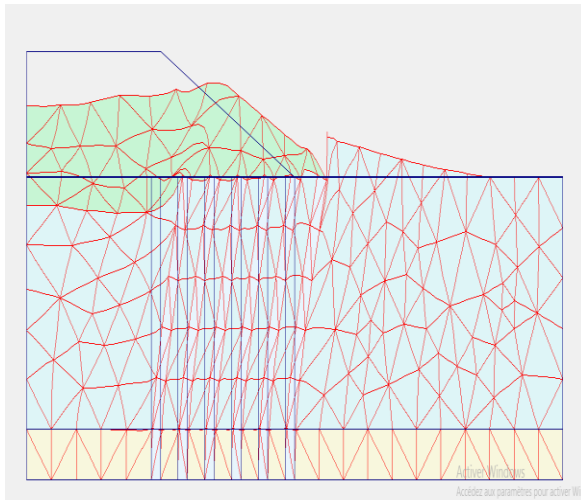
Méthode présente

Méthode d'Zhang et al.2014

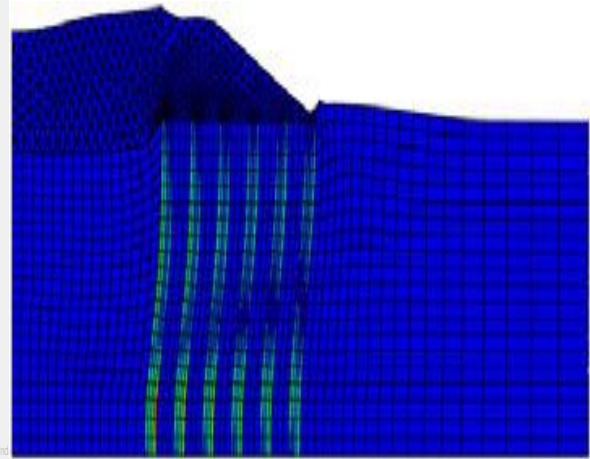
(B) Non enfoncé.

Figure 3. 7: Maillage déformé du modèle avec des colonnes DM à faible module.

- La figure 3.8 présente le maillage déformé du modèle avec des colonnes DM à module élevé obtenu par la modélisation par PLAXIS, et par l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014.

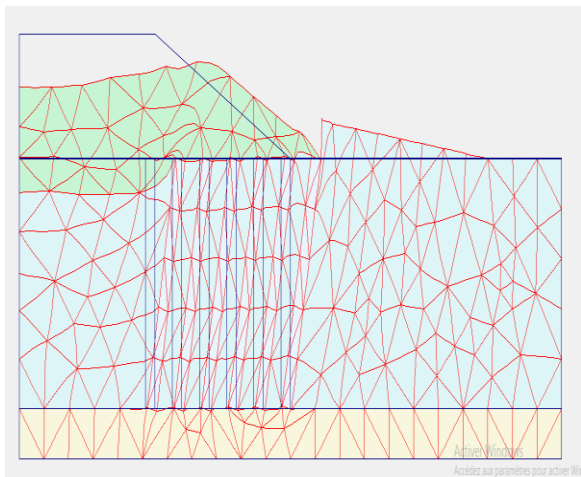


Méthode présente.

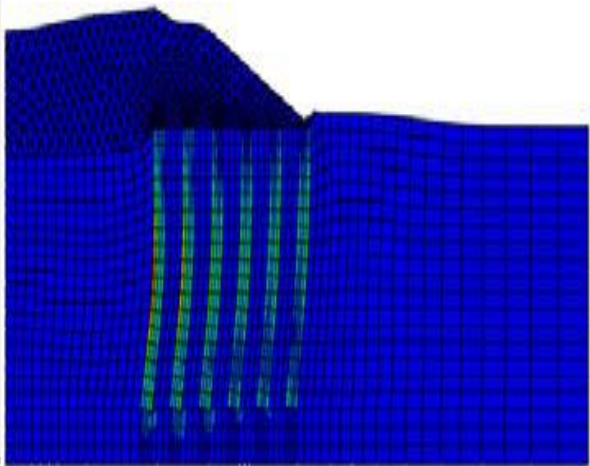


Méthode d'Zhang et al.2014.

(A) Enfoncé.



Méthode présente.



Méthode d'Zhang et al.2014.

(B) Non enfoncé.

Figure 3. 8: Maillage déformé du modèle avec des colonnes DM à module élevé.

3.5. Facteur de sécurité

Le tableau 3.2 montre les facteurs de sécurité calculés par les analyses numériques obtenu par PLAXIS, et par l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014.ABAQUS.

- Les factures de sécurité du sol renforcé par des colonnes de DM et plus élevé par rapport au sol sans amélioration (sans colonnes DM) quel que soit la condition des colonnes (faible ou bien élevé) pour la modélisation avec PLAXIS.

Les colonnes DM avait un avantage sur le facteur de sécurité et sur l'amélioration de la stabilité du remblai comparé au sol sans amélioration (sans colonne DM).

- Dans la condition des colonnes DM à faible module ; les facteurs de sécurité dans le cas enfoncé étaient légèrement plus élevés que celui du cas non enfoncé.

D'après le modèle utilisé dans cette condition, les colonnes DM enfoncé dans la couche de sable dense n'ont eu qu'un faible avantage sur le facteur de sécurité et sur l'amélioration de la stabilité du remblai supporté par les colonnes DM sur un sol mou, comparé aux cas non enfoncés.

- Dans la condition des colonnes DM à module élevé ; les factures de sécurité étaient plus élevées dans le cas enfoncé que celui du cas non enfoncé.

D'après le modèle utilisé dans cette condition, les colonnes DM enfoncé dans la couche de sable dense avait un avantage sur le facteur de sécurité et sur l'amélioration de la stabilité du remblai supporté par les colonnes DM sur un sol mou, comparé aux cas non enfoncés.

Tableau 3. 2: Facteurs de sécurité calculés par méthode présente (PLAXIS) et par l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014. (ABAQUS)

Condition (PLAXIS 2D)	Faible module	Module élevé
Enfoncé	2.045	3.495
Non enfoncé	2.020	2.109
Condition (ABAQUS)	Faible module	Module élevé
Enfoncé	1.61	1.68
Non enfoncé	1.60	1.66

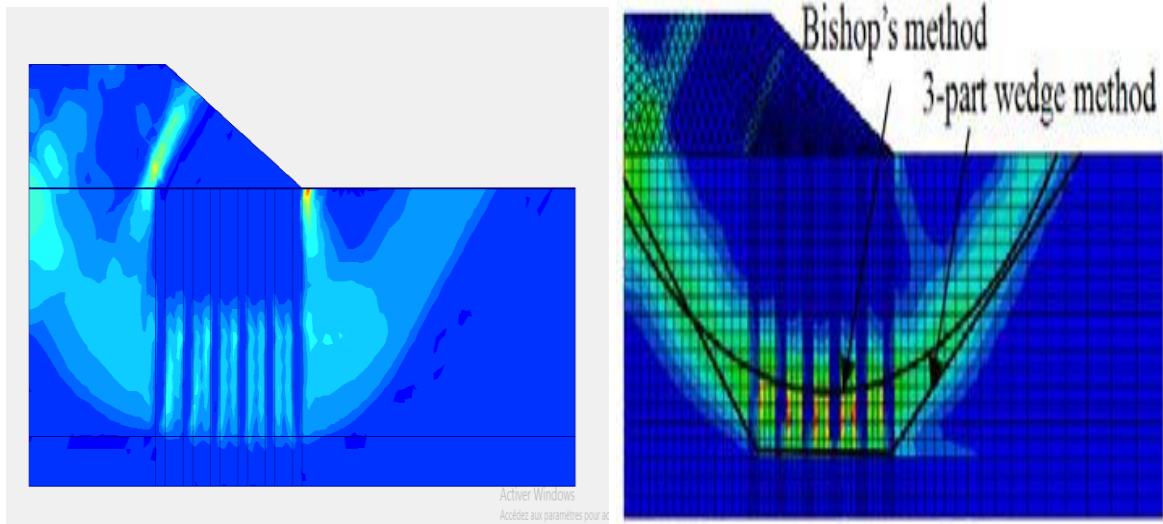
3.6. Surfaces de glissement

- La figure 3.9 présente la surface de glissement dans les cas avec des colonnes de DM à faible module obtenu par PLAXIS, et par l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014.

La surface de glissement déterminé au cas enfoncé était similaire à celle du cas non enfoncé dans la condition de colonne DM à faible module et on peut voir une surface de glissement profonde non continue due au renforcement avec des colonnes de DM à faible module.

- La figure 3.10 présente la surface de glissement dans les cas avec des colonnes de DM à module élevé.

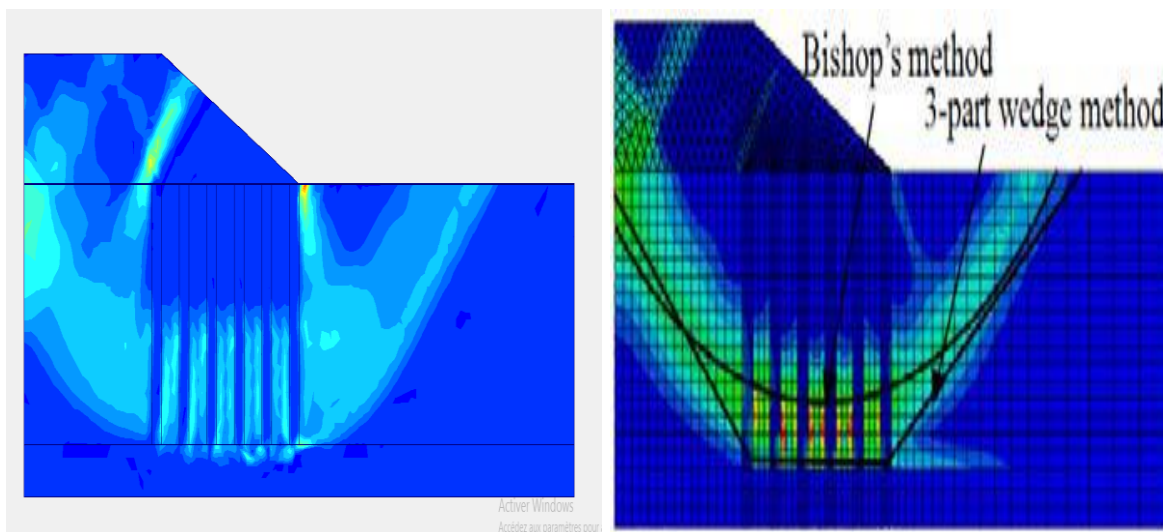
La surface de glissement déterminé au cas enfoncé était similaire à celle du cas non enfoncé dans la condition de colonne DM à module élevé on peut voir la surface de glissement profonde non continue due au renforcement avec des colonnes de DM à module élevé qui est aussi similaire au cas des colonnes non enfoncées.



Méthode présente.

Méthode d'Zhang et al.2014.

(A)Enfoncé

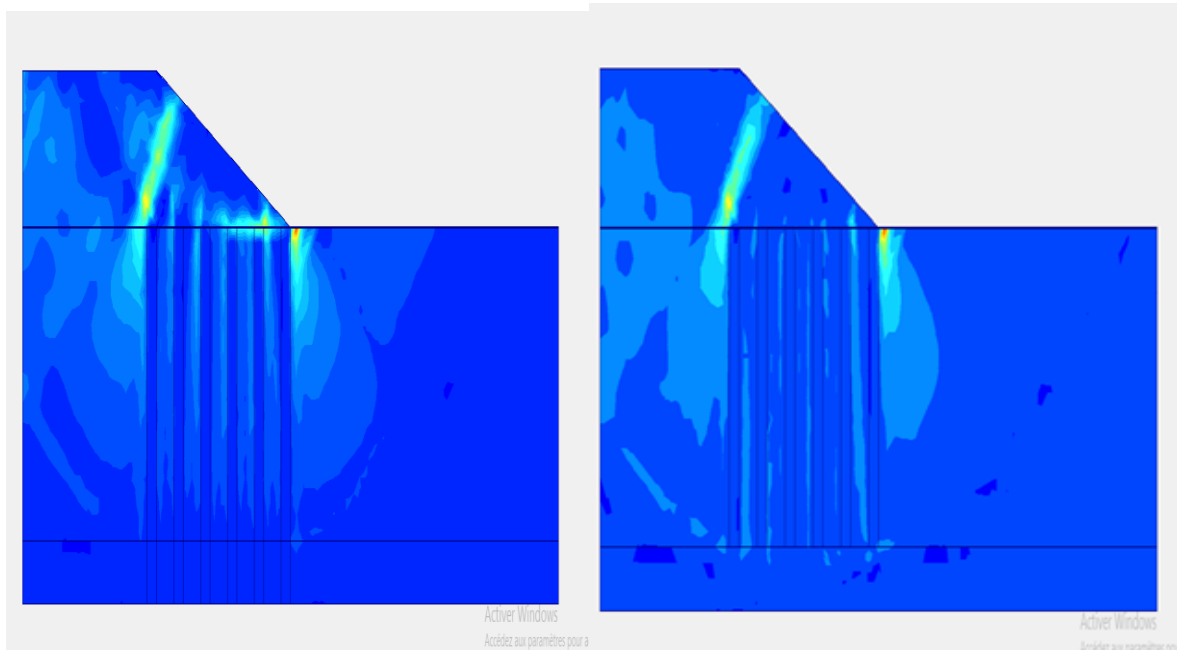


Méthode présente.

Méthode d'Zhang et al.2014.

(B)Non enfoncé

Figure 3. 9: Surface de glissement dans le modèle avec colonnes DM à faible module.



(A) Enfoncé

(B) Non Enfoncé

Figure 3. 10: Surface de glissement dans le modèle avec colonnes DM à Module élevé.

3.7. Conclusion

Le programme d'éléments finis PLAXIS a été utilisé pour évaluer la stabilité d'un sol mou supportant un remblai et renforcé par des colonnes de DM sur la base des résultats et de la discussion, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. Les colonnes DM ont cédé par rotation dans le modèle avec des colonnes DM à module élevé.
Toutes les colonnes DM ont basculé avec un angle d'inclinaison similaire.
2. Les colonnes DM ont cédé par flexion dans le modèle avec des colonnes DM à faible module.
Un point de flexion a été trouvé le long des colonnes DM.
3. Les colonnes DM avaient un grand avantage sur le facteur de sécurité et sur l'amélioration du sol et de la stabilité du remblai sur sol mou.
4. Les colonnes DM enfoncées dans la couche de sable dense ont eu un effet mineur sur les facteurs de sécurité basés sur le modèle étudié avec des colonnes DM à faible module.
5. Aucune surface de glissement profond continue n'existait dans les modèles numériques 2D du remblai supporté par des colonnes DM sur un sol mou.

6. Les résultats obtenus de la modélisation par PLAXIS étaient similaires aux résultats de l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014. (ABAQUS) concernant le mode de rupture des colonnes et les déformations et les surfaces de glissement.
7. Une différence sur les résultats obtenus de la modélisation par PLAXIS et celle aux résultats de l'exemple tiré de la méthode d'Zhang et al.2014. (ABAQUS) concernant les facteurs de sécurité.
8. Les facteurs de sécurité obtenue par la modélisation sur le logiciel PLAXIS étaient plus logique vu que le facteur de sécurité du sol mou sans renforcement $FS=1.720$ a augmenté après le renforcement du sol avec des colonnes en DM.

**CHAPITRE 4 : ETUDES
PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI
SUR SOL MOU RENFORCE PAR
DEEP MIXING**

4.1. Introduction

Les problèmes d'instabilité des pentes présentent des défis de conception et de recherche aux ingénieurs géotechniciens. L'analyse de la stabilité des pentes peut être effectuée par de différentes méthodes, le programme d'éléments finis PLAXIS 2D a été largement utilisé pour analyser la stabilité de la pente y compris le calcul de son facteur de sécurité.

La technique d'amélioration et de renforcement du sol en utilisant la méthode des colonnes de mélange de ciment en profondeur (DCM) pour renforcer des remblais sur sols mous a été largement utilisée dans la pratique de la construction car elle fournit une solution d'amélioration du sol économique et rapide.

Ce chapitre présente la modélisation numérique de la technique du deep mixing pour le renforcement des remblais sur sol mous afin d'étudier les facteurs qui influent sur le facteur de sécurité ; pour cela une série d'analyse par le programme d'éléments finis a été réalisée sur la géométrie complète du remblai sur sol mous renforcé par des colonnes en deep mixing.

4.2. Présentation de la géométrie du modèle et de l'étude numérique

4.2.1. Géométrie du remblai et du sol et les colonnes

Dans cette modélisation numérique, un remblai de 5 m de haut renforcé avec des colonnes DM de diamètre de 1 m dans la couche d'argile molle de 12 m d'épaisseur la géométrie du remblai et de sol est représentée sur la Figure 4.1.

Comme on peut le voir sur la figure 4.1, le remblai mesure 20m de large et 5 m de haut avec une pente qu'on va la faire varier dans cette étude de $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; renforcé par des colonnes en DM de 1 m de diamètre et on va faire varier la profondeur des colonnes on prendra des colonnes de 4 m et 8 m et 12 m de profondeur et on fait varier aussi le nombre de colonnes utilisé pour le renforcements de 2,4,6,8 colonne et 10 colonnes avec un espacement qui varie de 0.5 m, 1 m, 2 m ; sur argile molle de 40 m de largeur et 12 m de profondeur.

Le remblai est constitué d'un sol avec une valeur de cohésion de 15 kPa, un angle de frottement de 35° et un poids unitaire moyen de 18 KN/m³.

L'argile molle avec une cohésion de 25 kPa, un angle de frottement nulle et un poids unitaire moyen de 16 KN/m³.

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

Les colonnes DM avec une cohésion de 150 kPa et un angle de frottement égale à 0 un poids unitaire moyen de 20 KN/m³.

Les détails du remblai et de sol sont résumés dans le tableau 4.1.

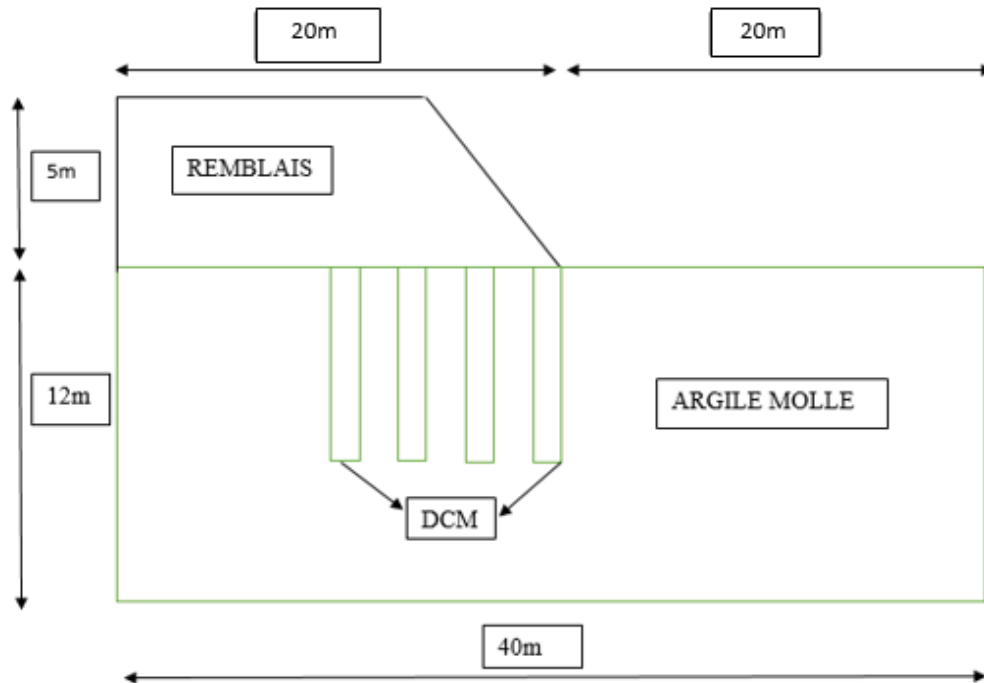


Figure 4. 1: Géométrie du modèle.

Tableau 4. 1: Propriétés des matériaux.

Matériel	Propriété
Remblais	$\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.3$, $E = 30 \text{ MPA}$, $c = 15 \text{ kPa}$, $\phi = 35^\circ$.
Argile	$\gamma = 16 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.35$, $E = 10 \text{ MPA}$, $c = 25 \text{ kPa}$, $\phi = 0^\circ$.
Colonnes DM	$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$, $\nu = 0.3$, $E = 30 \text{ MPA}$, $c = 150 \text{ kPa}$, $\phi = 0^\circ$.

4.2.2. Modélisation du modèle avec logiciel PLAXIS 2D

La modélisation du model nous permet de déterminer le facteur de sécurité et le cercle de glissement et à étudier l'effet de la longueur et l'espacement et le nombre de colonnes DM sur le facteur de sécurité tous en discutons avec précision les résultats donnés par logiciel PLAXIS.

La déformation plane 2D a été réalisée à l'aide du logiciel géotechnique PLAXIS 2D en adoptant la méthode d'analyse numérique 2D équivalente pour simuler le remblai sur sol mou renforcé par les colonnes en DM.

Les colonnes DM ont été simulées par des murs continus de déformation plane, les colonnes DM ont été converties en murs continus comme un matériau équivalent avec des propriétés équivalentes pour la modélisation sur PLAXIS.

Les colonnes DM de 1 m de diamètre et un module d'élasticité de 30 MPA (D=1m, Ec=30MPa) ont été converties à un matériau équivalent avec de propriété équivalente pour la modélisation sur PLAXIS comme un mur continu en déformation plane sur la base des équations présentés dans le chapitre 3.

- Pour sh=0.5 m :

$$E_{eq} = \frac{E_c \times \pi \times D^2}{4 \times sh \times d} \rightarrow E_{eq} = \frac{30000 \times \pi \times 1^2}{4 \times 0.5 \times 0.9} \rightarrow E_{eq} = 52359,87 \text{ KN/m}^2.$$

- Pour sh=1 m :

$$E_{eq} = \frac{E_c \times \pi \times D^2}{4 \times sh \times d} \rightarrow E_{eq} = \frac{30000 \times \pi \times 1^2}{4 \times 1 \times 0.9} \rightarrow E_{eq} = 26179,93 \text{ KN/m}^2.$$

- Pour sh=2 m :

$$E_{eq} = \frac{E_c \times \pi \times D^2}{4 \times sh \times d} \rightarrow E_{eq} = \frac{30000 \times \pi \times 1^2}{4 \times 2 \times 0.9} \rightarrow E_{eq} = 13089,96 \text{ KN/m}^2.$$

Le modèle 2D équivalent a été sélectionné en générant des résultats avec une précision raisonnable.

Le tableau 4.2 résume les détails du matériau équivalent pour la modélisation.

Tableau 4. 2: Détail du matériau équivalent.

Espacement des colonnes	Module d'élasticité équivalent
Sh=0.5 m.	Eeq= 52359,87 KN/m ² .
Sh=1 m.	Eeq= 26179,93 KN/m ² .
Sh=2 m.	Eeq= 13089,96 KN/m ² .

4.2.3. Les étapes de modélisation du modèle

- 1- Dans la fenêtre input on commence par la création du modèle géométrique du sol et du remblai et des colonnes DM avec les propriétés de chaque matériau.

- Les colonnes DM ont été modélisées avec le critère Mohr-Coulomb.
 - Le remblai, le sol meuble ont été modélisés avec le critère Mohr-Coulomb.
- 2- Dans la même fenêtre on génère le maillage d'éléments finis correspondant et les conditions initiales.
 - 3- Dans la fenêtre de calcul on définit les phases de calcul ; les calculs numériques ont été faits en 3 phases qui sont :
 - La première phase : définir le sol et les colonnes DM dans le type de calcul plastic.
 - La deuxième phase : définir le remblai dans le type de calcul plastic.
 - La 3ème phase : pour le calcul du facteur de sécurité dans le type de calcul de Phi/c réduction.
 - 4- Après avoir terminée les phases de calcul on clique sur (calculate) les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont affichés grâce à la touche <<output>>.
 - 5- Visualisation des Résultats on prend en considération le maillage déformé et le cercle de glissement et le facteur de sécurité.

4.2.4. Modélisation du modèle sans renforcement

On commence l'étude numérique du remblai sur sol mou sans renforcement (sans colonnes en DM) et déterminé le facteur de sécurité pour les pentes 30° et 45° et 60°.

A) Pente de 30°

- La modélisation sur PLAXIS et La géométrie du sol et du remblai sans colonnes DM est présenté dans la figure 4.2.

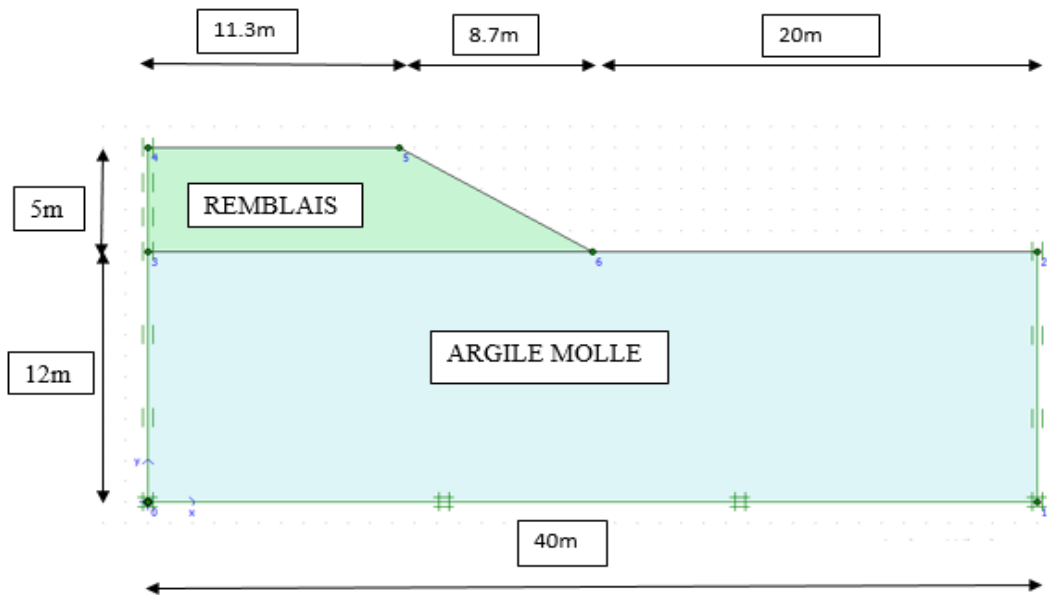


Figure 4. 2: Géométrie du modèle sans colonnes DM avec une pente de 30° .

- Le maillage déformé du modèle et présenté dans la figure 4.3.

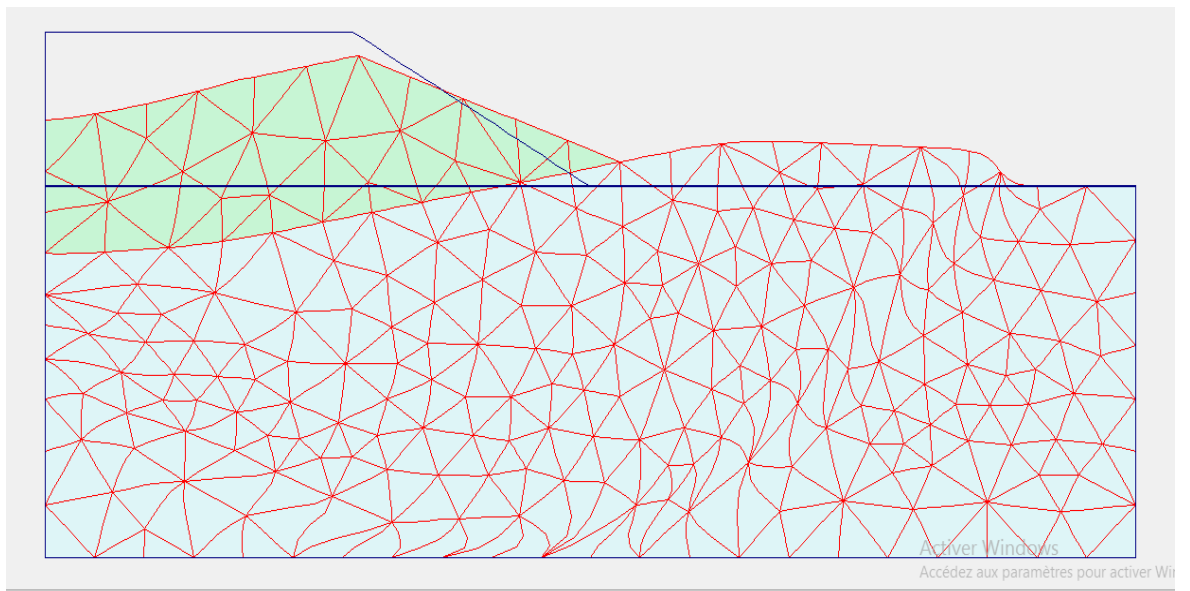


Figure 4. 3: Maillage déformé du modèle avec une pente de 30° .

- Le cercle de glissement du modèle est présenté dans la figure 4.4.

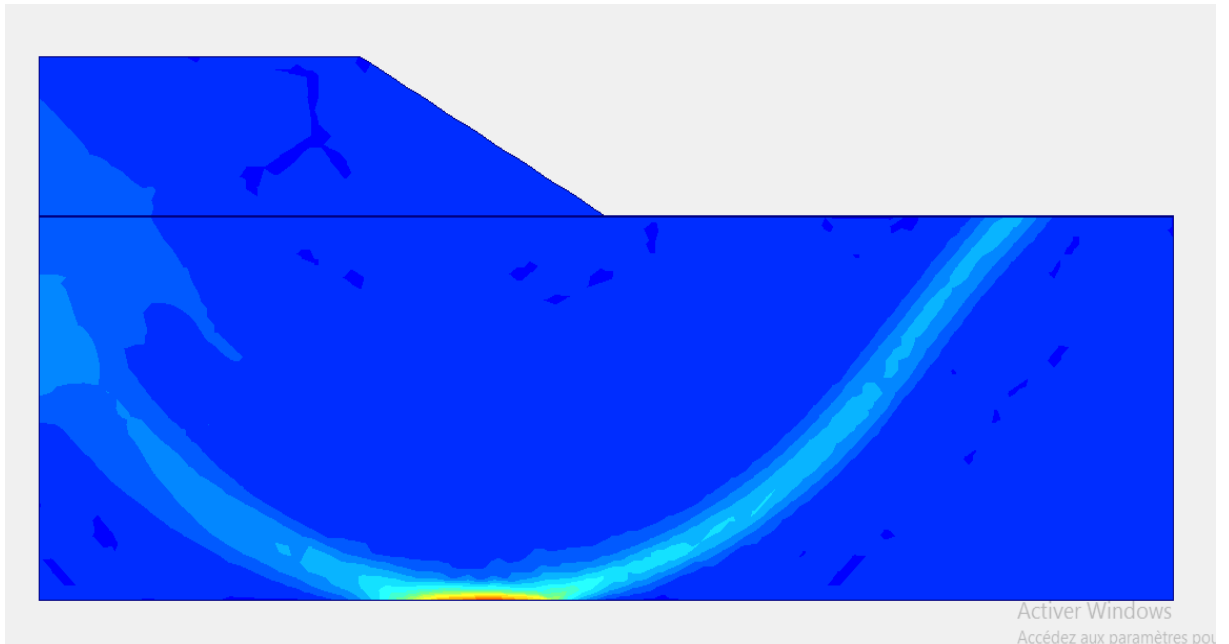


Figure 4. 4: Cercle de glissement du modèle pour une pente de 30°.

- Le facteur de sécurité est présenté dans la figure 4.5 qui est égale à 1.687 pour une pente de 30°.

Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	107 of 107	Extrapolation factor	2,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000

	Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,687
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time:	0,000

OK Print Help

Figure 4. 5: Facteur de sécurité pour une pente de 30°.

B) Pente de 45°

- La modélisation sur PLAXIS et La géométrie du sol et du remblai sans colonnes DM et présenté dans la figure 4.6.

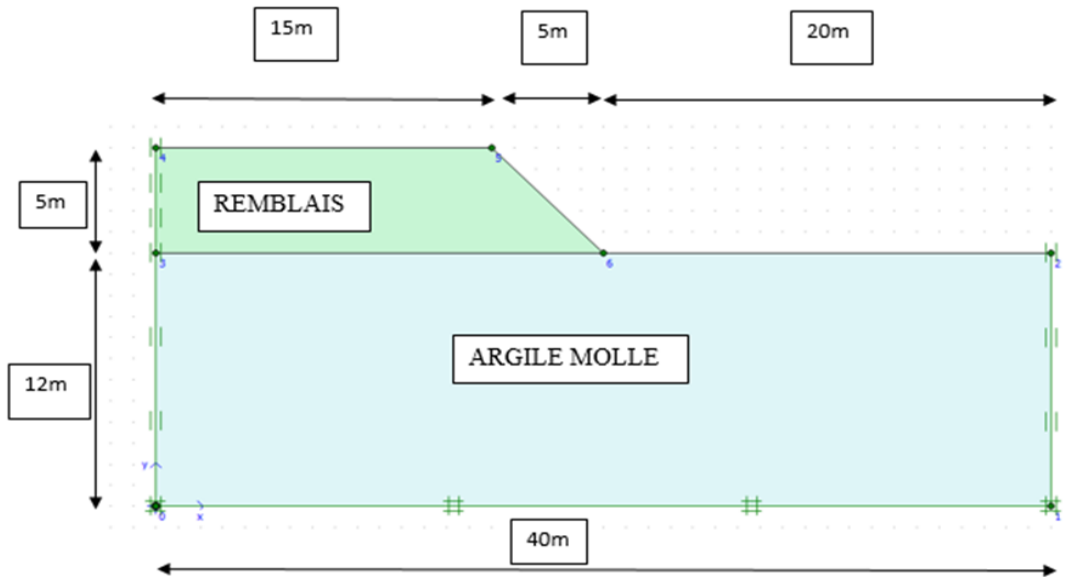


Figure 4. 6: Géométrie du modèle sans colonnes DM avec une pente de 45°.

- Le maillage déformé du modèle et présenté dans la figure 4.7.

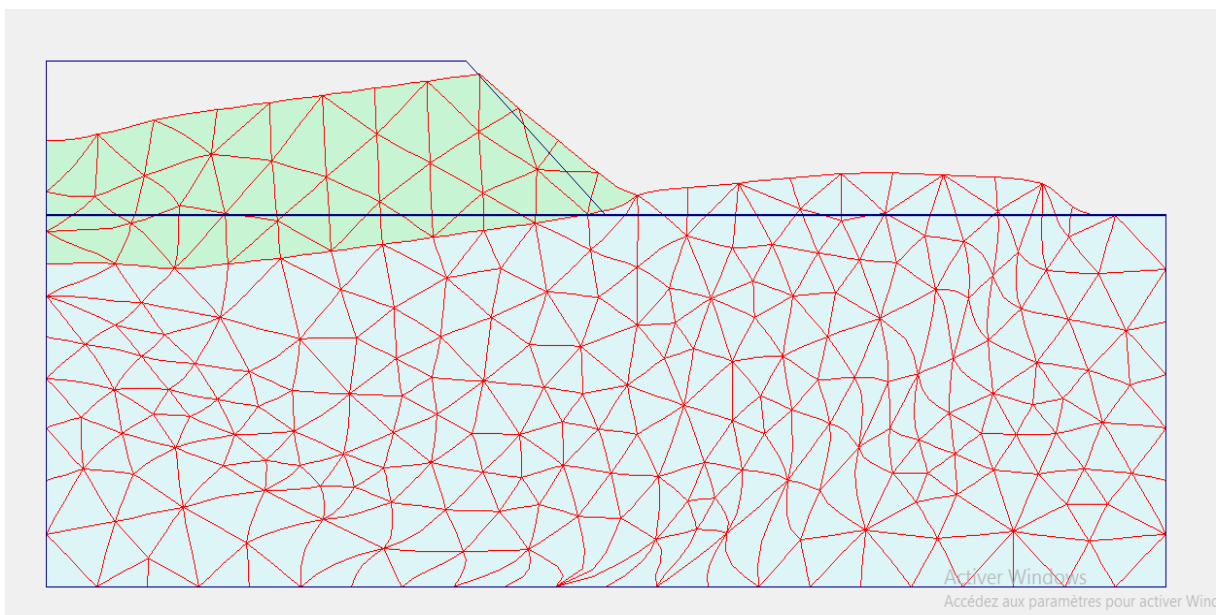


Figure 4. 7: Maillage déformé du model avec une pente de 45°.

- Le cercle de glissement du modèle est présenté dans la figure 4.8.

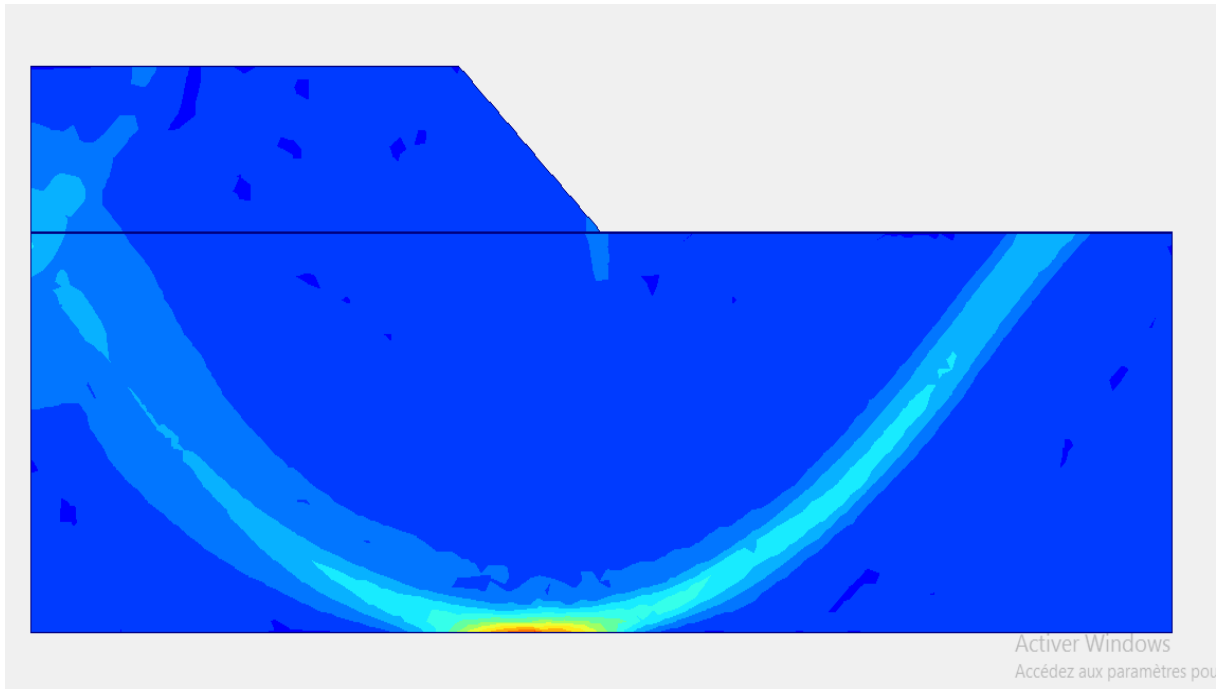


Figure 4. 8: Cercle de glissement du model pour une pente de 45°.

- Le facteur de sécurité est présenté dans la figure 4.9 qui est égale à 1.665 pour une pente de 45 °.

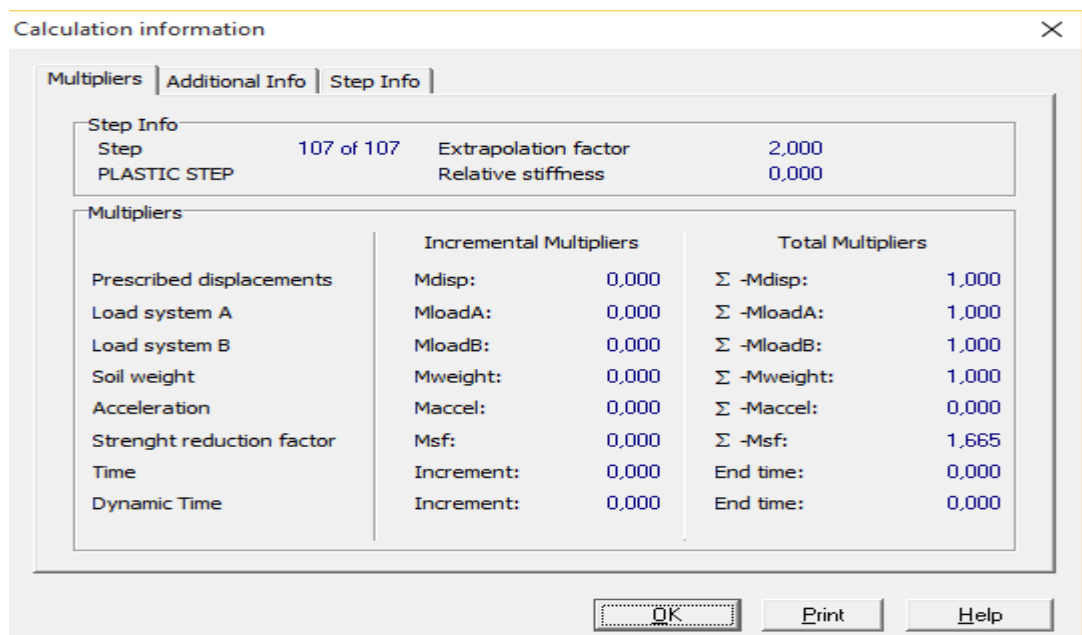


Figure 4. 9: Facteur de sécurité pour une pente de 45 °.

C) Pente de 60°

- La modélisation sur PLAXIS et La géométrie du sol et du remblai sans colonnes DM et présenté dans la figure 4.10.

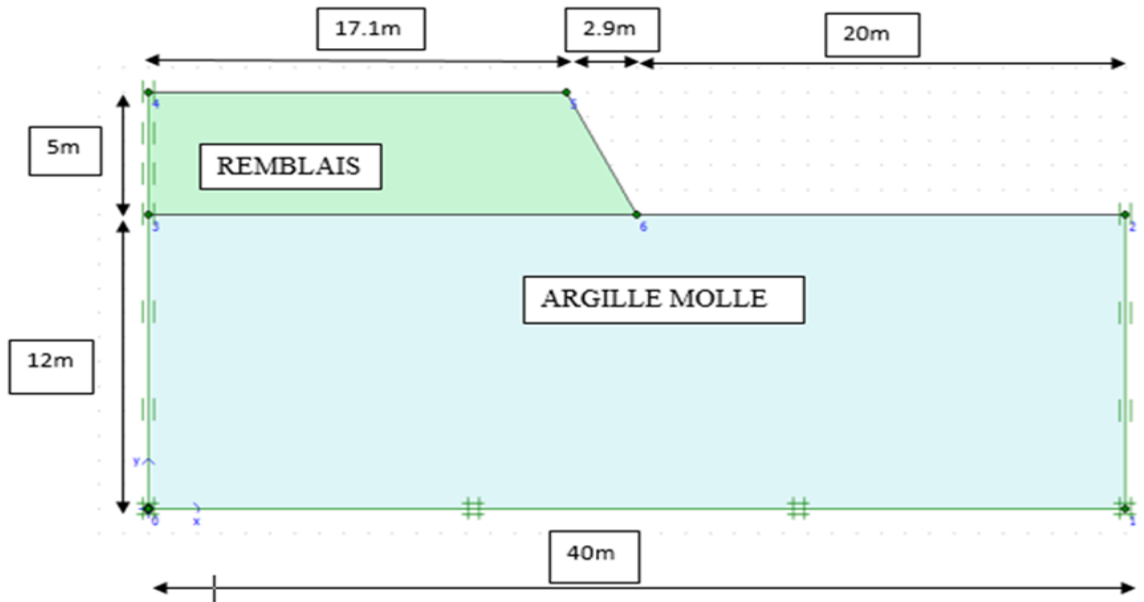


Figure 4. 10: Géométrie du modèle sans colonnes dm avec une pente de 60 °.

- Le maillage déformé du modèle et présenté dans la figure 4.11.

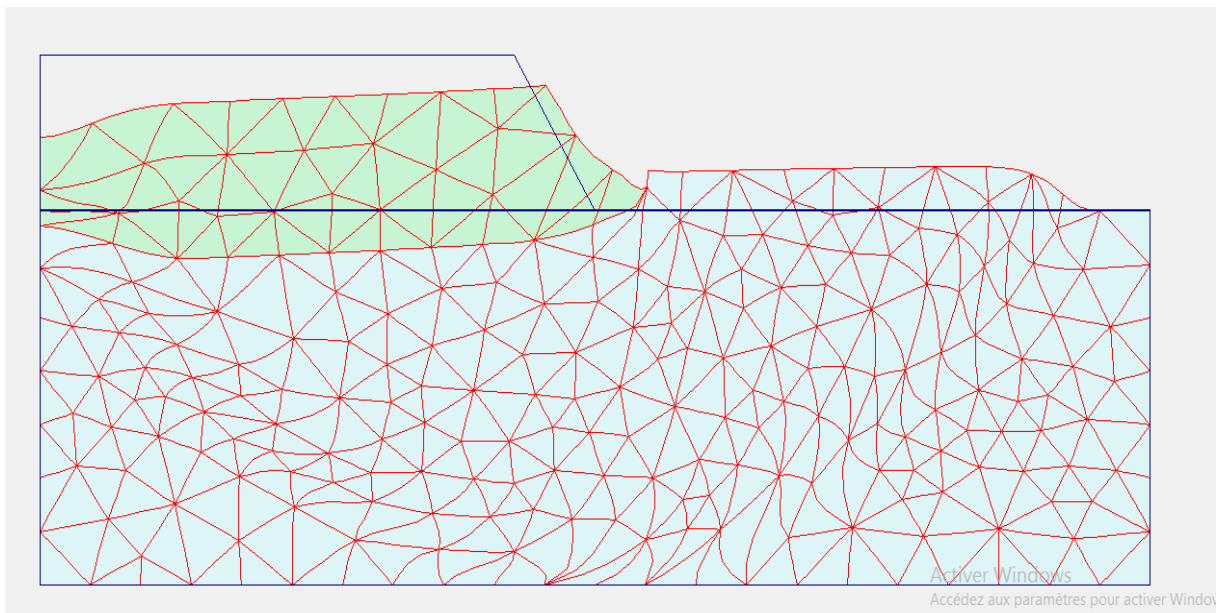


Figure 4. 11: Maillage déformé du model avec une pente de 60 °.

- Le cercle de glissement du modèle est présenté dans la figure 4.12.

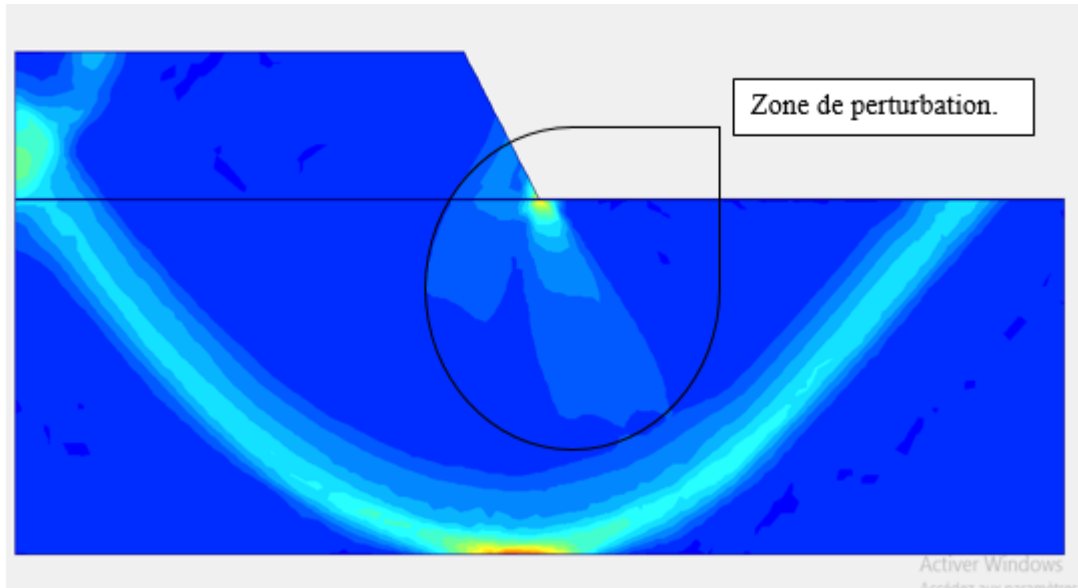


Figure 4. 12: Cercle de glissement du modèle pour une pente de 60 °.

- Le facteur de sécurité est présenté dans la figure 4.13 qui est égale à 1.64 pour une pente de 60 °.

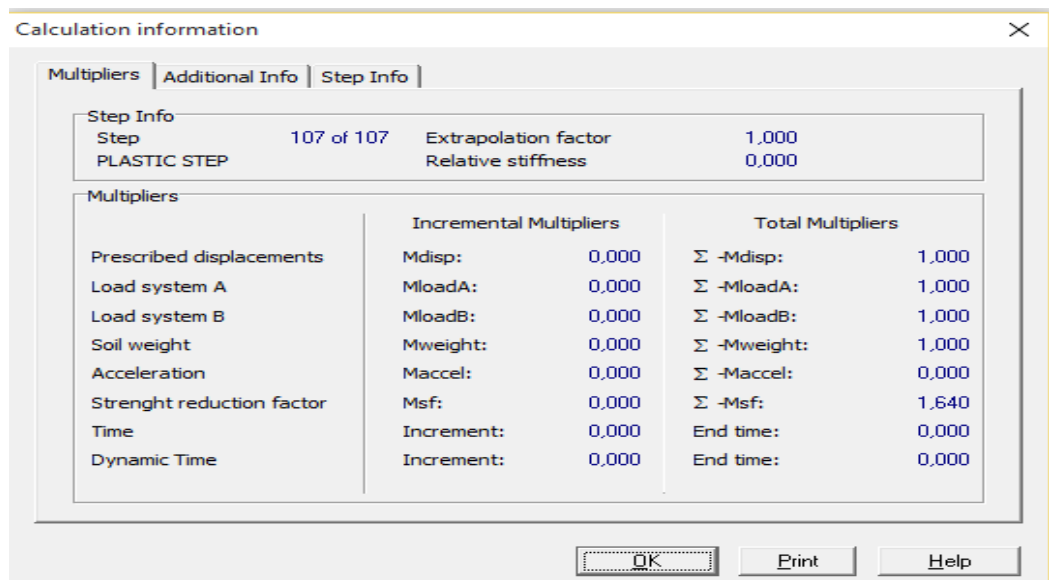


Figure 4. 13: Facteur de sécurité pour une pente de 60 °.

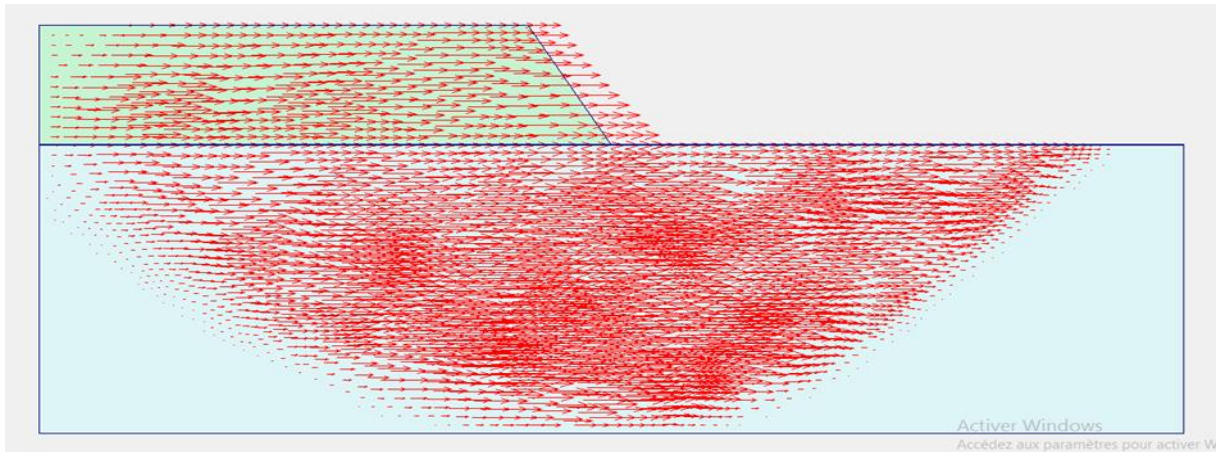


Figure 4. 14: Déplacement horizontal du remblai et du sol.

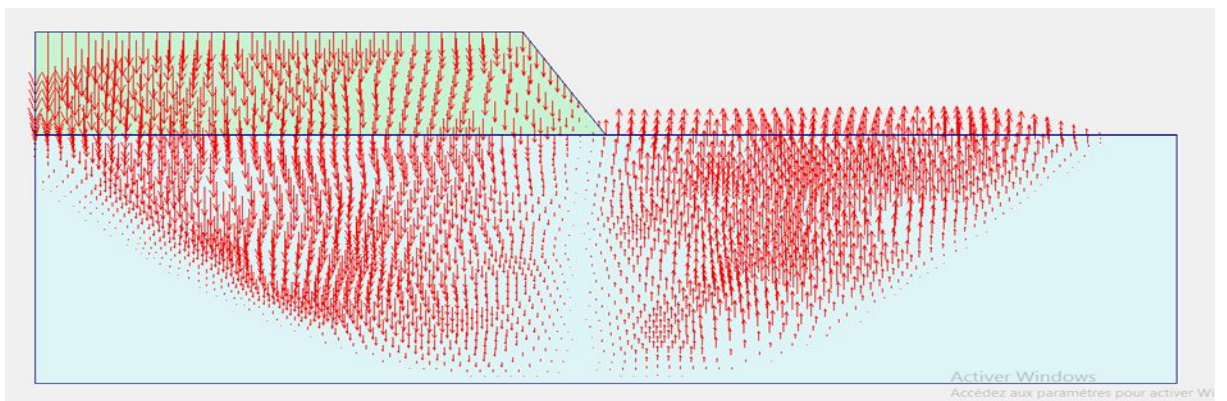


Figure 4. 15: Déplacement vertical du remblai et du sol.

Tableau 4. 3: Facteur de sécurité pour les pentes 30°, 45°, 60°.

Pente	Facteur de sécurité
Pente de 30°	Fs=1.687
Pente de 45°	Fs=1.665
Pente de 60 °	Fs=1.640

4.2.4.1. Discussion des résultats :

- 1- Pour les trois pentes des remblais sur argile molle on a un déplacement horizontal du remblai et du sol ; et un déplacement vertical du remblai et du sol vers l'intérieure avant le parement du talus ; et un déplacement vertical du sol vers extérieure juste après le parement ce qui signifie les déformations du maillage donné par le logiciel Les déplacements horizontal et vertical du remblai et du sol sont présentés dans les figures 4.14 et 4.15.
- 2- Un remblai sur un sol non traité a été choisi comme cas de référence. Il est montré que de hauts taux de déformation en cisaillement élevés se sont développés dans le

remblai et le sol mou, ce qui a créé une zone de glissement critique. La forme de cette zone de glissement critique est circulaire.

- 3- L'instabilité de la pente de remblais est développée à travers le sol, on a un cercle de glissement profond continu.
- 4- Le facteur de sécurité du remblai sur sol mou sans renforcement pour les trois pentes et donné dans le tableau 4.3 ; à chaque fois que la pente augmente le facteur de sécurité diminue.

4.2.5. Modélisation du modèle avec renforcement du sol aux colonnes en deep mixing

Dans cette partie de l'étude numérique du remblai sur sol mou en utilisant la technique de renforcement colonnes en DEEP MIXING en variant pour chaque pente étudier dans la partie précédente le nombre des colonnes (2 ;4 ;6 ;8 ;10) et les longueurs (4m ;8 m ;12m) des colonnes pour voir et déduire les facteurs qui influe sur le facteur de sécurité.

4.2.5.1. Modélisation avec $sh=0.5m$, $E_{eq}=52359,87 \text{ KN/m}^2$ pour une pente 30°

1) Amélioration avec 2 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 2 colonnes en DM en variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m) et voir les déformations du maillage et le cercle de glissement et les facteurs de sécurité.

➤ Amélioration avec 2 colonnes de 4m de longueur

- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.16.

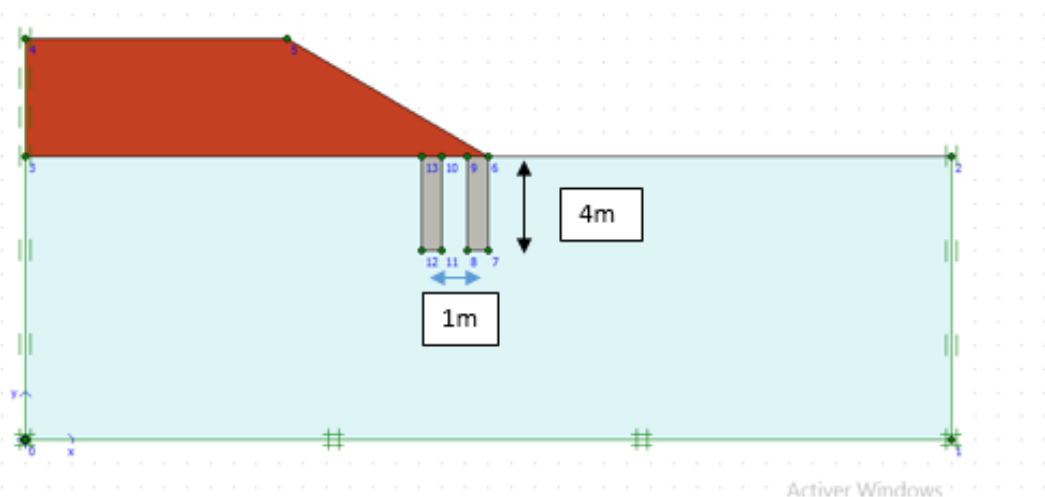


Figure 4. 16: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle et présenté dans la figure 4.17.

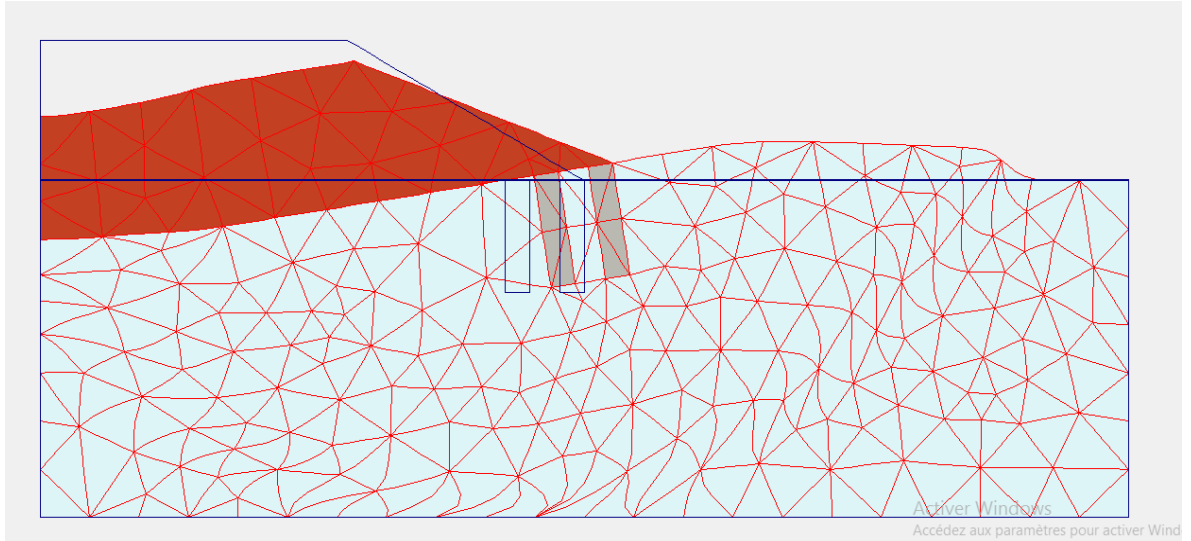


Figure 4. 17: Le maillage déformé du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.18.

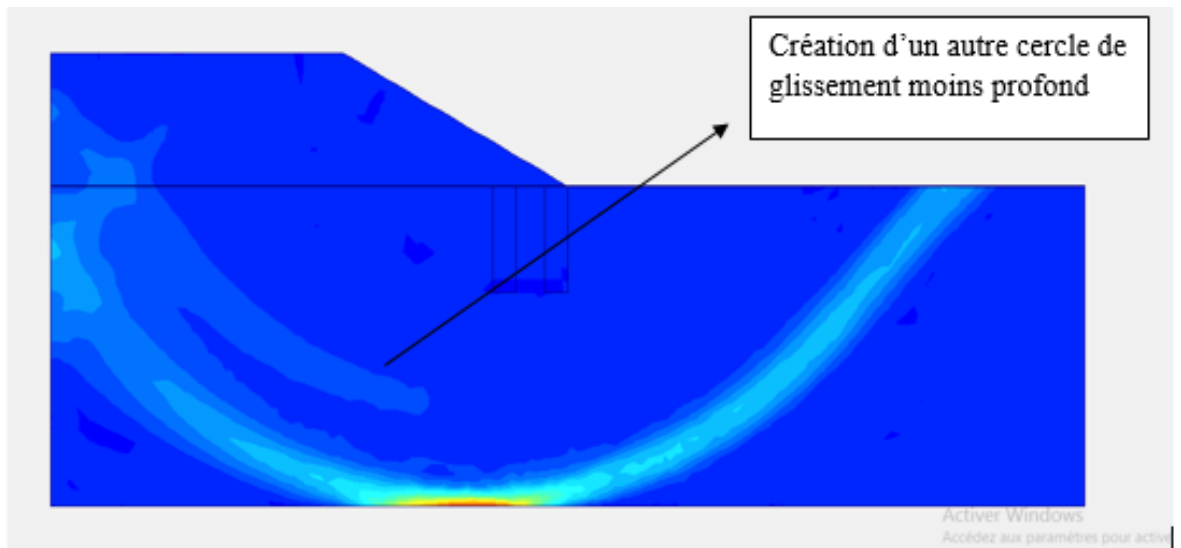


Figure 4. 18: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.701 et il est présenté dans la figure 4.19.

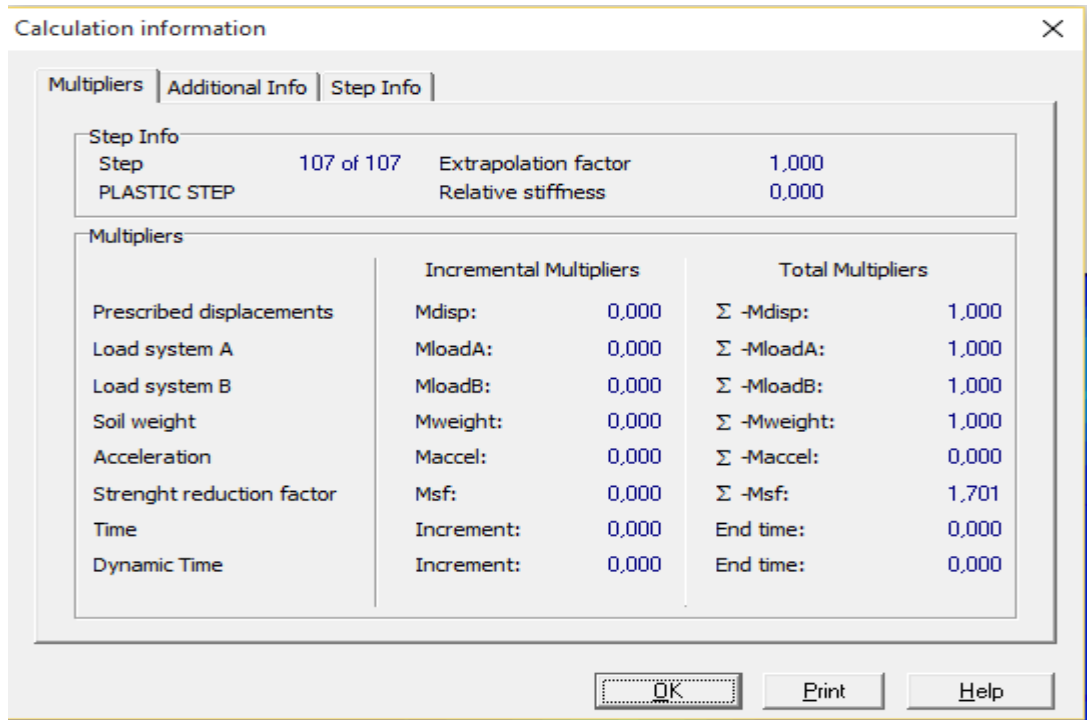


Figure 4. 19: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 2 colonnes de 8m de longueur**
 - La géométrie du modèle est présentée dans la figure 4.20.

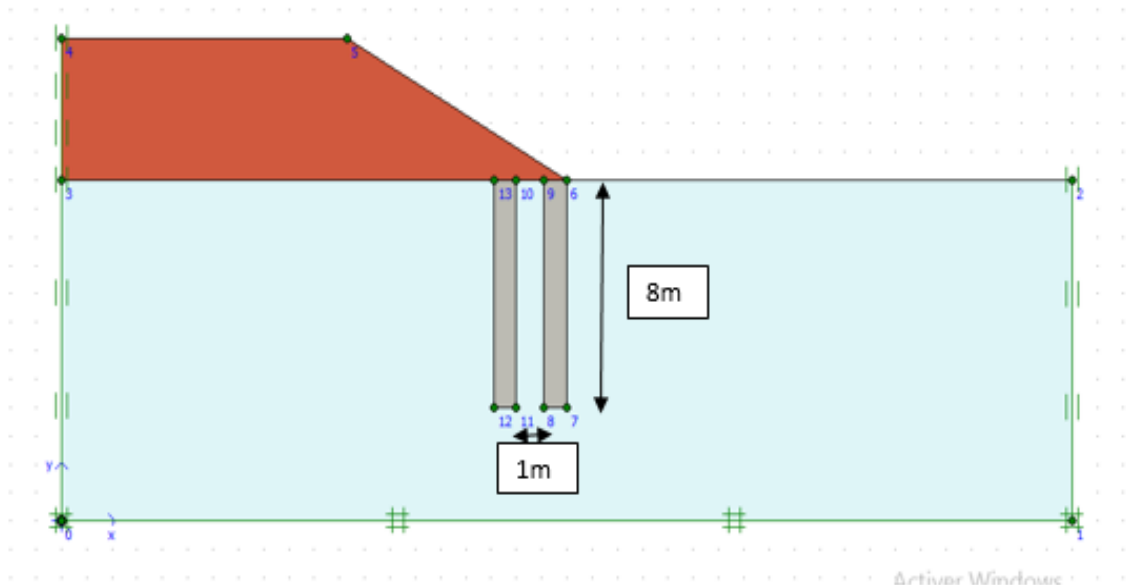


Figure 4. 20: Géométrie du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est dans la figure 4.21.

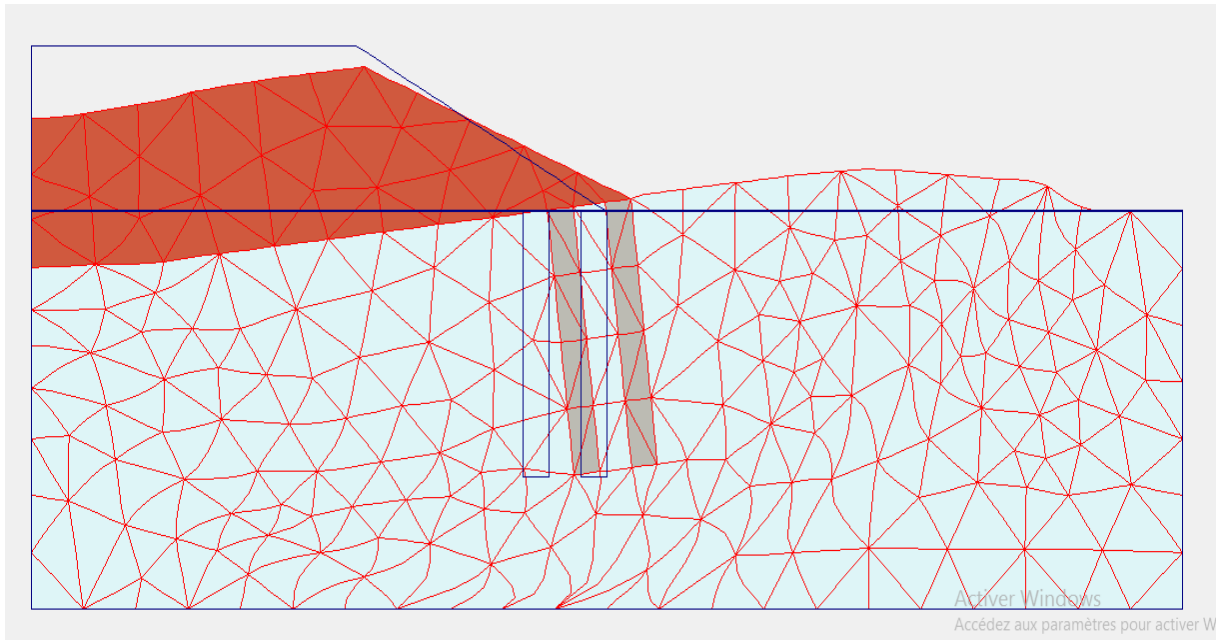


Figure 4. 21: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.22.

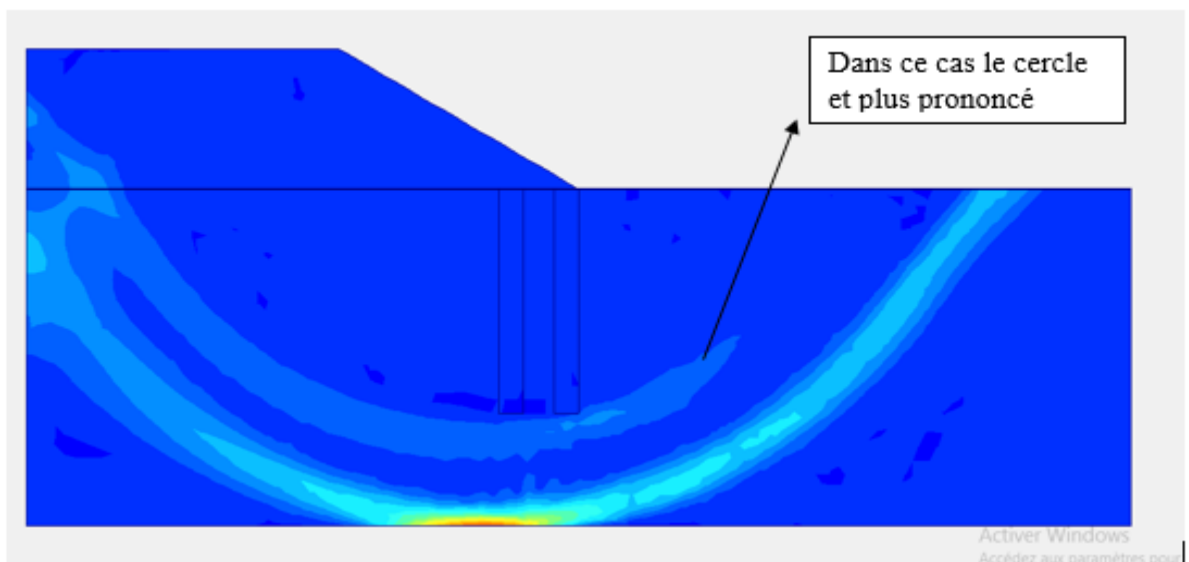


Figure 4. 22: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.713 et il est présenté dans la figure 4.23.

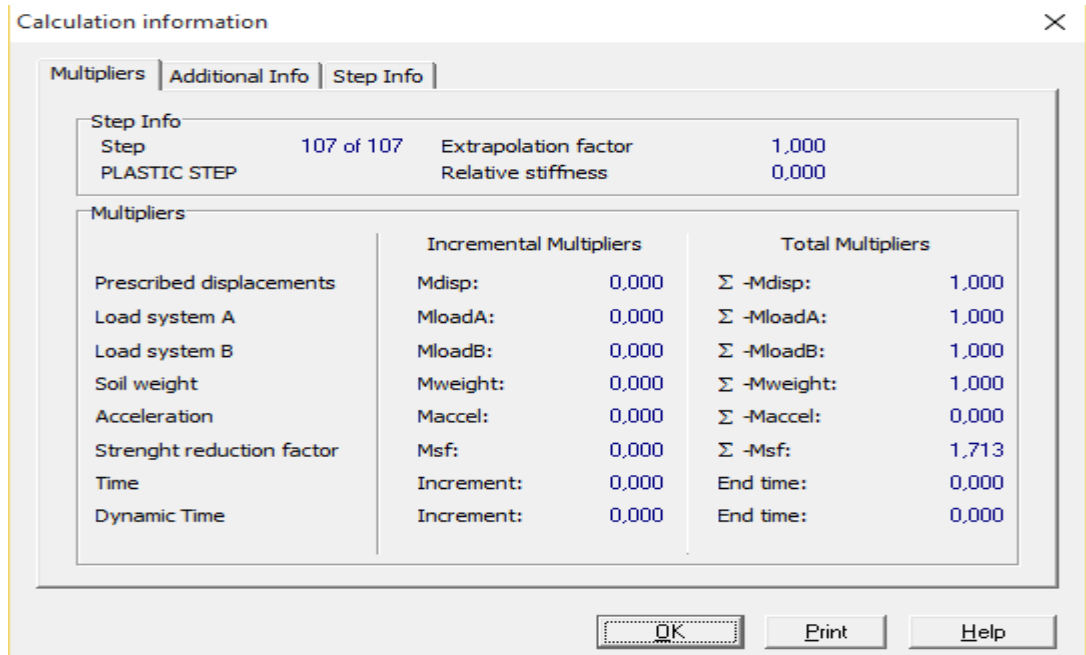


Figure 4. 23: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Amélioration avec 2 colonnes de 12m de longueur
 - La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.24.

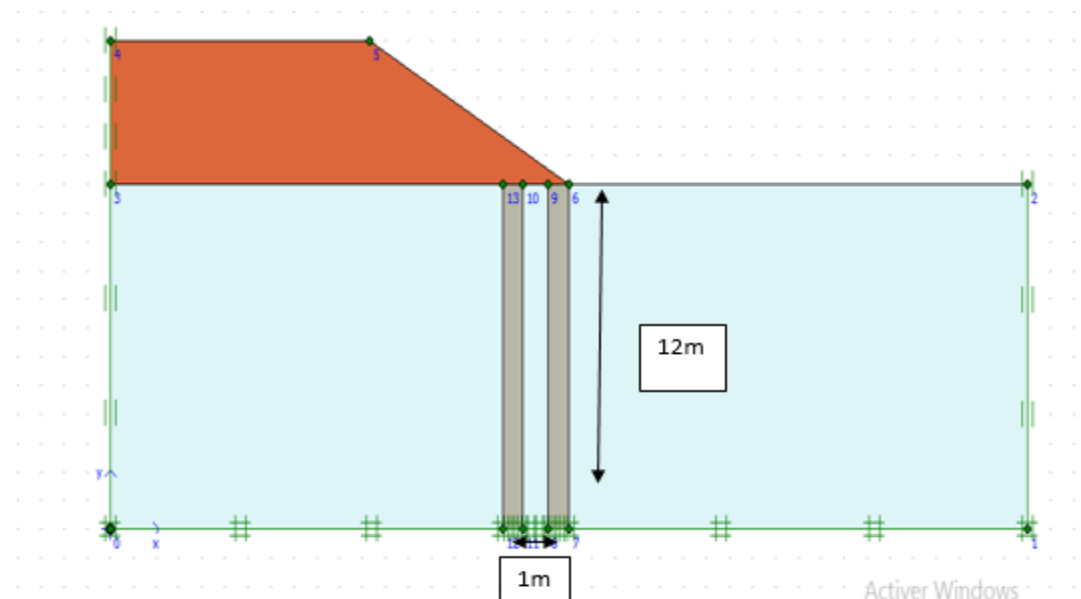


Figure 4. 24: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est dans la figure 4.25.

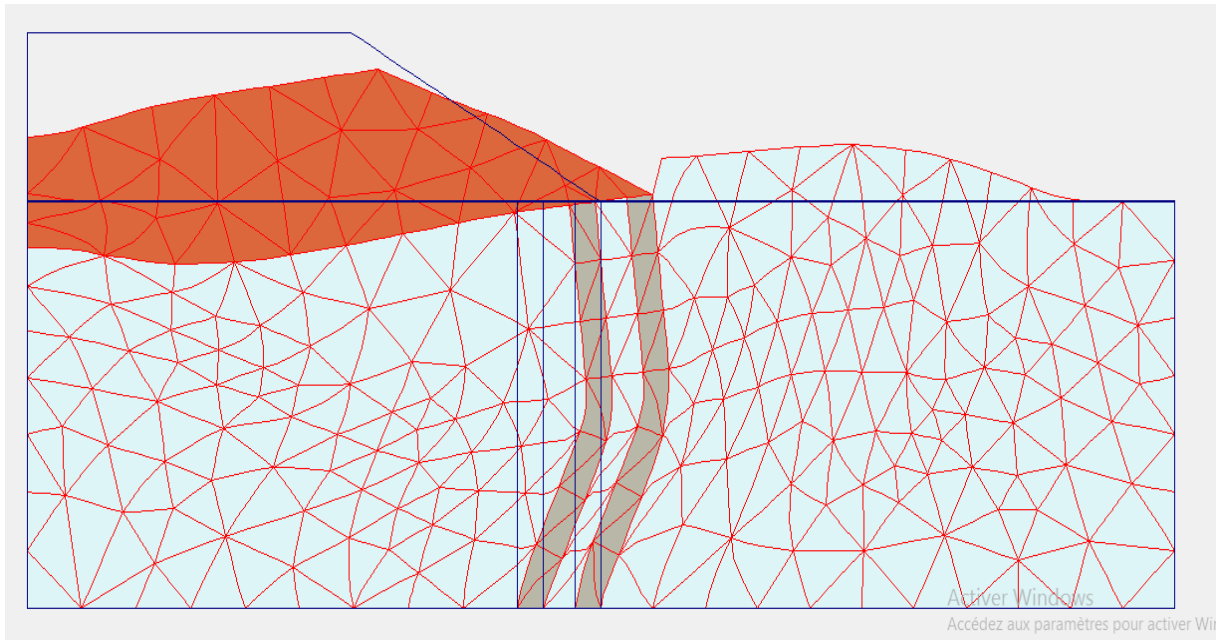


Figure 4. 25: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.26.

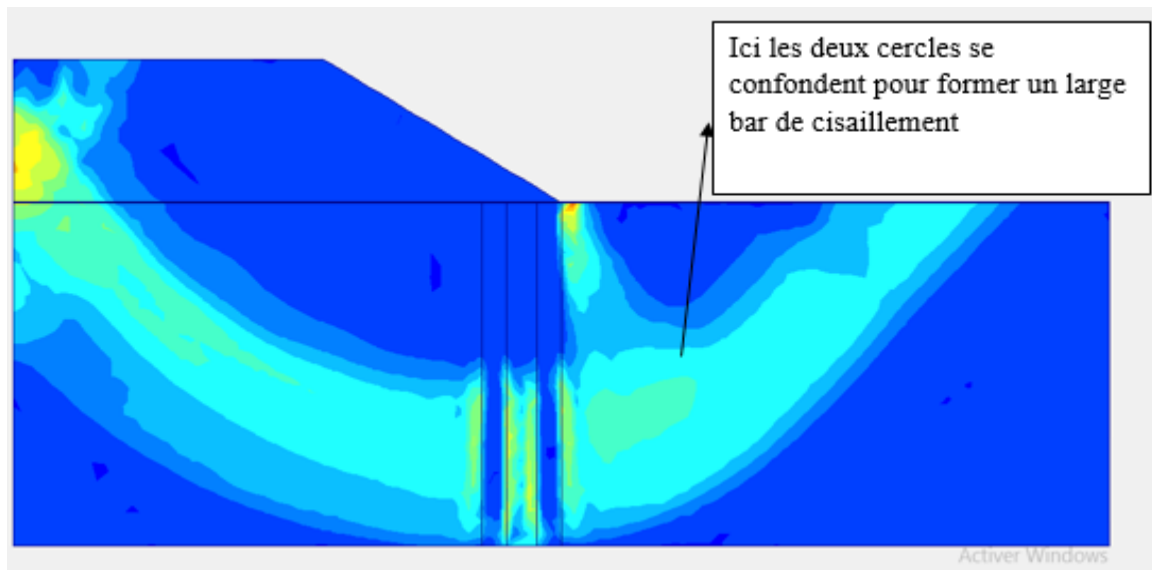


Figure 4. 26: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.839 et il est présenté dans la figure 4.27.

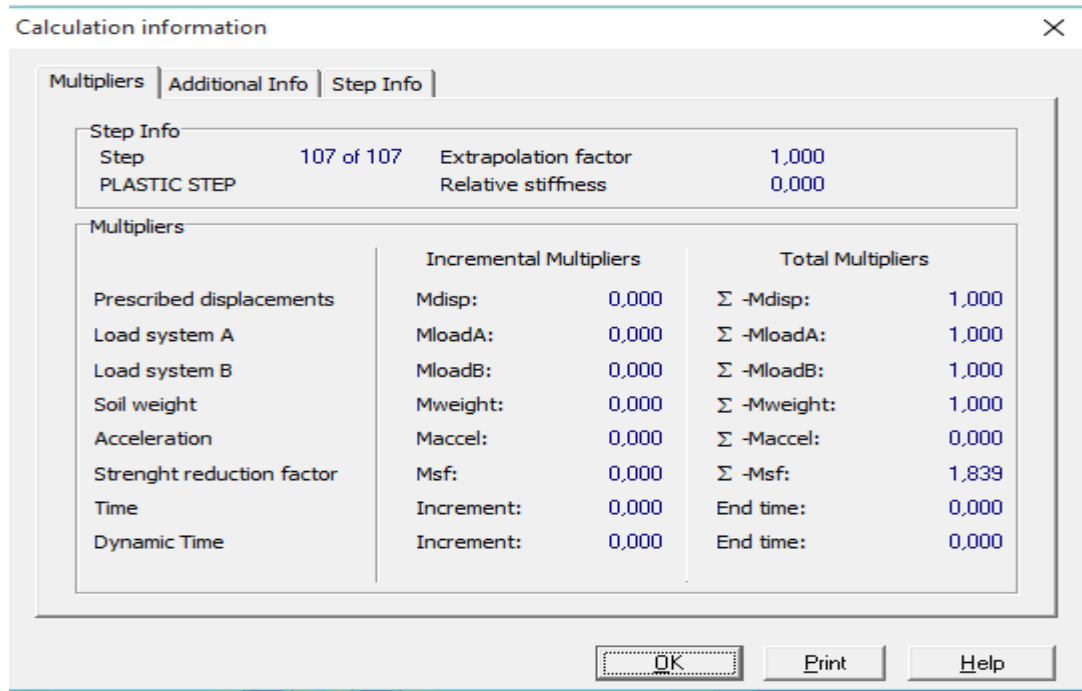


Figure 4. 27: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- La figure 4.28 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 30° renforcé par 2 colonnes.

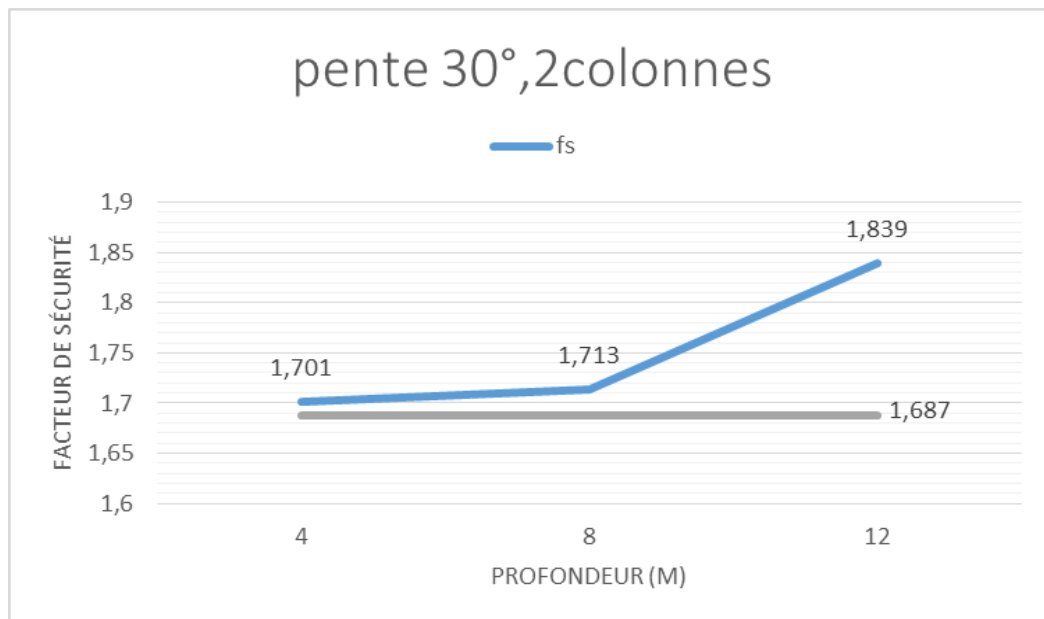


Figure 4. 28: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°.

2) Amélioration avec 4 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 4 colonnes en DM en variant la longueur. (4m ; 8 m ; 12m).

- Amélioration avec 4 colonnes de 4m de longueur
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.29.

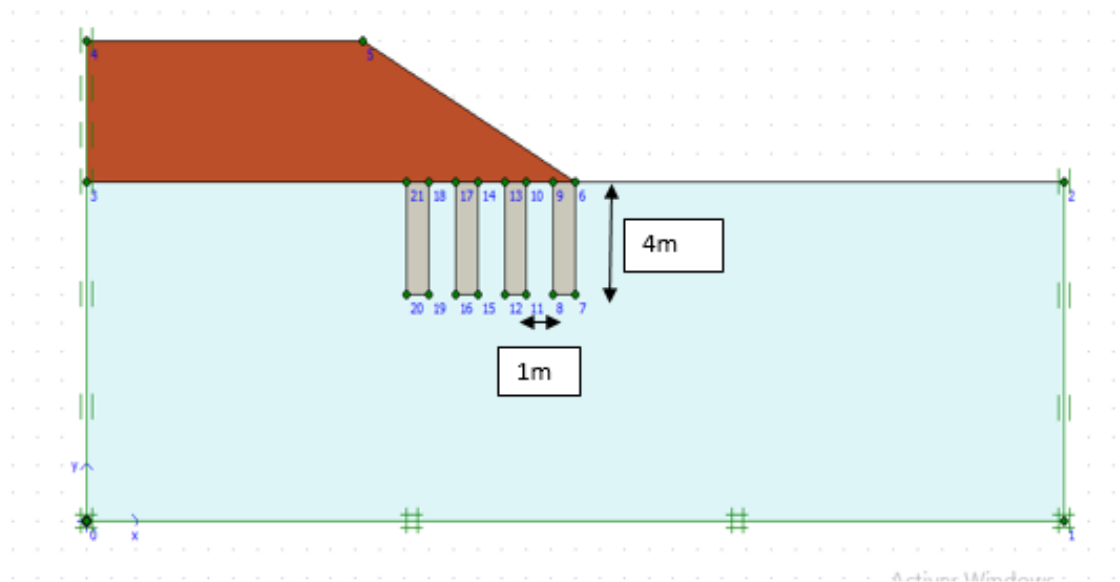


Figure 4. 29: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.30.

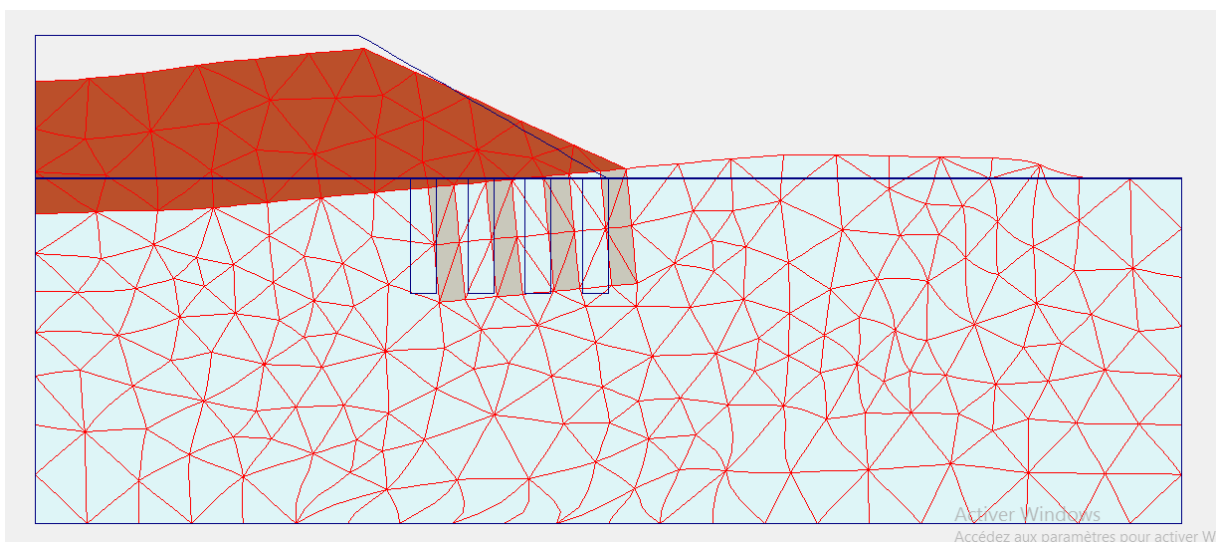


Figure 4. 30: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.31.

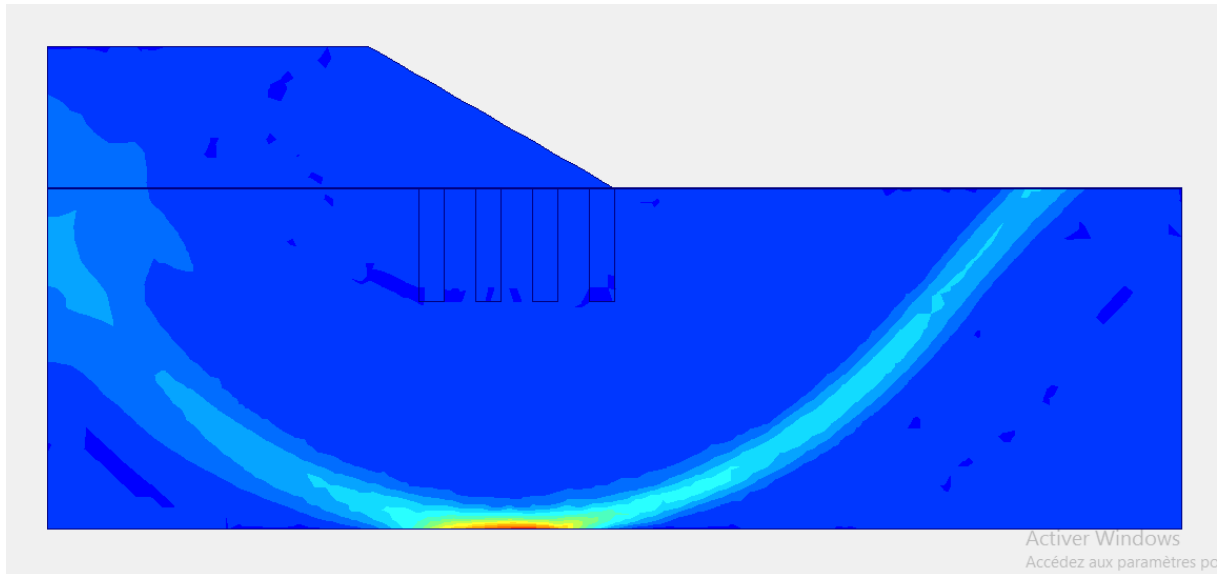


Figure 4. 31: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.693 et il est présenté dans la figure 4.32.

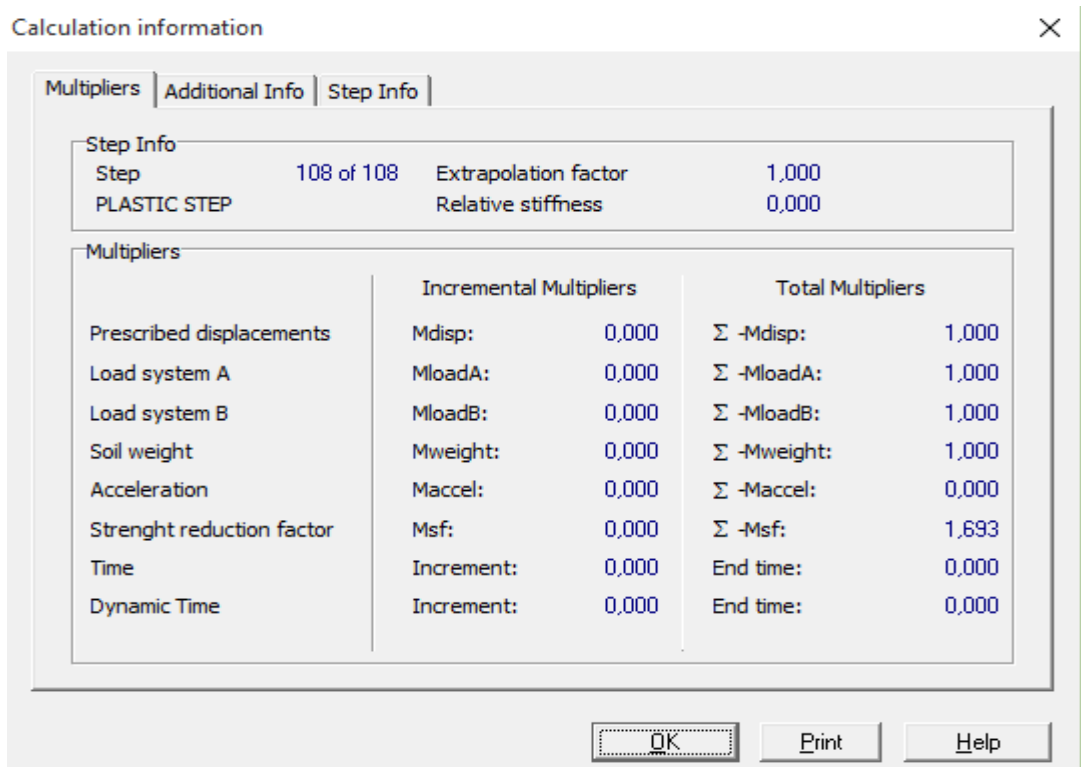


Figure 4. 32: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Amélioration avec 4 colonnes de 8m de longueur
- La géométrie du modèle est présentée dans la figure 4.33.

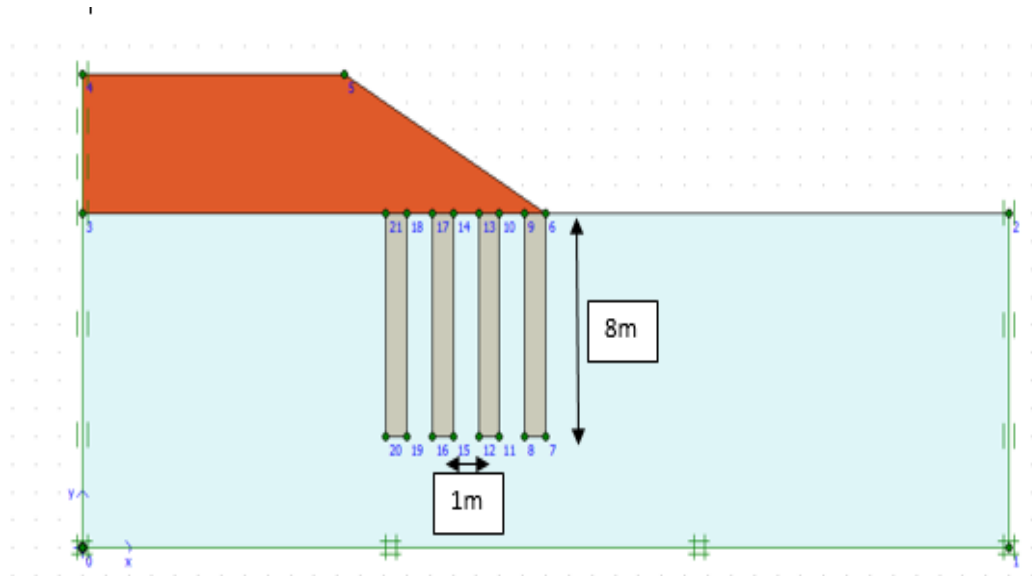


Figure 4. 33: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.34.

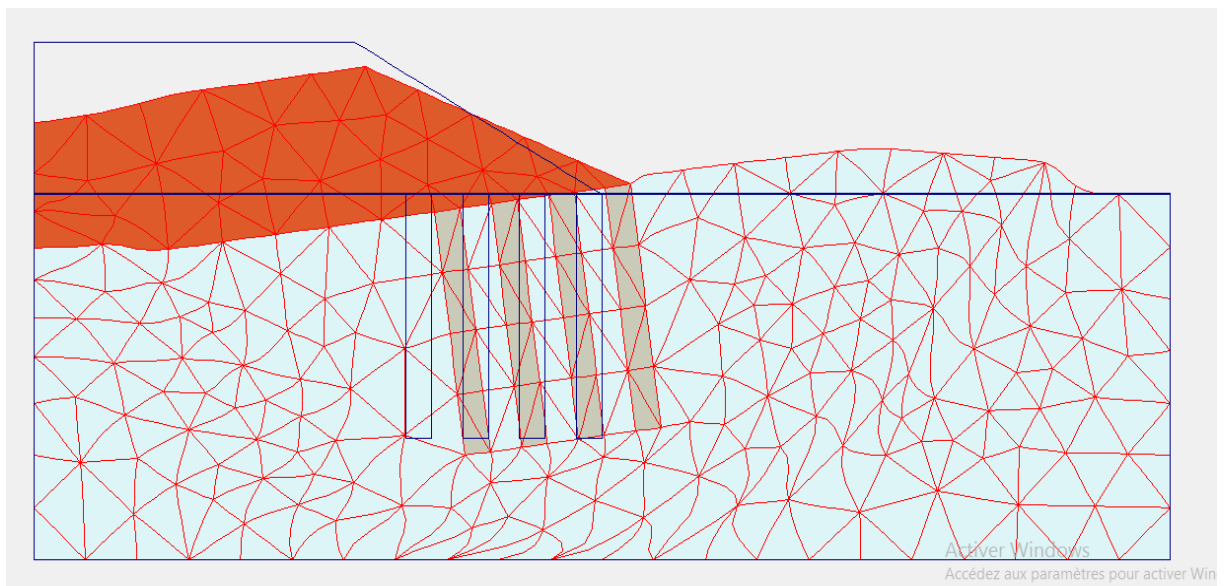


Figure 4. 34: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.35.

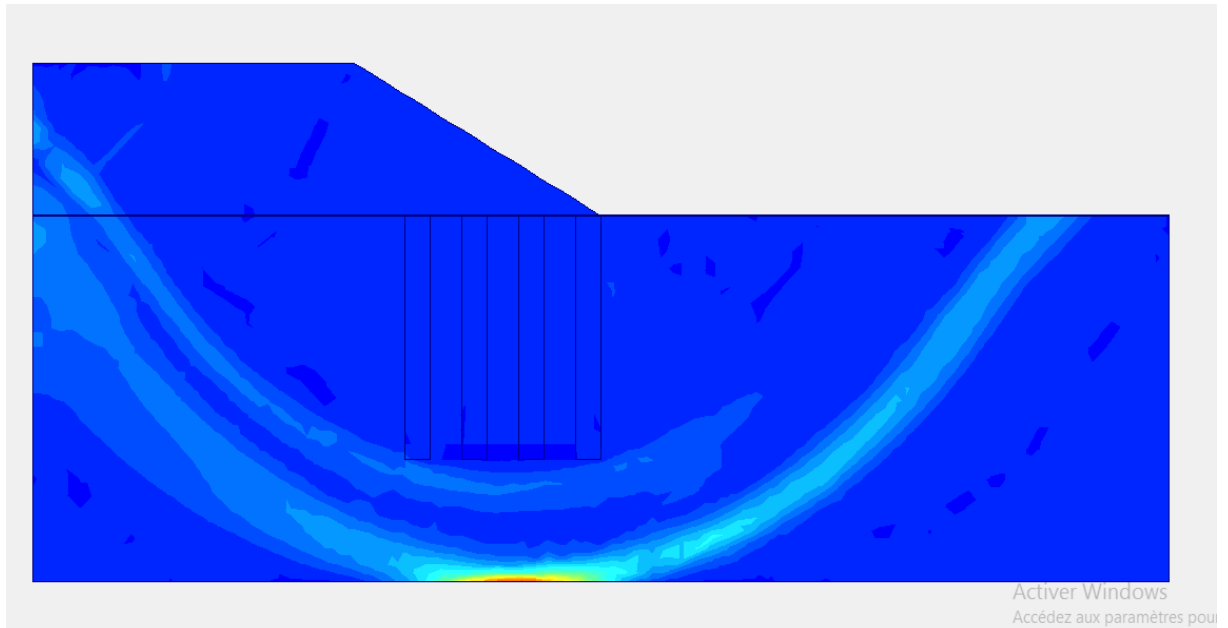


Figure 4. 35: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 8m d'est égalé à longueur 1.693 et il est présenté dans la figure 4.36.

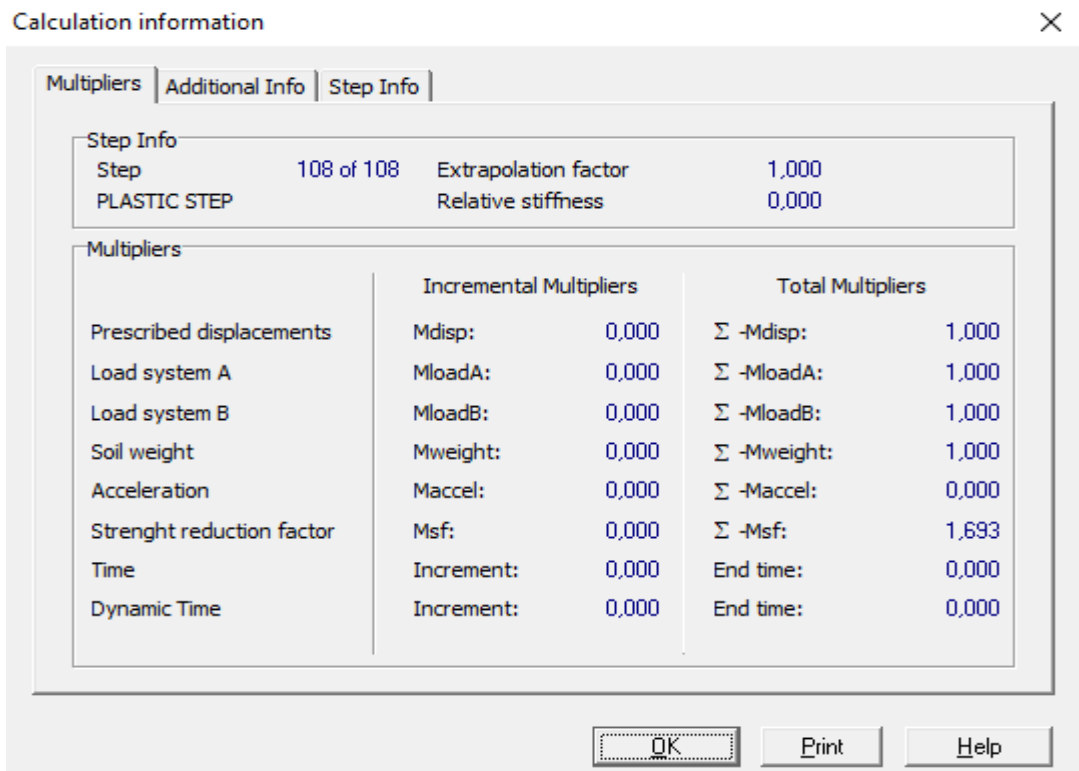


Figure 4. 36: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Amélioration avec 4 colonnes de 12m de longueur
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.37.

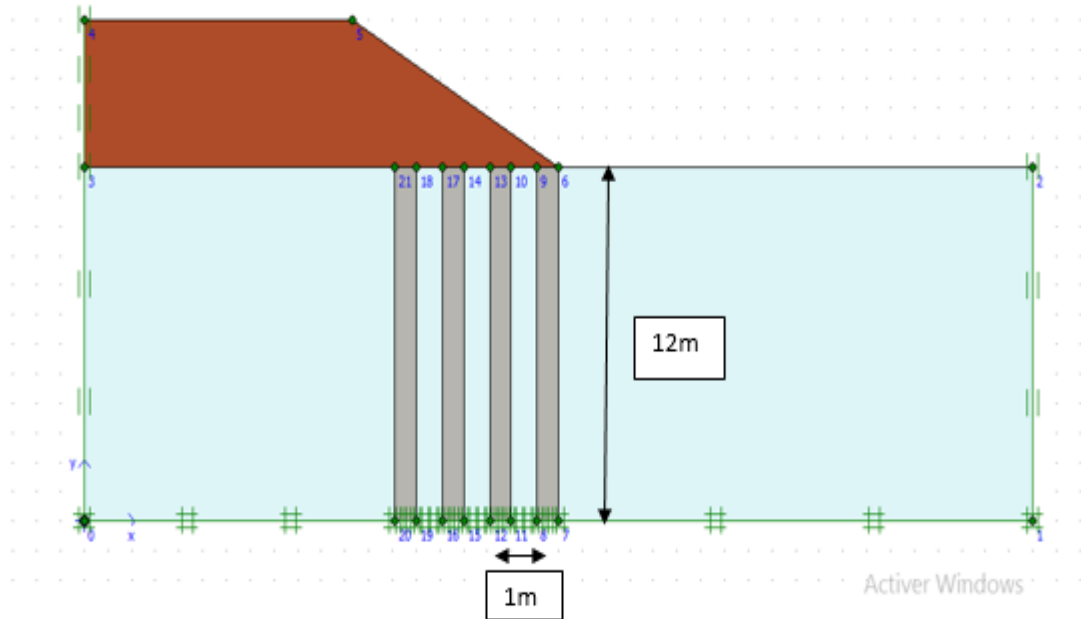


Figure 4. 37: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.38.

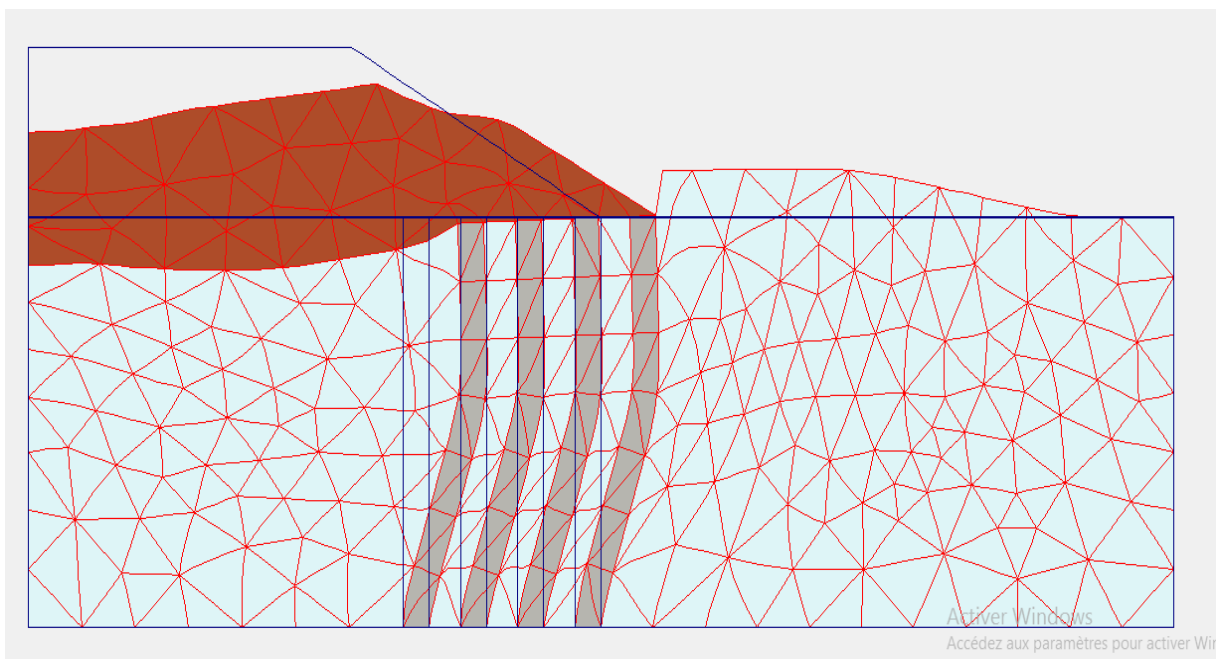


Figure 4. 38: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.39.

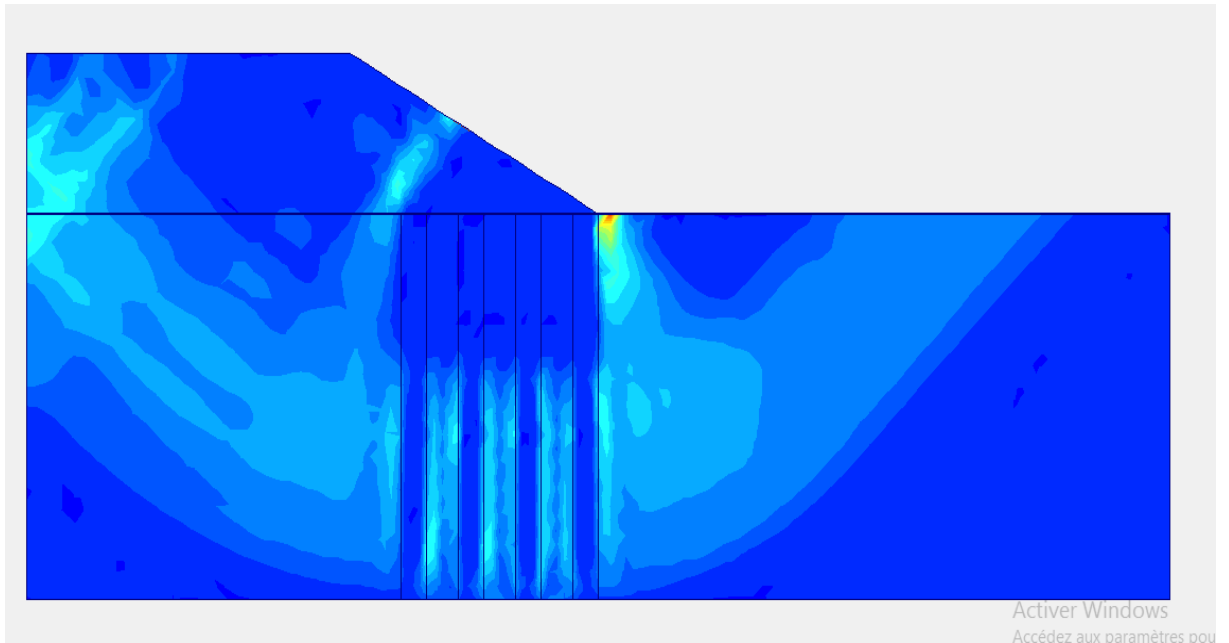


Figure 4. 39: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.908 et il est présenté dans la figure 4.40.

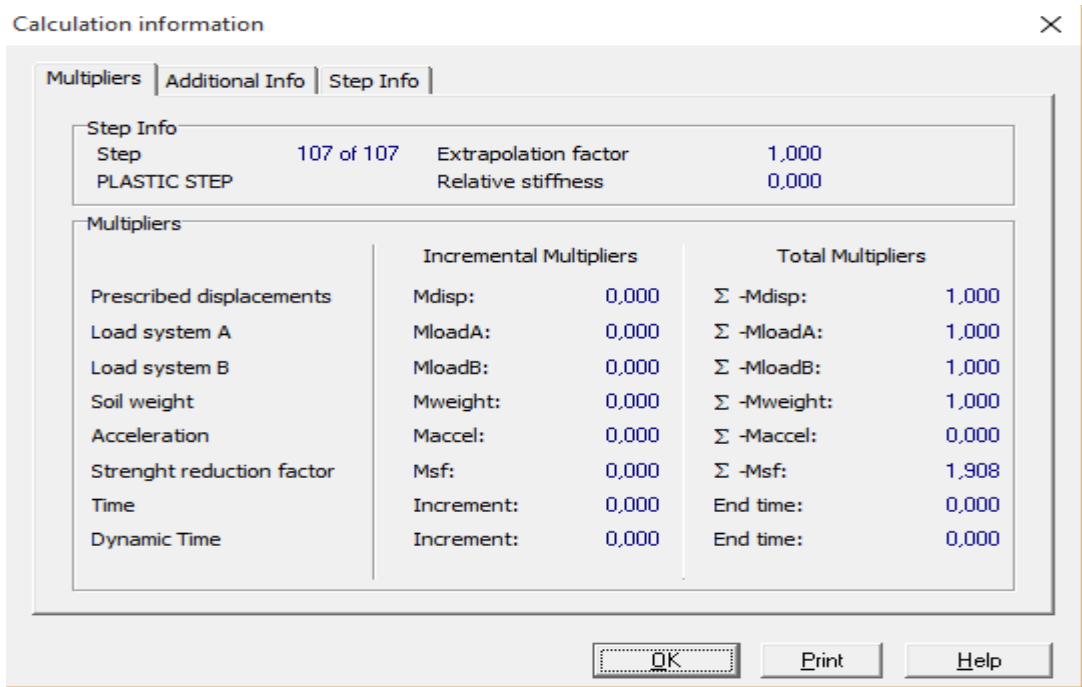


Figure 4. 40: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 4 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 4.41 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 30° renforcé par 4 colonnes.

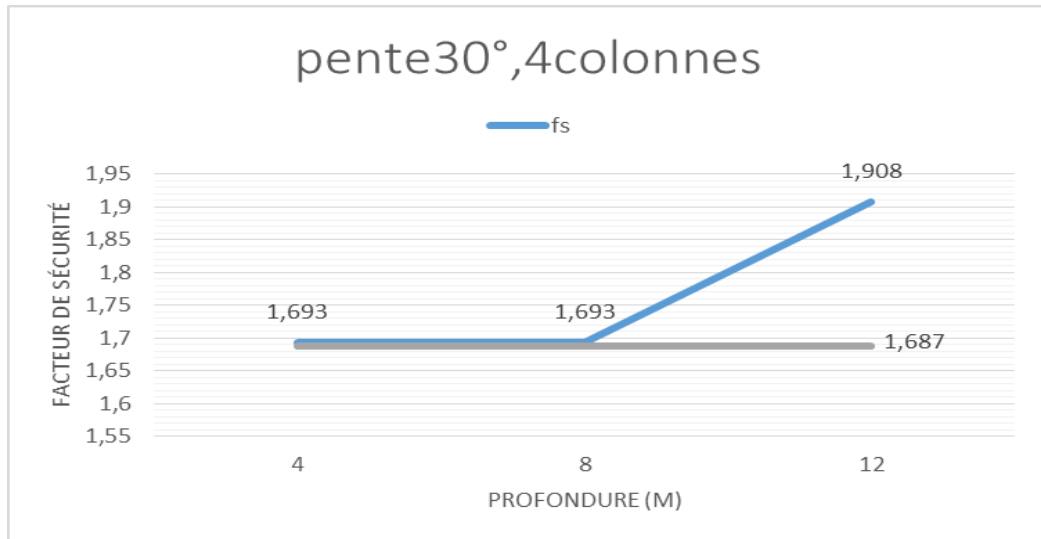


Figure 4. 41: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°.

3) Amélioration avec 6 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 6 colonnes en DM on variant la longueur. (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 6 colonnes de 4m de profondeur**
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.42.

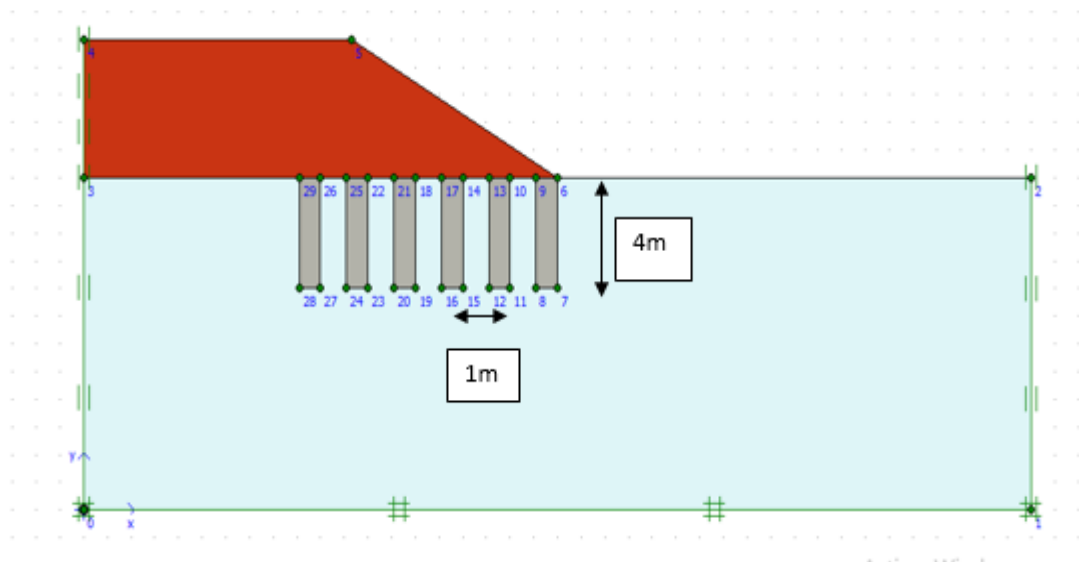


Figure 4. 42: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.43.

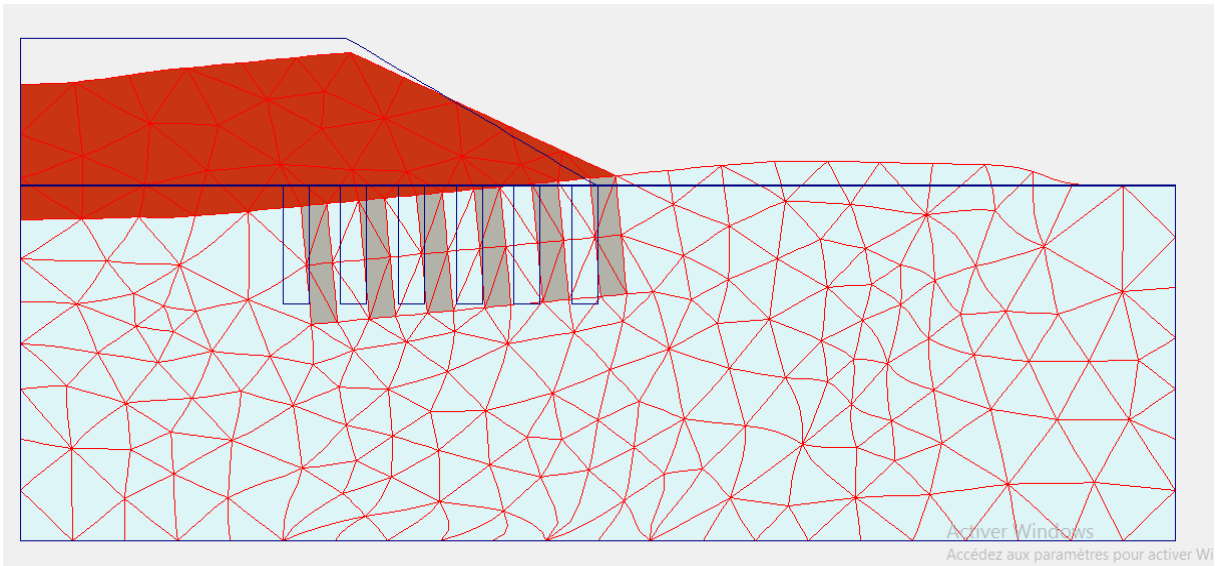


Figure 4. 43: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.44.

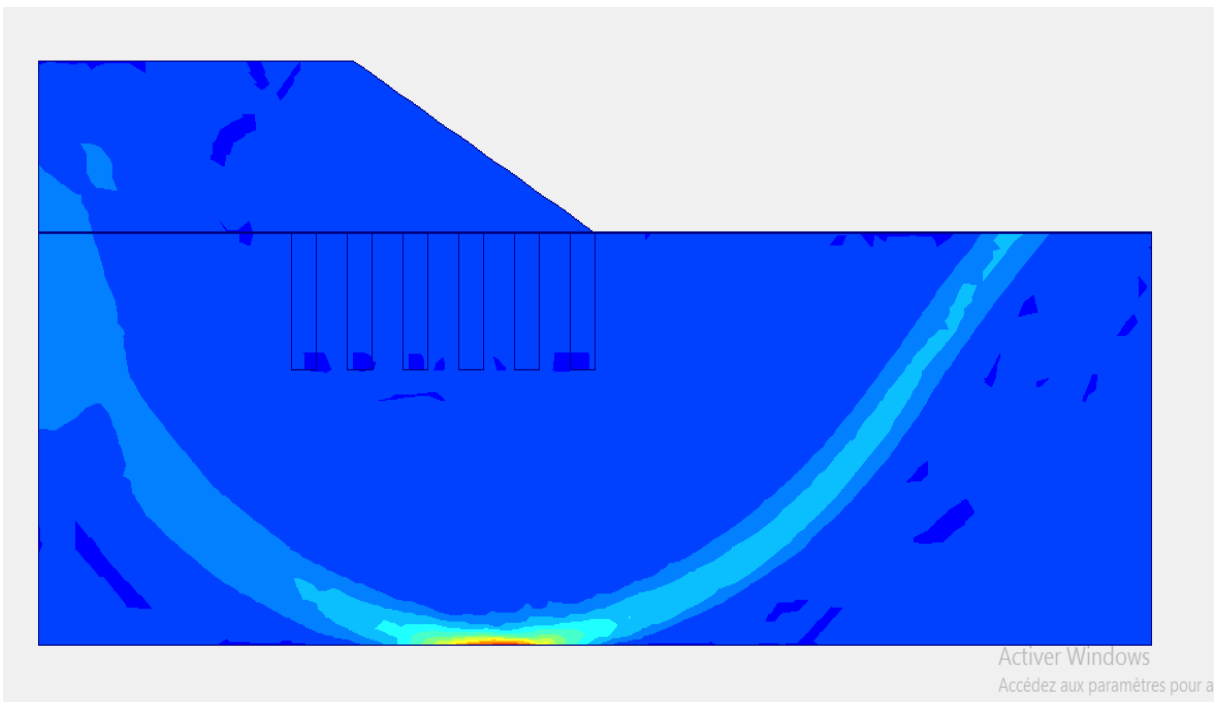


Figure 4. 44: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.668 et il est présenté dans la figure 4.45.

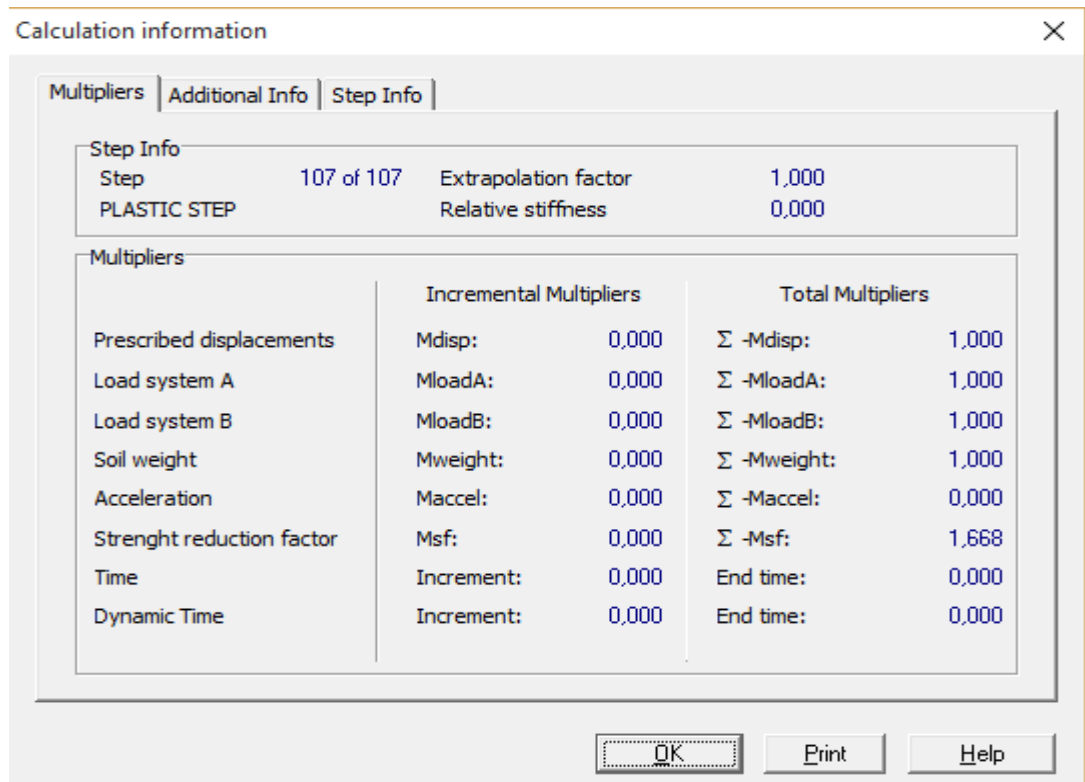


Figure 4. 45: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 4 m de longueur.

- **Amélioration avec 6 colonnes de 8m de longueur**
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.46.

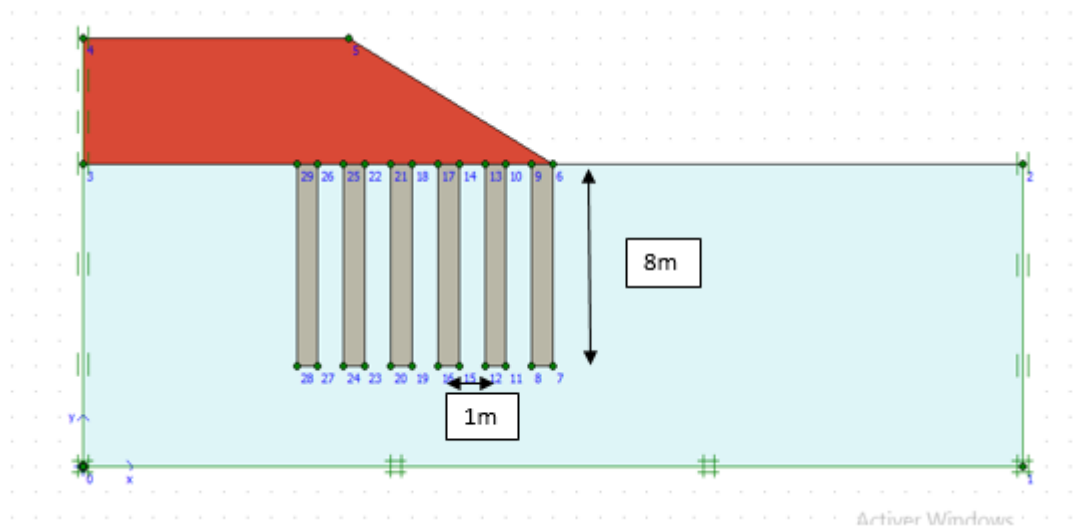


Figure 4. 46: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.47.

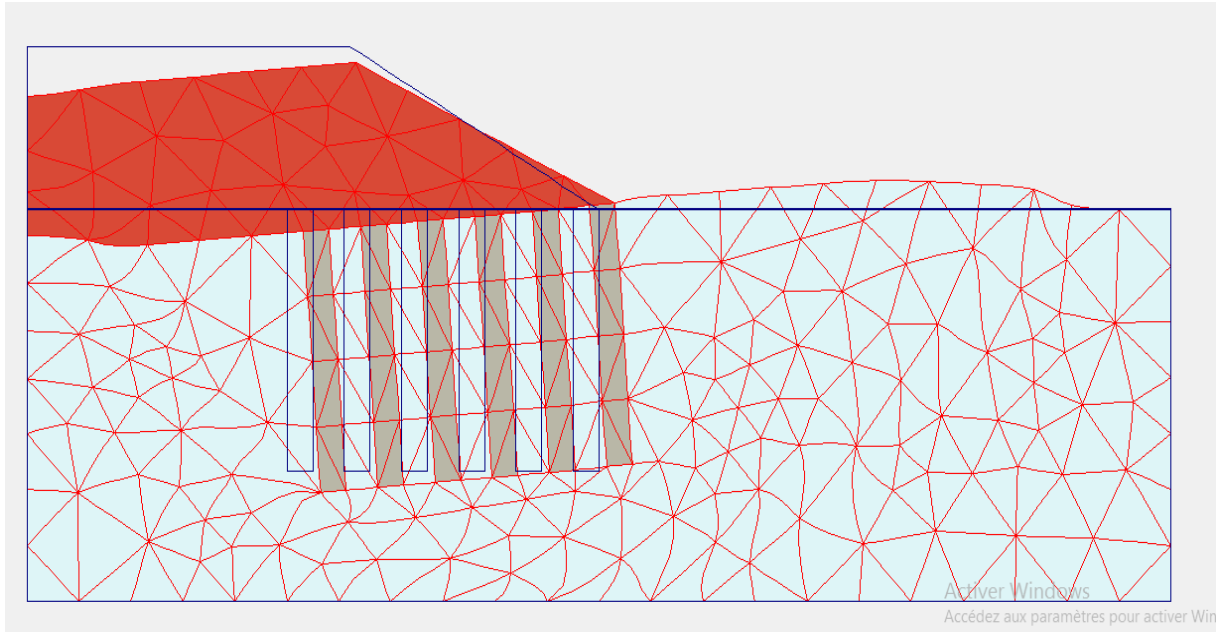


Figure 4. 47: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.48.

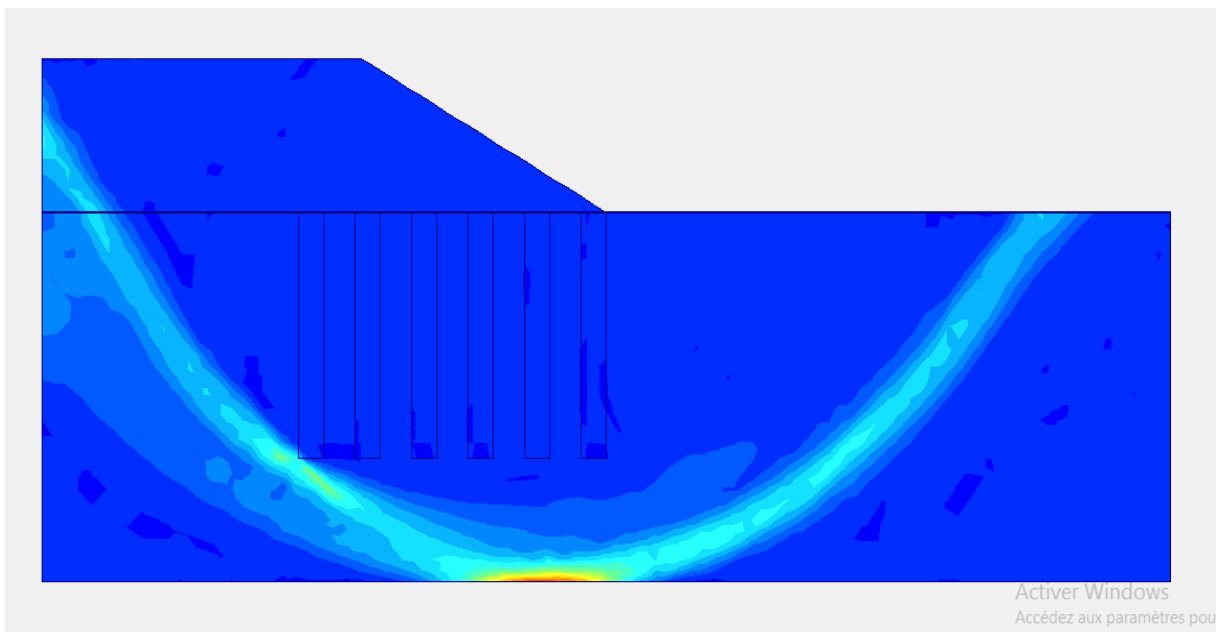


Figure 4. 48: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.644 et il est présenté dans la figure 4.49.

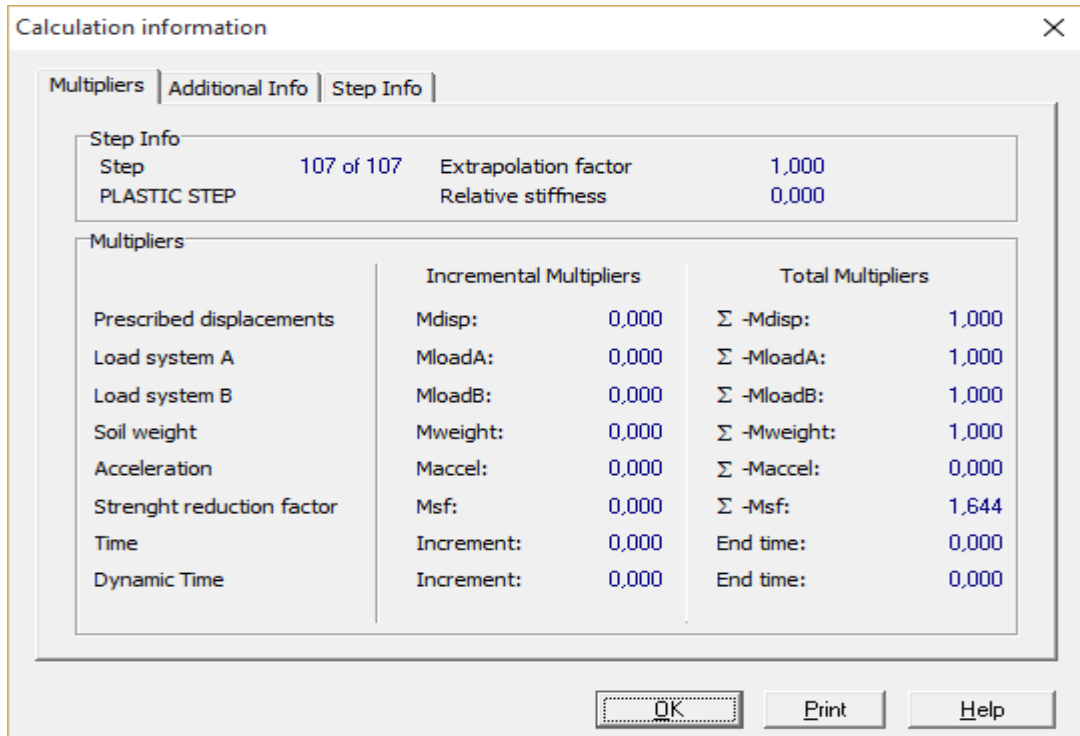


Figure 4. 49: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 8 m de longueur.

- **Amélioration avec 6 colonnes de 12m de longueur**
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.50.

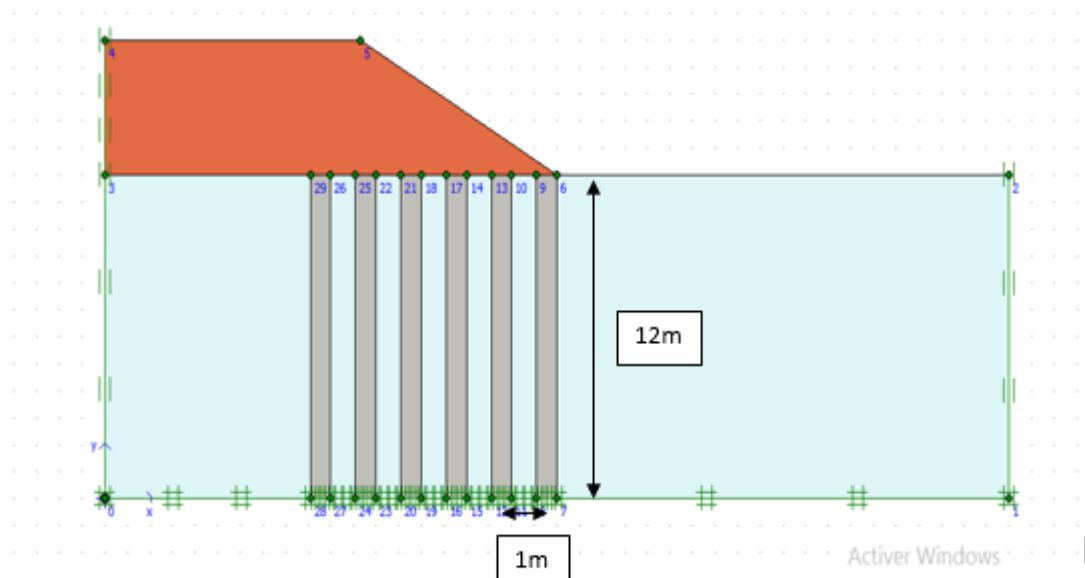


Figure 4. 50: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.51.

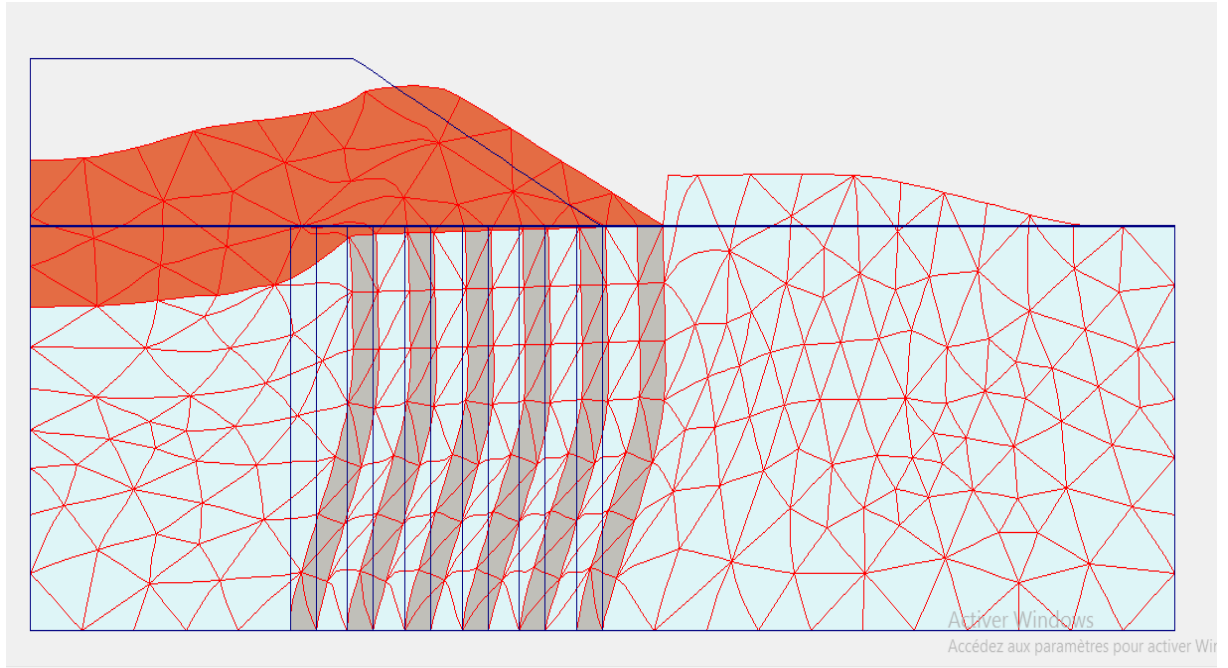


Figure 4. 51: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.52.

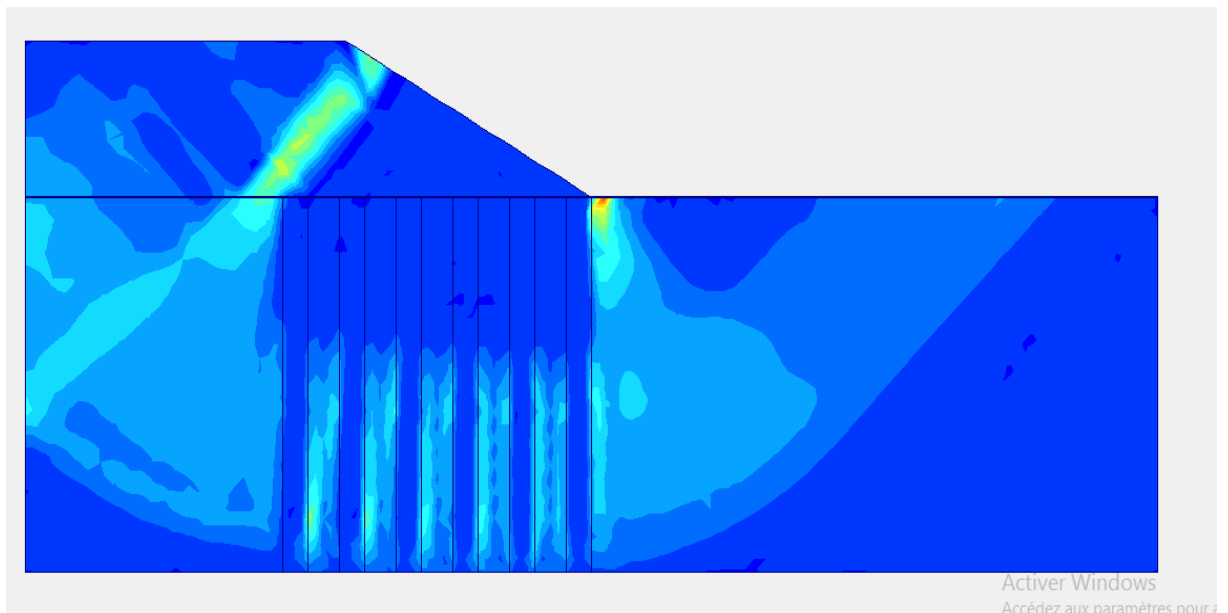


Figure 4. 52: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 6 colonnes de 12m de profondeur.

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur est égalé à 2.021 et il est présenté dans la figure 4.53.

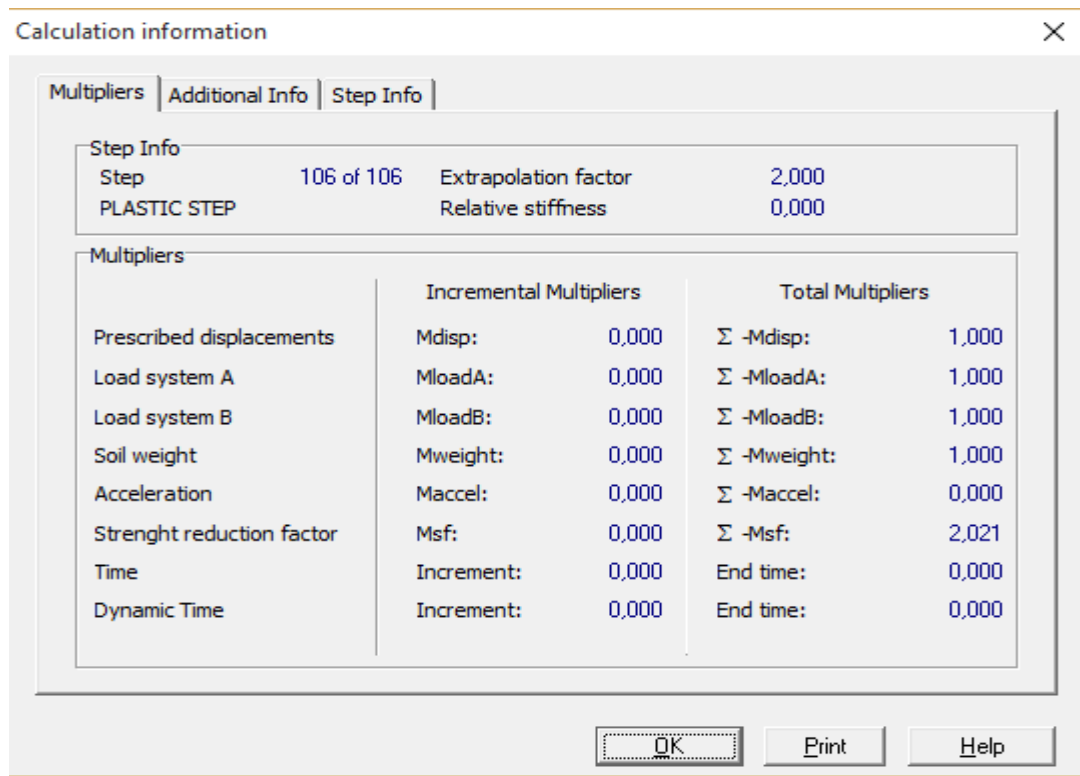


Figure 4. 53: Facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 6 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 4.54 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 30° renforcé par 6 colonnes.

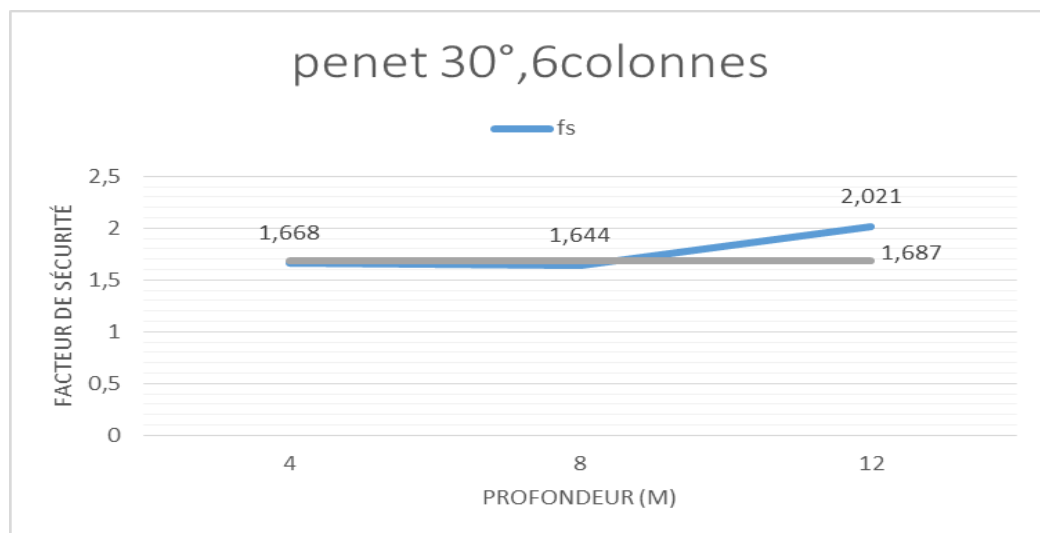


Figure 4. 54: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°.

4) Amélioration avec 8 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 8 colonnes en DM en variant la longueur (4m ; 8 m ; 12m).

- Amélioration avec 8 colonnes de 4m de longueur
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.55.

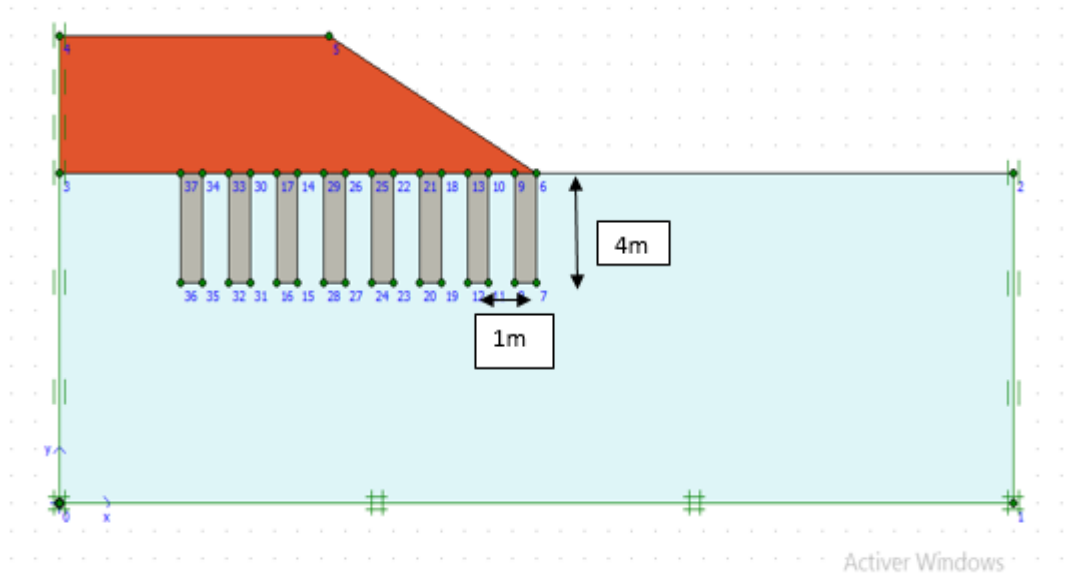


Figure 4. 55: Géométrie du modèle pente 30° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle et présenté dans la figure 4.56.

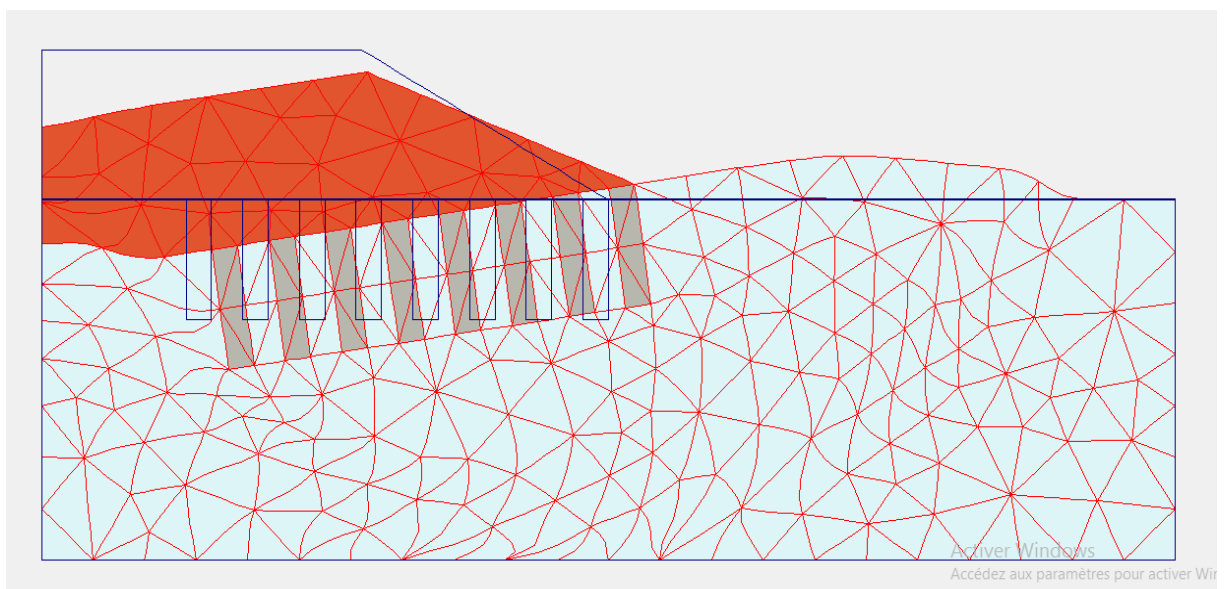


Figure 4. 56: Maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.57.

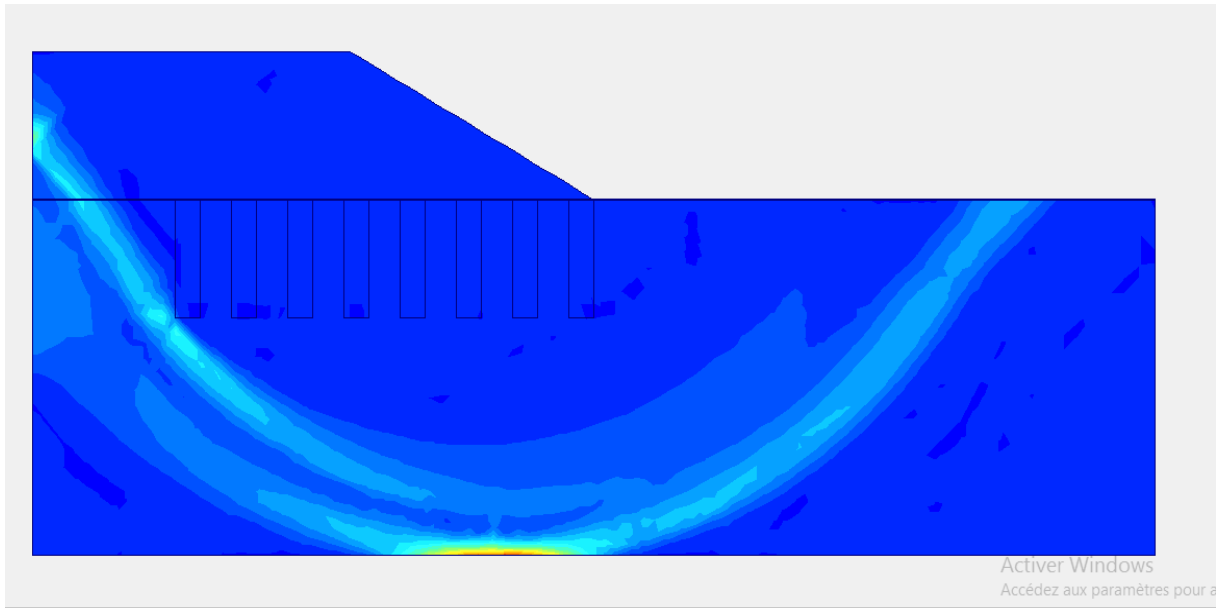


Figure 4. 57: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.627 et il est présenté dans la figure 4.58.

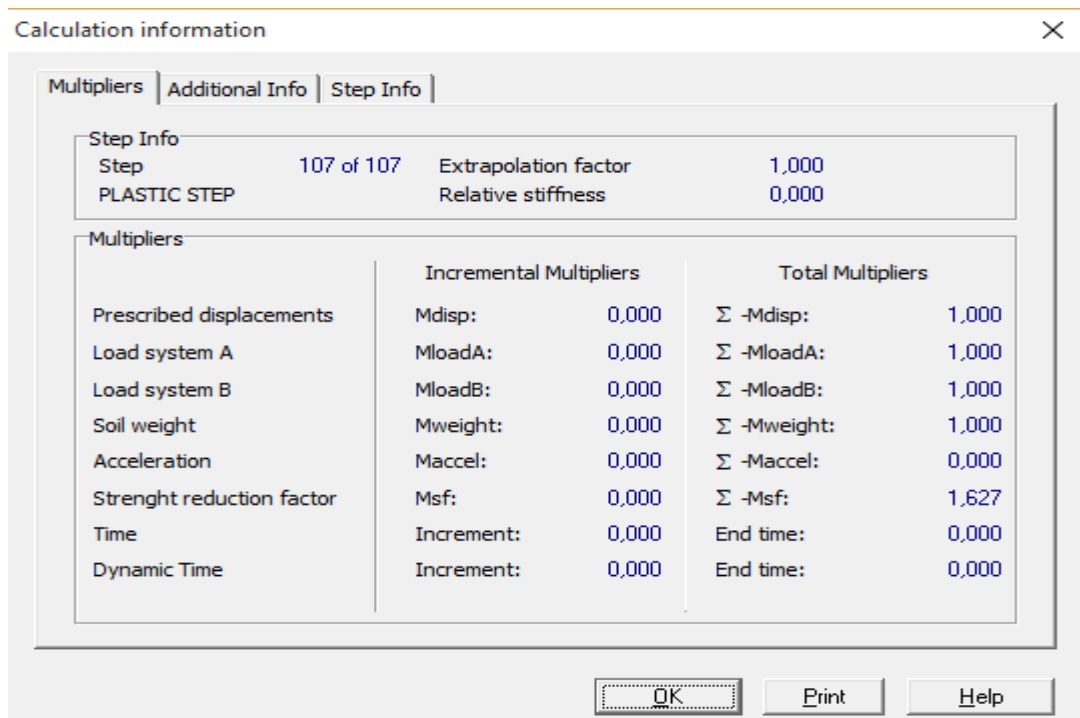


Figure 4. 58: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 4 m de longueur.

- Amélioration avec 8 colonnes de 8 m de longueur
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.59.

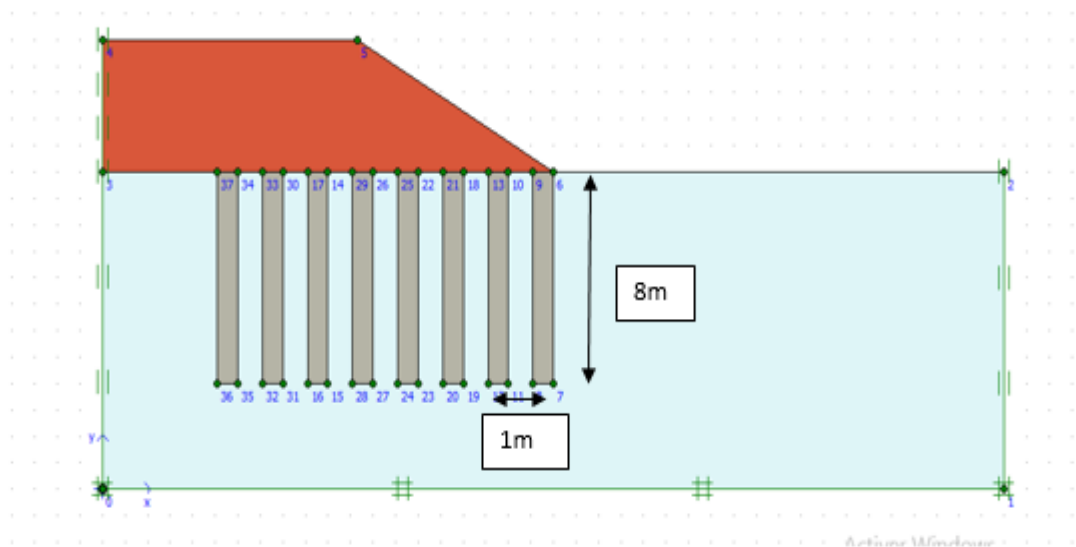


Figure 4. 59: Géométrie du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.60.

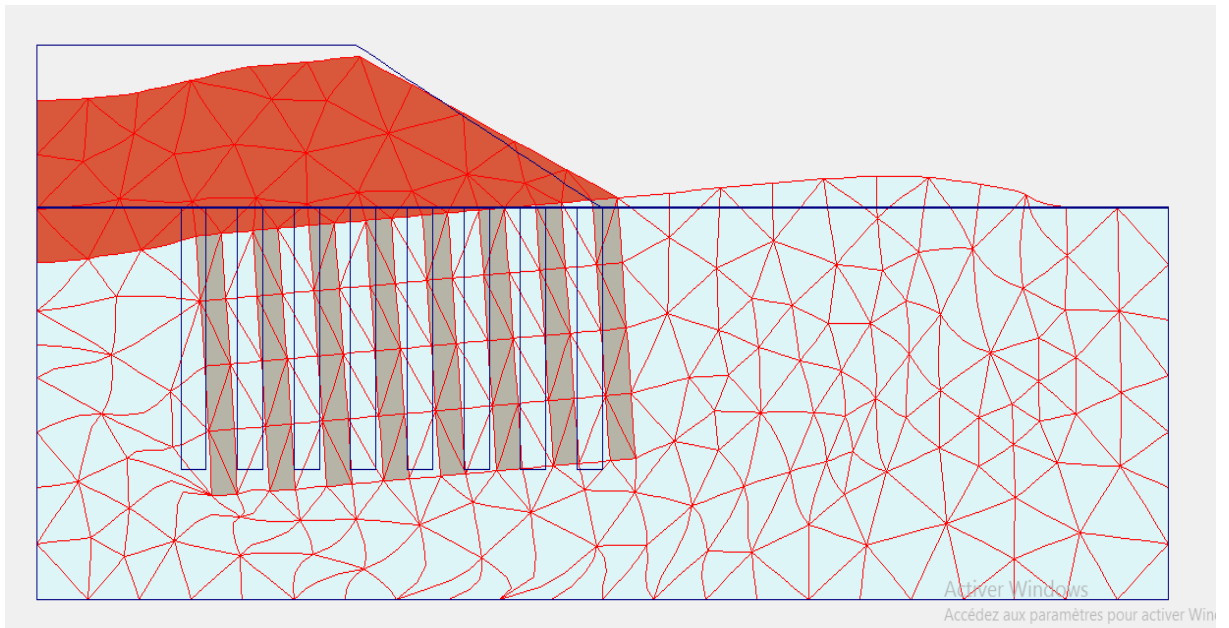


Figure 4. 60: Maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.61.

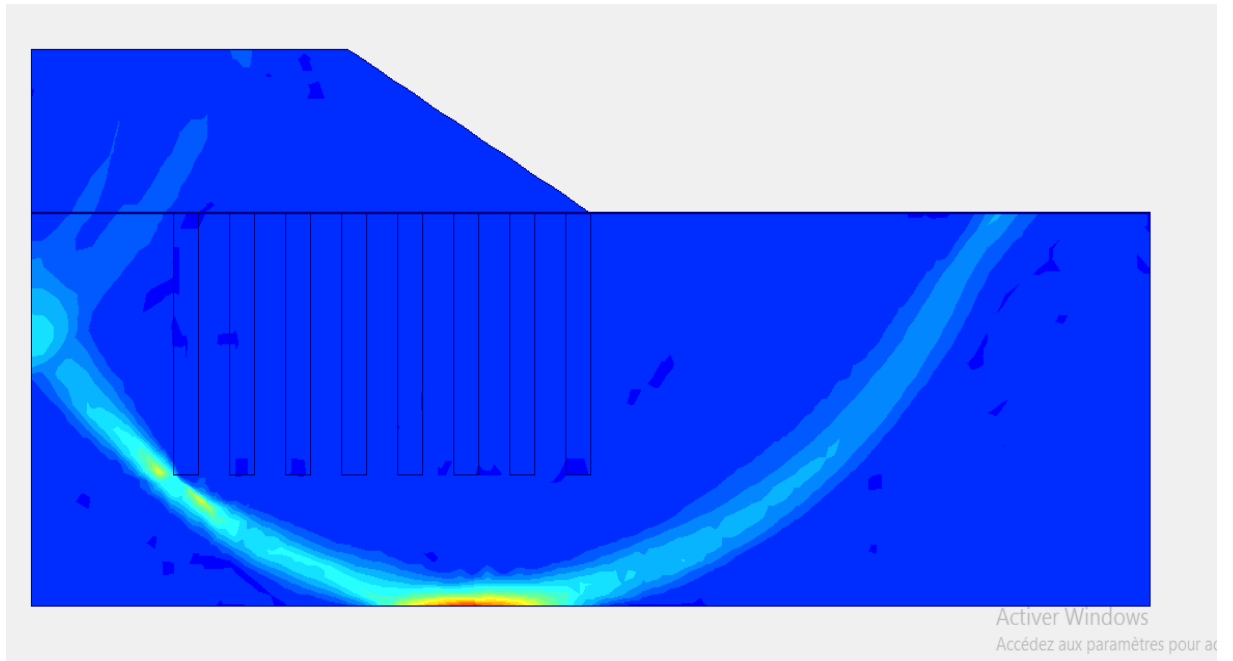


Figure 4. 61: Cercle du glissement du modèle pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.643 et il est présenté dans la figure 4.62.

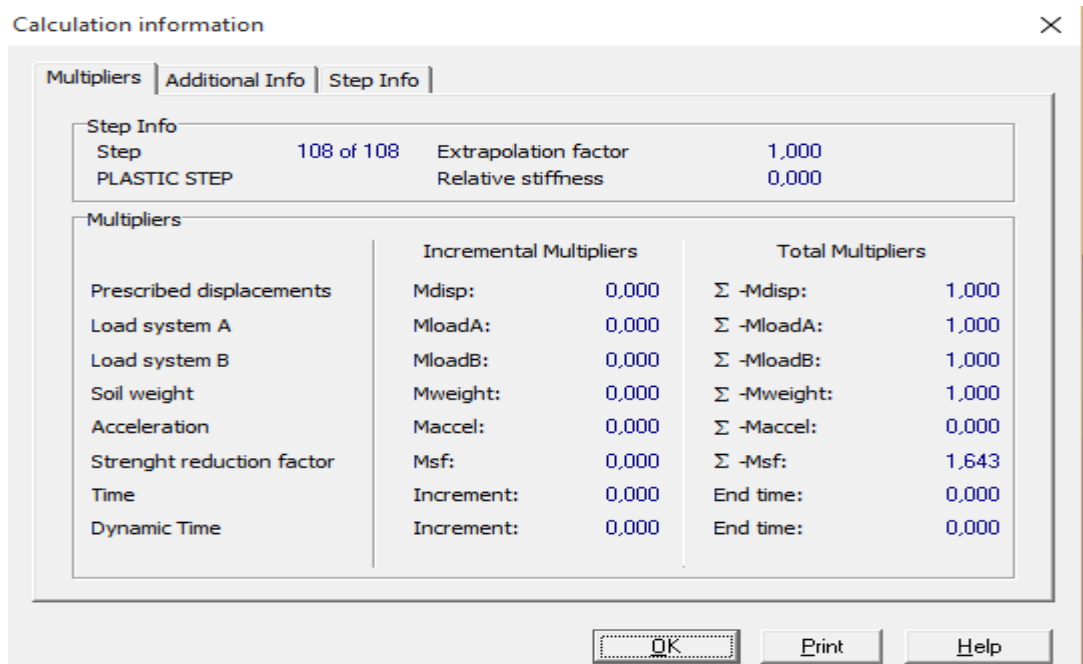


Figure 4. 62: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 8 m de longueur.

- Amélioration avec 8 colonnes de 12m de longueur
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.63.

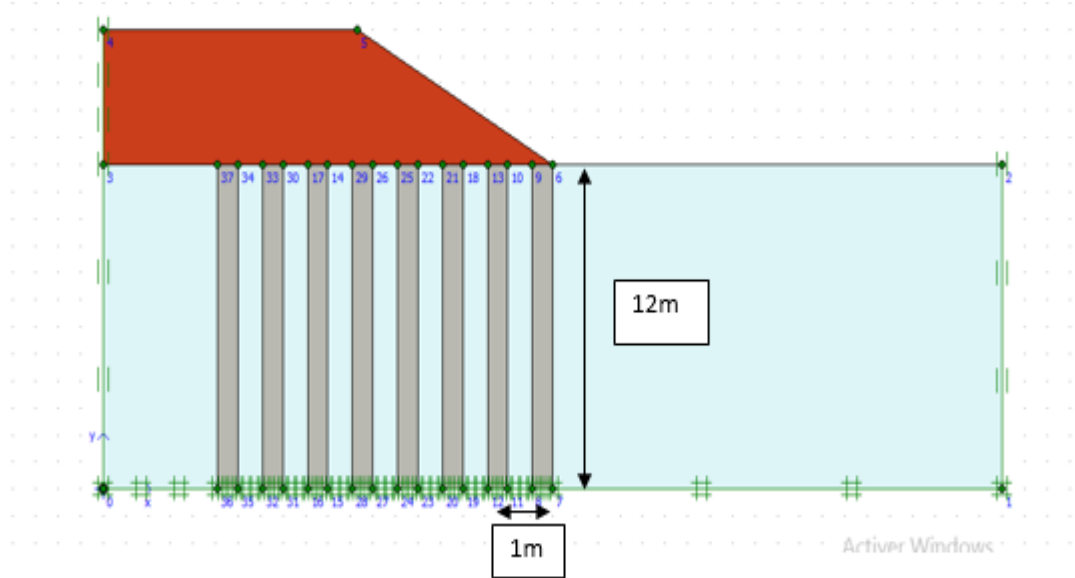


Figure 4. 63: Géométrie du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.64.

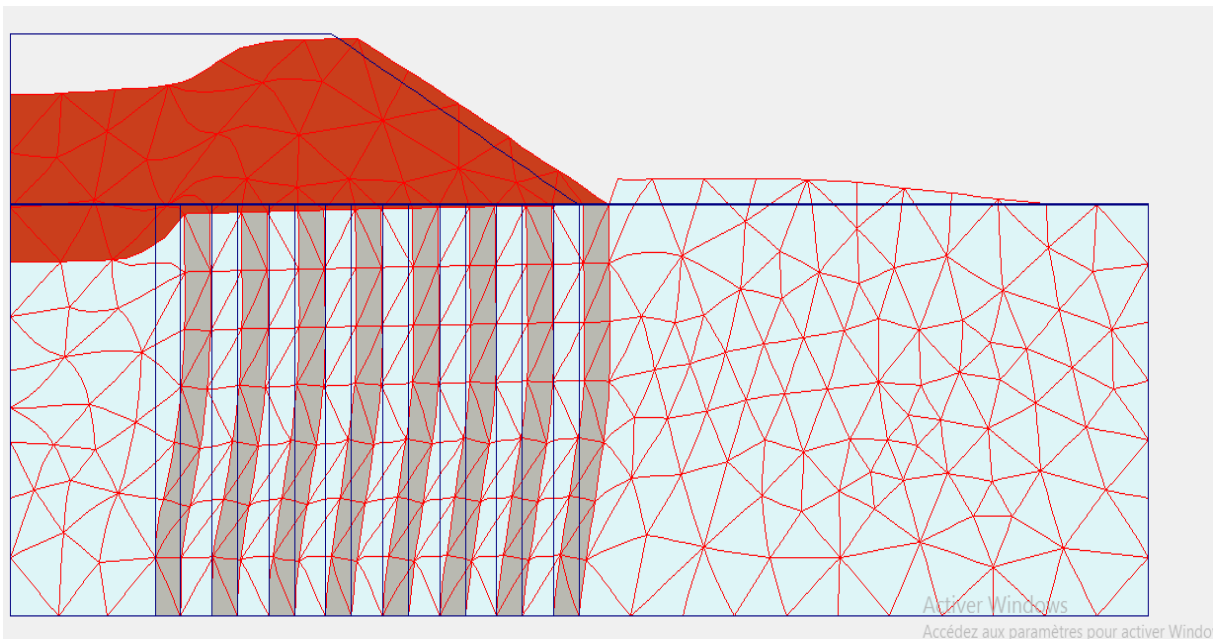


Figure 4. 64: Maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.65.

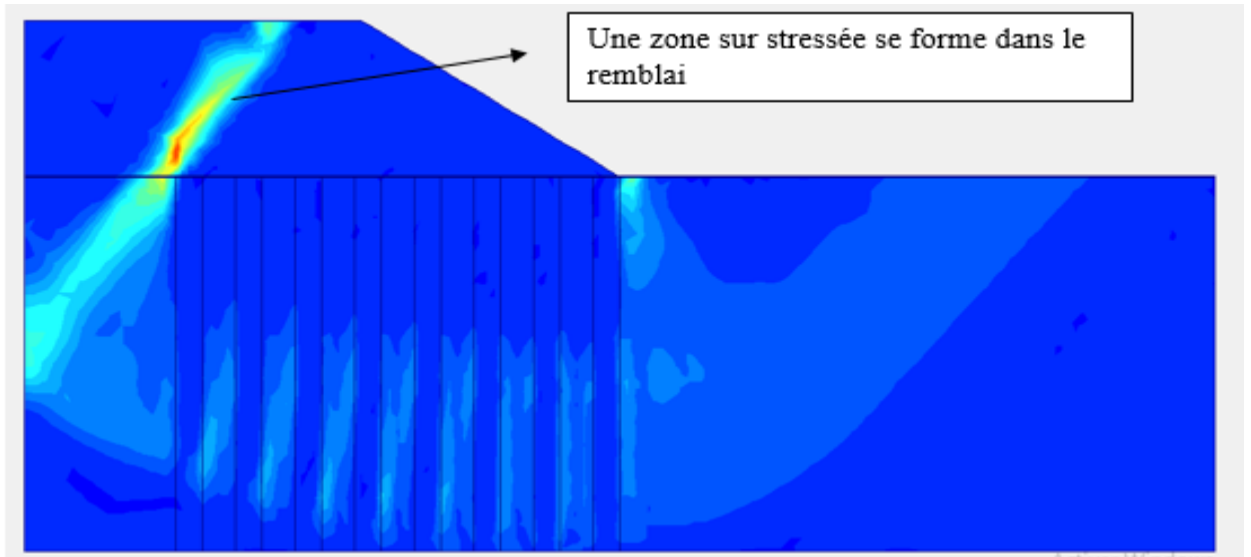


Figure 4. 65: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblai sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur est égalé à 2.233 et il est présenté dans la figure 4.66.

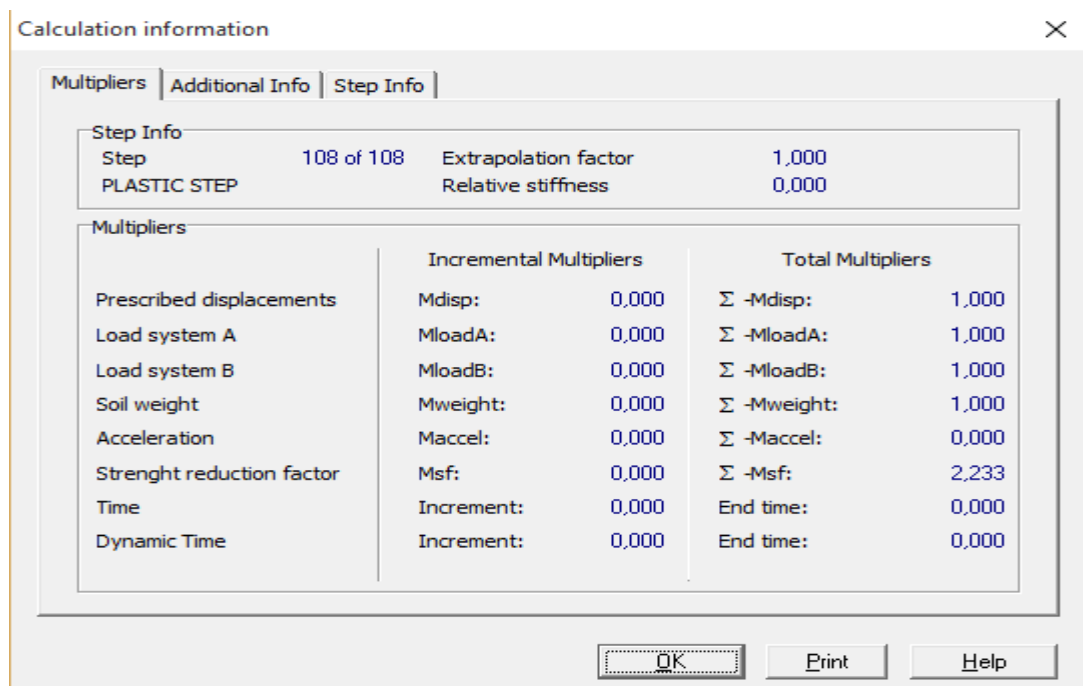


Figure 4. 66: Facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 4.67 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 30° renforcé par 8 colonnes.

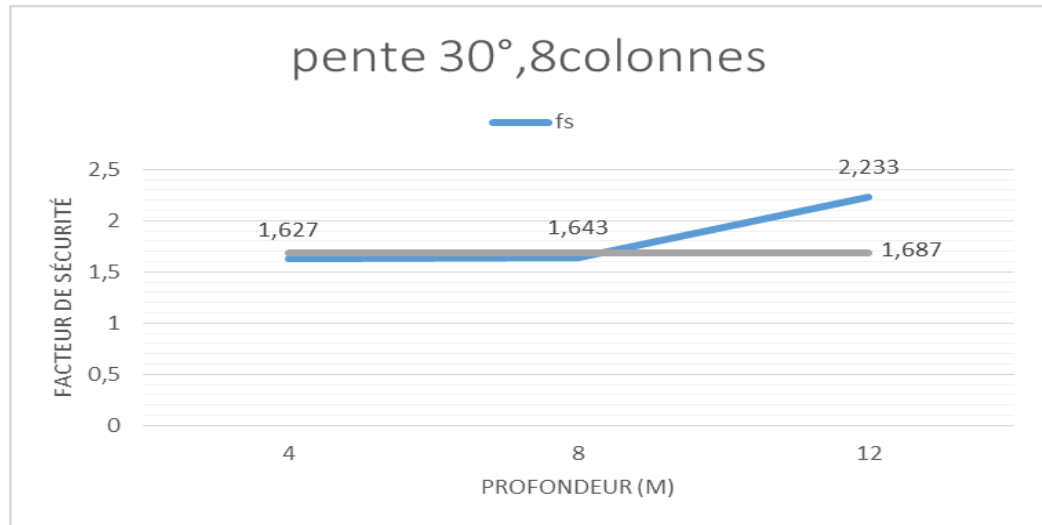


Figure 4. 67: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°.

5) Amélioration avec 10 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 10 colonnes en DM en variant la longueur. (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 10 colonnes de 4m de longueur**
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.68.

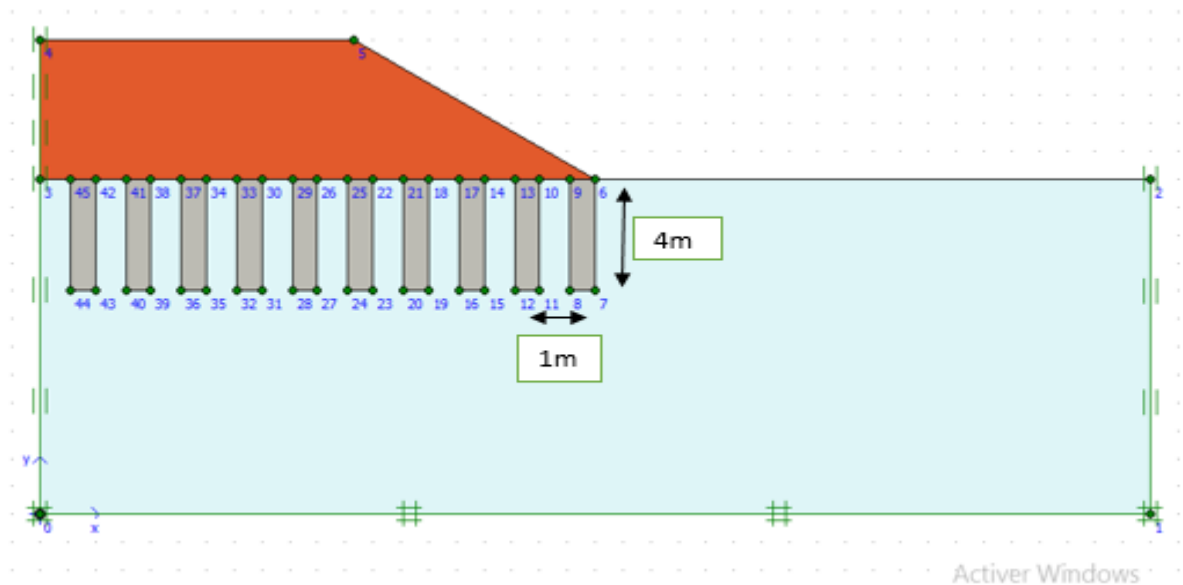


Figure 4. 68: Géométrie du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.69.

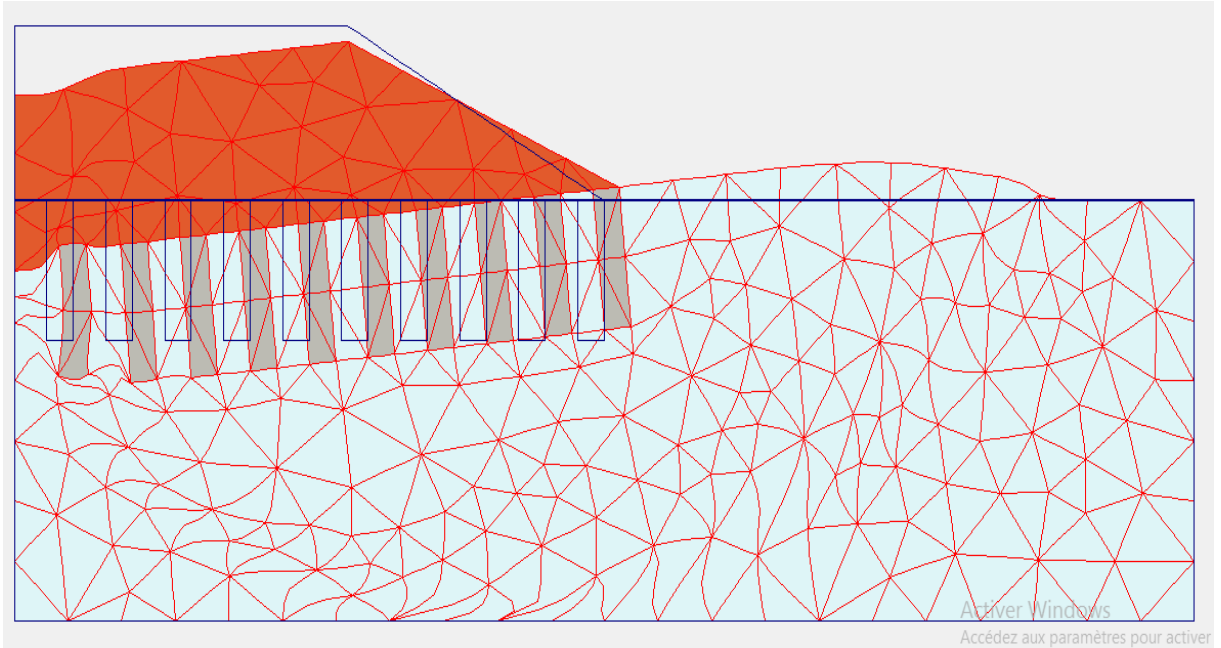


Figure 4. 69: maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.70.

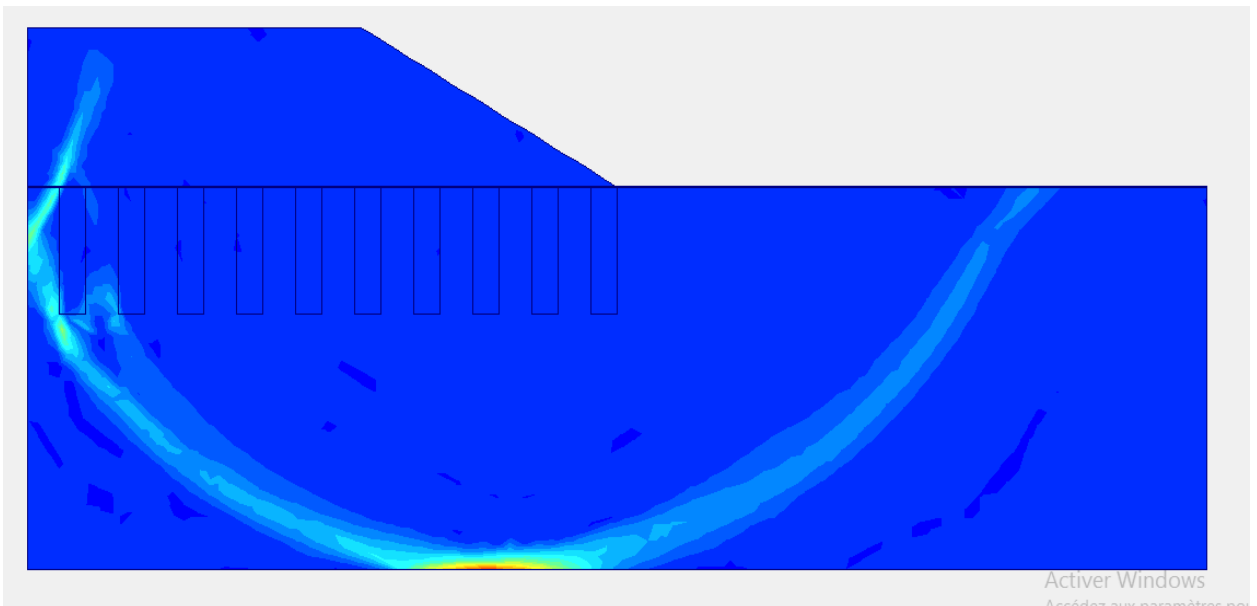


Figure 4. 70: cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1,724 et il est présenté dans la figure 4.71.

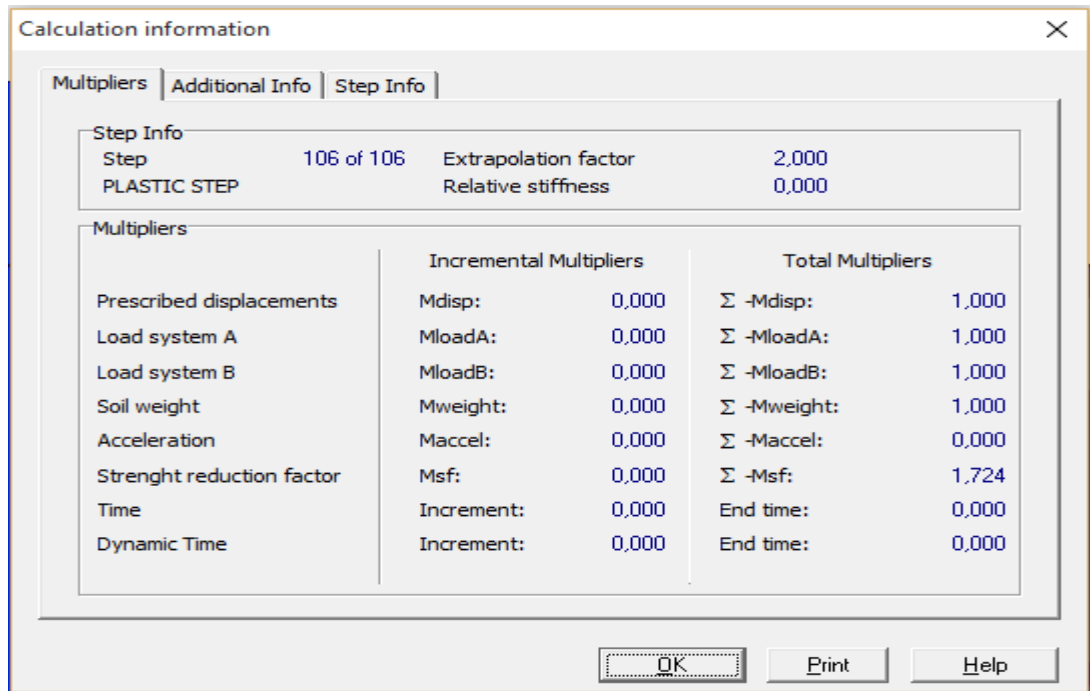


Figure 4. 71: facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 8 colonnes de 12 m de longueur.

- **Amélioration avec 10 colonnes de 8m de longueur**
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.72.

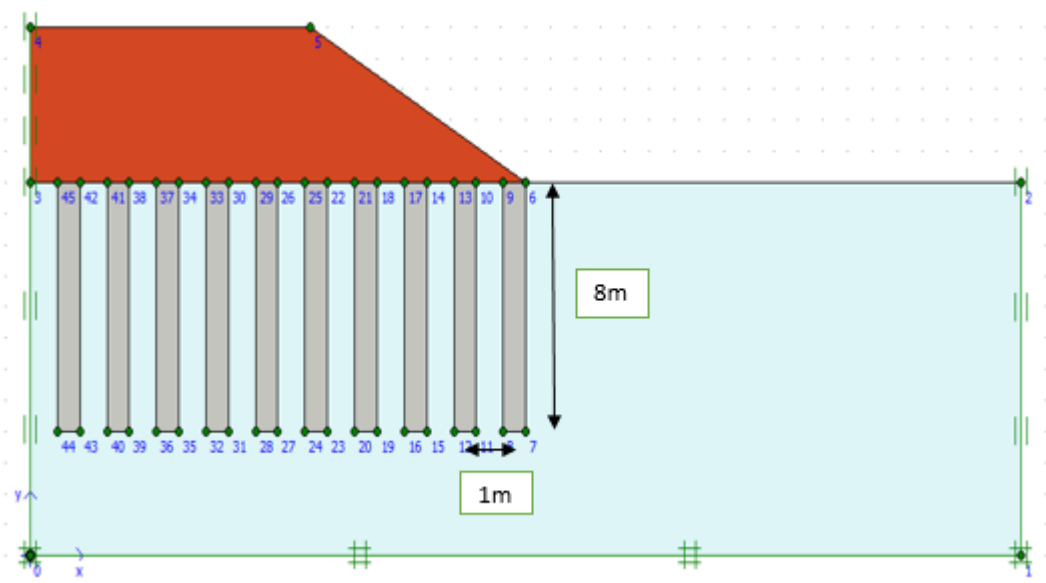


Figure 4. 72: géométrie du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.73.

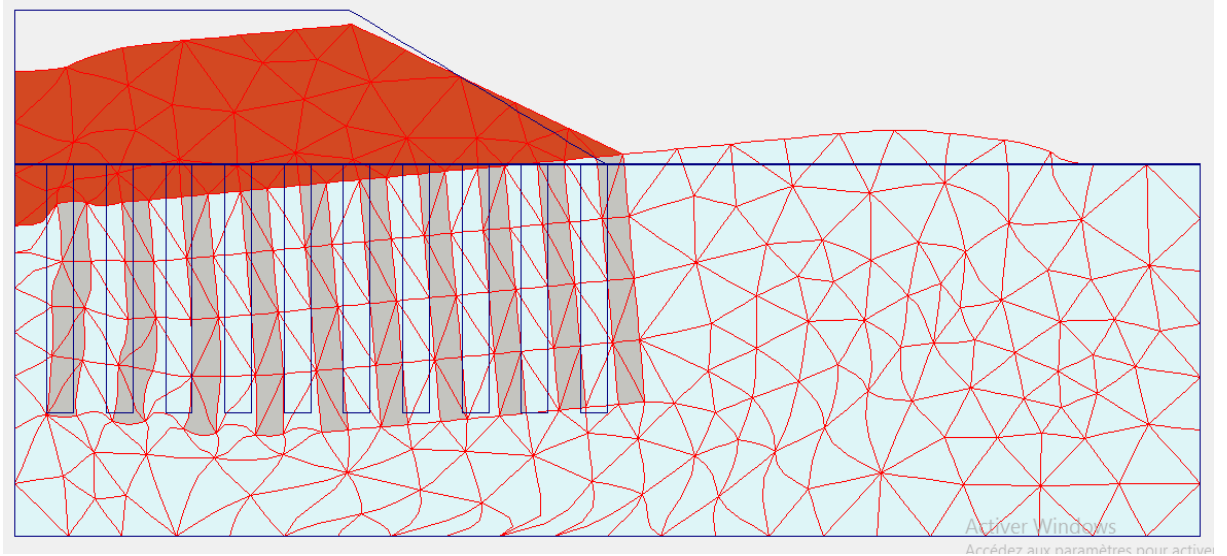


Figure 4. 73: maillage déformé du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.74.

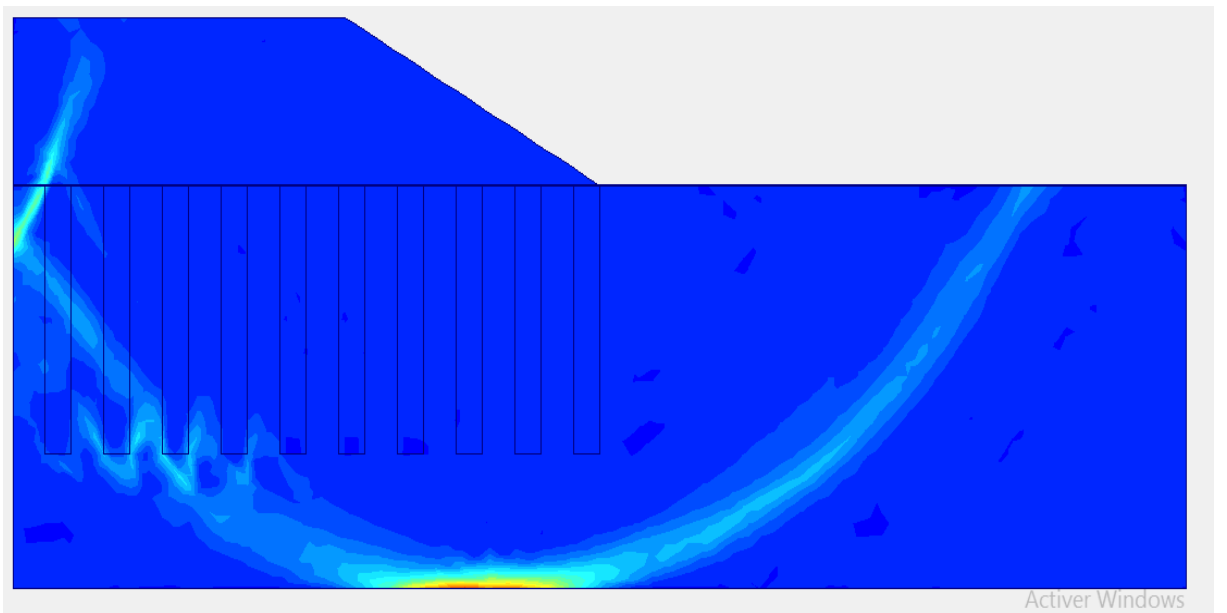


Figure 4. 74: cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur est égalé à 2,066 et il est présenté dans la figure 4.75.

Calculation information			
Step Info		Multipliers	
Step	106 of 106	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers		Incremental Multipliers	Total Multipliers
Prescribed displacements		Mdisp: 0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A		MloadA: 0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B		MloadB: 0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight		Mweight: 0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration		Maccel: 0,000	Σ -Maccel: 0,000
Strenght reduction factor		Msf: 0,000	Σ -Msf: 2,066
Time		Increment: 0,000	End time: 0,000
Dynamic Time		Increment: 0,000	End time: 0,000

Figure 4. 75: facteur de sécurité du modèle pente 30° renforcé par 10 colonnes de 8 m de longueur.

- Amélioration avec 10 colonnes de 12m de longueur
- La géométrie du modèle est donnée dans la figure 4.76.

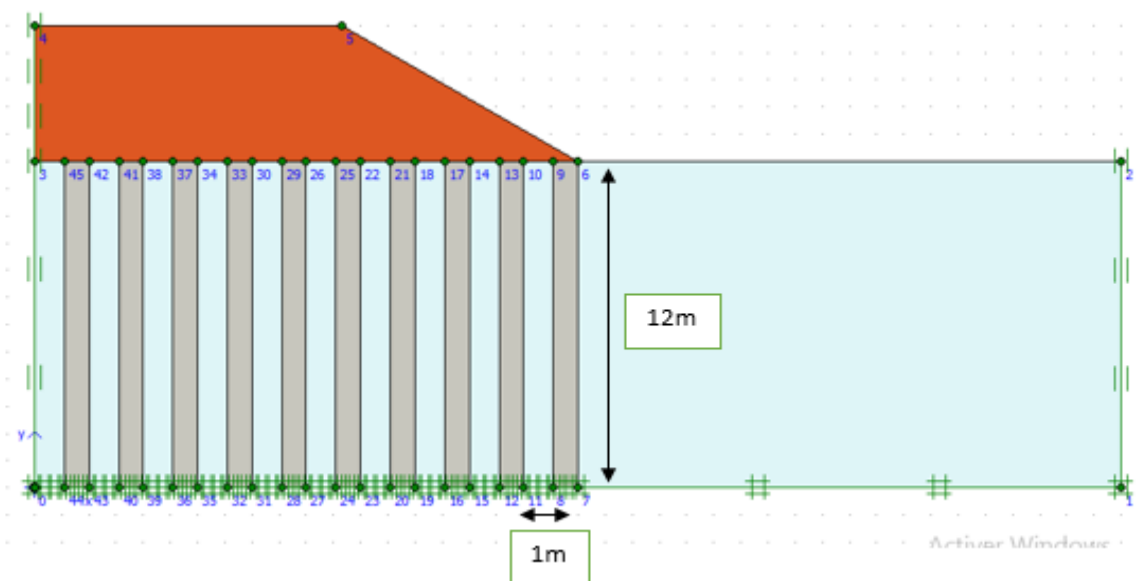


Figure 4. 76: géométrie du modèle pente 30° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

- Le maillage déformé du modèle est présenté dans la figure 4.77.

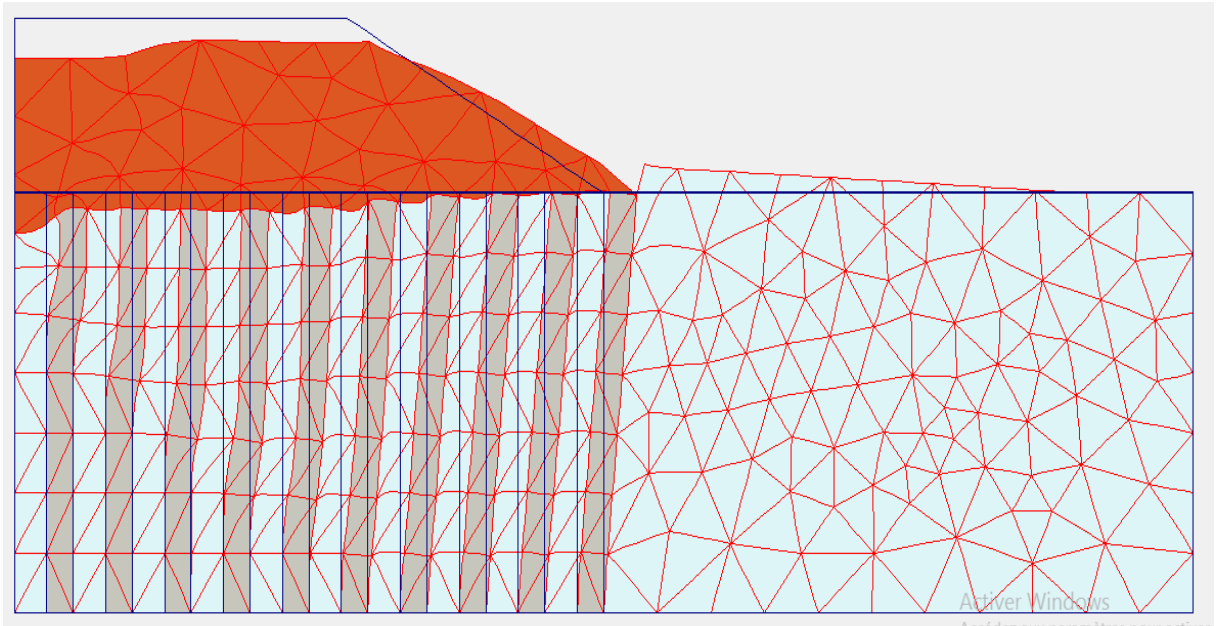


Figure 4. 77: maillage déformé du modèle pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 4.78.

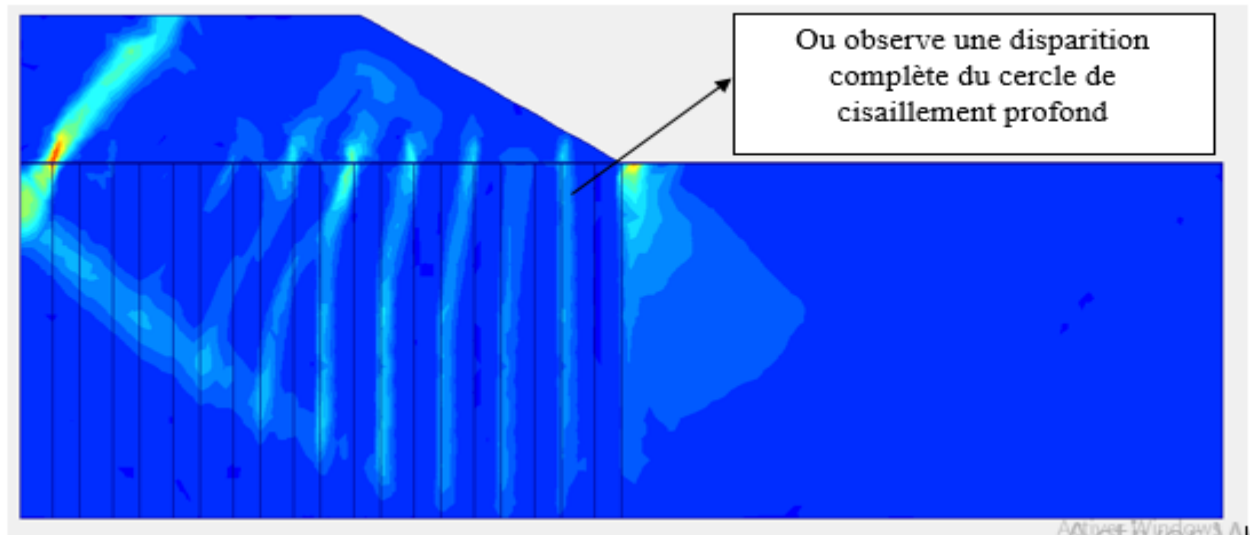


Figure 4. 78: Cercle du glissement du model pente 30 ° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur est égalé à 2,693 et il est présenté dans la figure 4.79.

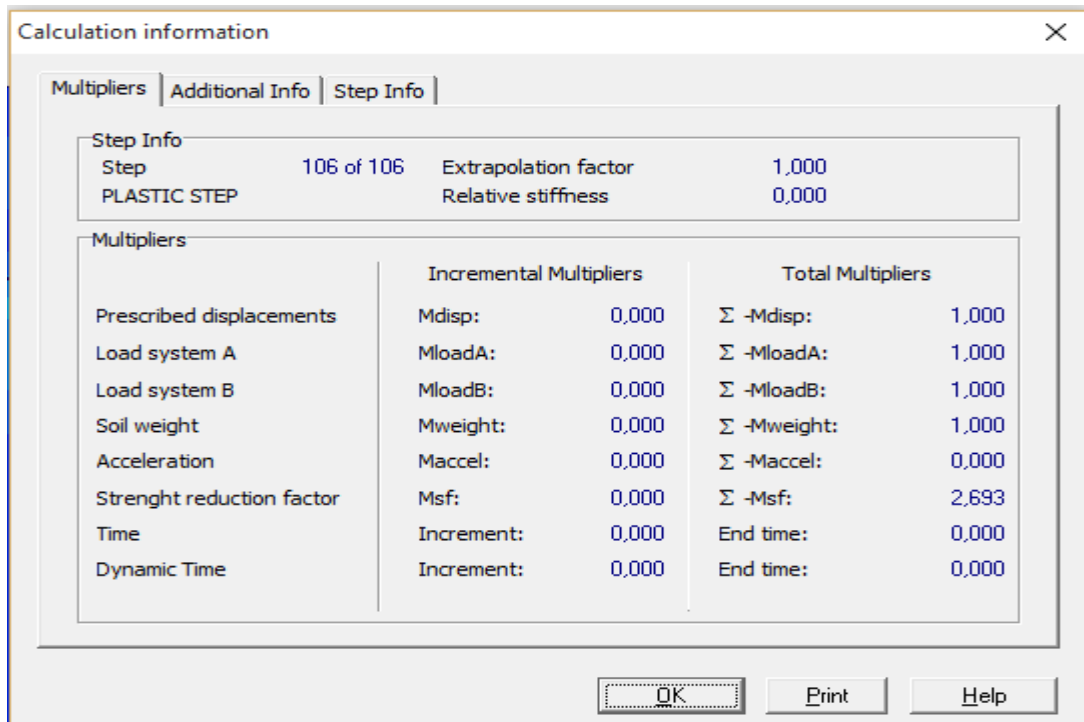


Figure 4. 79: facteur de sécurité du model pente 30° renforcé par 10 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 4.80 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 30° renforcé par 10 colonnes.

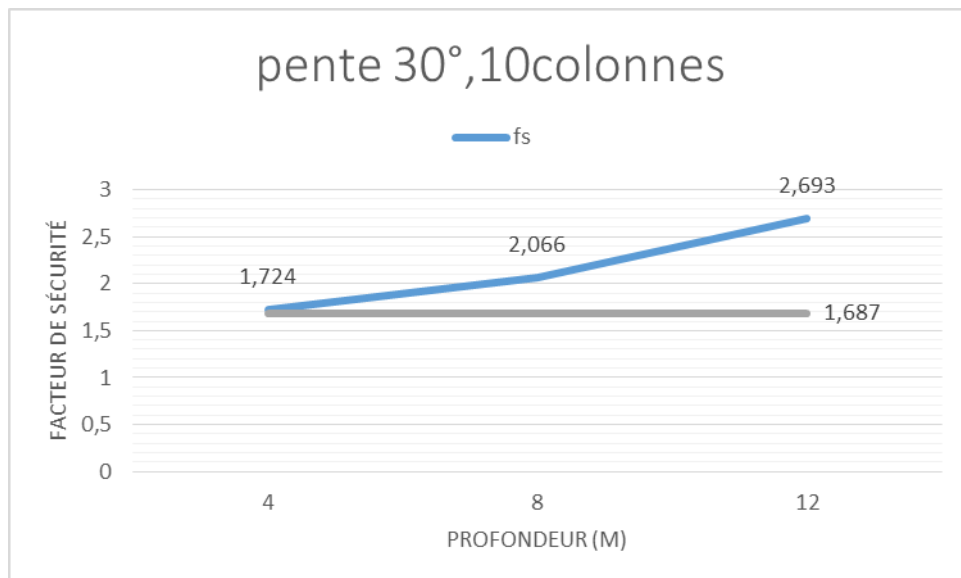


Figure 4. 80: Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 30°

4.2.5.2. Modélisation avec $sh=1m$, $E_{eq} = 26179,93 \text{ KN/m}^2$ pour la pente 45° .

On recommence les mêmes étapes de la modélisation du remblai sur argile molle avec renforcement en colonnes deep mixing faite dans la partie précédente.

Les détails et les résultats de la modélisation sont présentés dans l'annexe.

4.2.5.3. Modélisation avec $sh=2m$, $E_{eq} = 13089,96 \text{ KN/m}^2$ pour la pente 60° .

On recommence les mêmes étapes de la modélisation du remblai sur argile molle avec renforcement en colonnes deep mixing faite dans la partie précédente.

Les détails et les résultats de la modélisation sont présentés dans l'annexe.

4.3. Résultats et discussion

Dans cette modélisation numérique du remblai sur sol mou renforcé par les colonnes en DEEP MIXING par logiciel PLAXIS (2D) nous permet d'avoir les déformations du remblai et du sol et des colonnes et la surface du glissement et le facteur de sécurité.

4.3.1. Déformation des colonnes et du sol

- Les colonnes en **DM** a des profondeurs (4 m et 8 m) avec ($sh=0.5m$ et $sh= 1$, $sh =2$) Quel que soit leur nombre (2, 4, 6, 8,10) ; On subit un déplacement latéral vers l'extérieure.
- Les colonnes en DM à une profondeur de 12m avec ($sh=0.5m$ et $sh= 1$, $sh =2$) ont subi quelques flexions ; dans l'ensemble toutes les colonnes DM se sont inclinées vers l'extérieur ; l'angle d'inclinaison varie en fonction du nombre de colonne, l'angle d'inclinaison diminue avec l'augmentation de nombre des colonnes pour une pente de remblais 30° 45° et 60° .
- Les colonnes en DM avec $sh=0.5m$ ne subit aucune déformation avec un remblai de pente 45° pour une profondeur de 12m et 60° pour un nombre de colonne 8 a une profondeur de 12m et un nombre de colonnes 10 pour les profondeurs 8m et 12m
- Les colonnes DM avec $sh= 1m$ ne subit aucune déformation avec un remblai de pente 60° pour un nombre de colonne 8 à une profondeur de 12m et un nombre de colonnes 10 pour les profondeurs 8m et 12m.
- Les colonnes DM avec $sh=2$ ne subit aucune déformation avec un remblai de pente 60° pour un nombre de colonne 8 à une profondeur de 12m et un nombre de colonnes 10 pour les profondeurs 8m et 12m.

4.3.2. Surface de glissement

- On a un cercle de glissement profond continu (déformation de cisaillement maximum profonde) pour les améliorations avec des colonnes à des profondeurs 4m, 8m quel que soit le nombre (2, 4, 6, 8,10).
- Le taux de cisaillement et de déformation pour un remblai sur argile molle renforcé en colonne de DM de 12 m de profondeur montré dans les figures précédentes, qu'il n'y a pas de zone continue de taux de déformation en cisaillement. Les contours de taux de cisaillement et de déformation sont interceptés par les colonnes DM (mur sol-ciment.).
- On a un cercle de glissement profond discontinu pour les améliorations avec des colonnes à 12m de profondeur.
- Pour la pente de remblai 45°, 60° avec un renforcement en colonnes DM de 12 m de profondeur avec 8 colonnes et 8m et 12 m de profondeur avec 10 colonnes avec $sh=0.5m$; et avec $sh=1m$, $sh=2m$ pour 8m et 12 m de profondeur avec 10 colonnes et 12 m de profondeur avec 8 colonne ; on a un sol amélioré et l'absence complètement du cercle de glissement profond dans le sol, et il se développe près du parement du talus (déformation de cisaillement superficielle).

4.3.3. Facteur de sécurité

4.3.3.1. Pour $sh=0.5m$, $E_{eq}=52359,87 \text{ KN/m}^2$

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 30° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 4: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1,701	1,693	1,668	1,627	1,724
8 m	1,713	1,693	1,644	1,643	2,066
12 m	1,839	1,908	2,021	2,233	2,693

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

➤ Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 30° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

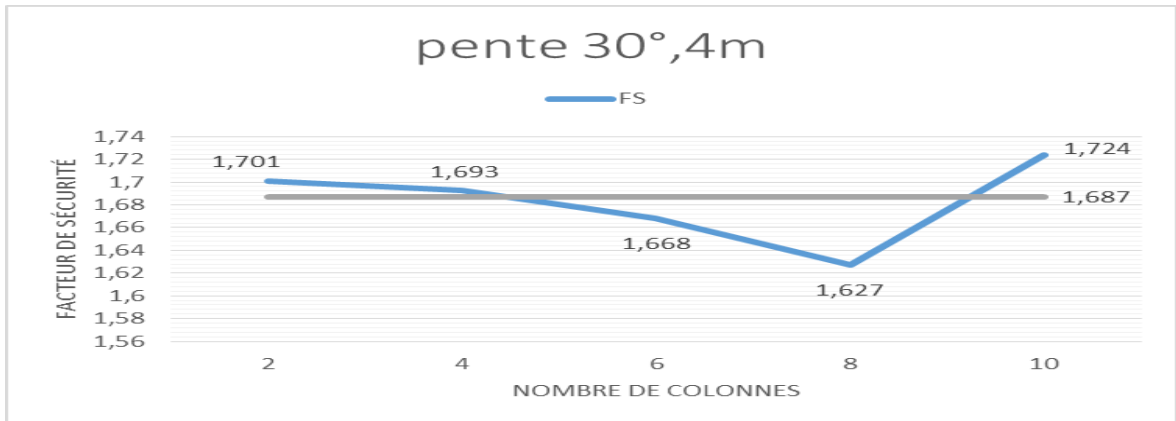


Figure 4. 81: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

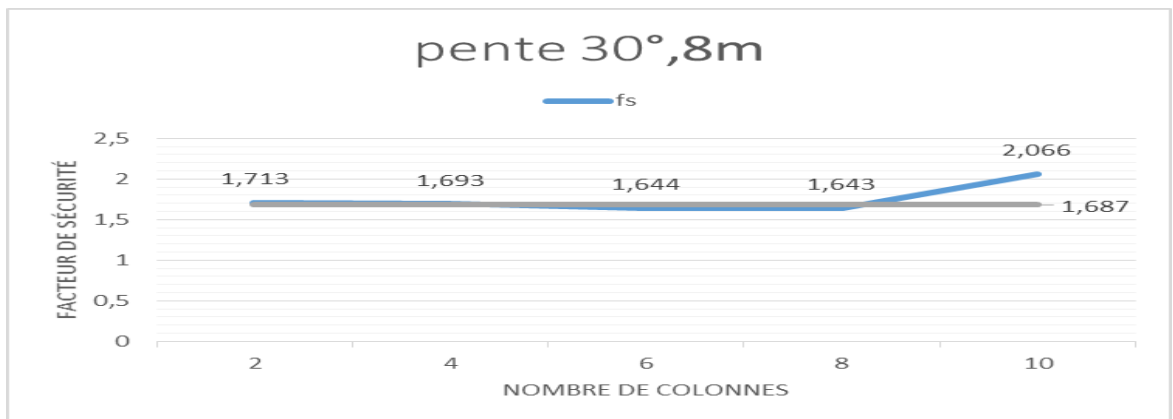


Figure 4. 82: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

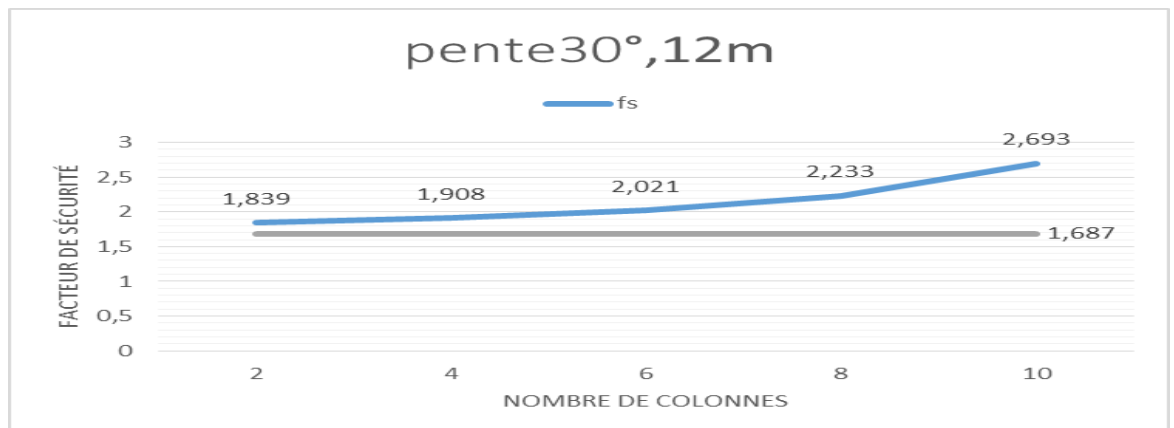


Figure 4. 83: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

**CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU
RENFORCE PAR DEEP MIXING**

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 45° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 5: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1,668	1,654	1,625	1,590	1,704
8 m	1,666	1,634	1,585	1,626	2,032
12 m	1,762	1,861	2,002	2,200	2,366

- Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 45° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

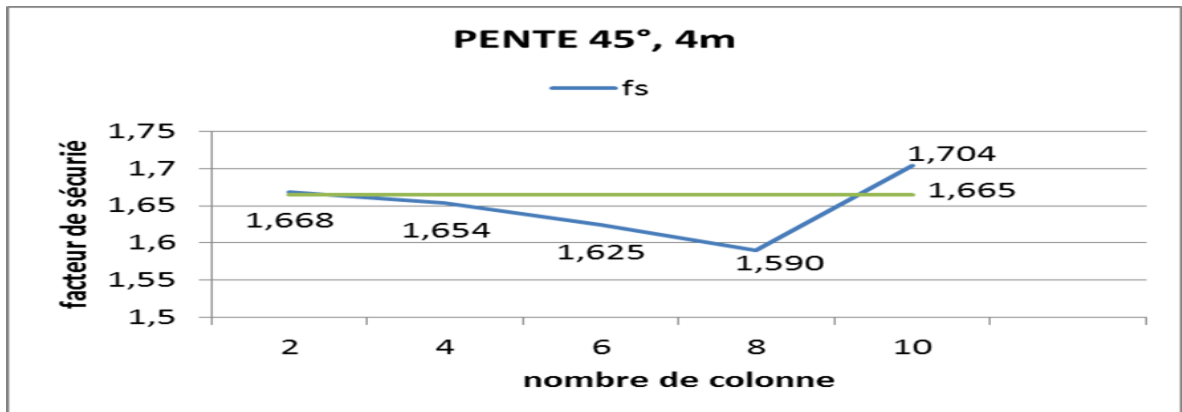


Figure 4. 84: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

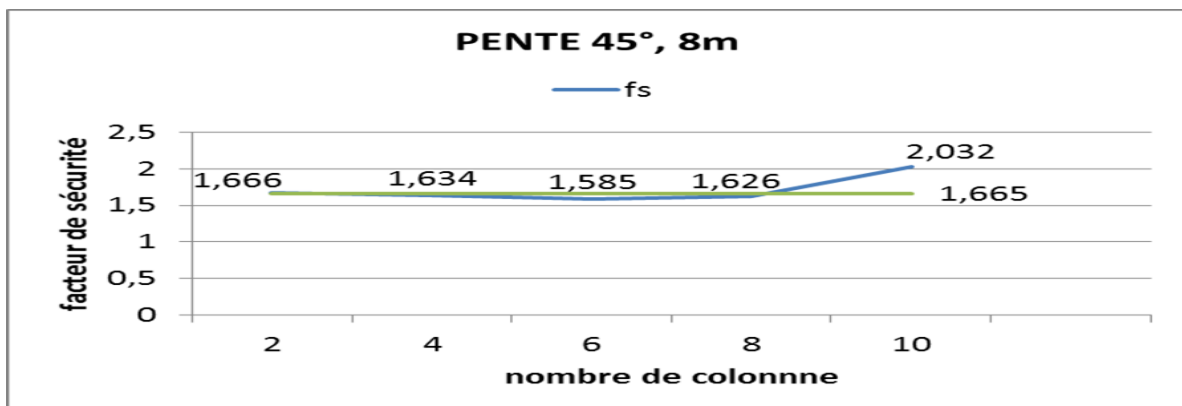


Figure 4. 85: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

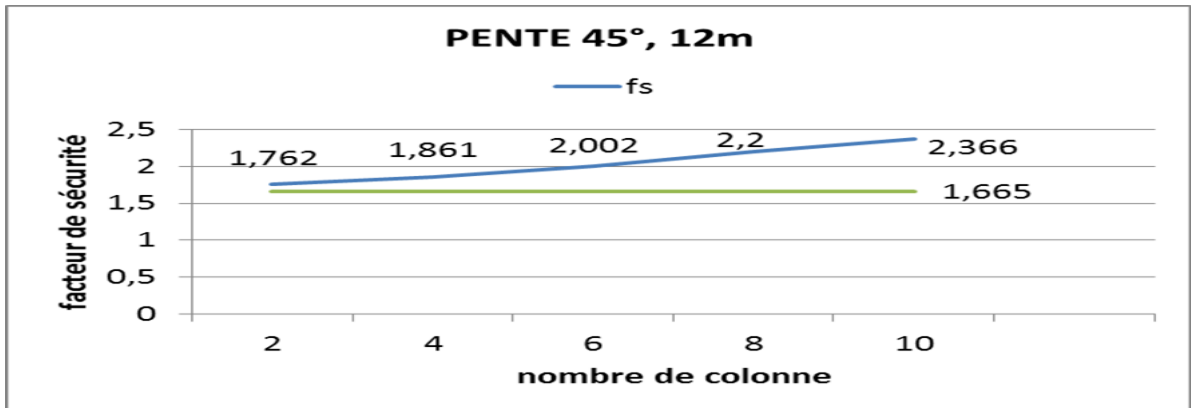


Figure 4. 86: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 60° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 6: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1.638	1.620	1.592	1.562	1.702
8 m	1.634	1.592	1.555	1.625	1.908
12 m	1.705	1.854	1.904	1.906	1.918

- Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 60° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

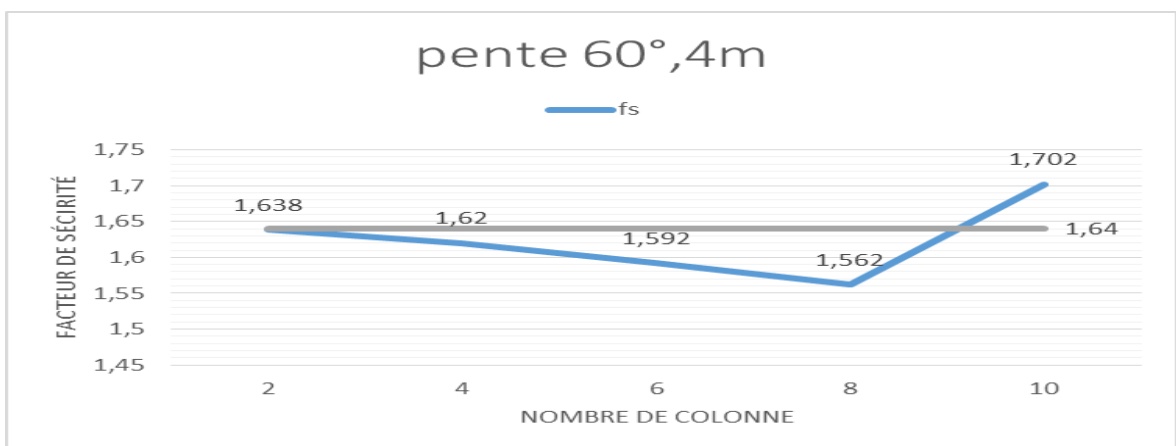


Figure 4. 87: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

- Longueur de 8 m :

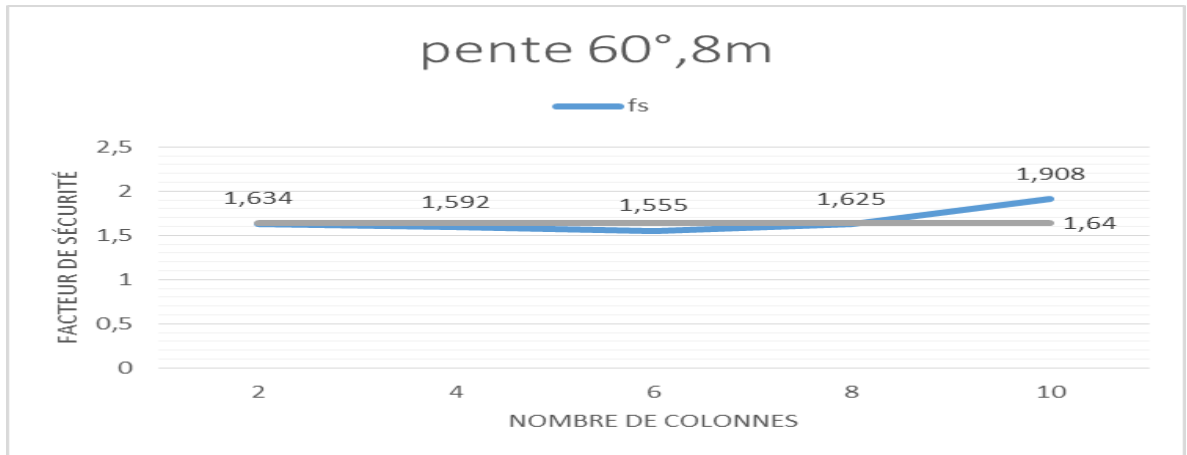


Figure 4. 88: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

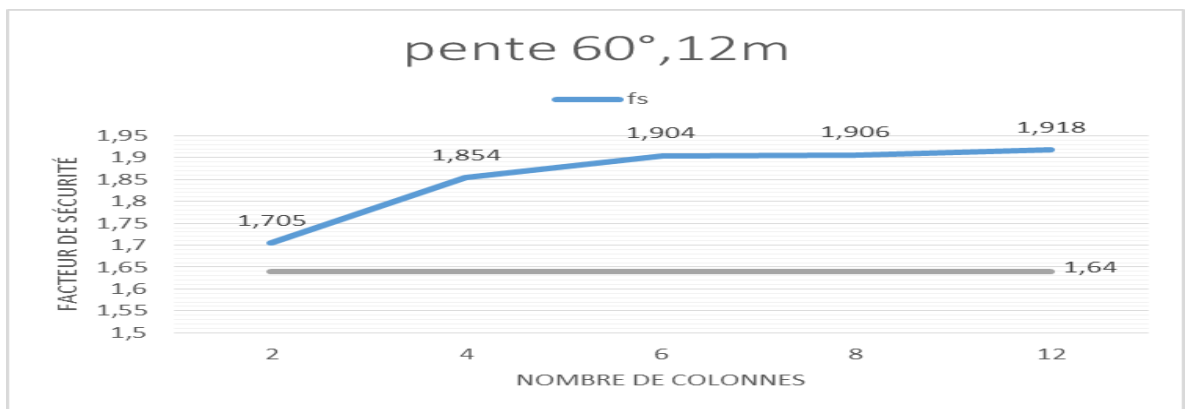


Figure 4. 89: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

4.3.3.2. POUR $sh=1m$, $E_{eq}= 26179,93 \text{ KN/m}^2$

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 30° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 7: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Longueur \ Nombre de colonne	2	4	6	8	10
4 m	1,701	1,693	1,668	1,627	1,724
8 m	1,713	1,692	1,645	1,643	2,066
12 m	1,838	1,908	2,021	2,233	2,692

CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU RENFORCE PAR DEEP MIXING

➤ Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 30° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

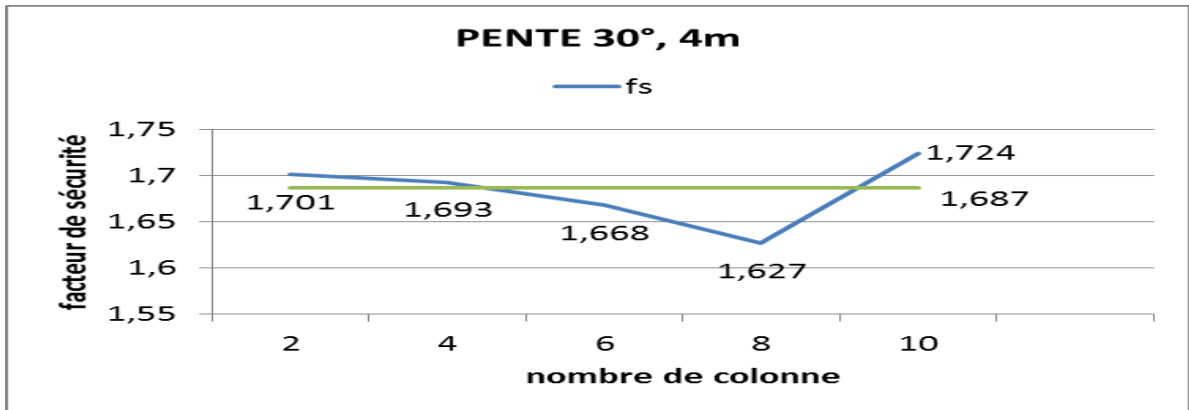


Figure 4. 90: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

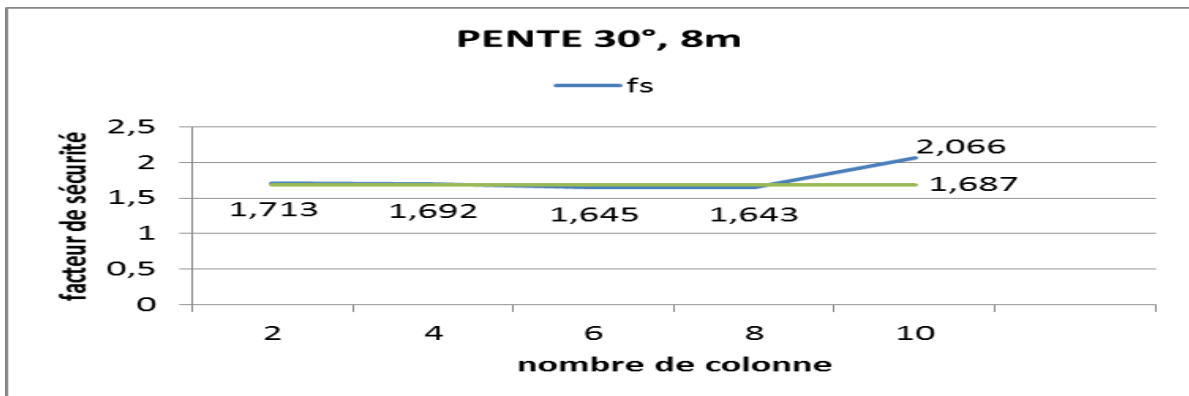


Figure 4. 91: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

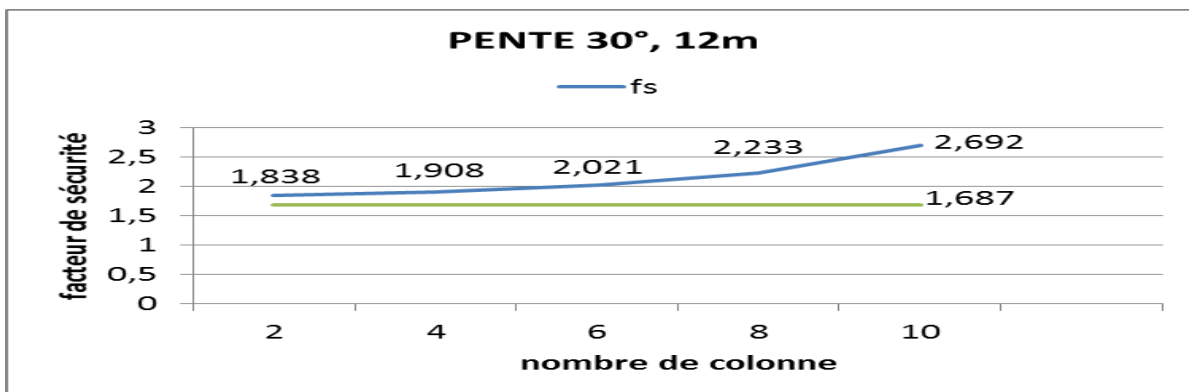


Figure 4. 92: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

**CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU
RENFORCE PAR DEEP MIXING**

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 45° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 8: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1,668	1,654	1,626	1,590	1,705
8 m	1,666	1,634	1,585	1,626	2,031
12 m	1,762	1,860	2,002	2,201	2,453

- Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 45° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

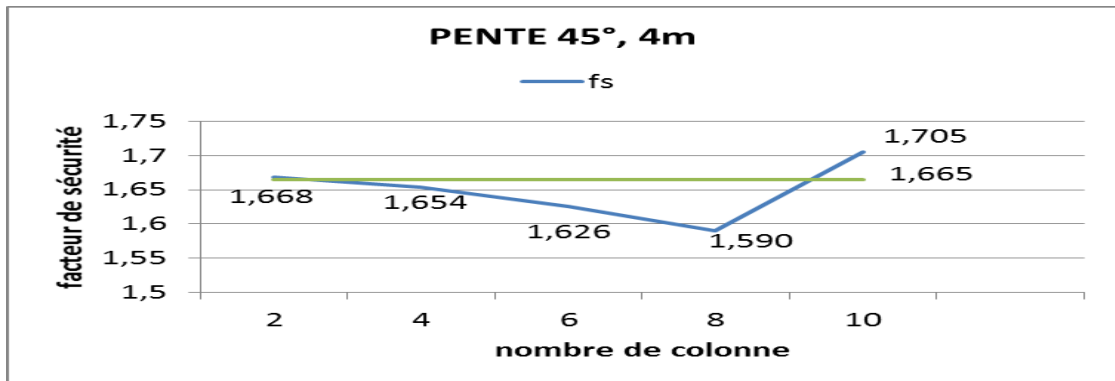


Figure 4. 93: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

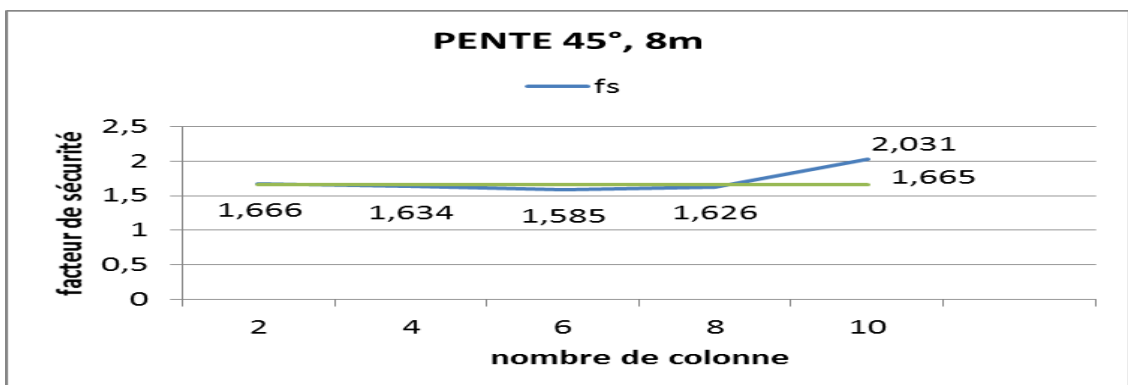


Figure 4. 94: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

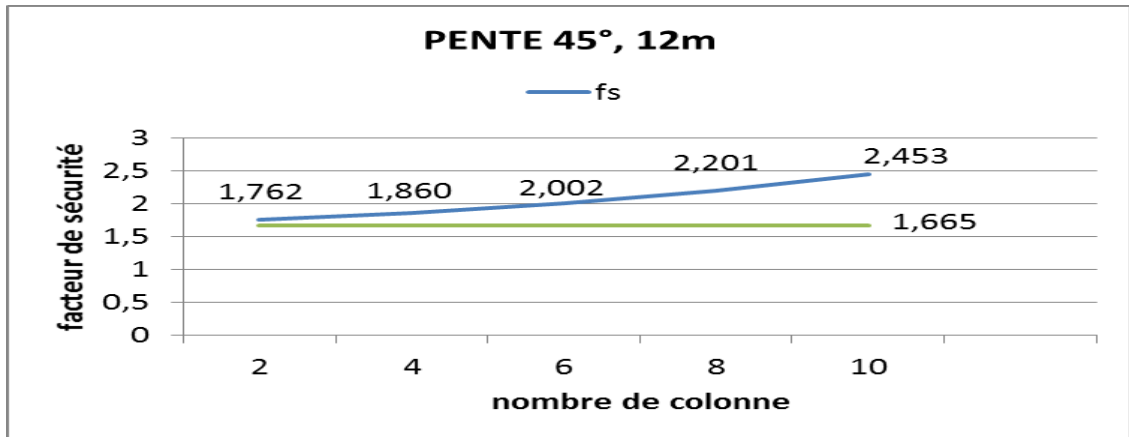


Figure 4. 95: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 60° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 9: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1,638	1,619	1,592	1,561	1,702
8 m	1,635	1,593	1,555	1,625	1,934
12 m	1,704	1,854	1,982	1,909	1,918

- Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 60° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

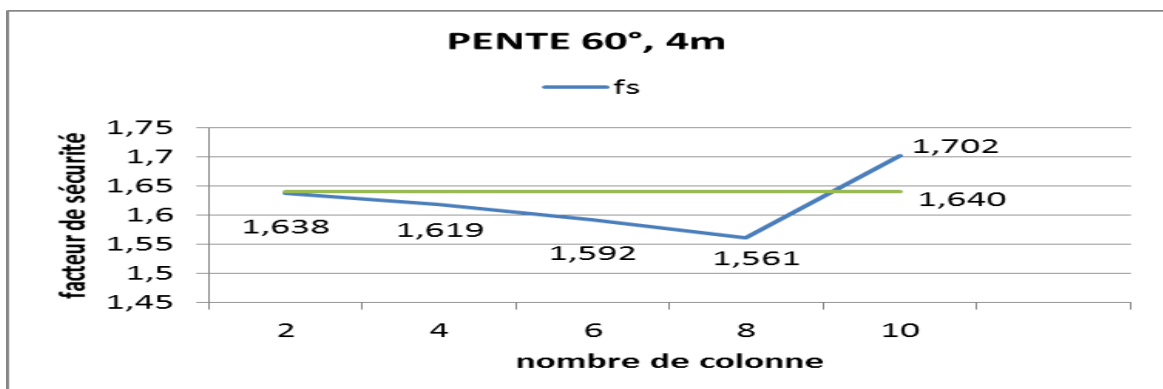


Figure 4. 96: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

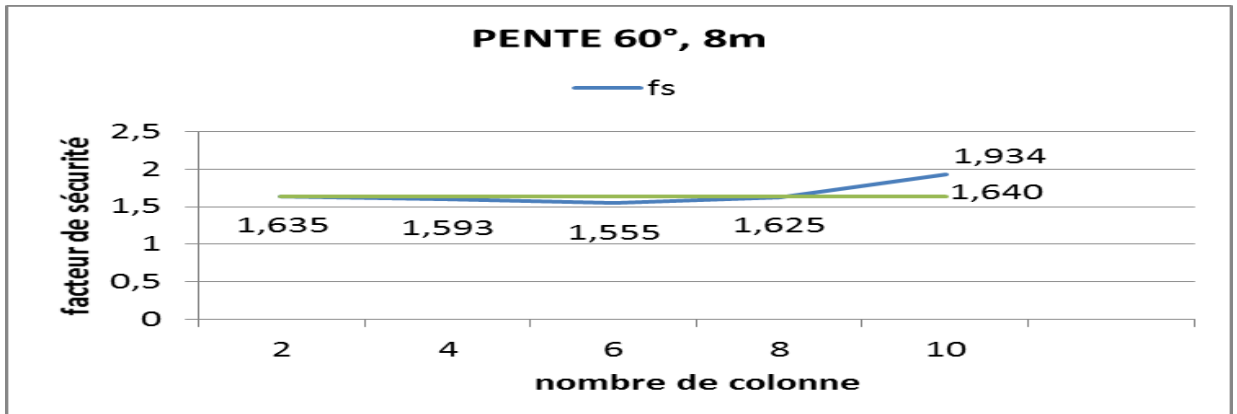


Figure 4. 97: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

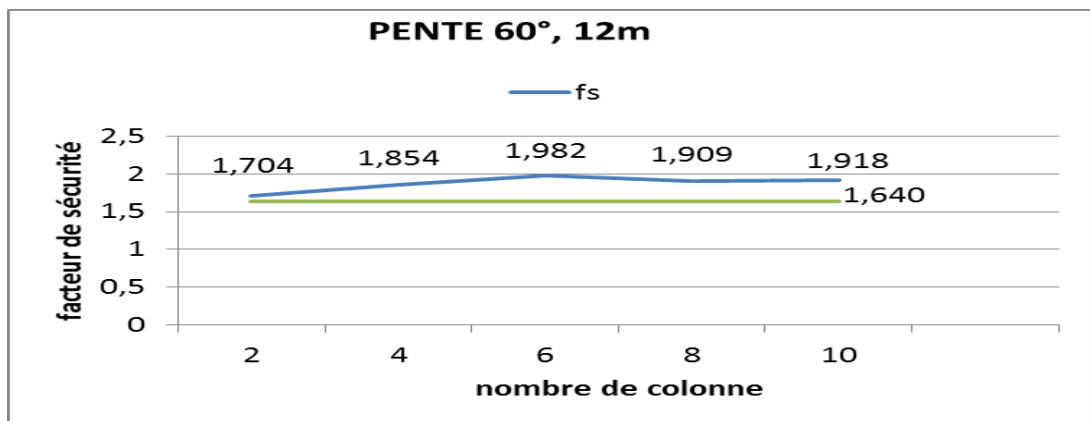


Figure 4. 98: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

4.3.3.3. POUR $sh=2m$, $E_{eq}= 13089,96 \text{ KN/m}^2$

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 30° sont groupés dans le tableau ci-dessus

Tableau 4. 10: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1.700	1.693	1.668	1.627	1.724
8 m	1.712	1.692	1.645	1.643	2.066
12 m	1.838	1.907	2.020	2.232	2.693

➤ Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 30° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

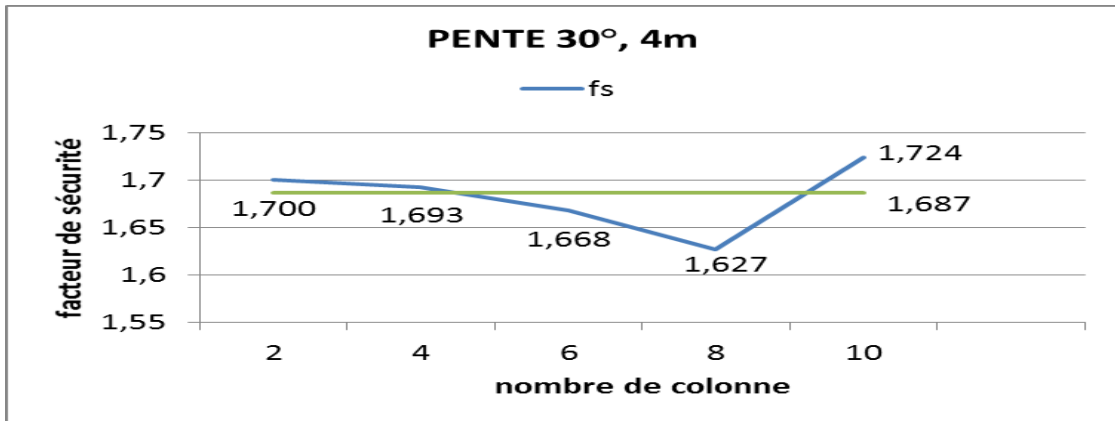


Figure 4. 99: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

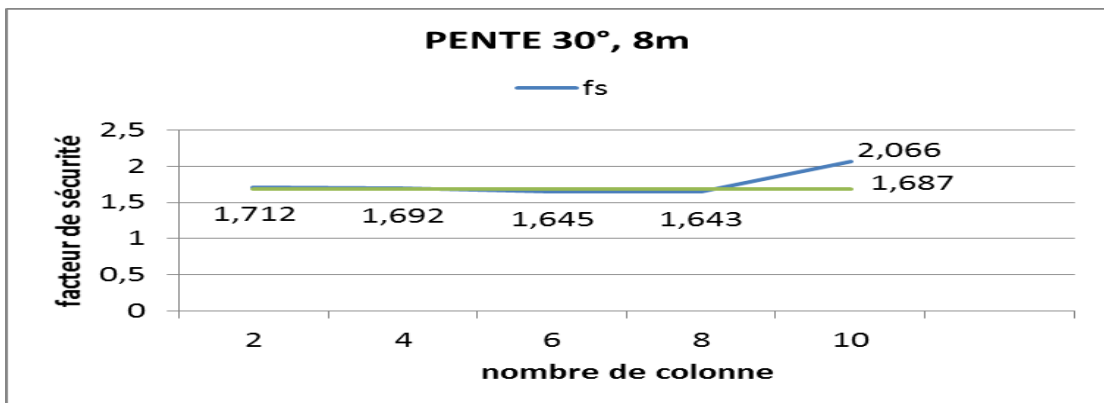


Figure 4. 100: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

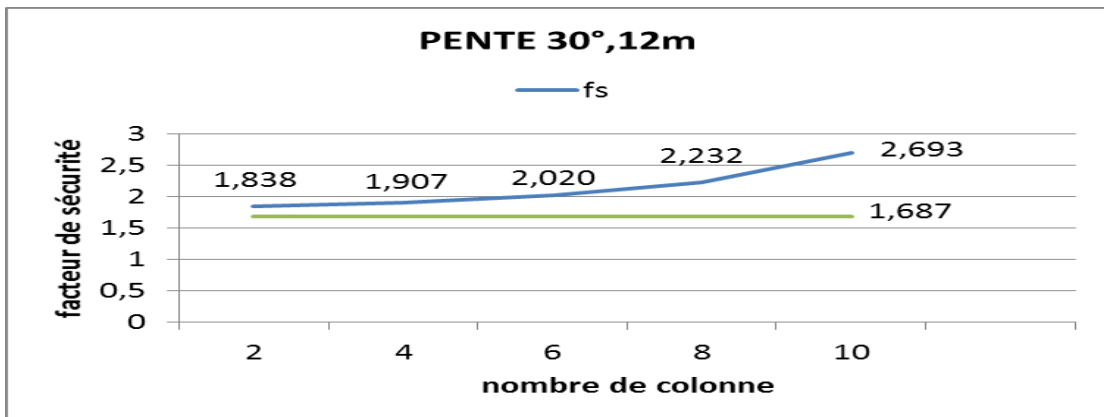


Figure 4. 101: graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

**CHAPITRE 4 : ETUDES PARAMETRIQUE D'UN REMBLAI SUR SOL MOU
RENFORCE PAR DEEP MIXING**

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 45° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 11: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1.668	1.654	1.626	1.590	1.704
8 m	1.666	1.633	1.585	1.626	2.031
12 m	1.762	1.861	2.002	2.201	2.456

- Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 45° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

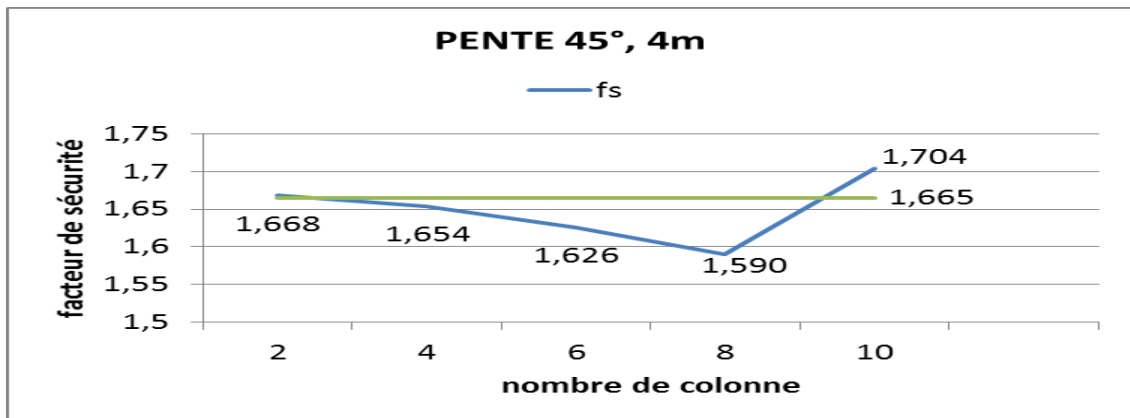


Figure 4. 102: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

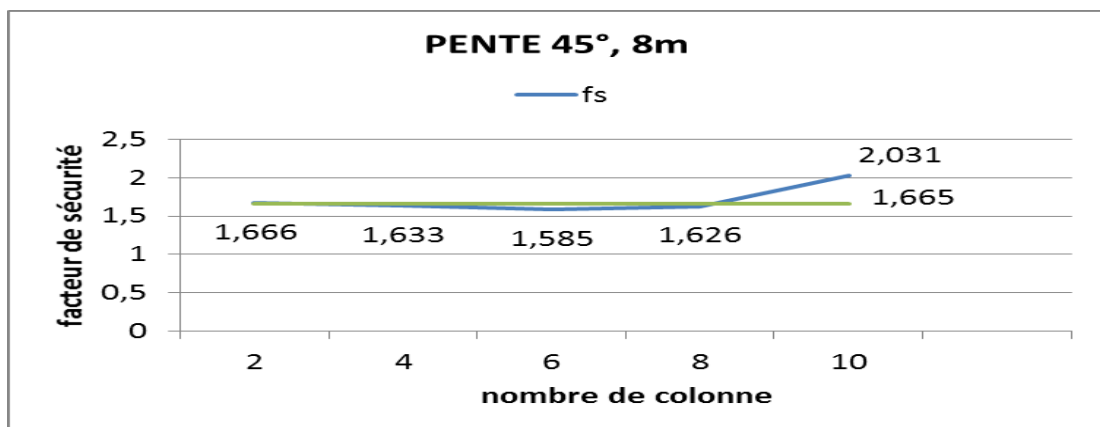


Figure 4. 103: graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

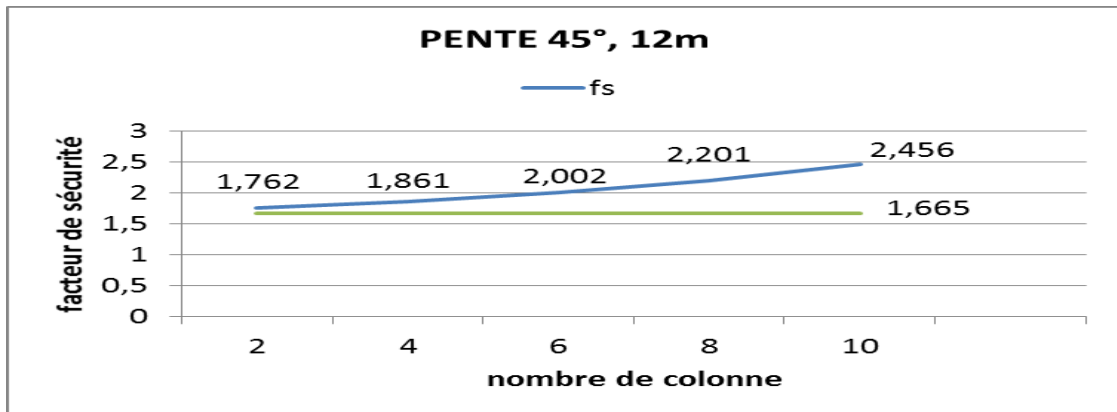


Figure 4. 104: graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Les résultats du facteur de sécurité pour une pente de 60° sont groupés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 4. 12: Présente les facteurs de sécurités avec les longueurs et le nombre de colonnes.

Nombre de colonne \ Longueur	2	4	6	8	10
4 m	1.639	1.620	1.592	1.562	1.702
8 m	1.634	1.593	1.554	1.625	1.940
12 m	1.707	1.854	1.981	1.918	1.923

- Les graphes du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes pour une pente de 60° sont présentés dans cette partie.

- Longueur de 4 m :

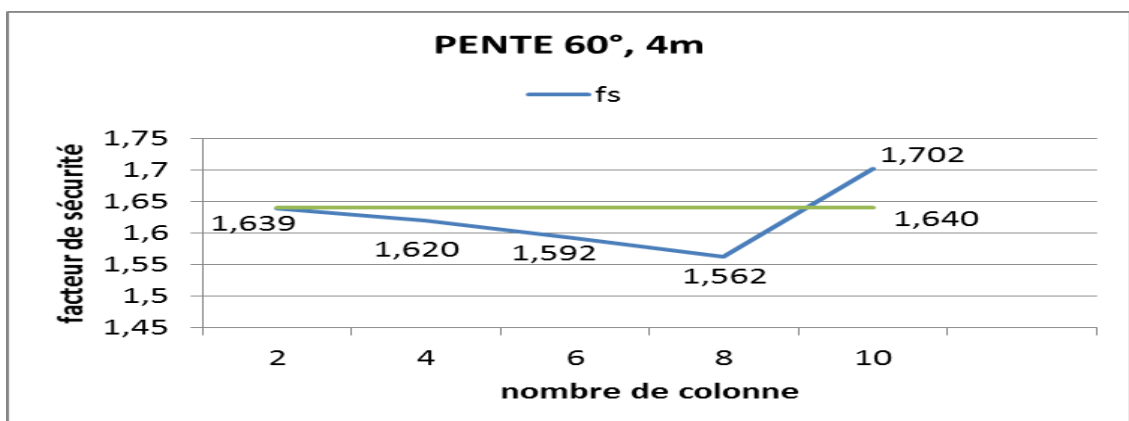


Figure 4. 105: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 8 m :

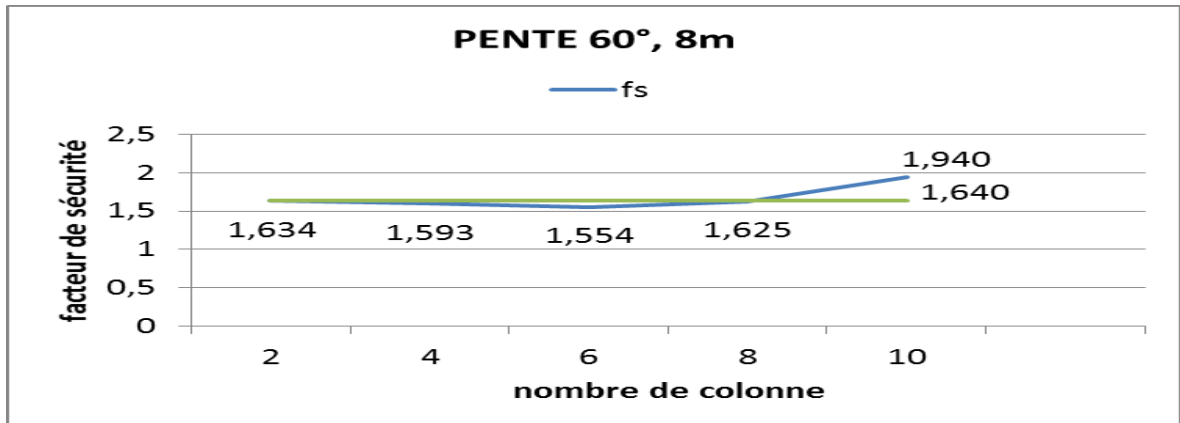


Figure 4. 106: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

- Longueur de 12 m :

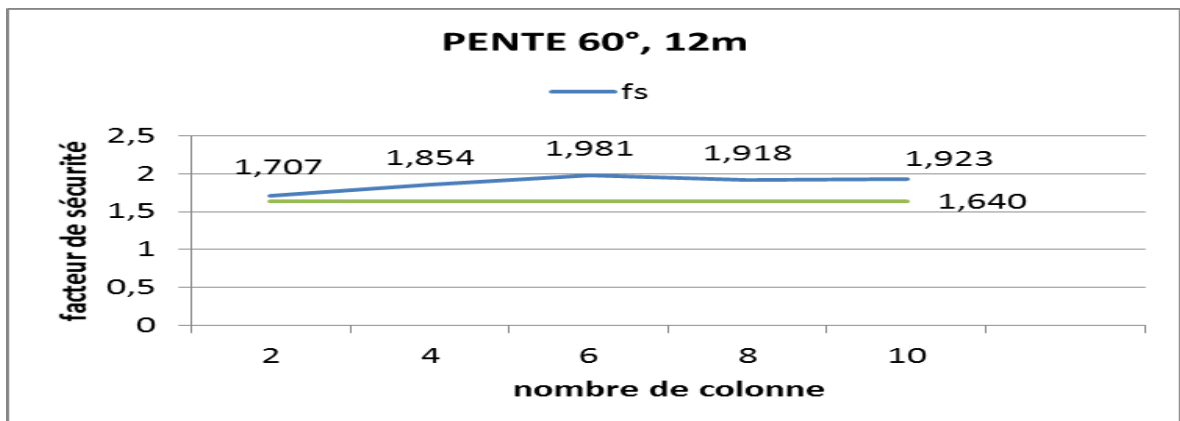


Figure 4. 107: Graphe du facteur de sécurité en fonction du nombre de colonnes.

4.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre un remblai supporté par des colonnes de ciment en profondeur (DCM) sur un sol mou a été simulés dans cette étude numérique.

Un modèle équivalent bidimensionnel (2D) de déformation plane par le logiciel PLAXIS 2D a été utilisé pour évaluer le comportement du remblai et les facteurs qui influent sur le facteur de sécurité.

Les principales conclusions de cette étude peuvent être résumées comme suit :

- Les résultats numériques ont indiqué que l'application des colonnes DCM peut minimiser efficacement le déplacement latéral, et augmenter la stabilité de l'ensemble du système de remblai construit sur sols mous.

- L'application des colonnes DCM avait un grand avantage sur augmentation du facteur de sécurité et de la stabilité du sol et du remblai, par rapport au remblai sur sol mou sans amélioration.
- Les colonnes en DM sont très efficaces pour renforcer le sol de fondation d'un remblai (renforcé le sol mous).
- Les colonnes DM ont un avantage d'amélioré et renforcé le sol plus profondément et par conséquent c'est une très bonne technique pour le la stabilité du sol mous et empêché la rupture profonde.
- D'après les résultats de la modélisation un renforcement avec des colonnes en DM à 4 ou bien à 8 mètres de profondeur n'a pas de grande influence sur le facteur de sécurité.
- D'après les résultats un renforcement avec des colonnes de 12 mètres de profondeur avait un grand avantage sur l'augmentation du facteur de sécurité quel que soit le nombre des colonnes.
- Le nombre de colonne et la profondeur de renforcement ont une grande influence sur le facteur de sécurité, le nombre des colonnes et la profondeur de renforcement ont une relation proportionnelle avec le facteur de sécurité.
- D'après l'étude paramétrique, on peut constater que l'influence du module d'Young des colonnes en DM reste très faible sur le facteur de sécurité, car le calcul du facteur de sécurité des talus n'est pas lié directement par les modules d'Young des sols.

Le but de ce travail est d'examiner l'effet du remblai renforcé par les colonnes en deep mixing sur sol mou sur le facteur de sécurité et sur les surfaces des glissements, Sur la base des résultats de cette étude, et sur résultats des simulations numériques on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✚ L'effet du renforcement des remblais sur sol mou par deep mixing est un phénomène complexe nécessitant un outil numérique bien adapté la modélisation numérique de cet effet nécessite des outils professionnels (tels que, PLAXIS, ...), Nous avons utilisé dans cette présente mémoire le code d'élément finis PLAXIS 2D en déformation plane.
- ✚ La modélisation avec le logiciel PLAXIS 2D a donné de bons résultats précis et logiques
- ✚ L'augmentation de la pente du remblai réduira le facteur de sécurité et augmente le cercle de glissement profond.
- ✚ Module d'Young des colonnes et l'espacement des colonnes à une très faible influence sur facteur de sécurité, par contre, il a une relation avec le mode de rupture des colonnes.
- ✚ Le renforcement du sol mou par des colonnes de 4 mètres de profondeur à aucune influence sur facteur de sécurité et sur le cercle de glissement sauf pour un nombre de colonne égale à 10.
- ✚ Le renforcement du sol par des colonnes de 8 mètres de profondeur a une très faible influence sur le facteur de sécurité et sur le cercle de glissement sauf pour un nombre de colonne égale à 10.
- ✚ Le renforcement du sol par des colonnes de 12 mètres de profondeur augmente le facteur de sécurité de façon optimal quel que soit le nombre des colonnes.
- ✚ Pour un renforcement de sol par des colonnes de 12 mètres de profondeur avec 8 et 10 colonnes pour les pentes des remblais 45° et 60° absence totale du cercle de glissement profond dans le sol due à un bon renforcement avec l'apparition d'un cercle de glissement près du parement.
- ✚ Le nombre de colonnes et la profondeur de renforcement influent sur le facteur de sécurité et sur le cercle de glissement profond.
- ✚ Pour une bonne amélioration et un bon renforcement du sol mou pour les remblais avec la méthode du deep mixing on opte pour un nombre de colonne supérieure ou égale à 8 avec une profondeur de 12 mètres.

- [1] **Masaki Kitazume & Masaaki Terashi (2013)**. the Deep Mixing Method.
- [2] **Zhen Zhang, Jie Han, Guanbao Ye (2014)**. Numerical Analysis of Failure Modes of Deep Mixed Column-supported Embankments on Soft Soils, Ground Improvement and Geosynthetics.
- [3] **Michał Topolnicki (2016)**. General overview and advances in Deep Soil Mixing Geotechnical Conference of Torino Design, Construction and Controls of Soil Improvement Systems, Torino,
- [4] **Brinkgreve et al. (2015)**. PLAXIS 2D, user manual, delft, the Netherlands: plaxis Bv.
- [5] **Olivier HELSON (2017)**. Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol : influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition. Thèse de doctorat présentée pour l'obtention du grade de docteur de l'université de Cergy- pontoise.
- [6] **Adrien Golaire (2021)**. Étude expérimentale du "Soil Mixing" comme outil de stabilisation des talus réalisé par 2ème année du Master Ingénieur Civil des Constructions travaille de fin d'étude.
- [7] **Masaki Kitazume, Dr. Eng (2017)**. Deep Mixing Method, the Japanese Experience and Recent Advancement Tokyo Institute of Technology.
- [8] **International Conference (2005)**. on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances (Stockholm- Sweden).
- [9] **AZZAZ Ibtissam & CHOUIKHA Safia (2017)**. Étude numérique de la stabilité d'un remblai sur sol mol traité par des colonnes ballastées entouré par de géo synthétique, mémoire de Fin d'Études.
- [10] **Jie Han et al. (2016)** Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay,
- [11] **Chi Dang Cong Chi Dang, and Hadi Khabbaz. (2007)** Numerical Analysis on the Performance of Fibre Reinforced Load Transfer Platform and Deep Mixing Columns Supported Embankments, University of Technology Sydney, Ultimo, Australia.

ANNEXES

I. MODÉLISATION AVEC $sh=1m$, $E_{eq} = 26179,93 \text{ KN/m}^2$ POUR LA PENTE 45° .

1) Amélioration avec 2 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 2 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m) et voir les déformations du maillage et le cercle de glissement et les facteurs de sécurité.

- Amélioration avec 2 colonnes de 4m de longueur
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 1.1.

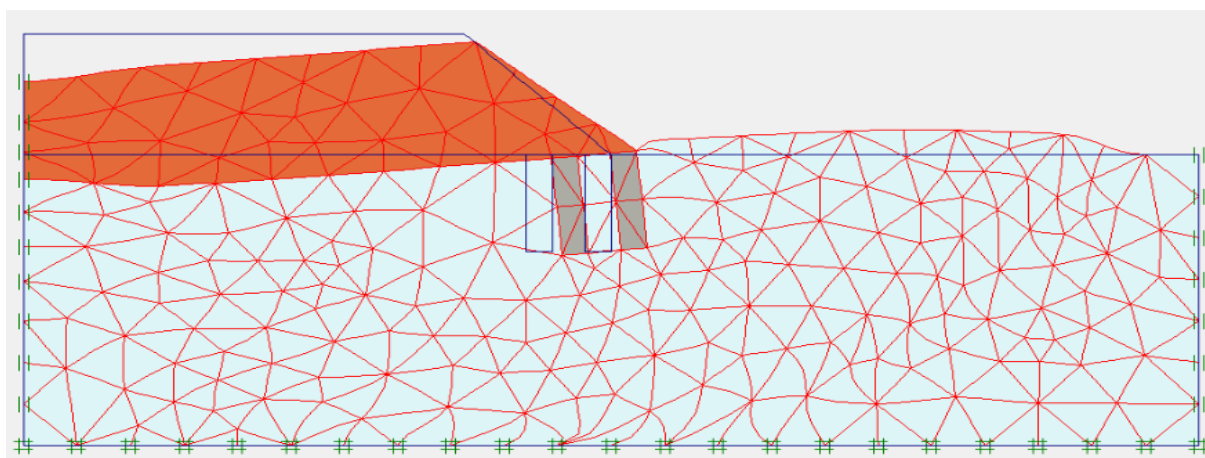


Figure 1.1 : Le maillage déformé du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 1.2.

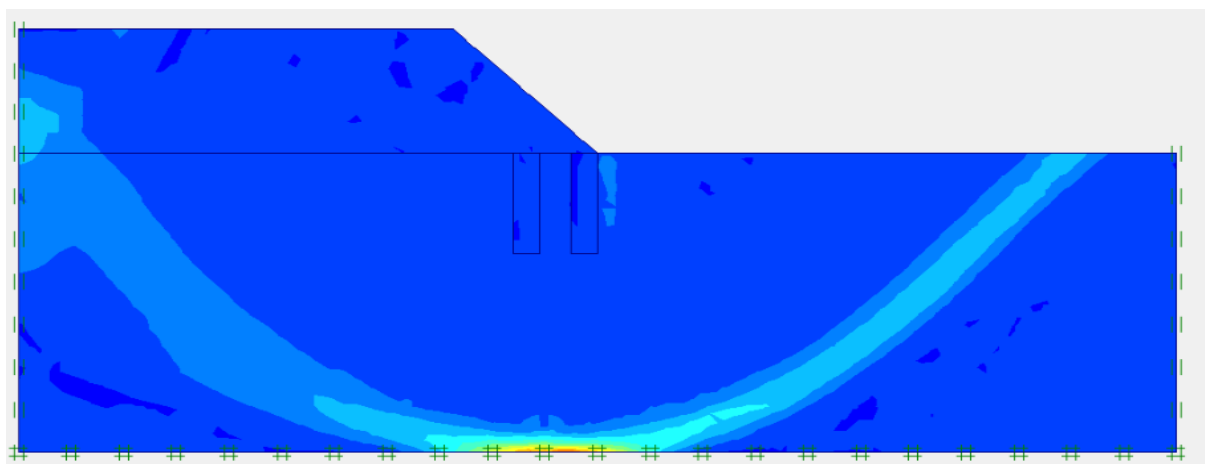


Figure 1.2 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.668 et il est présenté dans la figure 1.3.

Calculation information			
Step Info		Step Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	2,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel: 0,000
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf: 1,668
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time: 0,000

Figure 1.3 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 2 colonnes de 8m de longueur**
- Le maillage déformé du model et dans la figure 1.4.

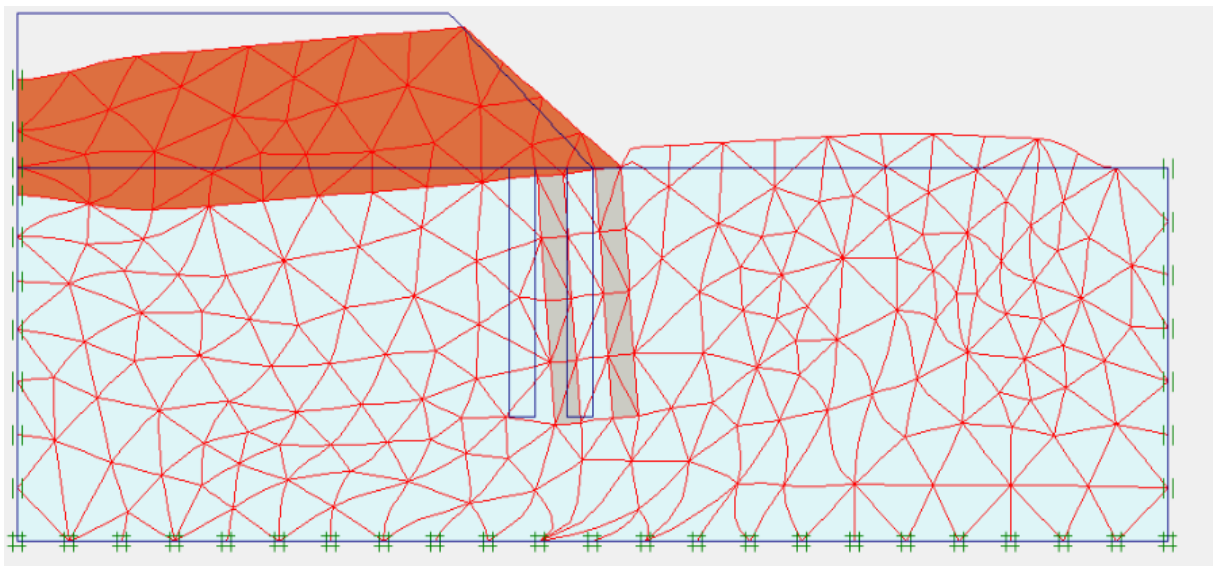


Figure 1.4 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 1.5.

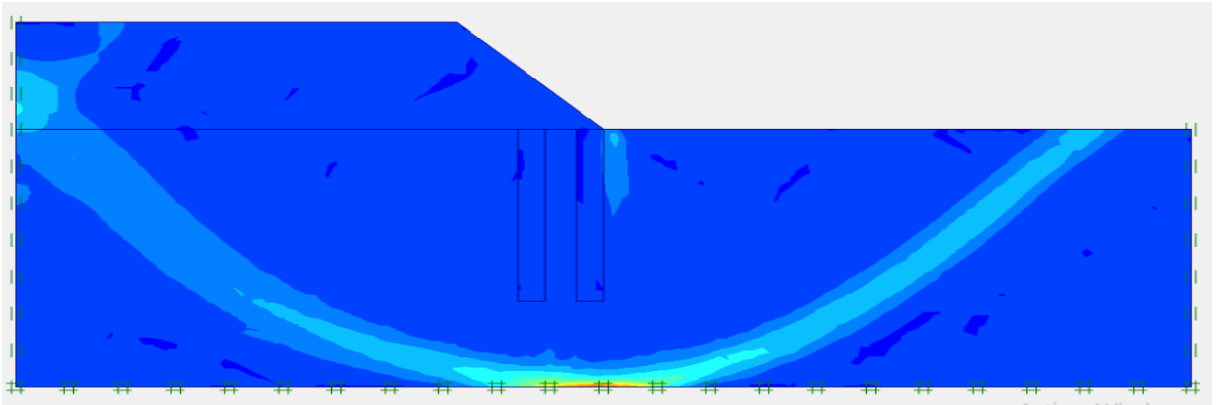


Figure 1.5 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.666 et il est présenté dans la figure 1.6.

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step		107 of 107	
PLASTIC STEP		Extrapolation factor		1.000	
		Relative stiffness		0.000	
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0.000	Σ -Mdisp:	1.000	
Load system A	MloadA:	0.000	Σ -MloadA:	1.000	
Load system B	MloadB:	0.000	Σ -MloadB:	1.000	
Soil weight	Mweight:	0.000	Σ -Mweight:	1.000	
Acceleration	Maccel:	0.000	Σ -Maccel:	0.000	
Streight reduction factor	Msf:	0.000	Σ -Msf:	1.666	
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000	
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000	

Figure 1.6 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 2 colonnes de 12m de longueur**
- Le maillage déformé du model et dans la figure 1.7.

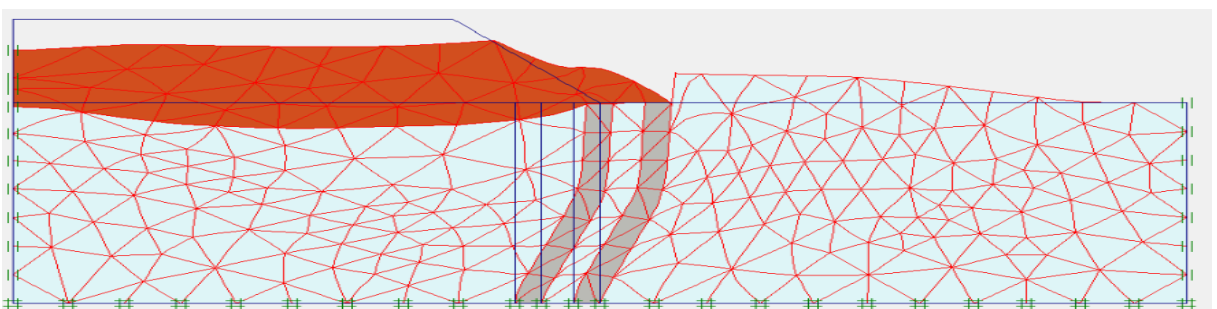


Figure 1.7 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 1.8.

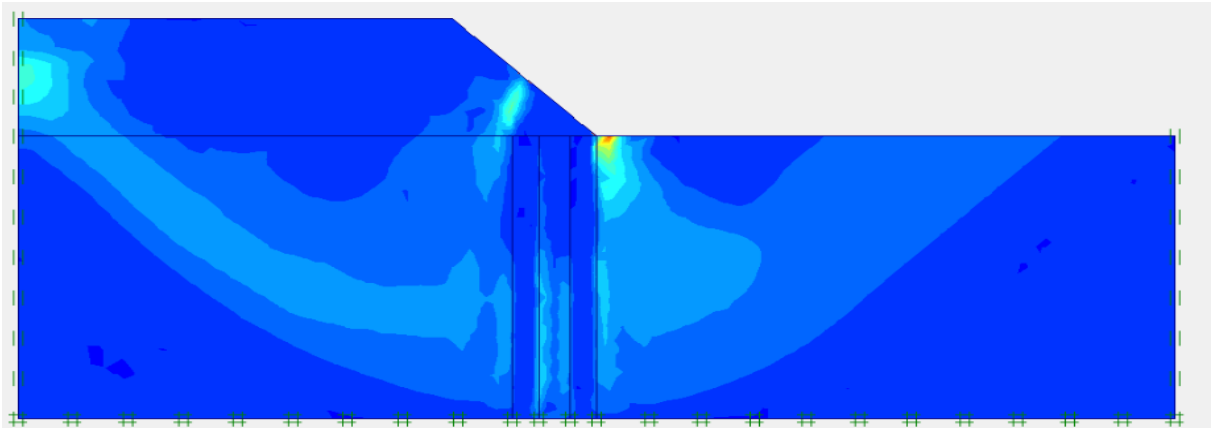


Figure 1.8 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.762 et il est présenté dans la figure 1.9.

Calculation information			
Multipliers Additional Info Step Info			
Step Info			
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers	Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0,000	Σ -Mdisp: 1,000	
Load system A	MloadA: 0,000	Σ -MloadA: 1,000	
Load system B	MloadB: 0,000	Σ -MloadB: 1,000	
Soil weight	Mweight: 0,000	Σ -Mweight: 1,000	
Acceleration	Maccel: 0,000	Σ -Maccel: 0,000	
Strenght reduction factor	Msf: 0,000	Σ -Msf: 1,762	
Time	Increment: 0,000	End time: 0,000	
Dynamic Time	Increment: 0,000	End time: 0,000	

Figure 1.9 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- La figure 1.10 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 45° renforcé par 2 colonnes.

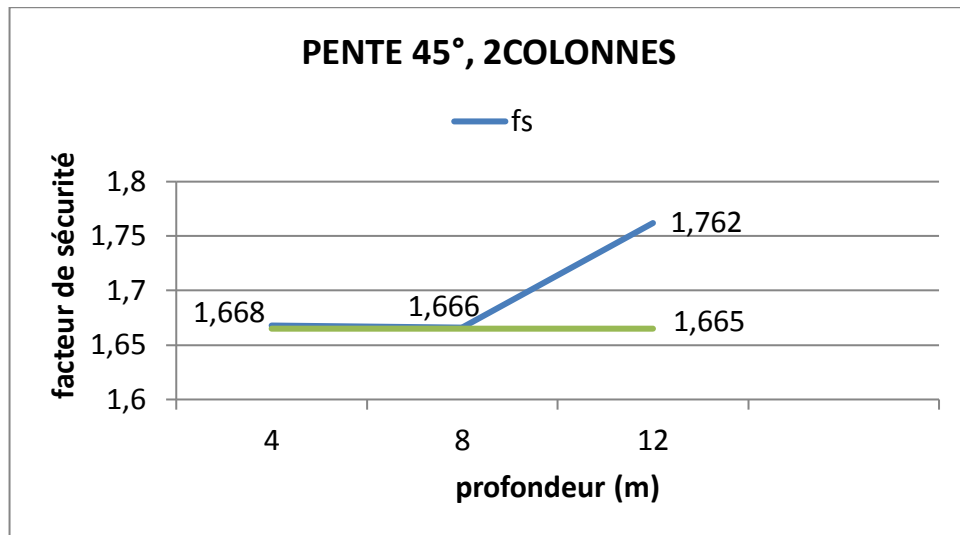


Figure 1.10 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 45°.

2) Amélioration avec 4 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 4 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 4 colonnes de 4m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 2.11.

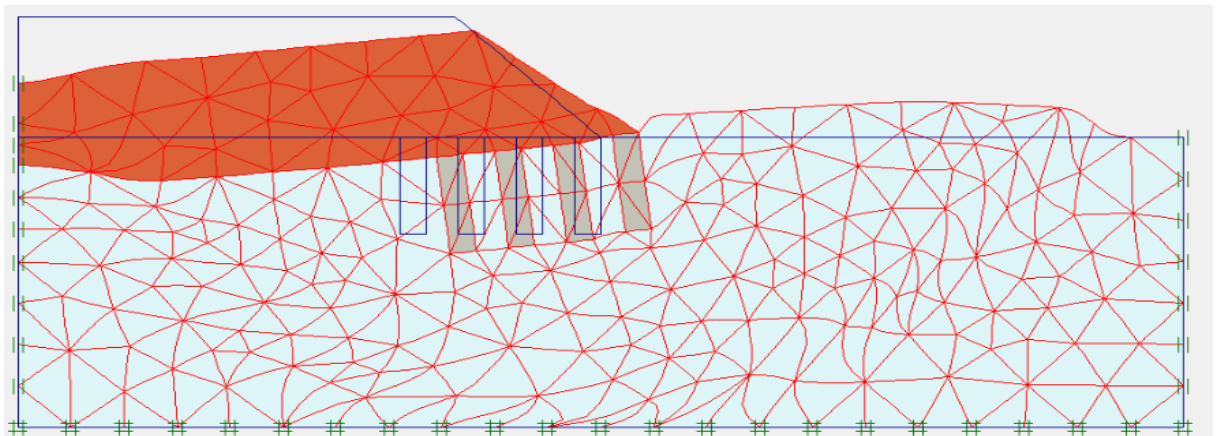


Figure 2.11 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 2.12.

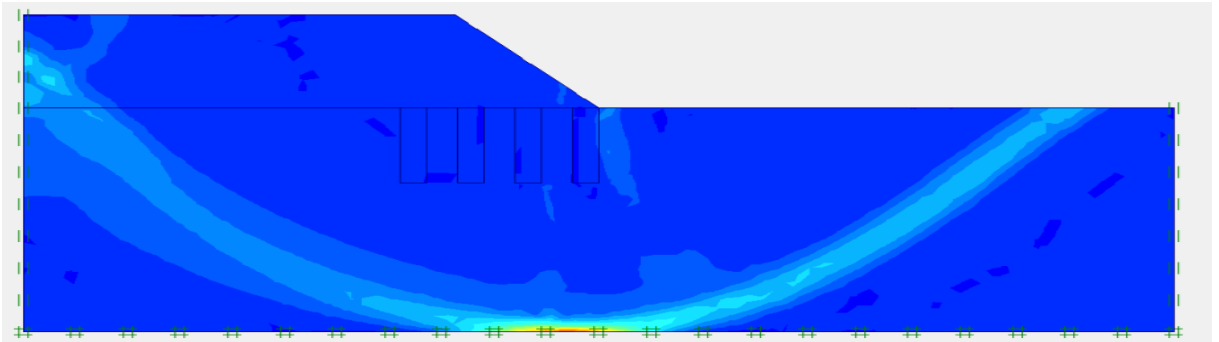


Figure 2.12 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.654 et il est présenté dans la figure 2.13.

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info	Step	107 of 107	Extrapolation factor	1.000	
	PLASTIC STEP		Relative stiffness	0.000	
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0.000	Σ -Mdisp:	1.000	
Load system A	MloadA:	0.000	Σ -MloadA:	1.000	
Load system B	MloadB:	0.000	Σ -MloadB:	1.000	
Soil weight	Mweight:	0.000	Σ -Mweight:	1.000	
Acceleration	Maccel:	0.000	Σ -Maccel:	0.000	
Strenght reduction factor	Msf:	0.000	Σ -Msf:	1.654	
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000	
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000	

Figure 2.13 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 4 colonnes de 8m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 2.14.

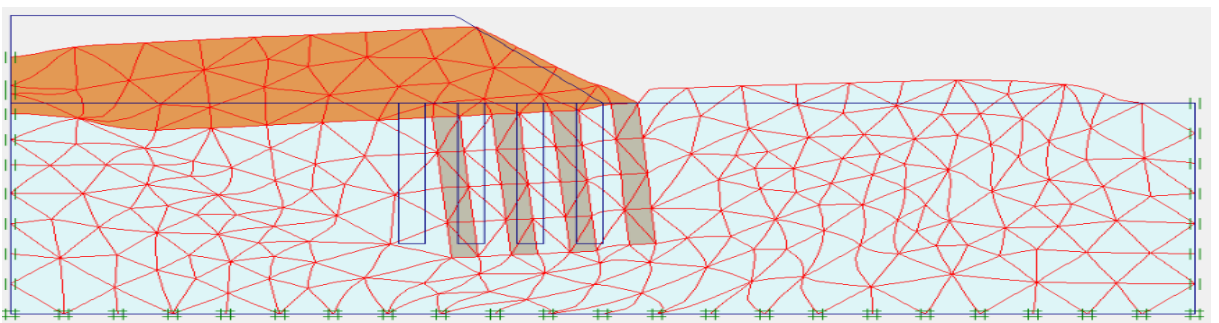


Figure 2.14 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure B-15.

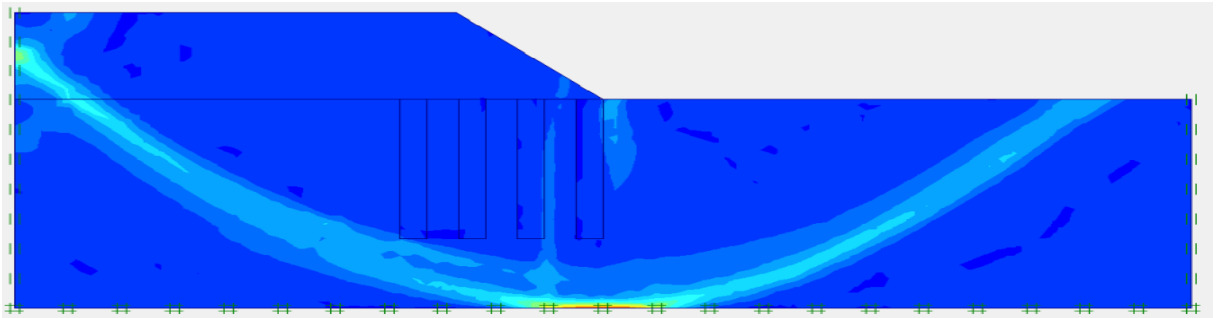


Figure 2.15 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.634 et il est présenté dans la figure 2.16.

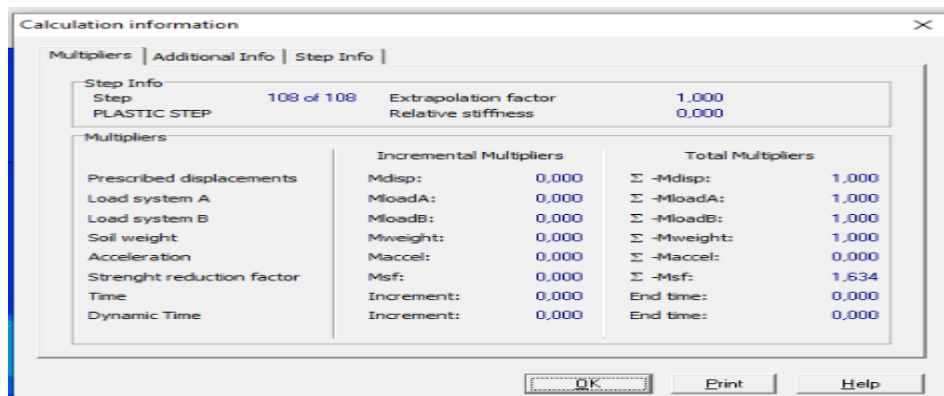


Figure 2.16 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 4 colonnes de 12m de profondeur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 2.17.

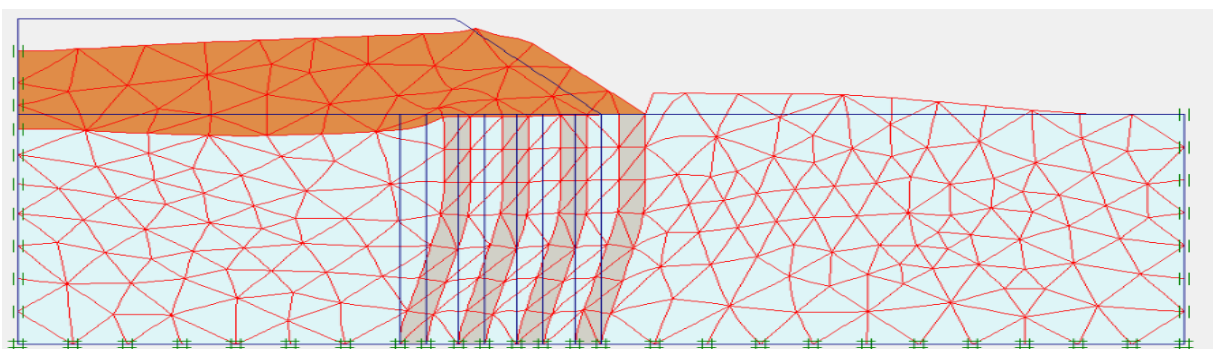


Figure 2.17 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 2.18.

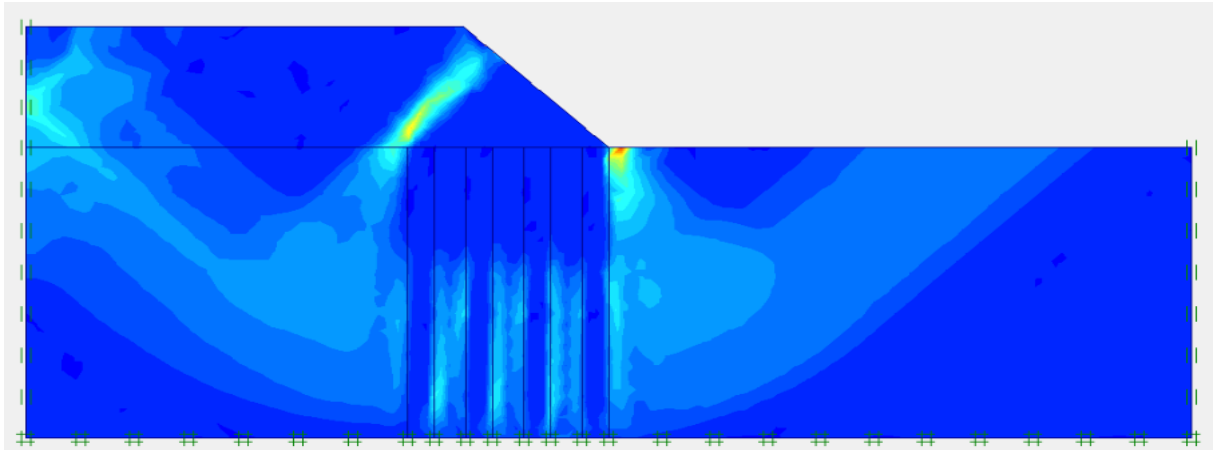


Figure 2.18 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.860 et il est présenté dans la figure 2.19.

Calculation information			
Multipliers		Additional Info	Step Info
Step Info		Step	107 of 107
PLASTIC STEP		Extrapolation factor	2,000
		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers	Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA: 0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB: 0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight: 0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel: 0,000	Σ -Maccel:	0,000
Streight reduction factor	Msf: 0,000	Σ -Msf:	1,860
Time	Increment: 0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment: 0,000	End time:	0,000

Figure 2.19 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 2.20 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 45° renforcé par 4 colonnes.

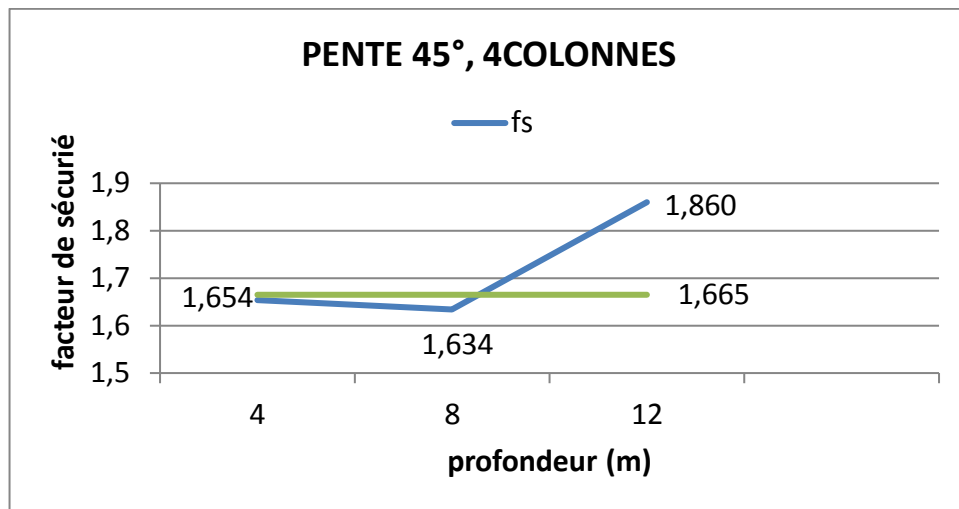


Figure 2.20 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 45° .

3) Amélioration avec 6 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 6 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 6 colonnes de 4m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 3.21.

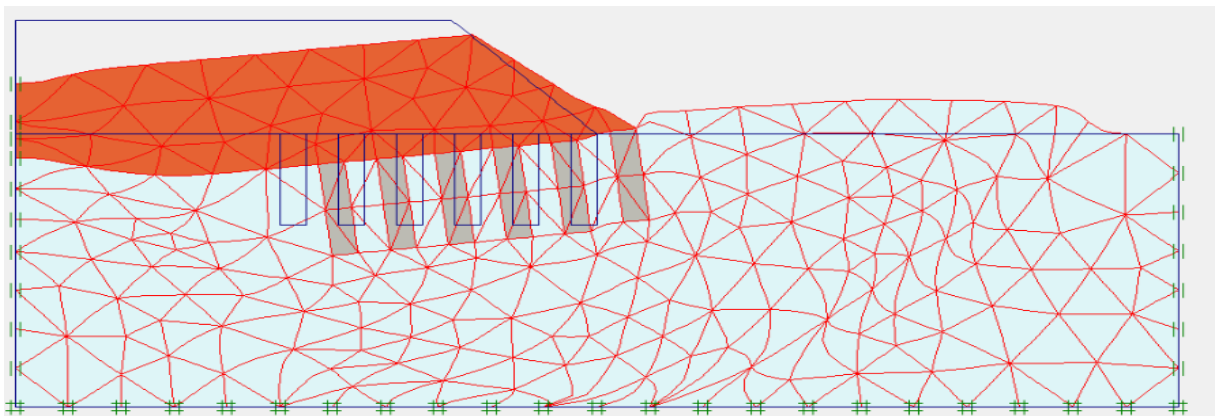


Figure 3.21 : Maillage déformé du modèle pente 45° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 3.22.

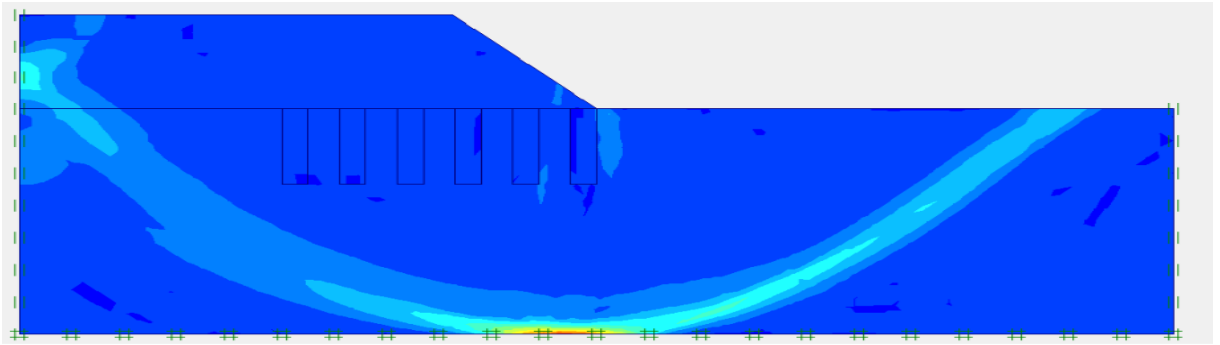


Figure 3.22 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.626 et il est présenté dans la figure 3.23.

Calculation information			
Multipliers		Additional Info	
Step Info		Step	107 of 107
PLASTIC STEP		Extrapolation factor	1.000
		Relative stiffness	0.000
Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0.000	Σ -Mdisp:	1.000
Load system A	MloadA: 0.000	Σ -MloadA:	1.000
Load system B	MloadB: 0.000	Σ -MloadB:	1.000
Soil weight	Mweight: 0.000	Σ -Mweight:	1.000
Acceleration	Maccel: 0.000	Σ -Maccel:	0.000
Streight reduction factor	Msf: 0.000	Σ -Msf:	1.626
Time	Increment: 0.000	End time:	0.000
Dynamic Time	Increment: 0.000	End time:	0.000

Figure 3.23 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 4 m de longueur.

- **Amélioration avec 6 colonnes de 8m de longueur**

- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 3.24.

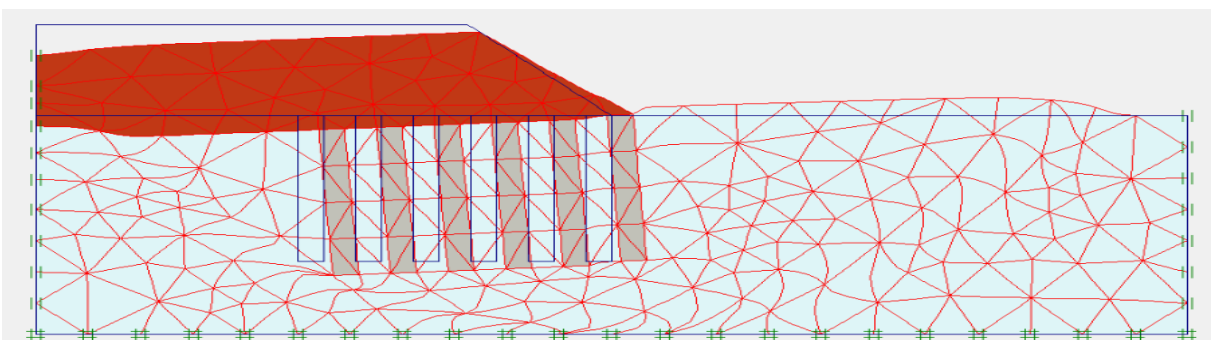


Figure 3.24 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 3.25.

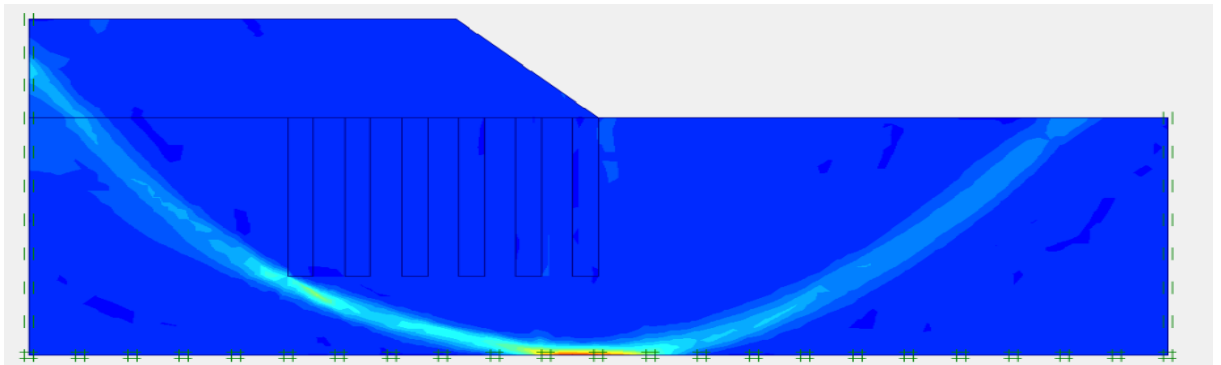


Figure 3.25 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.585 et il est présenté dans la figure 3.26.

Calculation information			
Multipliers		Additional Info	
Step Info			
Step	108 of 108	Extrapolation factor	2,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:
Time	Increment:	0,000	End time:
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time:
			1,000
			1,000
			1,000
			0,000
			1,585
			0,000
			0,000

Figure 3.26 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur

- **Amélioration avec 6 colonnes de 12m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 3.27.

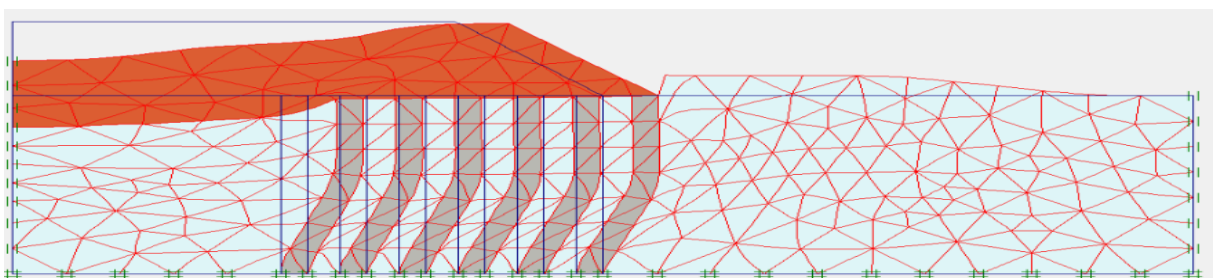


Figure 3.27 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 3.28.

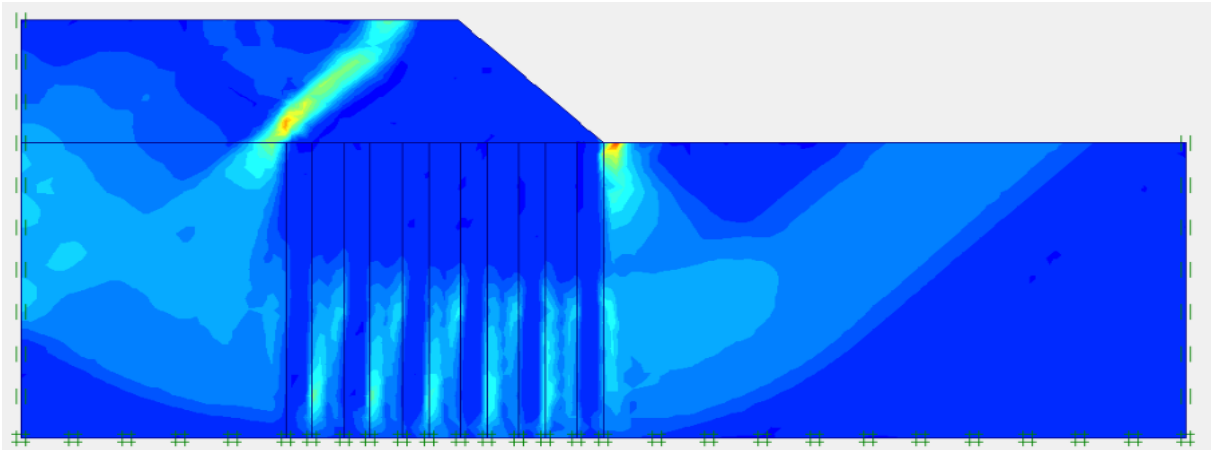


Figure 3.28 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur est égalé à 2.002 et il est présenté dans la figure 3.29.

Calculation information			
Multipliers Additional Info Step Info			
Step Info		Step	107 of 107
PLASTIC STEP		Extrapolation factor	1,000
		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel: 0,000
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf: 2,002
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time: 0,000

Figure 3.29 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 4 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 3.30 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 45° renforcé par 6 colonnes.

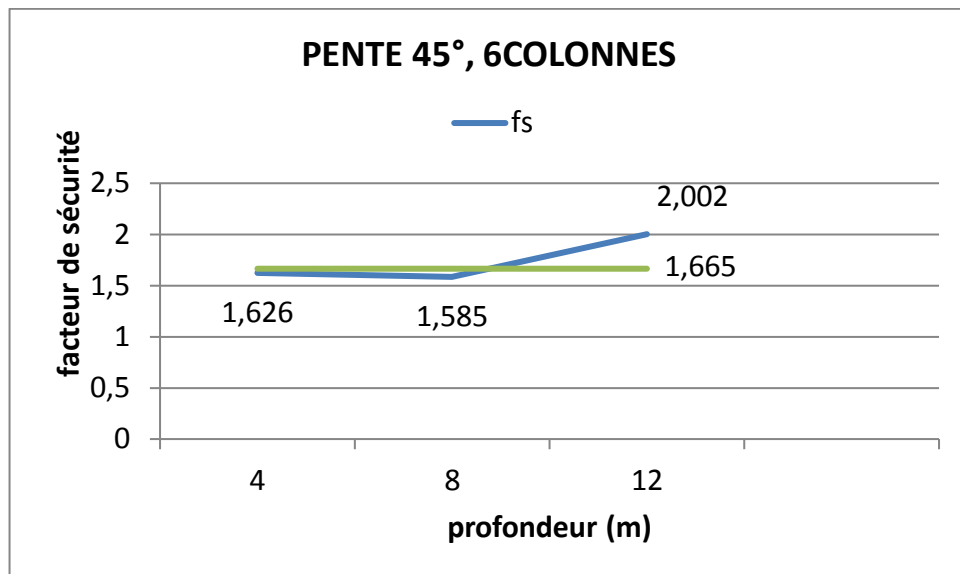


Figure 3.30 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 45°.

4) Amélioration avec 8 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 8 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 8 colonnes de 4m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 4.31.

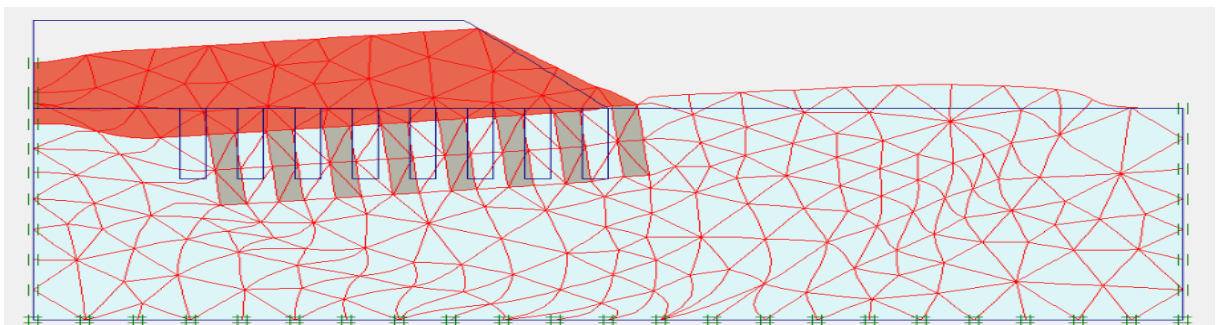


Figure 4.31 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.32.

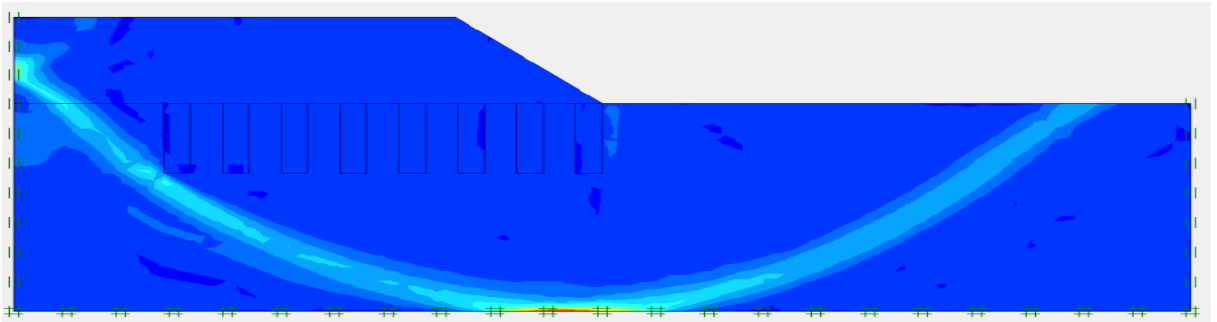


Figure 4.32 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur est égal à 1.590 et il est présenté dans la figure 4.33.

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness		0,000	
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000	
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000	
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000	
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000	
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000	
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,590	
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	

Figure 4.33 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 8 colonnes de 8m de longueur**

- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 4.34.

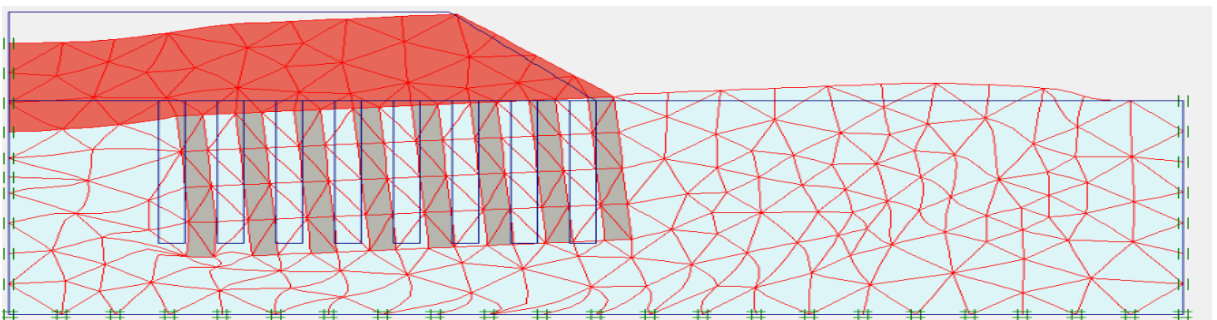


Figure 4.34 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.35.

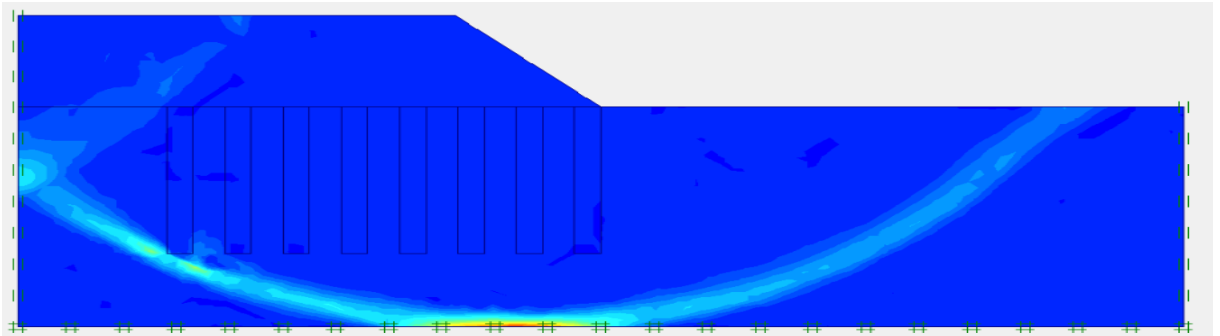


Figure 4.35 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.626 et il est présenté dans la figure 4.36.

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step	107 of 107	Extrapolation factor	1.000
PLASTIC STEP				Relative stiffness	0.000
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements		Mdisp:	0.000	Σ -Mdisp:	1.000
Load system A		MloadA:	0.000	Σ -MloadA:	1.000
Load system B		MloadB:	0.000	Σ -MloadB:	1.000
Soil weight		Mweight:	0.000	Σ -Mweight:	1.000
Acceleration		Maccel:	0.000	Σ -Maccel:	0.000
Streight reduction factor		Msf:	0.000	Σ -Msf:	1.626
Time		Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time		Increment:	0.000	End time:	0.000

Figure 4.36 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 8 colonnes de 12m de longueur**

- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 4.37.

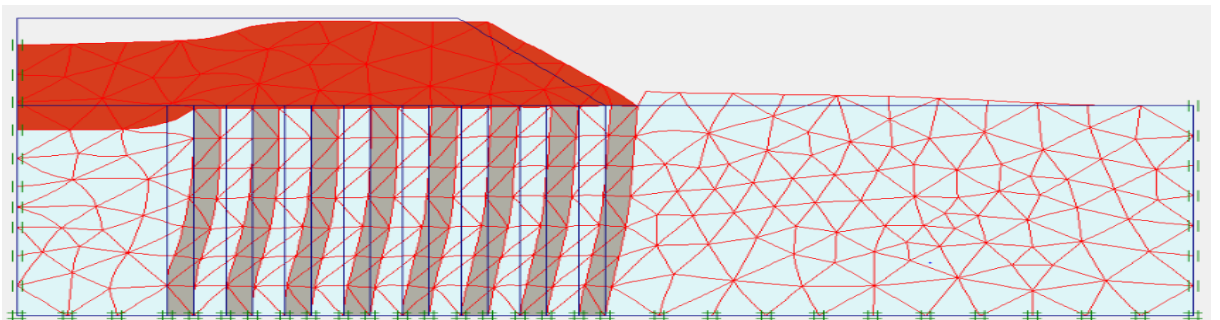


Figure 4.37 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.38.

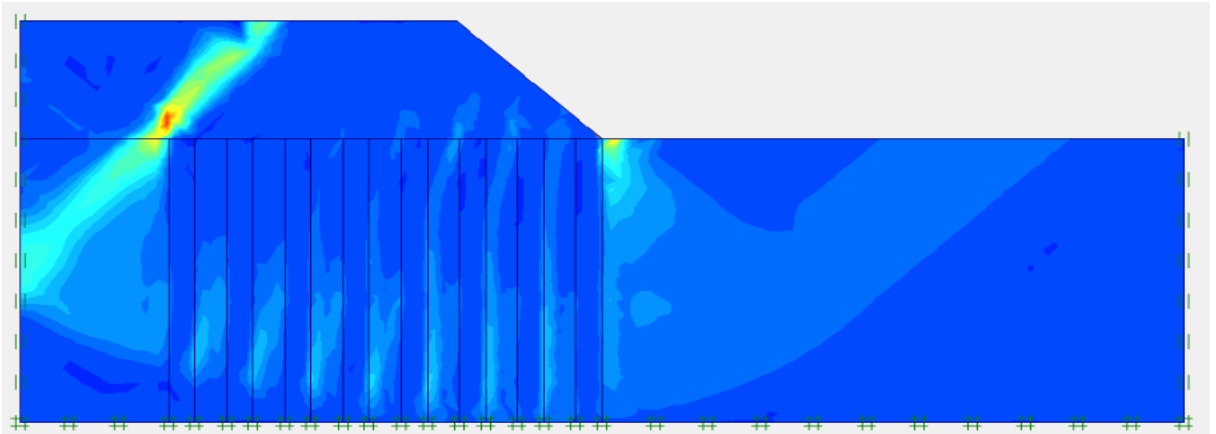


Figure 4.38 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur est égalé à 2.201 et il est présenté dans la figure 4.39.

Calculation information			
Multipliers Additional Info Step Info			
Step Info			
Step	108 of 108	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel: 0,000
Strenght reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf: 2,201
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time: 0,000

Figure 4.39 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 8 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 4.40 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 45° renforcé par 8 colonnes.

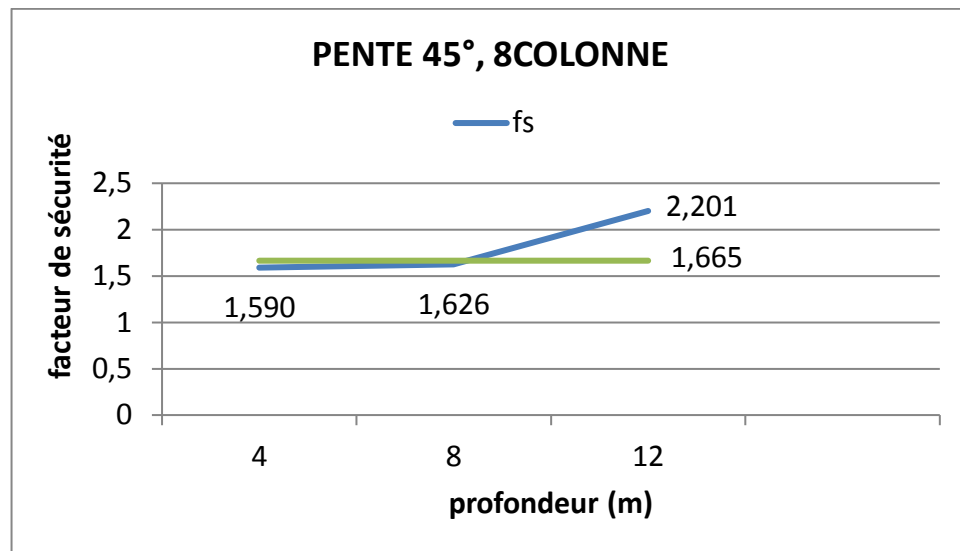


Figure 4.40 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 45°.

5) Amélioration avec 10 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 10 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 10 colonnes de 4m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 5.41.

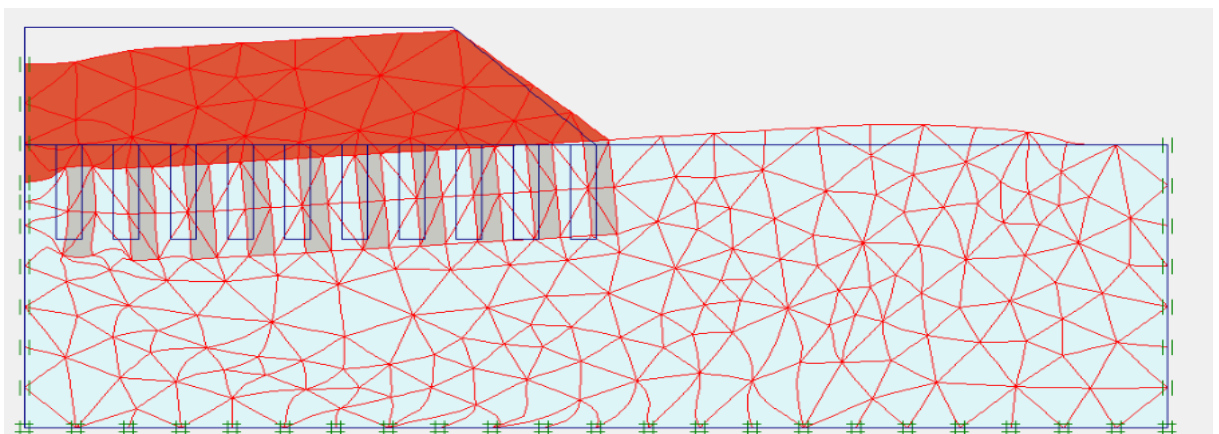


Figure 5.41 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 5.42.

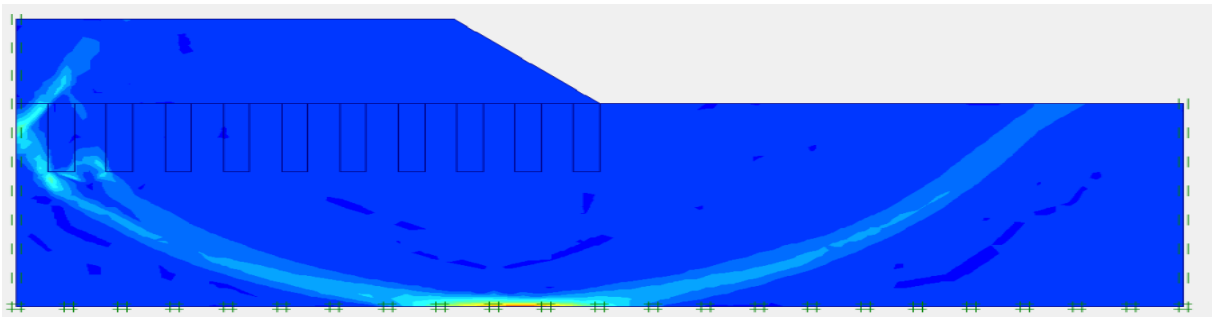


Figure 5.42 : cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.705 et il est présenté dans la figure 5.43.

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		107 of 107	Extrapolation factor	2,000	
Step		PLASTIC STEP	Relative stiffness	0,000	
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000	
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000	
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000	
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000	
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000	
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,705	
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	

Figure 5.43 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 10 colonnes de 8m de longueur**

- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 5.44.

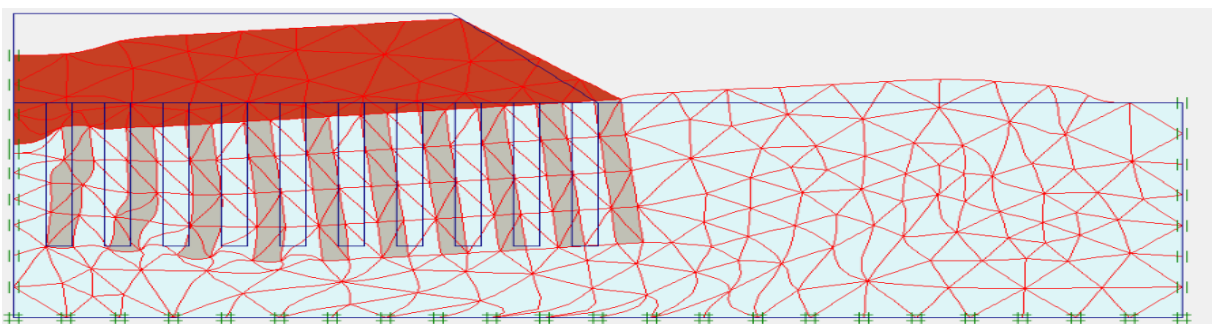


Figure 5.44 : Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 5.45.

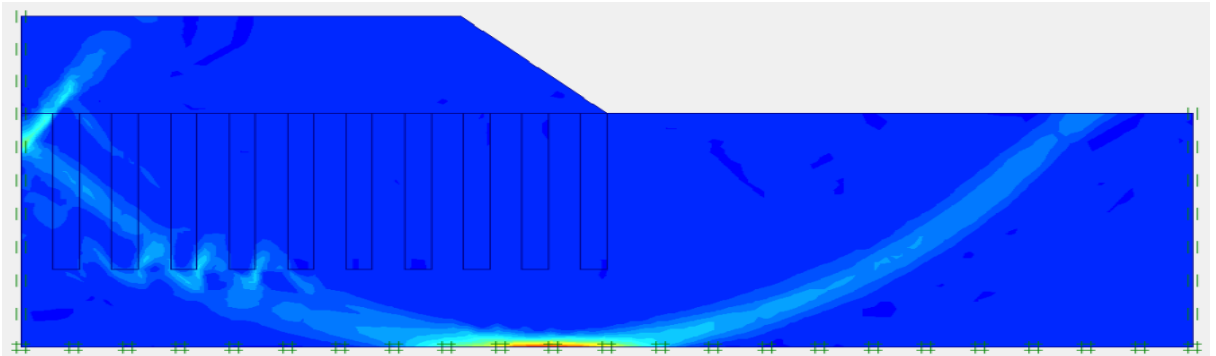


Figure 5.45 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur est égalé à 2.031 et il est présenté dans la figure 5.46.

Calculation information			
Multipliers		Additional Info	
Step Info			
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel: 0,000
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf: 2,031
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time: 0,000

Figure 5.46 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 10 colonnes de 12m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 5.47.

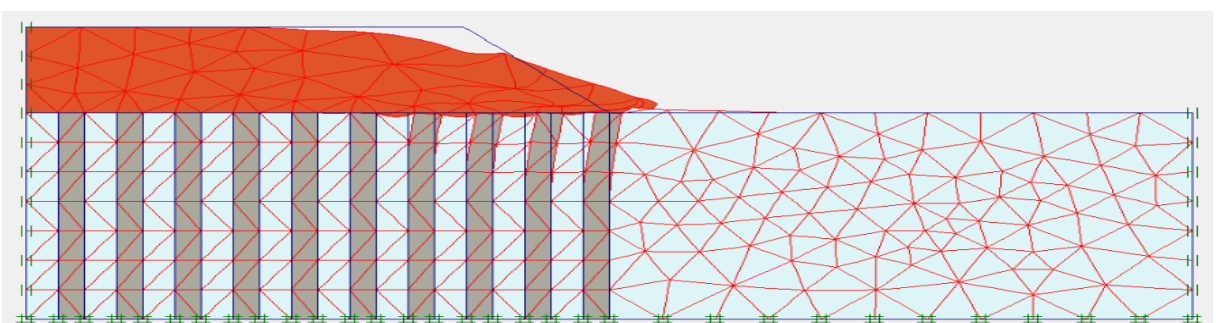


Figure 5.47: Maillage déformé du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement est présenté dans la figure 5.48.

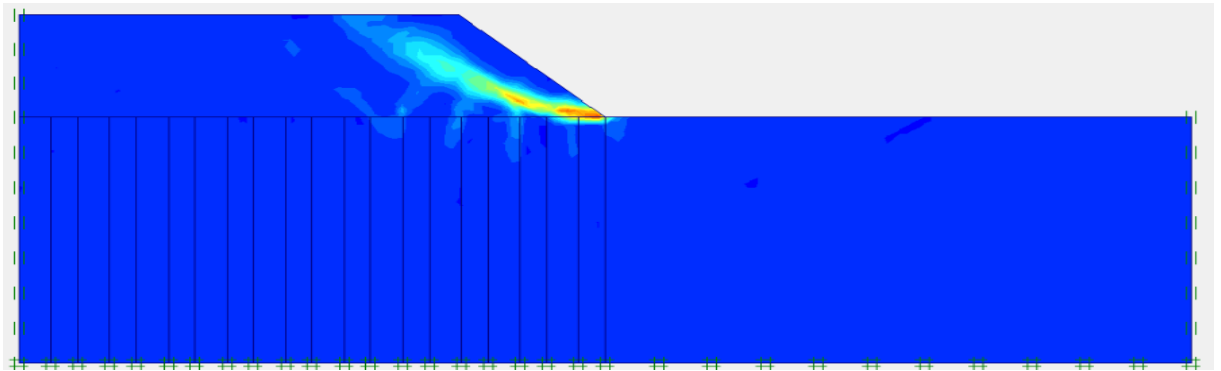


Figure 5.48 : Cercle du glissement du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur est égalé à 2.453 et il est présenté dans la figure 5.49.

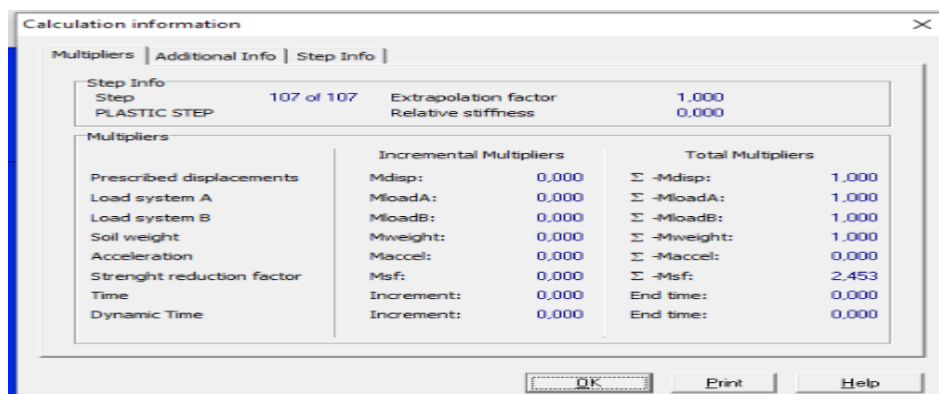


Figure 5.49 : Facteur de sécurité du model pente 45° renforcé par 10 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 5.50 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 45° renforcé par 10 colonnes.

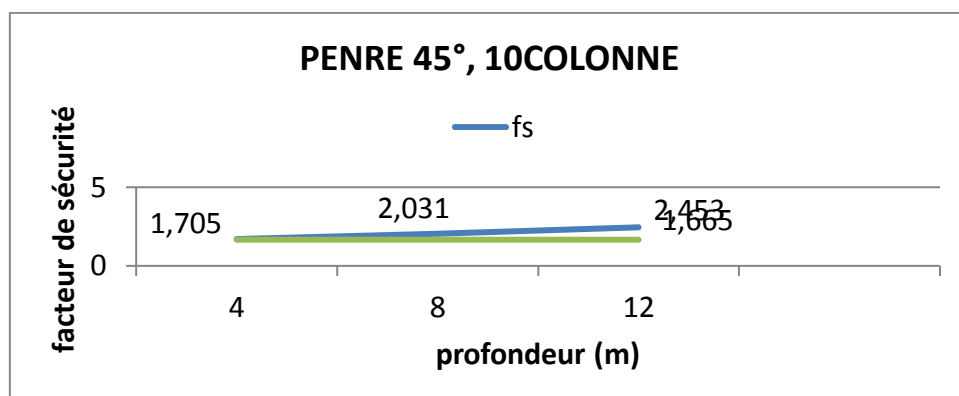


Figure 5.50 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 45°.

II. MODÉLISATION AVEC $sh=2m$, $E_{eq} = 13089,96KN/m^2$ POUR LA PENTE 60° .

1) Amélioration avec 2 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 2 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m) et voir les déformations du maillage et le cercle de glissement et les facteurs de sécurité.

- Amélioration avec 2 colonnes de 4m de longueur
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 1.1.

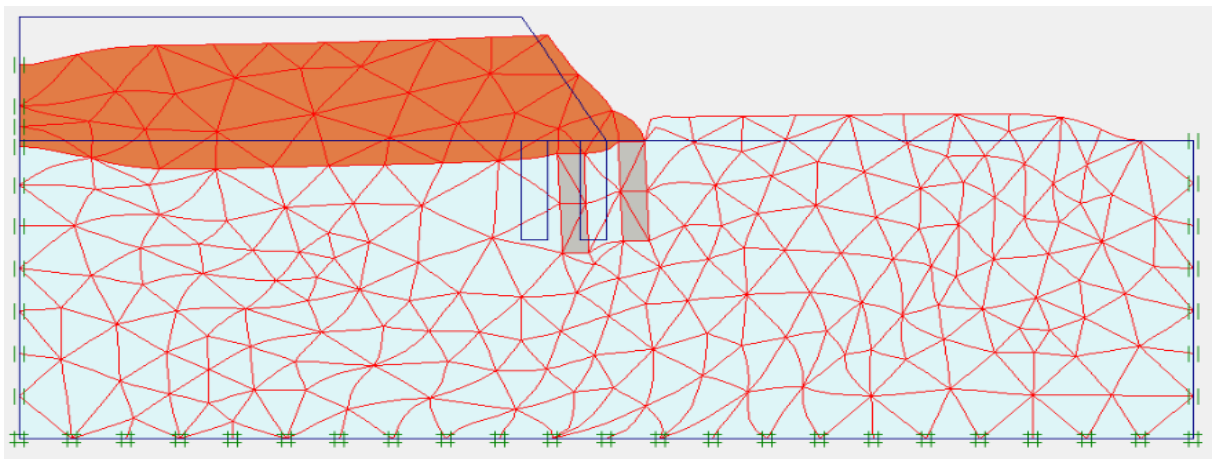


Figure 1.1 : Le maillage déformé du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 1.2.

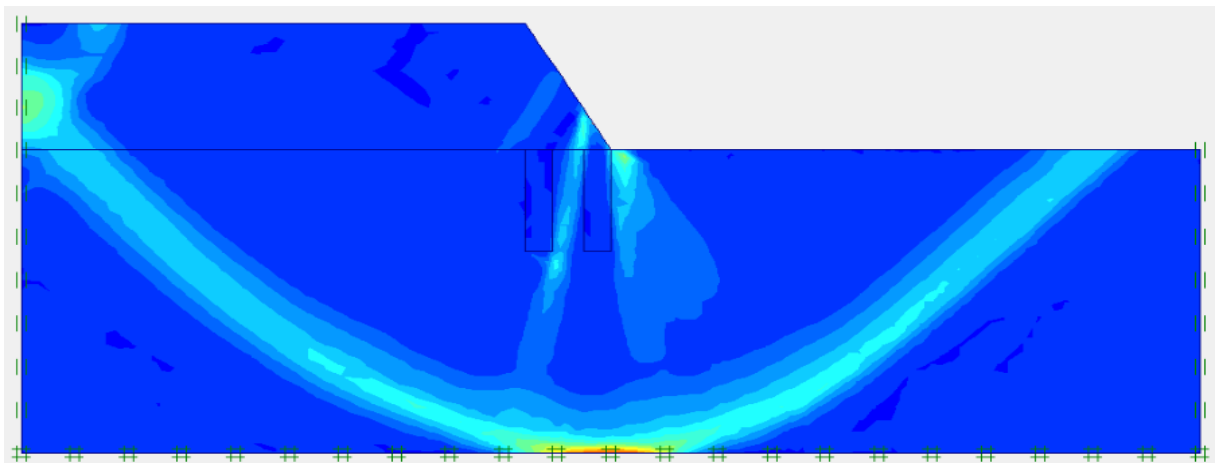
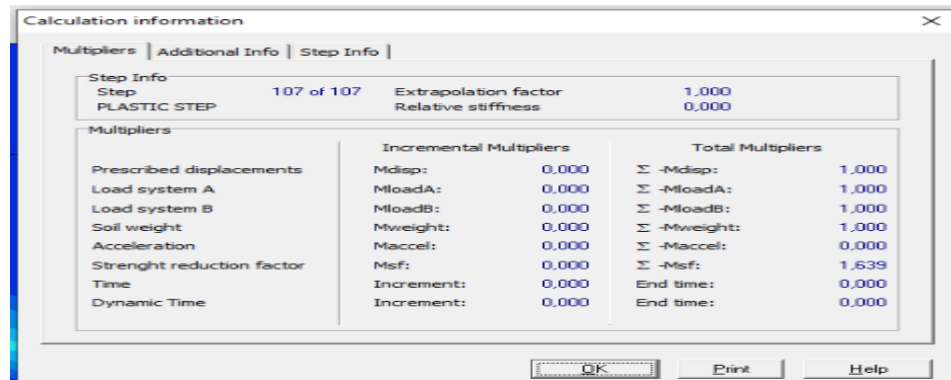


Figure 1.2 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.639 et il est présenté dans la figure 1.3.



Calculation information			
Multipliers		Step Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1.000
Step	PLASTIC STEP	Relative stiffness	0.000
Multipliers		Incremental Multipliers	Total Multipliers
Prescribed displacements		Mdisp: 0.000	Σ -Mdisp: 1.000
Load system A		MloadA: 0.000	Σ -MloadA: 1.000
Load system B		MloadB: 0.000	Σ -MloadB: 1.000
Soil weight		Mweight: 0.000	Σ -Mweight: 1.000
Acceleration		Maccel: 0.000	Σ -Maccel: 0.000
Streight reduction factor		Msf: 0.000	Σ -Msf: 1.639
Time		Increment: 0.000	End time: 0.000
Dynamic Time		Increment: 0.000	End time: 0.000

Figure 1.3 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 2 colonnes de 8m de longueur**
- le maillage déformé du model et dans la figure 1.4.

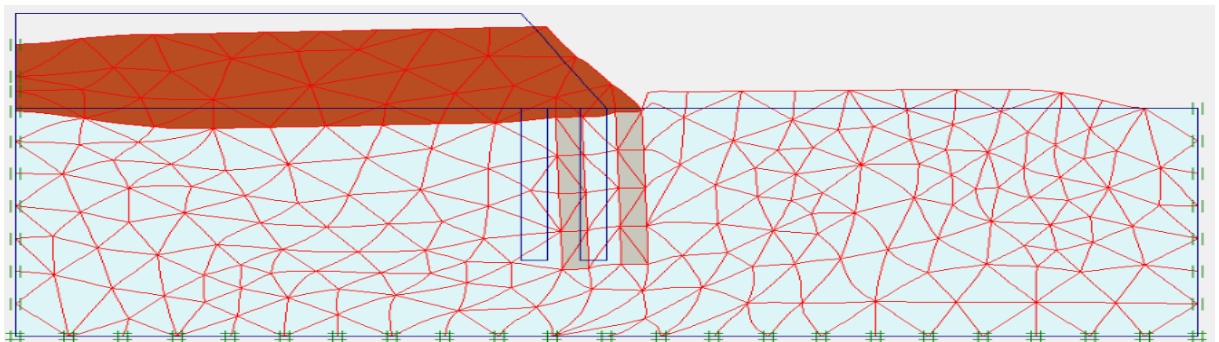


Figure 1.4 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 1.5.

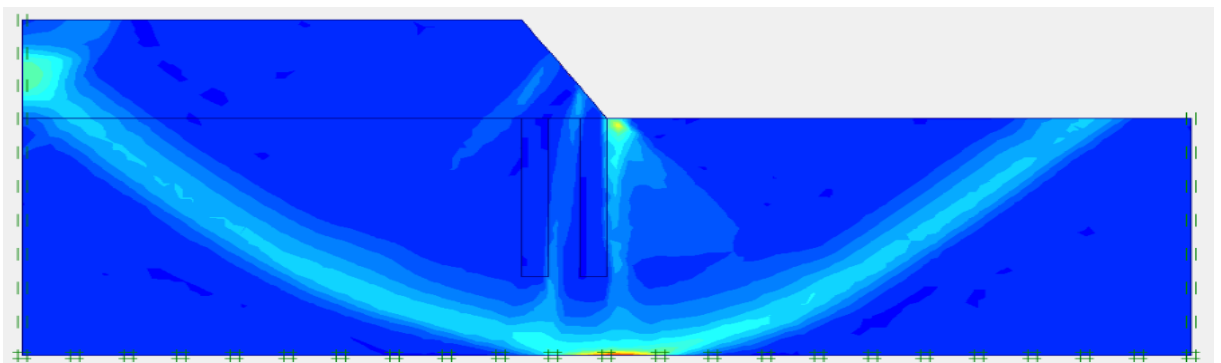
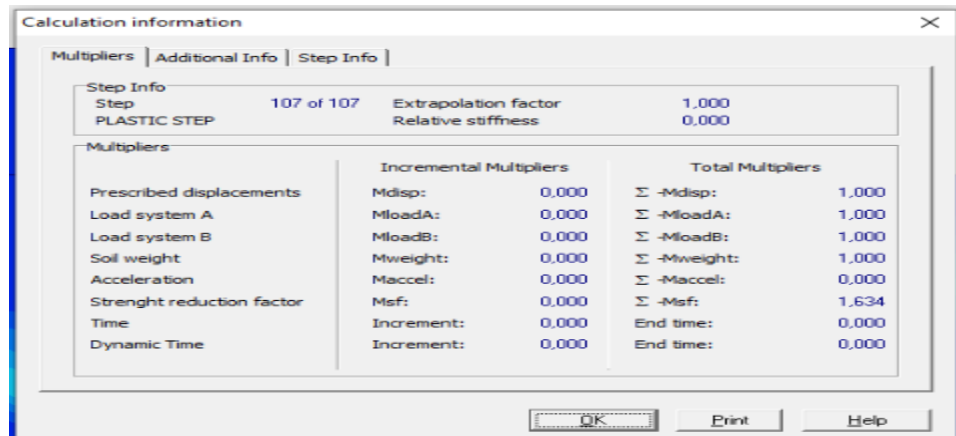


Figure 1.5 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.634 et il est présenté dans la figure 1.6.



Step Info		Step Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers	Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA: 0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB: 0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight: 0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel: 0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strenght reduction factor	Msf: 0,000	Σ -Msf:	1,634
Time	Increment: 0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment: 0,000	End time:	0,000

Figure 1.6 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 2 colonnes de 12m de longueur**
- le maillage déformé du model et dans la figure 1.7.

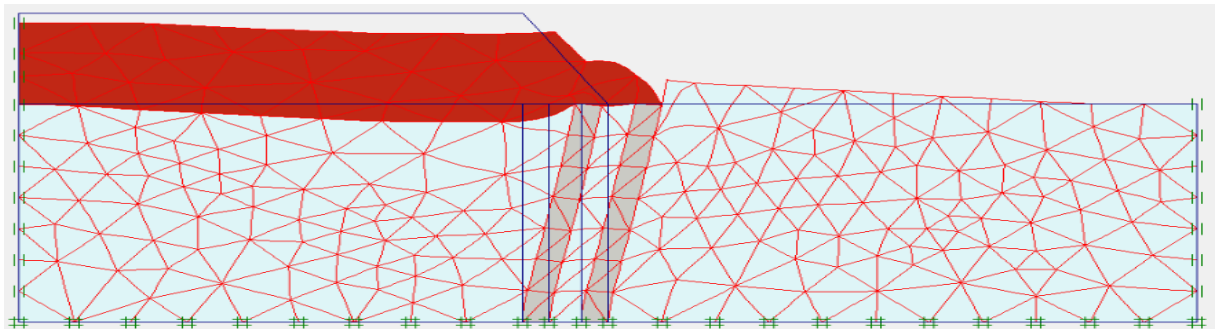


Figure 1.7 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 1.8.

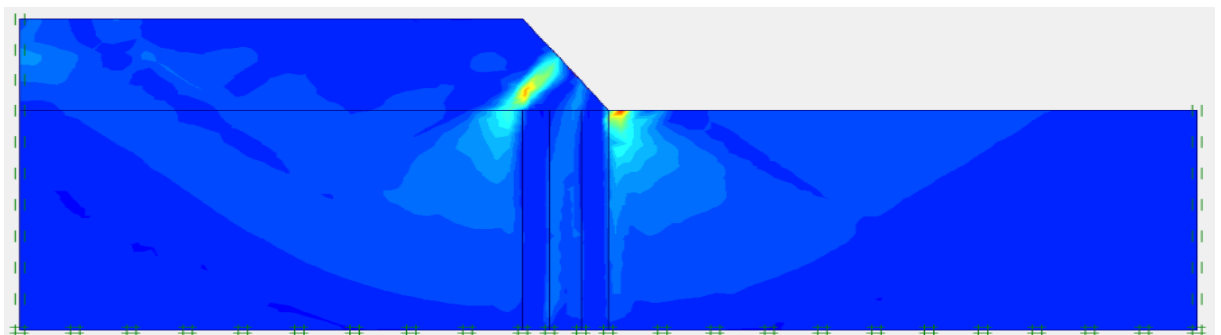


Figure 1.8 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.707 et il est présenté dans la figure 1.9.

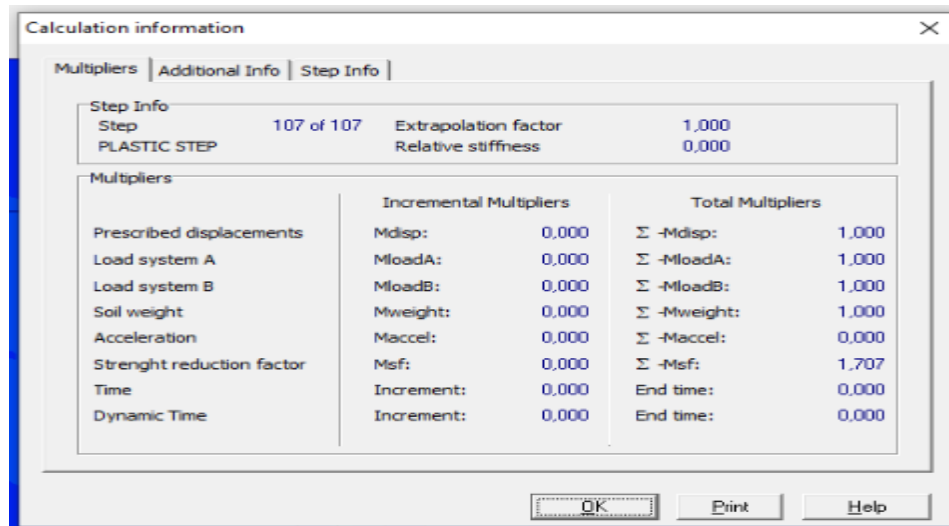


Figure 1.9 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 2 colonnes de 12m de longueur.

- La figure 1.10 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 60° renforcé par 2 colonnes.

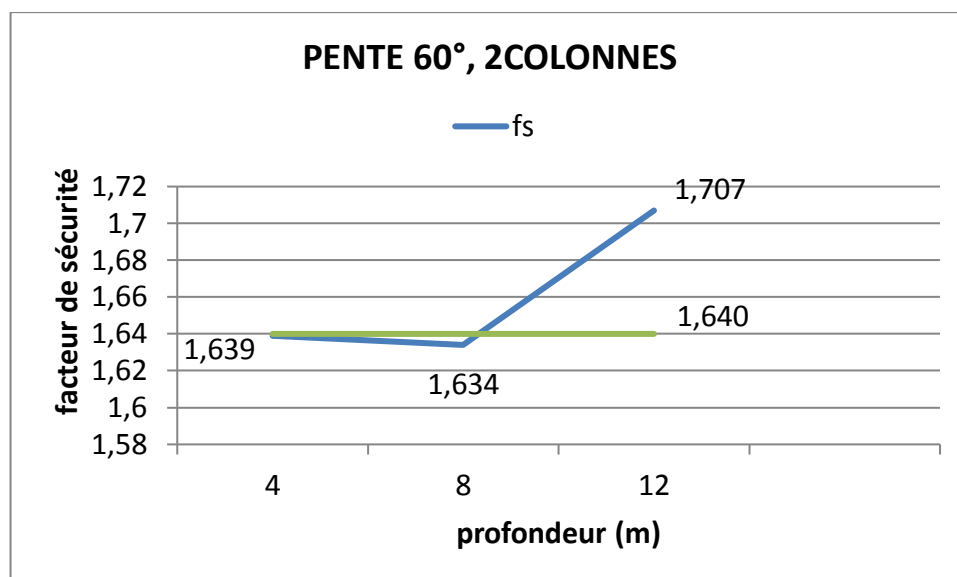


Figure 1.10 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 60°.

2) Amélioration avec 4 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 4 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

➤ Amélioration avec 4 colonnes de 4m de longueur

➤ Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 2.11.

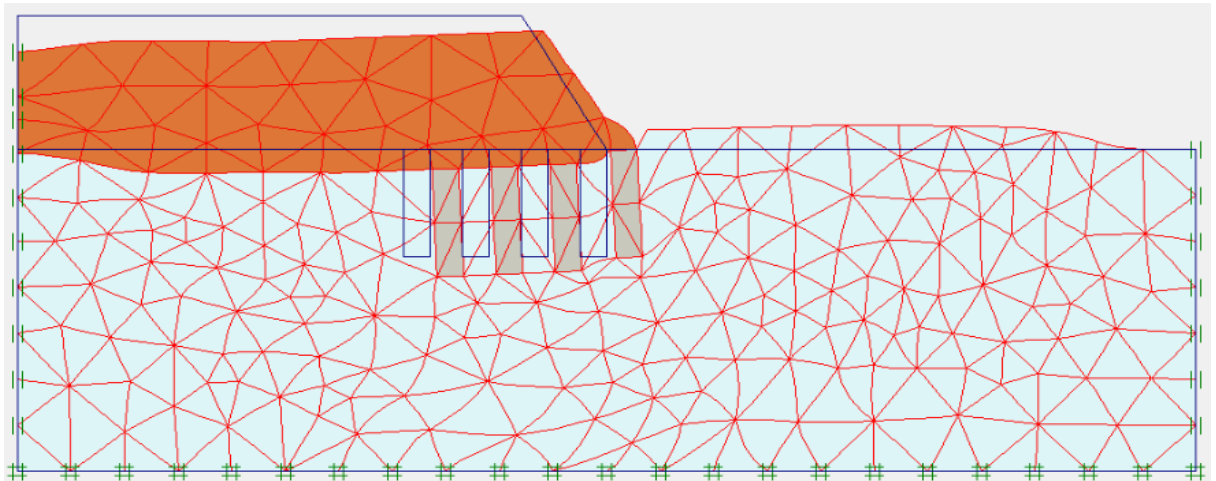


Figure 2.11 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

➤ Le cercle de glissement et présenté dans la figure 2.12.

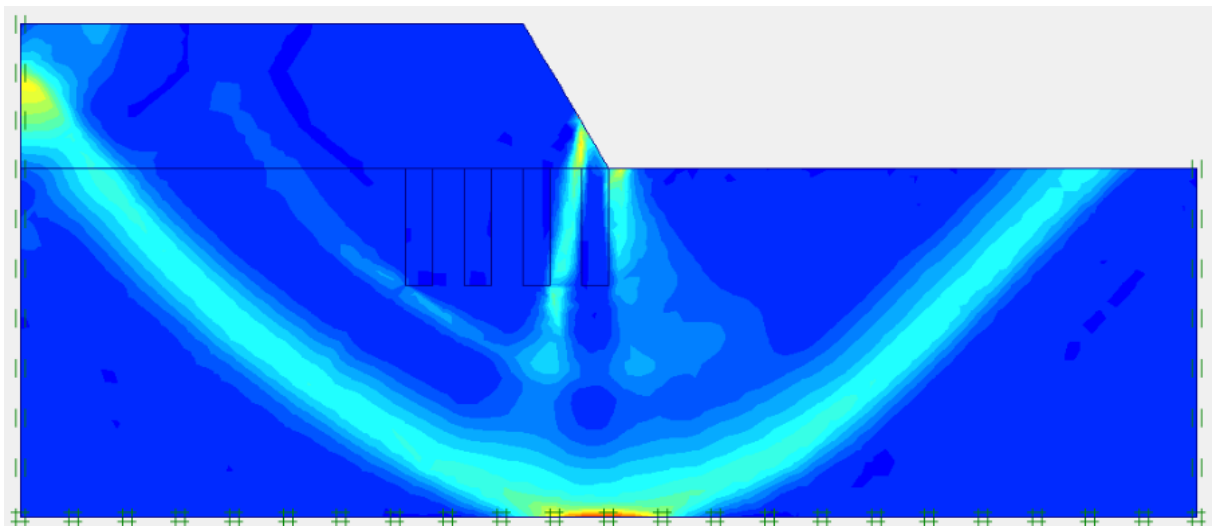
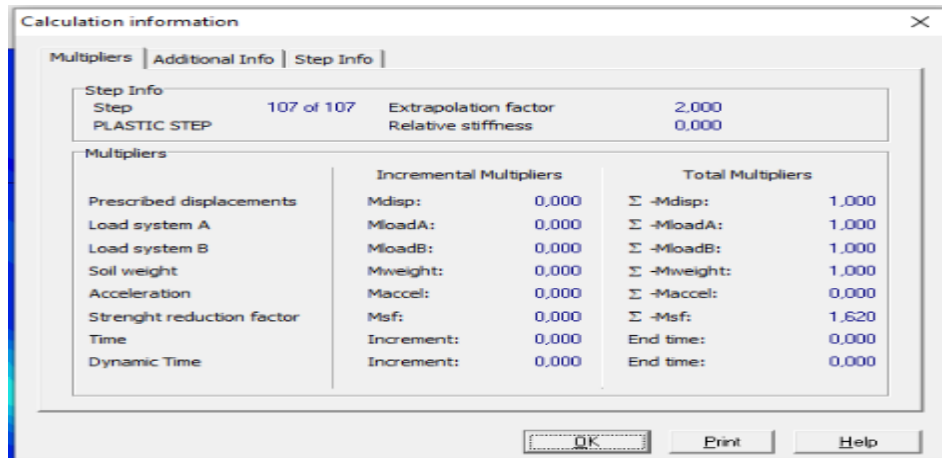


Figure 2.12 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.620 et il est présenté dans la figure 2.13.



Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step	107 of 107	Extrapolation factor	2.000
PLASTIC STEP				Relative stiffness	0.000
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements		Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A		MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B		MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight		Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration		Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strenght reduction factor		Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,620
Time		Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic Time		Increment:	0,000	End time:	0,000

Figure 2.13 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 4 colonnes de 8m de profondeur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 2.14.

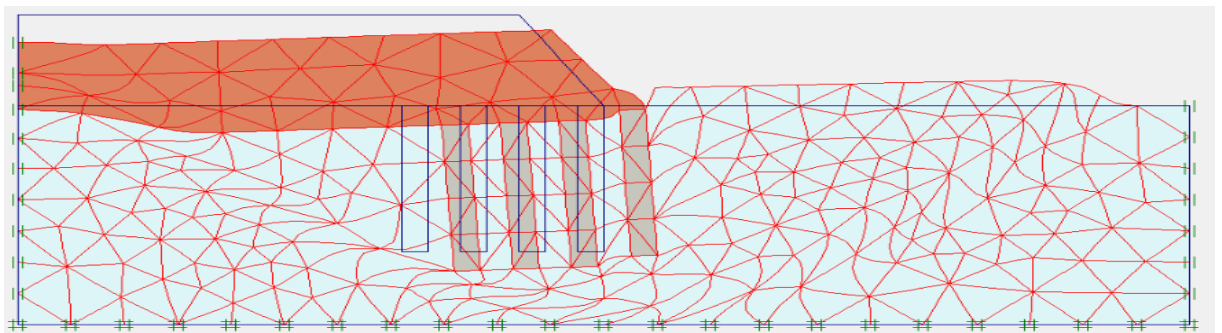


Figure 2.14 : maillage déformé du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 2.15.

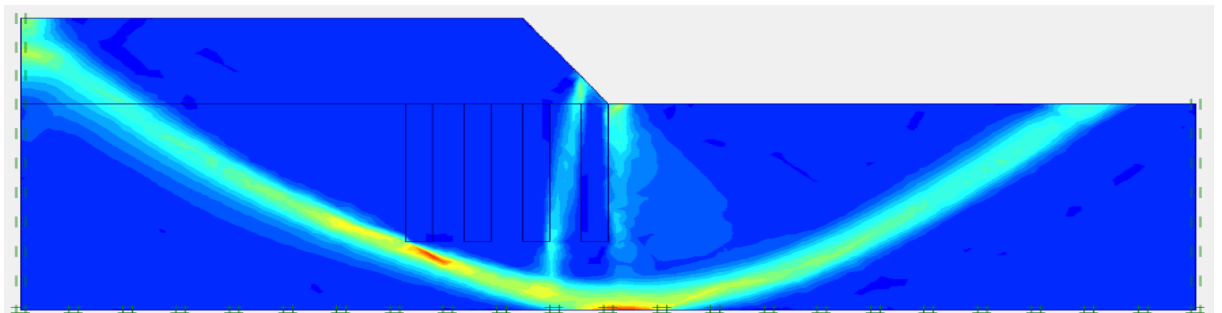
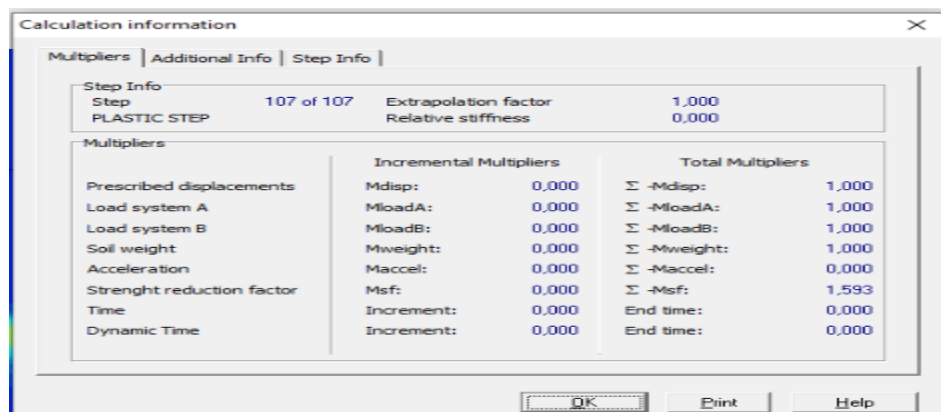


Figure 2.15 : cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.593 et il est présenté dans la figure 2.16.



Calculation information			
Step Info		Step Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel: 0,000
Streight reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf: 1,593
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time: 0,000

Figure 2.16 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 4 colonnes de 12m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 2.17.

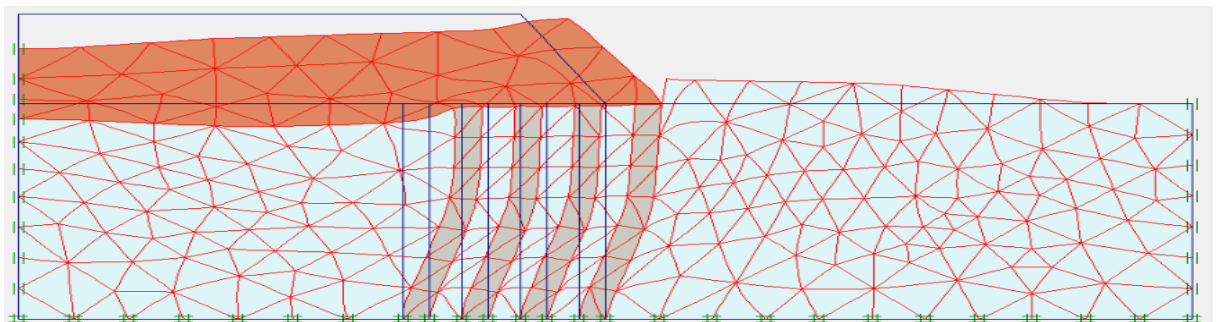


Figure 2.17 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 2.18.

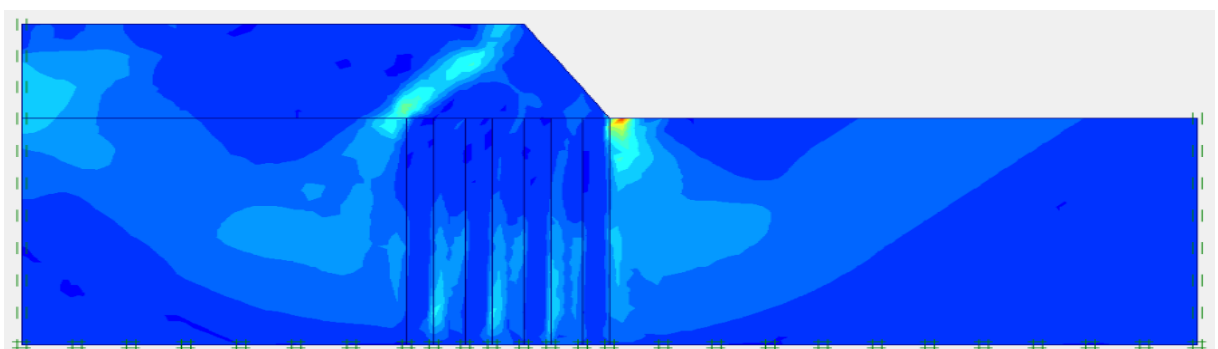


Figure C-18 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 4 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.854 et il est présenté dans la figure 2.19.

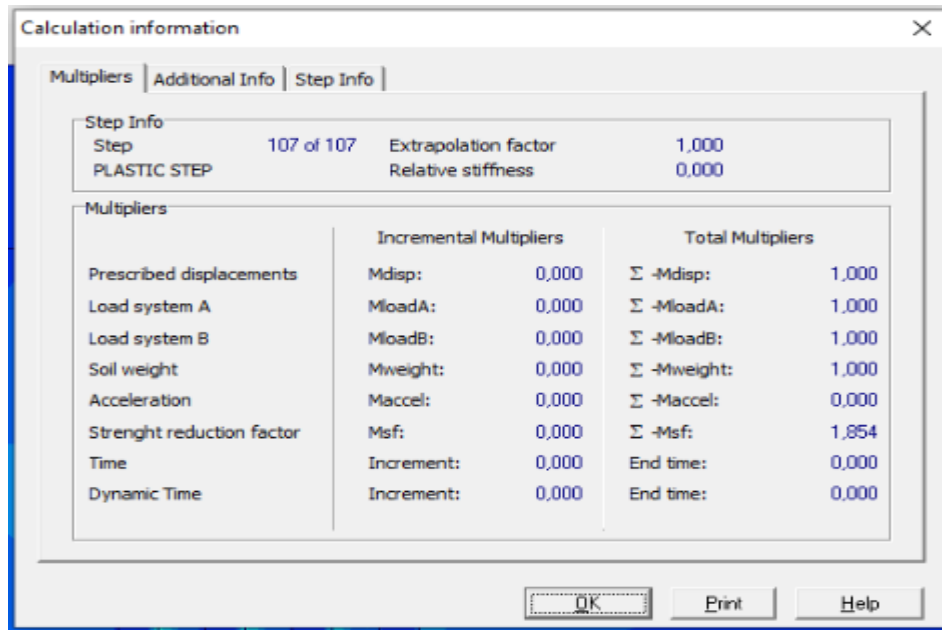


Figure 2.19 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 2.20 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 60° renforcé par 4 colonnes.

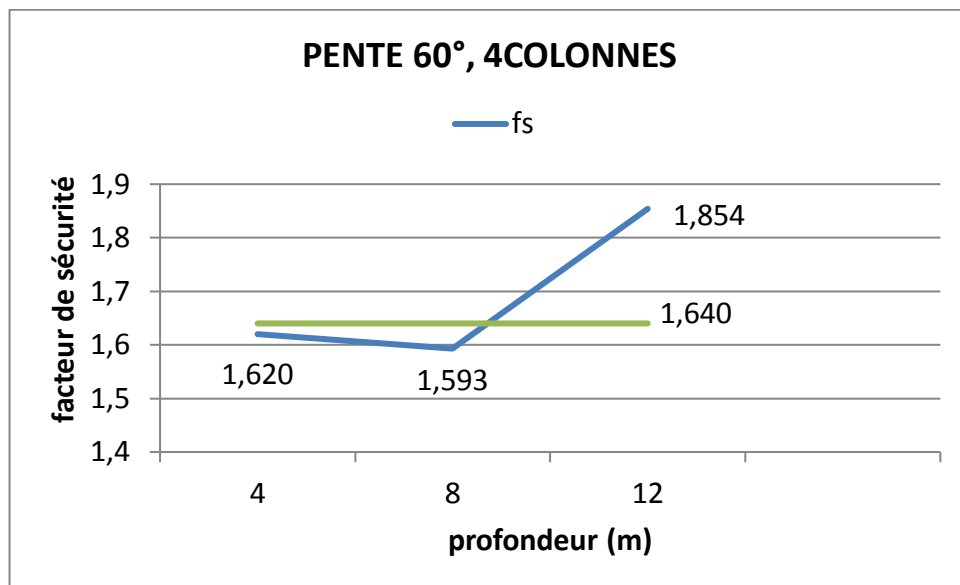


Figure 2.20 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 60°.

3) Amélioration avec 6 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 6 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 6 colonnes de 4m de profondeur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 3.21.

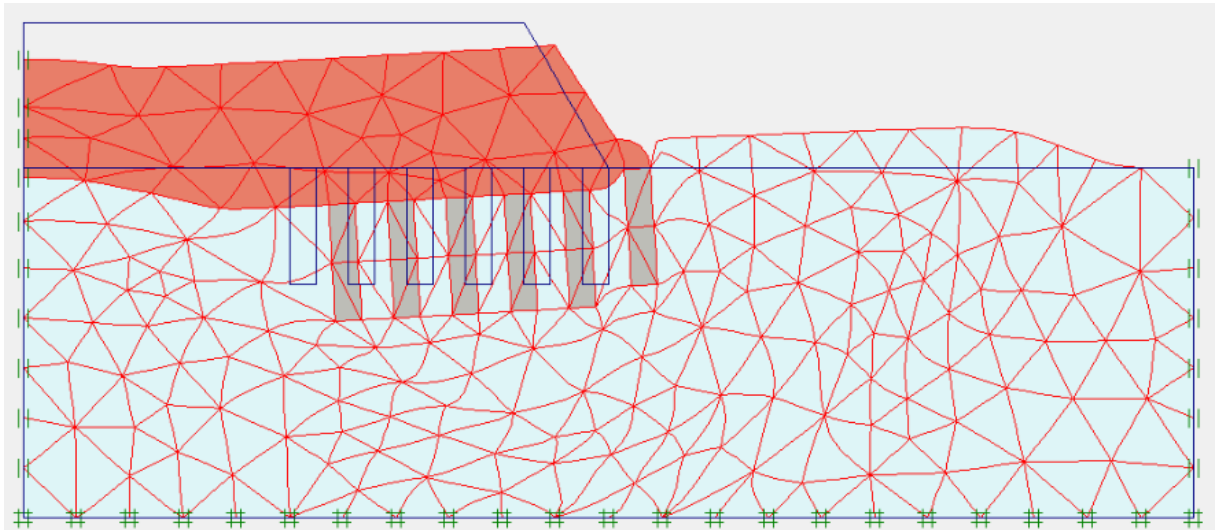


Figure C-21 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 3.22.

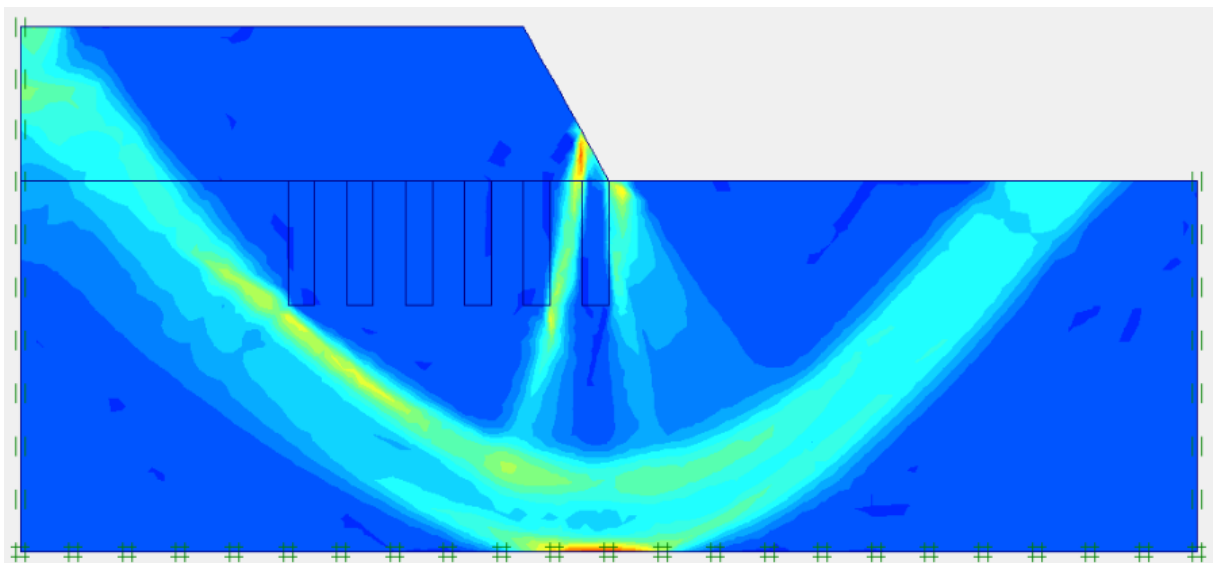


Figure 3.22 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.592 et il est présenté dans la figure 3.23.

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP				Relative stiffness	0,000
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements		Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A		MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B		MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight		Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration		Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Streight reduction factor		Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,592
Time		Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic Time		Increment:	0,000	End time:	0,000

Figure 3.23 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 4 m de longueur.

- **Amélioration avec 6 colonnes de 8m de longueur**

- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 3.24.

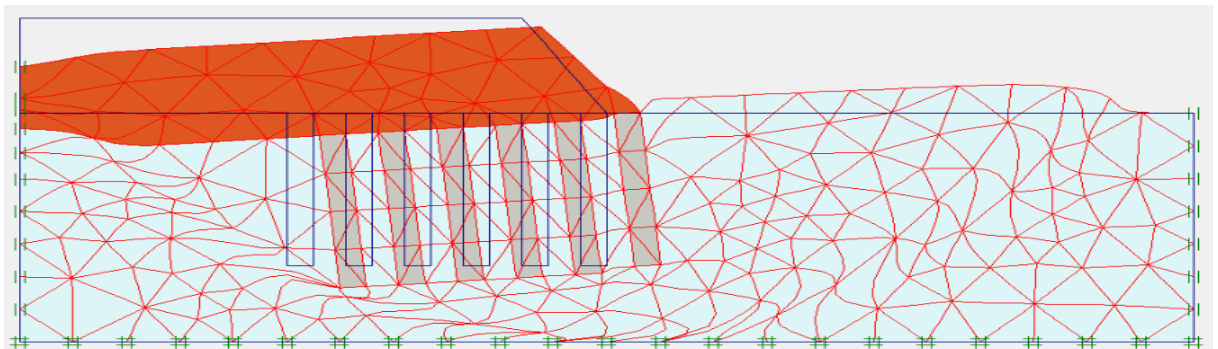


Figure 3.24 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 3.25.

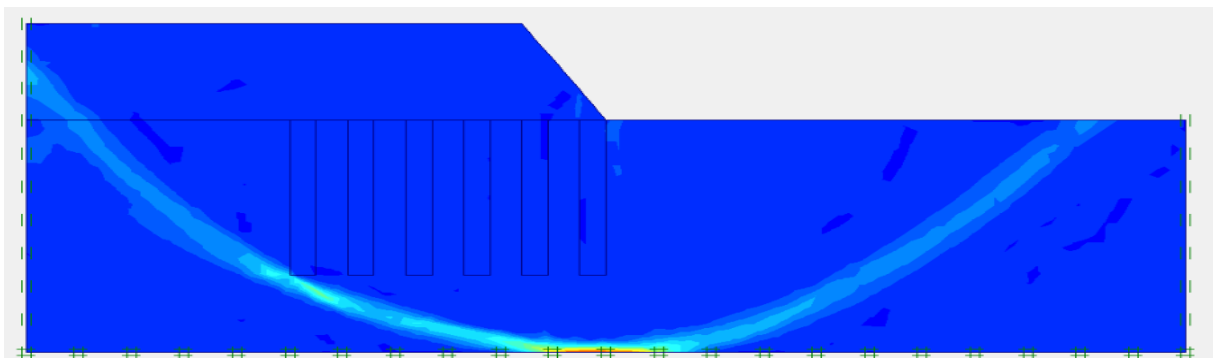


Figure 3.25 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.554 et il est présenté dans la figure 3.26.

The screenshot shows a 'Calculation information' dialog box with the following data:

Multipliers Additional Info Step Info			
Step Info		Extrapolation factor	1,000
Step	107 of 107	Relative stiffness	0,000
PLASTIC STEP			
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel: 0,000
Strenght reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf: 1,554
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time: 0,000

Figure 3.26 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 6 colonnes de 12m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 3.27.

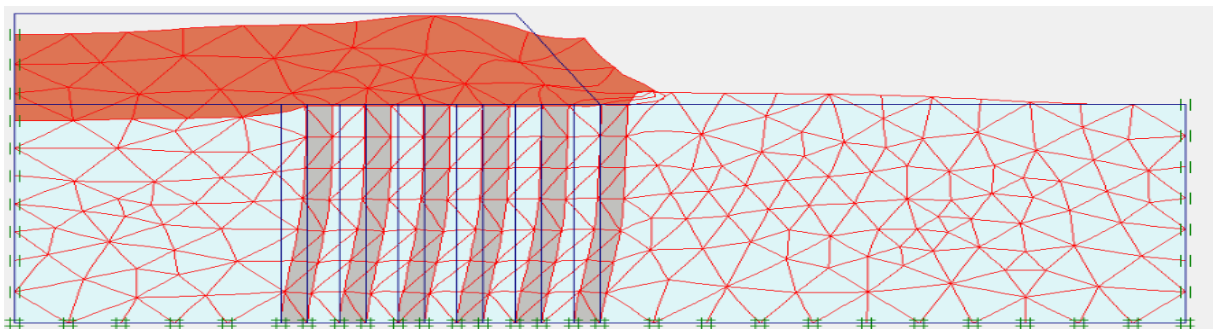


Figure 3.27 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 3.28.

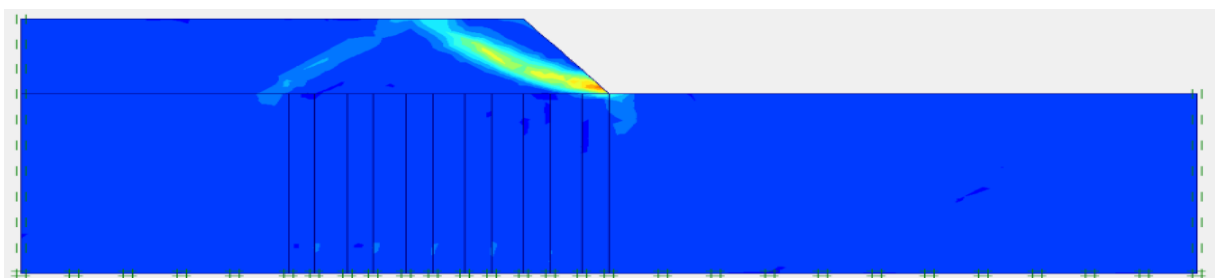


Figure 3.28 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 6 colonnes de 12m de longueur est égal à 1.981 et il est présenté dans la figure 3.29.

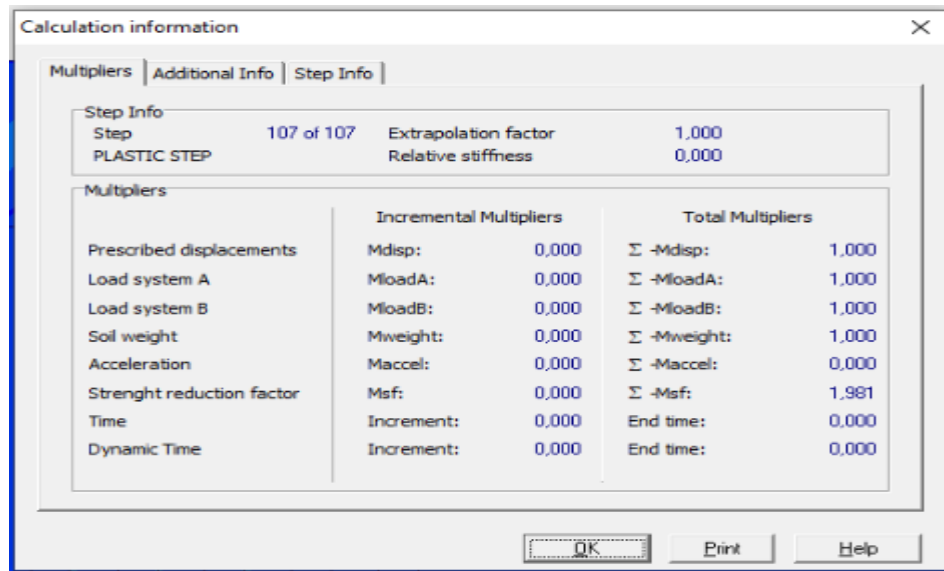


Figure 3.29 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 4 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 3.30 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 60° renforcé par 6 colonnes.

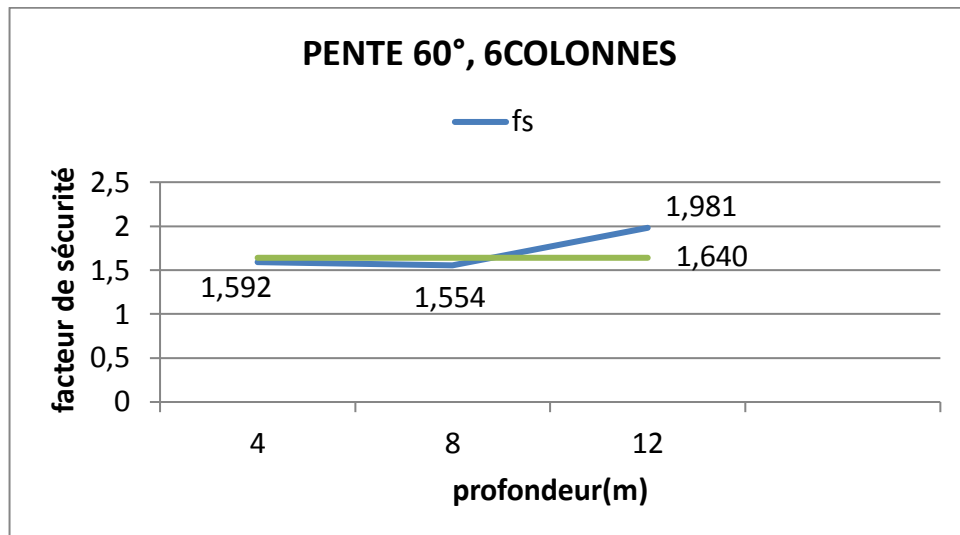


Figure 3.30 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 60°.

4) Amélioration avec 8 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 8 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 8 colonnes de 4m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 4.31.

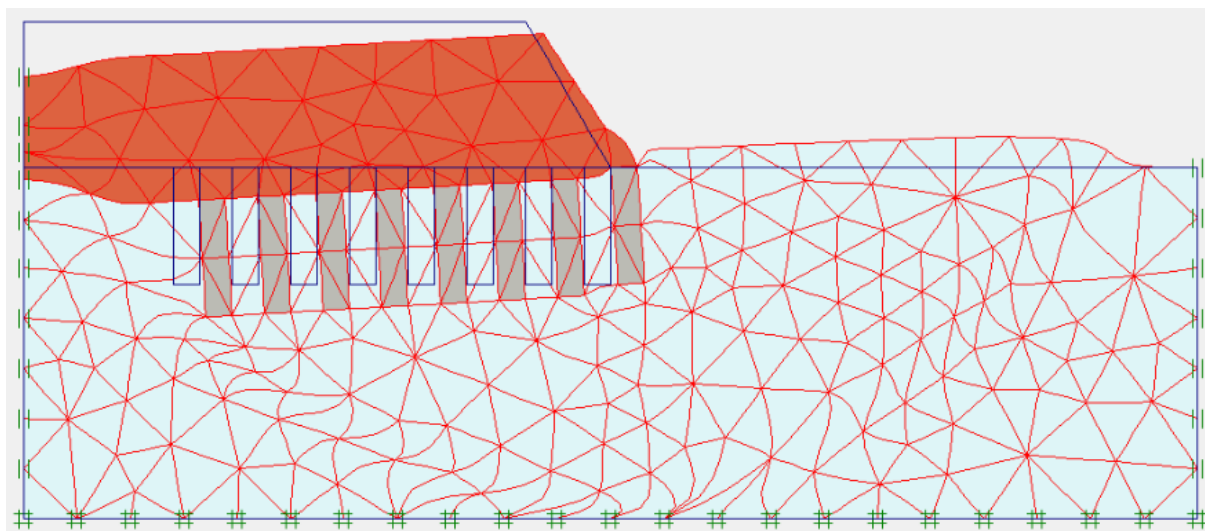


Figure 4.31 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.32.

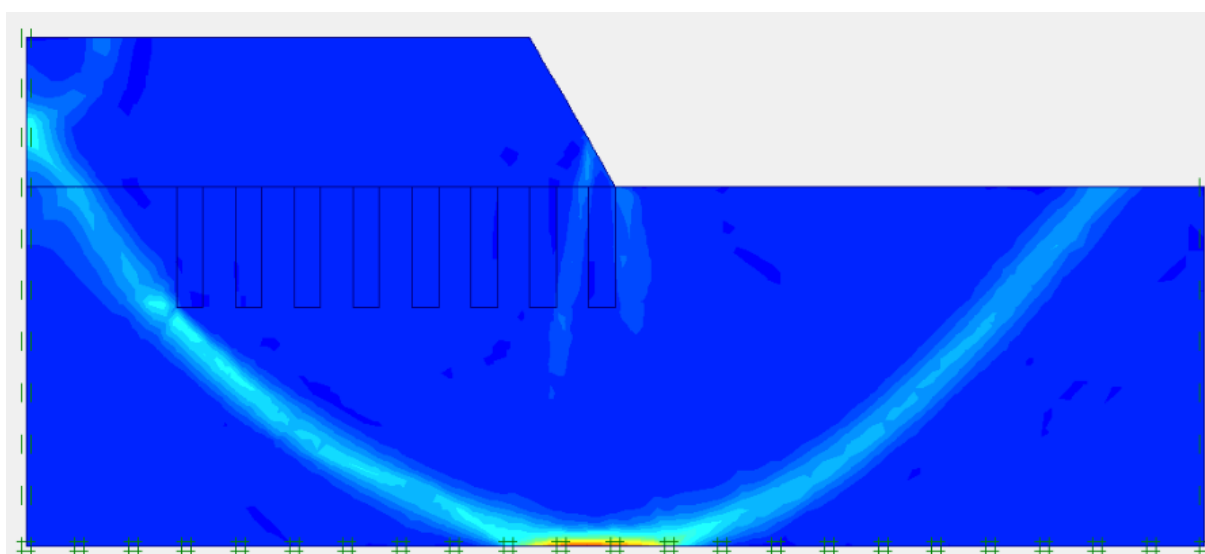
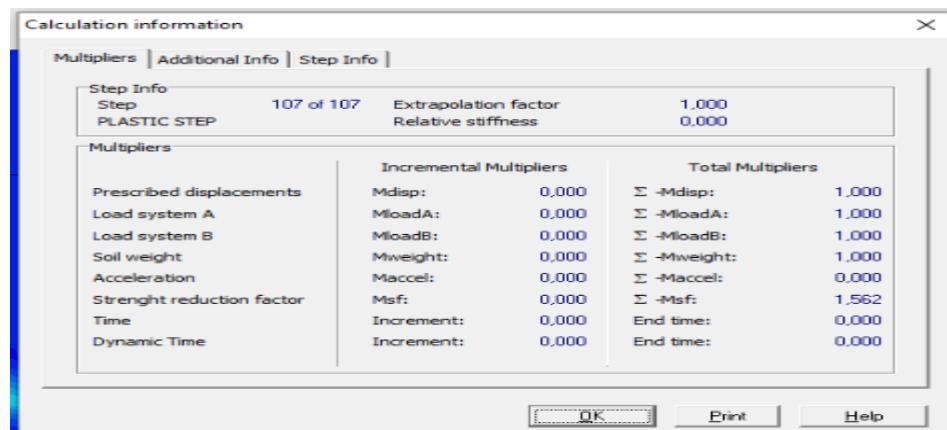


Figure 4.32 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.562 et il est présenté dans la figure 4.33.



Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step	107 of 107	Extrapolation factor	1.000
PLASTIC STEP				Relative stiffness	0.000
Multipliers		Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements		Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A		MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B		MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight		Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration		Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Streight reduction factor		Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,562
Time		Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic Time		Increment:	0,000	End time:	0,000

Figure 4.33 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 4m de longueur.

➤ Amélioration avec 8 colonnes de 8m de longueur

- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 4.34.

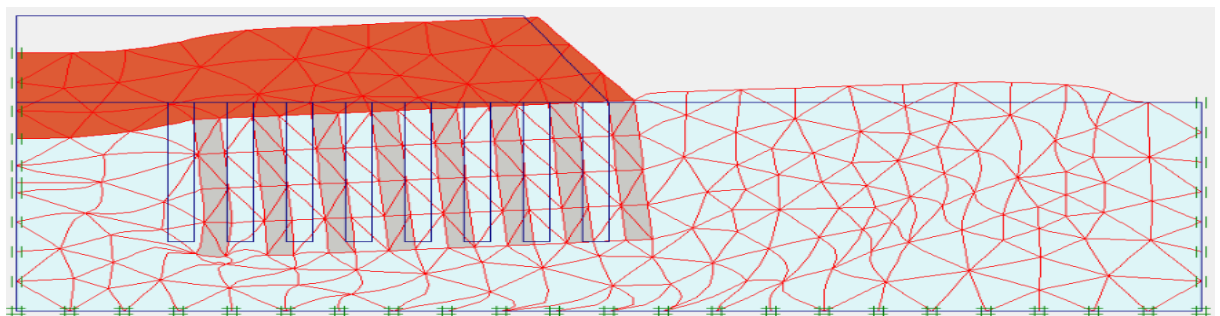


Figure 4.34 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.35.

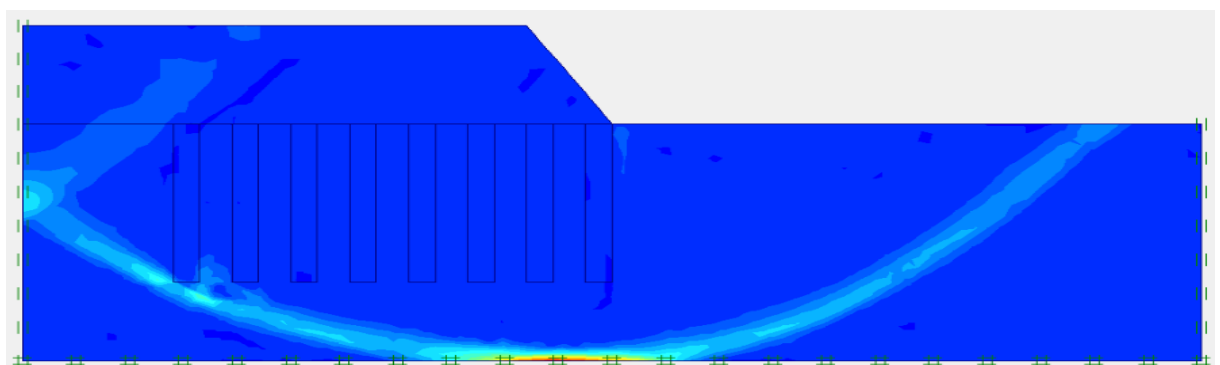
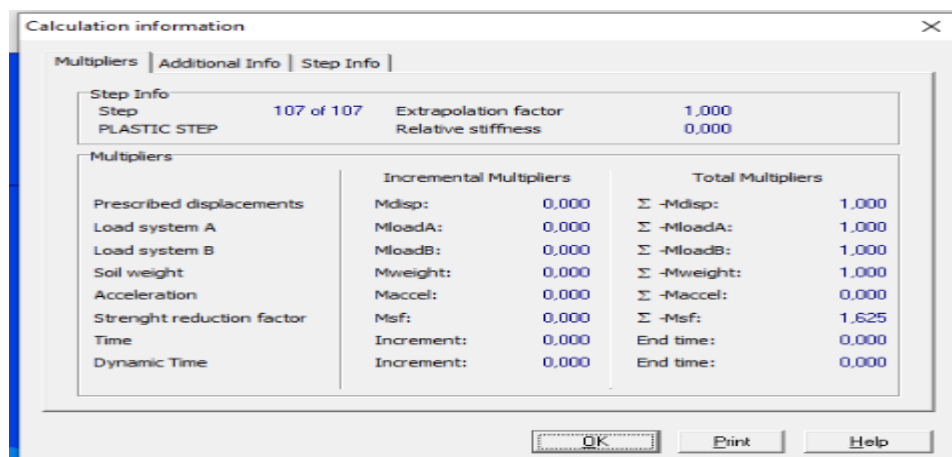


Figure 4.35 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur est égalé à 1.625 et il est présenté dans la figure 4.36.



Calculation information			
Step Info		Additional Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers	Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA: 0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB: 0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight: 0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel: 0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf: 0,000	Σ -Msf:	1,625
Time	Increment: 0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment: 0,000	End time:	0,000

Figure 4.36 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 8 colonnes de 12m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 4.37.

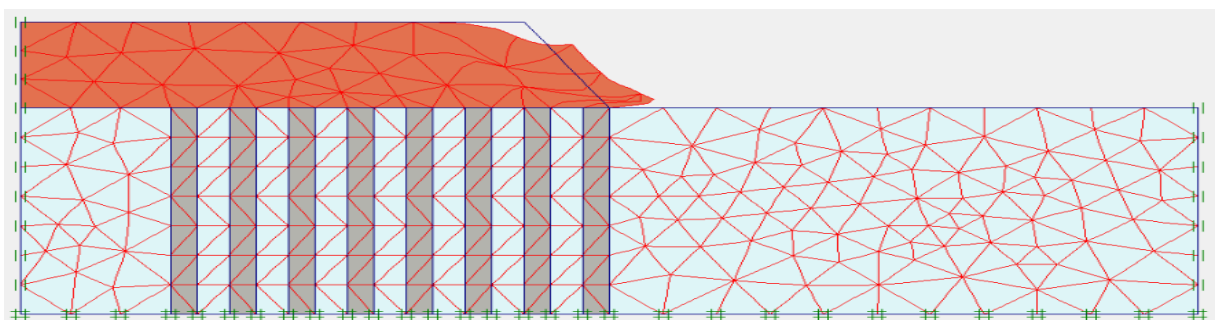


Figure 4.37 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 4.38.

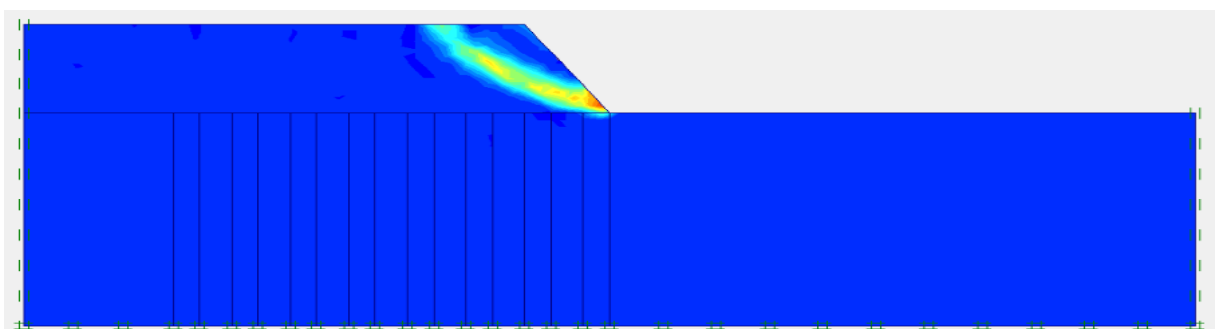


Figure 4.38 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 8 colonnes de 12m de longueur est égal à 1.918 et il est présenté dans la figure 4.39.

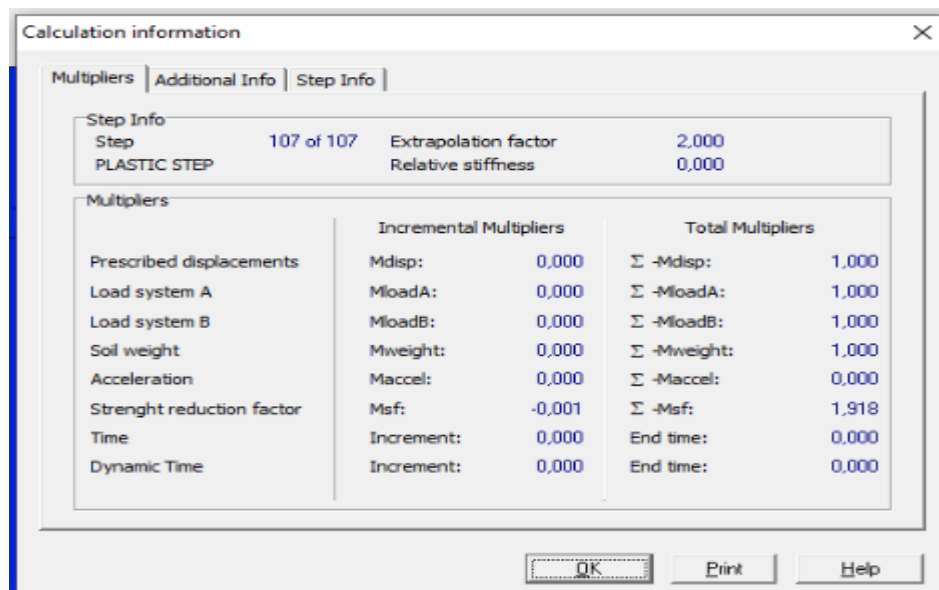


Figure 4.39 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 8 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 4.40 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 60° renforcé par 8 colonnes.

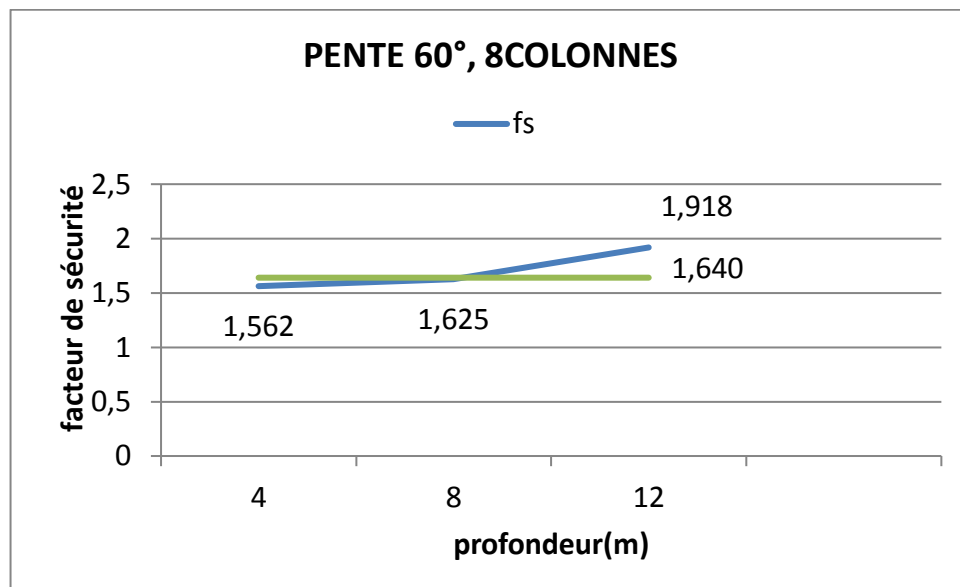


Figure 4.40 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 60°.

5) Amélioration avec 10 colonnes

On modélise le remblai sur sol mou renforcé par 10 colonnes en DM on variant les longueurs (4m ; 8 m ; 12m).

- **Amélioration avec 10 colonnes de 4m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 5.41.

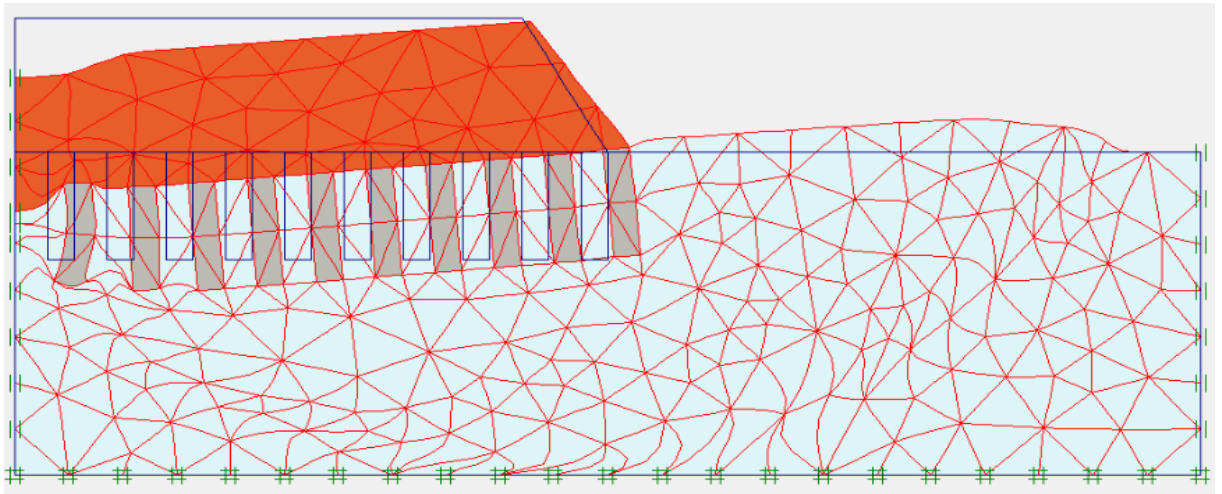


Figure 5.41 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 5.42.

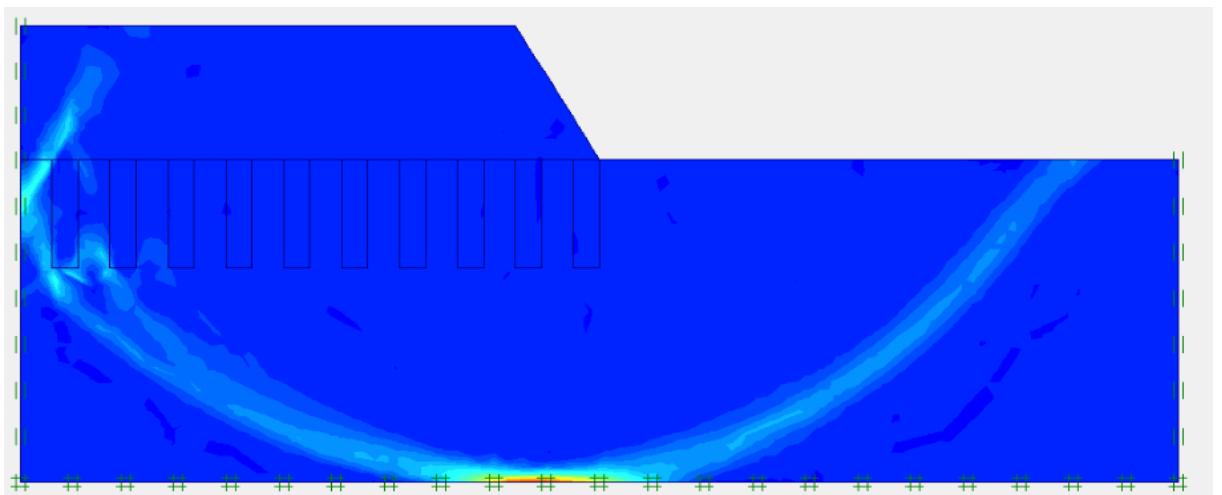
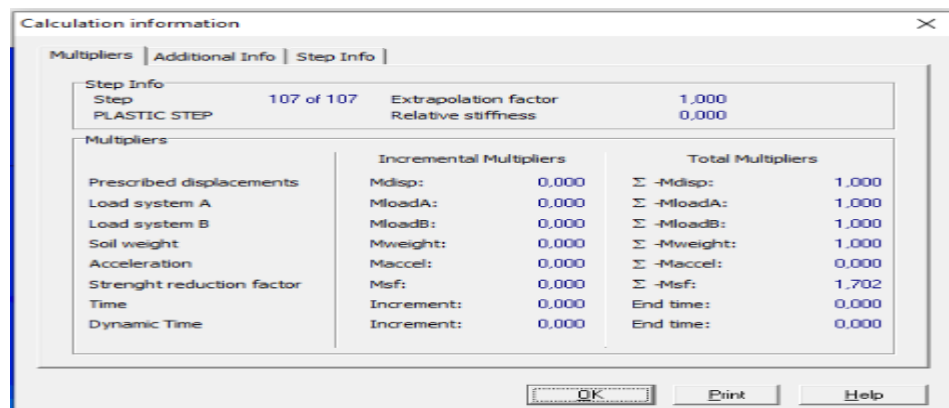


Figure 5.42 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur est égalé à 1.702 et il est présenté dans la figure 5.43.



Calculation information			
Step Info		Step Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	1,000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental Multipliers	Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA: 0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB: 0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight: 0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel: 0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf: 0,000	Σ -Msf:	1,702
Time	Increment: 0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment: 0,000	End time:	0,000

Figure 5.43 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 4m de longueur.

- **Amélioration avec 10 colonnes de 8m de longueur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 5.44.

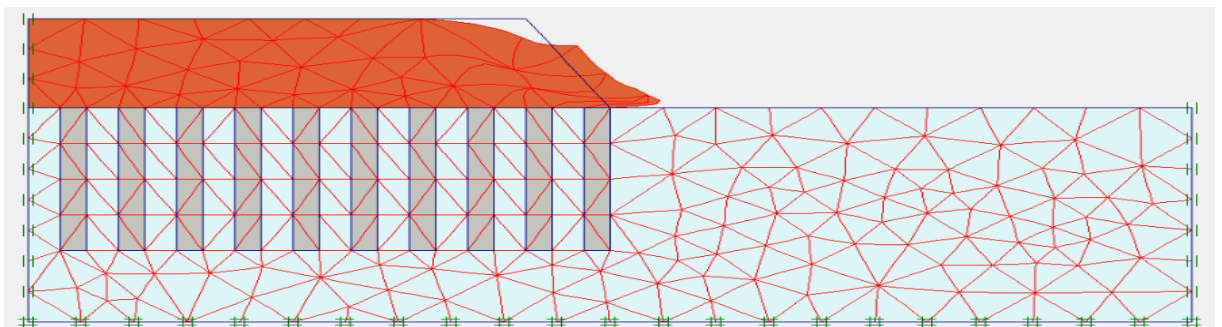


Figure 5.44 : Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 5.45.

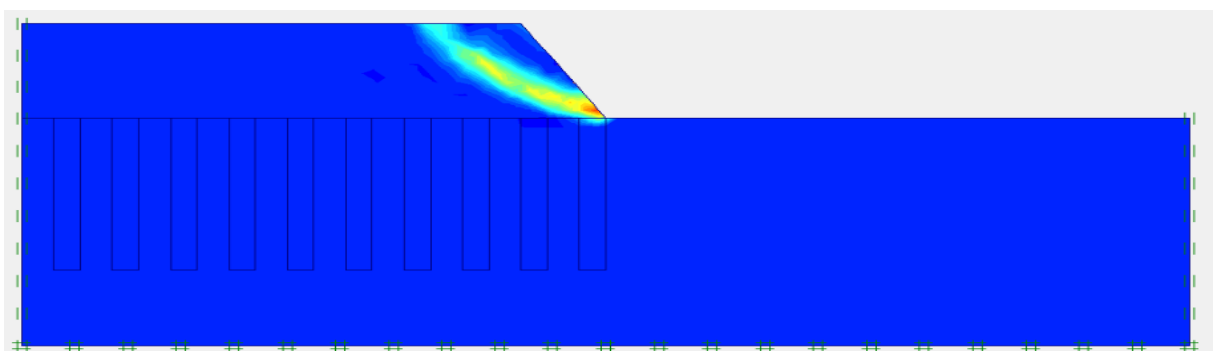


Figure 5.45 : cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 8m de profondeur est égalé à 1.940 et il est présenté dans la figure 5.46.

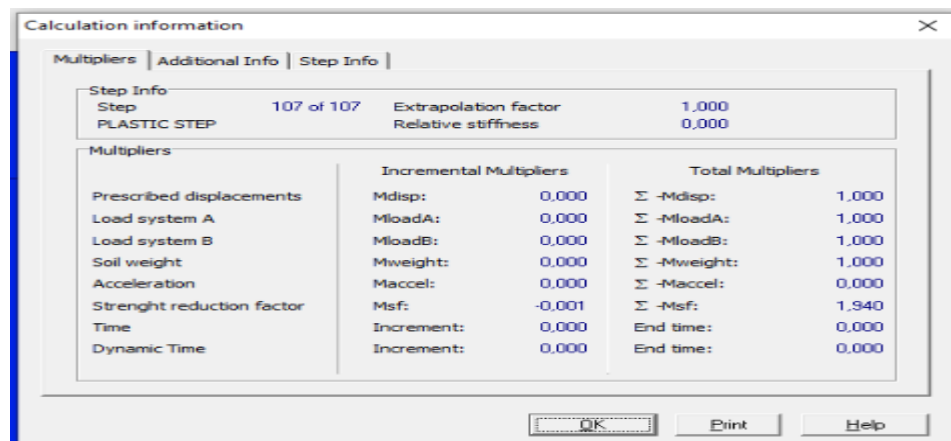


Figure 5.46 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 8m de longueur.

- **Amélioration avec 10 colonnes de 12m de profondeur**
- Le maillage déformé du model et présenté dans la figure 5.47.

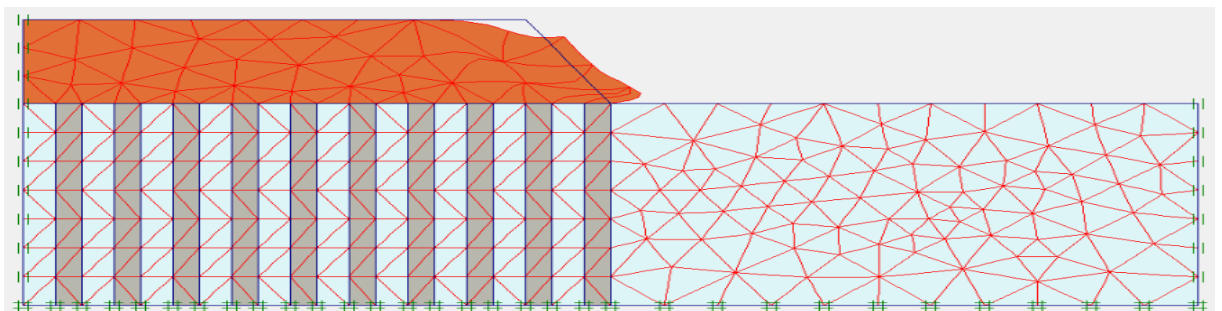


Figure 5.47: Maillage déformé du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

- Le cercle de glissement et présenté dans la figure 5.48.

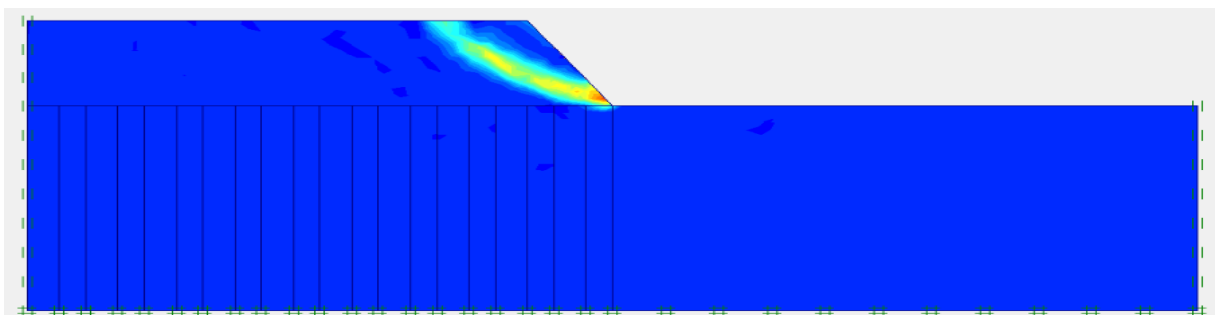


Figure 5.48 : Cercle du glissement du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur.

- Le facteur de sécurité de remblais sur sol mou renforcé par 10 colonnes de 12m de longueur est égalé à 1.923 et il est présenté dans la figure 5.49.

Calculation information			
Step Info		Step Info	
Step	107 of 107	Extrapolation factor	2.000
PLASTIC STEP		Relative stiffness	0.000
Multipliers			
	Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0.000	Σ -Mdisp: 1.000
Load system A	MloadA:	0.000	Σ -MloadA: 1.000
Load system B	MloadB:	0.000	Σ -MloadB: 1.000
Soil weight	Mweight:	0.000	Σ -Mweight: 1.000
Acceleration	Maccel:	0.000	Σ -Maccel: 0.000
Streight reduction factor	Msf:	0.000	Σ -Msf: 1.923
Time	Increment:	0.000	End time: 0.000
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time: 0.000

Figure 5.49 : Facteur de sécurité du model pente 60° renforcé par 10 colonnes de 12 m de longueur.

- La figure 5.50 représente le graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente de remblais 60° renforcé par 10 colonnes.

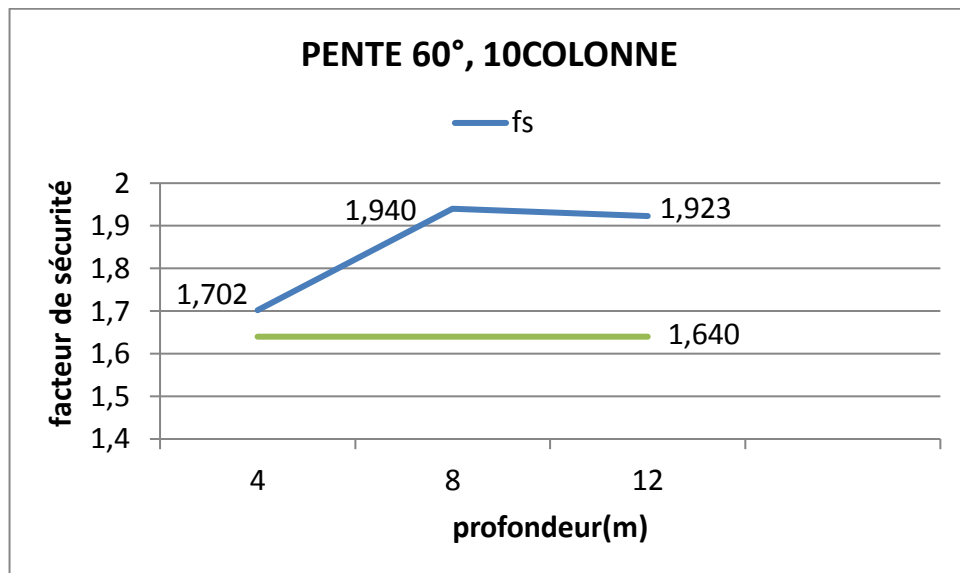


Figure 5.50 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de la profondeur pour une pente 60°.