

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
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

MODELISATION NUMERIQUE DES TERRAINS EN PENTE
RENFORCÉS PAR CLOUS – DESCRIPTION ET ETUDE
PARAMETRIQUE.

Présenté par :

M^r. YACEF SOFIANE

M^r. AZAZI OUSSAMA

Devant les membres de jury :

ABED YOUNES

U. Saad Dahleb-Blida

President

TOUMI ILHEM

U. Saad Dahleb-Blida

Examineur

D^r : AMAR BOUZID. Dj

U. Saad Dahleb-Blida

Promoteur

Blida, Novembre 2021

RESUME

Le présent mémoire traite la modélisation et la conception du clouage du sol, la première partie concerne la connaissance des méthodes et les domaines d'utilisation de la technique de clouage du sol et sa conception.

Dans la deuxième partie, présentation de l'ogiciel (PLAXIS), c'est un ensemble d'éléments finis qui a été développé spécifiquement pour l'analyse de la déformation et de la stabilité dans les projets d'ingénierie géotechnique. Les procédures d'entrée graphiques simples permettent une génération rapide de modèles d'éléments finis complexes.

Ce travail est dédié à l'étude du comportement de ce type de techniques de renforcement et au développement des données numériques de notre projet qui connecte et démontre l'interactivité entre le sol et la technique utilisée, est les paramètres qui ont un effet sur cette technique (longueur des clous, espacement, inclinaison, pente de talus)

L'étude paramétrique montre l'effet des paramètres de calcul et des paramètres géotechniques sur les résultats. Pour atteindre l'objectif visé, le travail sera comme suit :

- Définition et clarification de la technique des éléments finis et leur domaine d'utilisation.
- utiliser un programme qui fonctionne avec cette propriété (*PLAXIS 8.2*). qui permet de transférer le projet réel sur un modèle numérique pour étudier les facteurs d'influence facilement et rapidement et décrire le comportement des structures renforcées par le clouage avec une attention particulière sur l'effet de phasage de construction sur le comportement de la paroi clouée, l'effet de l'espacement et longueurs des clous et leurs inclinaisons.

Deuxièmement, on détermine un modèle et présentez sa géométrie et les propriétés de ses matériaux constitutifs et on passe au calcul par *PLAXIS 8.2*.

Finalement, l'étude paramétrique, qui montre l'effet des paramètres de calcul et des paramètres géotechniques sur les résultats.

Mots-clés : renforcement des soles par clouage, éléments finis, paroi clouée, plaxis 2d, terrain en pente.

ABSTRACT

This dissertation deals with the modeling and design of soil nailing, the first part is about the knowledge of the methods and areas of use of soil nailing technique and its design.

In the second part, software presentation (PLAXIS), it is a set of finite elements that has been developed specifically for the analysis of deformation and stability in geotechnical engineering projects. Simple graphical input procedures allow for rapid generation of complex finite element models.

This work is dedicated to the study of the behavior of this type of reinforcement techniques and to the development of a digital model of our project that connects and demonstrates the interactivity between the soil and the technique used.

The parametric study shows the effect of computational parameters and geotechnical parameters on the results. To achieve the intended goal, the work will be as follows:

- Definition and clarification of the technique of finite elements and their field of use.
- use a program that works with this property (PLAXIS 8.2). which makes it possible to transfer the actual project to a digital model to study the influencing factors easily and quickly and describe the behavior of structures reinforced by nailing with special attention on the construction phasing effect on the behavior of the nailed wall, the effect of spacing and lengths of nails and their inclinations.

Secondly, we determine a model and present its geometry and the properties of its constituent materials and proceed to the calculation by PLAXIS 8.2.

Finally, the parametric study, which shows the effect of the calculation parameters and geotechnical parameters on the results.

Keywords: nailing, reinforcement, finite elements, nailed wall, plaxis 2d.

ملخص

تتناول هذه المذكرة نمذجة وتصميم تسمير الأرض، ويتعلق الجزء الأول بمعرفة طرق ومجالات استخدام تقنية تسمير الأرض وتصميمها.

في الجزء الثاني، عرض برنامج (PLAXIS) ، هو مجموعة من العناصر المحدودة التي تم تطويرها خصيصًا لتحليل التشوه والاستقرار في مشاريع الهندسة الجيوتقنية. تسمح إجراءات الإدخال الرسومي البسيطة بالتوليد السريع لنماذج العناصر المحدودة المعقدة.

هذا العمل مخصص لدراسة سلوك هذا النوع من تقنيات التعزيز وتطوير نموذج رقمي لمشروعنا يربط ويوضح التفاعل بين الأرض والتقنية المستخدمة.

توضح الدراسة البارامترية تأثير معاملات التصميم والمعلمات الجيوتقنية على النتائج. وتحقيق الهدف سيكون العمل على النحو التالي:

-تعريف وتوضيح تقنية العناصر المحدودة ومجال استخدامها.

-استخدام برنامج يعمل مع هذه الخاصية (PLAXIS 8.2) مما يسمح بنقل المشروع الحقيقي إلى نموذج رقمي لدراسة العوامل المؤثرة بسهولة وسرعة ووصف سلوك الهياكل المعززة بالتسمير مع إيلاء اهتمام خاص لتأثير مراحل البناء على سلوك جدار التسمير، وتأثير التباعد وأطوال المسامير وميولها.

ثانيًا، نحدد نموذجًا ونعرض هندسته وخصائص المواد المكونة له وننتقل إلى الحساب بواسطة

PLAXIS 8.2.

وأخيرًا الدراسة البارامترية والتي توضح أثر معاملات الحساب والمعلمات الجيوتقنية على النتائج.

الكلمات المفتاحية: تسمير، تقوية، عناصر محدودة، جدار مسمر، دعامة ثنائية الأبعاد.

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé	II
Tables de matière.....	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux.....	V
Introduction générale	1

Chapitre 1 : clouage et procédés d'installation des clous

1 Introduction :.....	3
1.2 Origine :	4
1.3 Éléments de la structure clouée :	5
1.3.1 Les barres de renforcement en acier :	5
1.3.2 Centreurs :.....	5
1.3.3 Injection du coulis :	6
1.3.4 Tête de clou :	7
1.3.5 Écrou hexagonal, la rondelle et la plaque d'appui :	7
1.3.6 Bande géo composite de drainage :	7
1.4 Méthode de construction et application de clouage du sol :	8
1.5 Détails de la tête de clou :	13
1.6 Le revêtement de la pente :	14
1.7 Avantages du clouage du sol :	16
1.8 Exemples de clouage du sol :	18
1.9 Conclusion :	20

Chapitre 2 : PRESENTATION EN UTILISANT LE CODE D'ELEMENTS FINIS (PLAXIS 2D)

2. Présentation du logiciel :	22
2.1 Code de calcul Plaxis :	22
2.2 Les avantages et les inconvénients de la MEF :	23
2.3 Description et implémentations de Plaxis 2D :	23
2.3.1 Configuration et densité du maillage :	24
2.3.2 Modèle constitutif du sol :	24

2.3.3 Types d'assistance concernant la modélisation des clous de sol dans PLAXIS 2D :	..25
2.3.3.1 Éléments d'interface :	.....25
2.3.3.2 Éléments de géogrille (Geogride) :	.....25
2.3.3.3 Éléments en plaque (plate) :	.....26
2.3.3.4 Rangées de poutres encastées (RPE) :	.....27
2.3.4 Phases de calculs :	.....29
2.4. Les sous programmes de plaxis 2D :	.....30
2.5. Conclusion :	.....33

Chapitre 3 : COMPARAISON DES RESULTATS DE PLAXIS 2D PAR UN EXEMPLE TIRE DE LA LITTERATURE

3. introduction de chapitre :	.....35
3.1 présentation :	.....35
3.1.1 la méthode des éléments finis :	.....35
3.2 modélisation par logiciel (PLAXIS) déliements finis :	.....36
3.2.1 Présentation de l'exemple traité :	.....36
3.2.2 Résultats de la méthode (EF) avec PLAXIS 2D (donné) :	.....39
3.3 Les cas étudiés :	.....43
3.3.1 Pour les surfaces des glissements:	.....47
3.3.2 Pour les facteurs de sécurité :	.....48
3.3.3 Pour les forces axiales des clous :	.....52
3.4 Comparaison de facteur de sécurité :	.....58
3.5 Conclusion :	.....59

Chapitre 4 : modélisation d'une pente renforcée par clous (étude paramétrique)

4. Introduction :	.....61
4.1 Définition des données :	.....61
4.1.1 Hypothèses et géométrie :	.....61
a) Les hypothèses générales données :	.....61
b) La géométrie du modèle :	.....61
c) Les conditions aux limites :	.....63
4.2 Dimensionnement de la paroi clouée :	.....63
4.2.1. Principes :	.....63

4.2.2 Caractéristiques des matériaux :	63
a) Propriétés des couches de sols et des interfaces :	63
b) Éléments structuraux :	64
4.2.3 Génération du maillage :	66
4.2.4 Conditions initiales :	66
a) Conditions hydrauliques :	66
b) Contraintes initiales :	68
4.3 Procédure de calculs :	68
4.3.1 Les principaux résultats :	70
a- L'effet de phasage de construction sur le comportement de la paroi clouée :	70
4.4 Les cas étudié :	70
4.4.1 Pente de 30° :	70
4.4.1.1 excavations de 10 m directement :	70
4.4.1.2 excavations par partie :	82
4.4.2 Pente de 45° :	96
4.4.2. Excavation de 10 m directement :	96
4.4.2.2 excavations par partie :	108
4.4.3 Pente de 60° :	126
4.4.3.1 excavations de 10 m directement :	126
4.4.3.2 Excavations par partie :	138
4.5 Conclusion :	152

Conclusions

Références Bibliographiques

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Clouage et procédés d'installation des clous.

Chapitre 2 : Présentation en utilisant le code d'éléments finis (PLAXIS 2D)

Tableau 2.1. Phases de calcul pour FOS_{EF} dans PLAXIS 2D.....	29
--	----

Chapitre 3 : Comparaison en utilisant le logiciel PLAXIS

Tableau. 3.1 - Propriétés des couches de sols et des interfaces.....	38
Tableau. 3.2 - Propriétés mécaniques du clou/ciment.....	38
Tableau. 3.3 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les angles.....	40
Tableau 3.4 : résultats de forces axiales sur clous (donné).....	41
Tableau 3.5 : propriété de sole modifié.....	44
Tableau. 3.6 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les angles.....	48
Tableau 3.7 - les résultats des forces axiale appliqué sur les clous.....	57
Tableau 3.8 : tout les résultats de facture de sécurité (donné et calculé).....	58

Chapitre 4 : modélisation d'une pente renforcée par clous (étude paramétrique)

Tableau. 4.1 - Propriétés des couches de sols et des interfaces.....	64
Tableau. 4.2 - Propriétés mécaniques du clou.....	65
Tableau. 4.3 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	79
Tableau. 4.4 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	87
Tableau. 4.5 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	94
Tableau 4.6 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	104
Tableau. 4.7 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	117
Tableau. 4.8 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	124
Tableau. 4.9 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	135
Tableau. 4.10 - Résumé des résultats de M_{sf} pour tous les longueurs.....	143
Tableau. 4.11 - Résumé des résultats les de M_{sf} pour tous longueurs.....	149

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Clouage et procédés d'installation des clous.

Figure 1.1 : Les deux utilisations possibles du clouage.....	3
a- Application du clouage à la stabilité de pente.	
b- Application du clouage au soutènement de fouille.	
Figure 1.2 : différences conceptuelles entre le revêtement de tunnel rigide et flexible.....	4
Figure 1.3 : des barres d'acier d'armature pleine ou creuse utilisé dans le clouage.....	5
Figure 1.4 : Les centreurs PVC typiques attachés à une barre d'acier du clou avant installation.....	6
Figure 1.5 : Détails d'injection.....	7
Figure 1.6 : système de drainage.....	8
Figure 1.7 : les différentes étapes de construction d'une paroi.....	9
Figure 1.8 : foreuse pneumatique pour l'installation de clous.....	11
Figure 1.9 : appareil de forage léger utilisé.....	11
Figure 1.10 : Projection par voie sèche.....	12
Figure 1.11 : Projection par voie humide.....	13
Figure 1.12 : Section transversale d'un mur de sol cloué.....	14
Figure 1.13 : Têtes de clous dans des niches	14
Figure 1.14 : application de béton projeté avec treillis soudé.....	15
Figure 1.15 : application de béton projeté mélangé avec des fibres d'acier.....	16
Figure 1.16 : renforcement du plan faible par clouage.....	17
Figure 1.17 : première pente de clouage du sol au Brésil construite en 1970 ...	18
Figure 1.18 : Mur mixte pour stabiliser une pente artificielle derrière un bâtiment, Niteroi, Brésil.....	19
Figure 1.19 : stabilisation de talus par clouage à une culée de chemin de fer, Sao Paulo, Brésil.....	19
Figure 1.20 : un glissement de terrain s'est produit sur une partie de la route et les travaux pratiquement achevés.....	20

Chapitre 2 : Présentation en utilisant le code d'élément fini (PLAXIS 2D)

Figure 2.1 : Éléments finis EF dans PLAXIS (Brinkgreve & et al. PLAXIS 2D 2015 - Manuel de l'utilisateur, 2015).....	24
Figure 2.2 : Interfaces utilisées dans PLAXIS 2D (Tschuchnigg F., 2013)....	25
Figure 2.3 : Géo grille en combinaison avec des interfaces, tracée à partir de PLAXIS 2D.....	26
Figure 2.4 : Plaque en combinaison avec des interfaces, tracée à partir de PLAXIS 2D.....	27
Figure 2.5 : RPE implémenté dans PLAXIS 2D, et maillage déformé.....	28
Figure 2.6 : Principe 2D de l'interaction d'une poutre encastree avec le sol (Sluis, 2012).....	28
Figure 2.7 : Principe des interfaces (Sluis, 2012).....	29
Figure 2.8 : Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input).....	30
Figure 2.9 : Fenêtre principale du programme de calcul.....	31
Figure 2.10 : Fenêtre de calcul.....	31
Figure 2.11 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme.....	32
Figure 2.12 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves...32	

Chapitre 3: Comparaison en utilisant le logiciel PLAXIS

Figure 3.1: Modélisation numérique de talus de sol renforcé dans PLAXIS 2.....	37
Figure 3.2 : Facteur de sécurité contre le déplacement de pente de PLAXIS 2D pour différentes inclinaisons de clous à 45° de pente.....	39
Figure 3.3 : Facteur de sécurité contre le déplacement de pente de PLAXIS 2D pour différentes inclinaisons de clous à une pente de 60°.....	39
Figure 3.4 : (a) Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0°. (b) Surface de glissement à rupture pour un angle d'inclinaison de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 15°. (c) Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 30°.....	40
Figure 3.5 : (a) Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0°. (b) Surface de glissement à rupture pour un angle d'inclinaison de 60° de PLAXIS avec une inclinaison du clou de 15°. (c) Surface de glissement à rupture pour un angle d'inclinaison de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 30°.	41

Figure 3.6 : Répartition de la force axiale du clou de PLAXIS 2D pour une pente de 45°	42
Figure 3.7 : Répartition de la force axiale du clou de PLAXIS 2D pour une pente de 60°	42
Figure 3.8 : rupture de sole directement par PLAXIS 2D	43
Figure 3.9 : représentation des surfaces de glissement avec PLAXIS 2D sur une pente de 45°	45
Figure 3.10 : représentation des surfaces de glissement avec PLAXIS 2D sur une pente de 60°	47
Figure 3.11 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction de déplacement pour les 3 inclinaisons des clous de la pente de 45°	50
Figure 3.12 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction de déplacement pour les 3 inclinaisons des clous de la pente 60°	51
Figure 3.13 – Répartition de la force axiale des clous inclinés de 0° de PLAXIS 2D pour la pente 45°	53
Figure 3.14 – Répartition de la force axiale des clous inclinés de 15° de PLAXIS 2D pour la pente 45°	55
Figure 3.15 – Répartition de la force axiale des clous inclinés de 30° de PLAXIS 2D pour la pente 45°	56

Chapitre 4 : Modélisation d'une pente renforcée par clous (étude paramétrique)

Figure 4.1 - Vue en coupe du projet	62
Figure 4.2 - Modèle géométrique du projet	62
Figure 4.3 - Maillage du projet	66
Figure 4.4 - Conditions hydrauliques initiales	67
Figure 4.5 - Génération des pressions interstitielles initiales	67
Figure 4.6 - Génération des contraintes initiales	68
Figure 4.7 – phase initiale (0)	69
Figure 4.8 – phase 1 (excavation)	69
Figure 4.9 – phase 2 (activation des clous)	69
Figure 4.10 – phase 3 (Phi/c reduction)	70
Figure 4.11 - une pente de 30° sans clouage	70
Figure 4.12 – modélisation des clous de 2m incliné de 0° ; 15° ; 30°	71
Figure 4.13 – les résultats de calcule (pente de 30° sans clouage)	73
Figure 4.14 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 2m incliné 0°)	75
Figure 4.15 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 2m incliné 15°)	77

Figure 4.16 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 2m incliné 30°).....	79
Figure 4.17 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.....	81
Figure 4.18 – une pente de 30° sans clouage.....	82
Figure 4.19 – modalisation des clous de 2m incliné de 0° ; 15° ; 30°.....	83
Figure 4.20 – les résultats de calcule (sol sans clouage).....	85
Figure 4.21 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 2m incliné 0°).....	87
Figure 4.22 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.....	88
Figure 4.23 – une pente de 30° sans clouage.....	89
Figure 4.24 – les résultats de calcule (pente de 30° sans clouage).....	91
Figure 4.25 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 2 m incliné 0°).....	93
Figure 4.26 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.....	95
Figure 4.27 - une pente de 45° sans clouage.....	96
Figure 4.28 – modélisation des clous de 5 m incliné de 0° ; 15° ; 30°.....	96
Figure 4.29 – les résultats de calcule (pente de 45° sans clouage).....	98
Figure 4.30 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 5 m incliné 0°).....	100
Figure 4.31 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 5 m incliné 15°).....	102
Figure 4.32 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 5 m incliné 30°).....	104
Figure 4.33 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.....	106
Figure 4.34 Une pente de 45° sans clouage.....	108
Figure 4.35 Modélisation des clous de 5m incliné 0° ; 15° ; 30°.....	108
Figure 4.36 –les résultats de calcule (pente de 45° sans clouage).....	110
Figure 4.37 –les résultats de calcule (pente de 45° avec un clou de 5m).....	112
Figure 4.38 –les résultats de calcule (pente de 45° avec un clou de 5m inclinai par 15°).....	114
Figure 4.39 –les résultats de calcule (pente de 45° avec un clou de 5m inclinai par 30°).....	116
Figure 4.40 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.....	118
Figure 4.41 Une pente de 45° sans clouage.....	119
Figure 4.42 –les résultats de calcule (pente de 45° sans clou).....	121
Figure 4.43 –les résultats de calcule (pente de 45° avec un clou de 5m).....	123
Figure 4.44 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.....	125

Figure 4.45 – une pente de 60° sans clouage.....	126
Figure 4.46 – modélisation des clous de 7m incliné de 0° ; 15° ; 30°	126
Figure 4.47 – les résultats de calcule (pente de 60° sans clouage).....	128
Figure 4.49 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 7m incliné 0°).....	130
Figure 4.49 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 7m incliné 15°).....	132
Figure 4.50 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 7m incliné 30°).....	134
Figure 4.51 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d’inclinaison des clous.....	137
Figure 4.52 - une pente de 60° sans clouage.....	138
Figure 4.53 – modélisation des clous de 7m incliné de 0° ; 15° ; 30°.....	138
Figure 4.54 – les résultats de calcule (pente de 60° sans clouage).....	140
Figure 4.55 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 7m incliné 0°).....	142
Figure 4.56 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d’inclinaison des clous.....	144
Figure 4.57 – une pente de 60° sans clouage.....	145
Figure 4.58 – les résultats de calcule (pente de 60° sans clouage).....	147
Figure 4.59 – les résultats de calcule (sol cloué par des clous de 7m incliné 0°).....	149
Figure 4.60 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d’inclinaison des clous.....	150

Liste des symboles

γ : poids total de l'unité de masse de sol.....	[kN]
γ_{unsat} : Poids volumique Humide.....	[kN/m ³]
γ_{sat} : Poids volumique saturé.....	[kN/m ³]
U : Coefficient de Poisson.	
φ : Angle de frottement interne du sol.....	[°]
ψ : Angle de dilatance du sol.....	[°]
E _{ref} : Module d'Young.....	[kN/m ²]
C _{ref} : cohésion.....	[kN/m ²]
EA : Rigidité normale.....	[kN/m]
EI : Rigidité de flexion.....	[kN.m ² /m]
d : Epaisseur équivalente.....	[m]
d : Diamètre de clou.....	[m]
ω : poids.....	[kN/m]
H : hauteur du soutènement.....	[m]
L : longueur des clous.....	[m]
FOS : coefficient de sécurité	[-]
MEF : méthodes d'éléments finie	[-]
EL : méthode d'équilibre limite	[-]

Introduction générale

Le clouage parmi les techniques des renforcements des sols, qui est utilisé pour améliorer des propriétés mécaniques de ces sols au moyen de barres d'acier installées, appelées « clous ». des inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion, et qui peut être utilisé soit pour la réalisation de massifs de soutènement, en déblai, soit pour le renforcement de talus existants.

Les éléments linéaires (barres, cornières, tubes.) sont mis en place horizontalement ou légèrement inclinés au fur et à mesure que l'on terrasse l'excavation et sont sollicités par la déformation progressive du massif.

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie.

L'utilisation de la méthode des éléments finis a connu un développement très important dans les bureaux d'études et les centres de recherches en géotechnique. Ce développement s'est accompagné de la mise au point de programmes de calcul capables de résoudre des problèmes complexes.

Notre objectif est d'étudier le comportement de ce type de techniques de renforcement et au développement des données numérique de notre projet qui connecte et démontre l'interactivité entre le sol et la technique utilisée, est les paramètres qui ont un effet sur cette technique (longueur des clous, espacement, inclinaison, pente de talus), Dans réalité, un clou est entouré de sol (caractéristiques 3D) qui est difficile à modéliser en une approche 2D. Ainsi, des effets 3D avec une approche EF de déformation plane 2D simplifiée sont également étudiés.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail sera divisé suivant le plan ci-dessous :

- Introduction générale.
- Chapitre 1 : clouage et procédés d'installation des clous.
- Chapitre 2 : Présentation en utilisant le code d'élément finie (PLAXIS 2D)
- Chapitre 3 : comparaison des résultats de PLAXIS 2D par un exemple tiré de la littérature
- Chapitre 4 : modélisation d'une pente renforcé par clous (étude paramétrique)
- Conclusion générale

Chapitre 1 : Clouage et procédés d'installation des clous.

1) Introduction

Le clouage du sol consiste à renforcer la masse du sol par l'introduction d'une série d'éléments appelés clous pour résister aux efforts de traction, de flexion et de cisaillement. Les éléments de renforcement sont constitués de barres rondes en acier à section transversale. Les clous sont installés de manière subhorizontale dans la masse de sol dans un trou pré-percé, qui est jointoyé, les clous sont utilisés dans les domaines de stabilisation des pentes et du soutènement des excavations. La figure 1 montre des applications typiques dans les pentes et les excavations.



a) Application du clouage à la stabilité de pente.



b) Application du clouage au soutènement de fouille.

Figure 1.1 : Les deux utilisations possibles du clouage. [7]

1.2) Origine

Le clouage du sol trouve son origine dans la méthode de creusement de soutènement en béton projeté développée à la fin des années 60 (Fig.2) consistant l'utilisation d'un revêtement souple qui permet la déformation du sol autour de l'excavation qui a été renforcée par boulonnage ou clouage. Une zone active se forme autour de l'excavation et le revêtement est par conséquent soumis à une charge réduite. Cette technique contraste avec la technique traditionnelle de creusement de tunnels (avant 1960) où un revêtement rigide était utilisé pour empêcher la déformation du sol et était soumis à une charge complète due aux pressions du sol.

En Algérie, le clouage des sols est très pratiqué dans le domaine des travaux public.

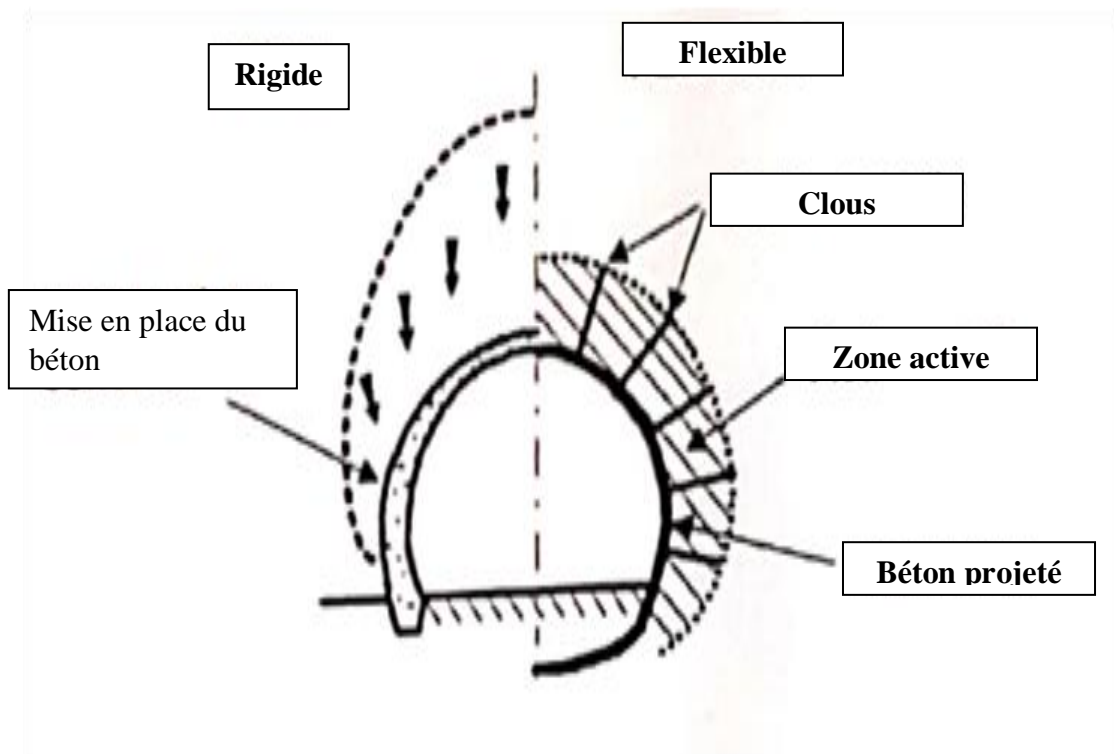


Figure 1.2 : différences conceptuelles entre le revêtement de tunnel rigide et flexible. [5]

1.3) Éléments de la structure clouée

Cette section traitera des différents composants des clous à plancher en ciment. Coupe transversale du mur cloué et photos sur place de divers composants.

1.3.1) Les barres de renforcement en acier

Des barres d'acier d'armature pleine ou creuse (avec une force minimale de 415 kpa) sont le composant principal du système de clouage du sol. Ces éléments sont placés dans des trous de forage pré-percés et que le coulis en place.



Des barres d'acier d'armature pleine



Des barres d'acier d'armature creuse

Figure 1.3 : des barres d'acier d'armature pleine ou creuse utilisé dans le clouage

1.3.2) Centreurs

Matériau PVC, qui est fixé sur le clou de sol pour garantir que le clou de sol est centré dans le trou de forage, les centreurs en PVC sont disponibles pour tous les diamètres de trous et clou configurations.

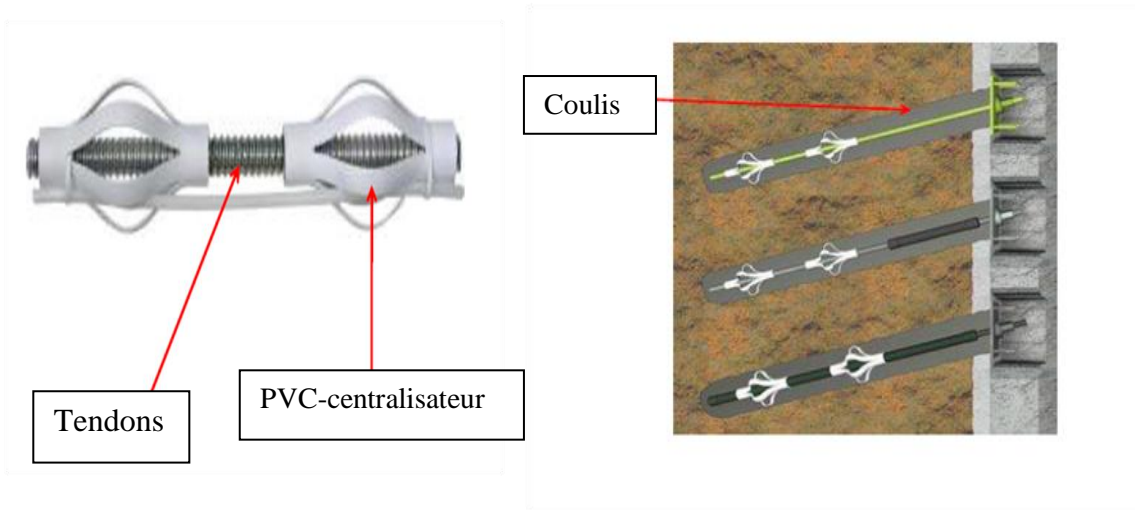


Figure 1.4 : Les centreurs PVC typiques attachés à une barre d'acier du clou avant installation. [5]

1.3.3) Injection du coulis

Après le clouage, le coulis est mis en place dans le trou pré-percé. La fonction principale du coulis est de transférer la pression du bloc de clous. Le jointoiment offre également un certain degré de protection contre la corrosion des clous du sol. La méthode de jointoiment utilisée pour mettre en œuvre le renforcement dépend de la technique de forage et de l'application. La méthode la plus utilisée consiste à injecter en même temps que le forage. Il assure la présence du coulis d'étanchéité sur toute la longueur de l'ancrage. L'unité d'injection se compose généralement d'un mélangeur et d'une pompe. Le choix de la pompe d'injection dépend de l'application : pour un perçage d'injection simultanée, une pression d'injection maximale de 7 bars est suffisante. Dans l'argile, une pression de 17 bars peut être requise.

La consommation du coulis de ciment dépend des facteurs suivants :

- a) La technique d'injection et de forage utilisée
- b) La nature du sol
- c) La vitesse

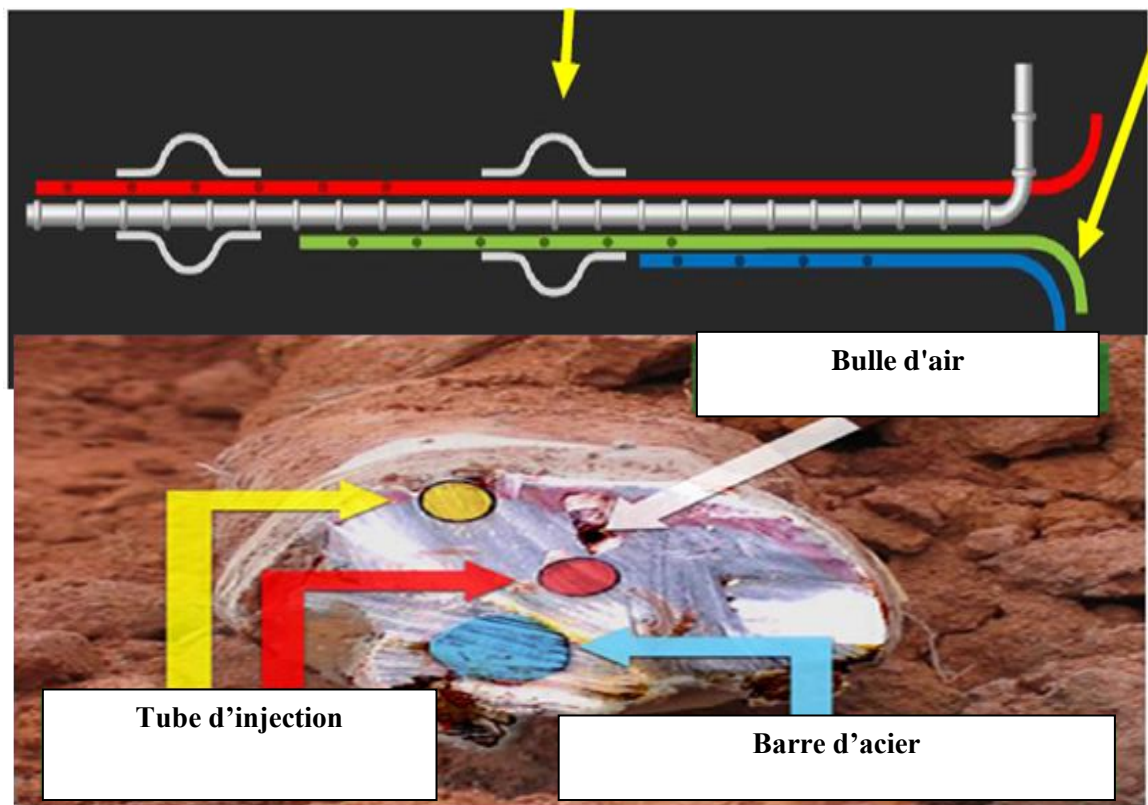


Figure 1.5 : Détails d'injection [5]

1.3.4) tête de clou

La tête du clou est l'extrémité filetée de clou du sol qui dépasse la paroi opposée. Il s'agit d'une structure de forme carrée en béton qui comprend la plaque d'acier, écrous en acier, la tête et le renforcement des sols cloués. Cette partie de la structure fournit la force portante du sol clouée, et les transferts portant des charges de la masse de sol clouée.

1.3.5) Écrou hexagonal, la rondelle et la plaque d'appui

Ceux-ci sont fixés à la tête du clou et sont utilisés pour relier le clou de sol à la face. Plaque d'appui répartit la force à la fin de clou de béton projetée temporaire face.

1.3.6) Bande géo composite de drainage

Système vertical drains sont utilisés comme support du système de drainage. Ceux-ci sont placés avant l'application du parement provisoire pour la collecte et la transmission de l'eau d'infiltration qui peut migrer vers la face provisoire.

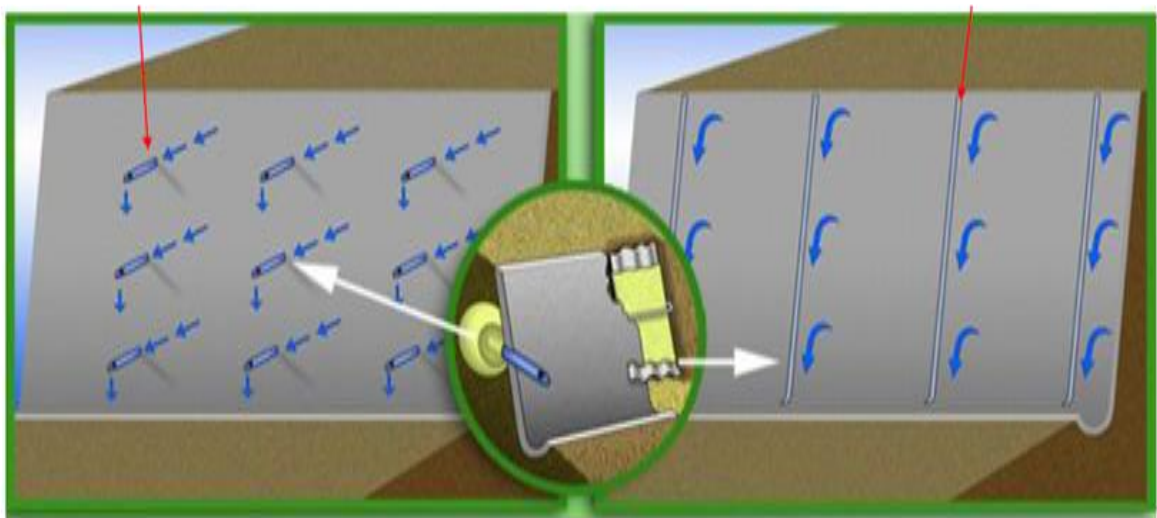
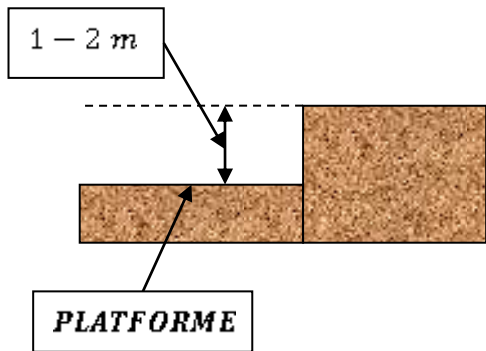


Figure 1.6 : système de drainage [5]

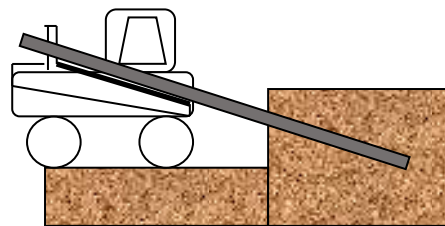
1.4) Méthode de construction et application de clouage du sol

Des murs de clouage de sol ont été utilisés pour stabiliser les pentes naturelles ou les excavations. Dans ce cas, l'armature est mise en place par paliers au fur et à mesure de l'avancement du creusement, typiquement par paliers de creusement de 1 à 2 m de profondeur, La profondeur d'excavation maximale à chaque étape dépend du type de sol et de l'inclinaison de la pente, qui doit être maintenue stable pendant l'étape d'excavation, jusqu'à ce que le renforcement soit en place et commence à mobiliser ses effets.

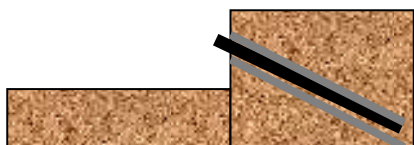
Le principe de la construction d'un mur de sol clouée à l'aide des clous d'acier est décrit ci-dessous et représenté schématiquement à la figure 7.



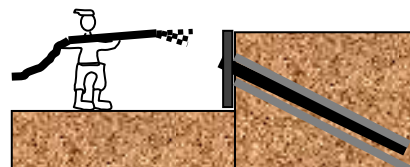
Etape 1
Terrasser une petite coupure



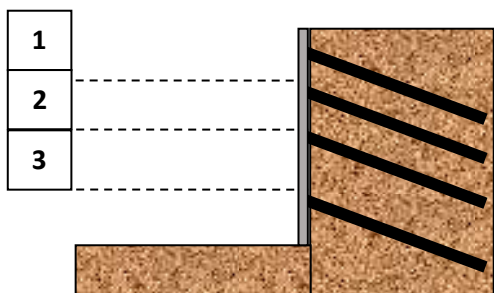
Etape 2
Percer un trou de clou



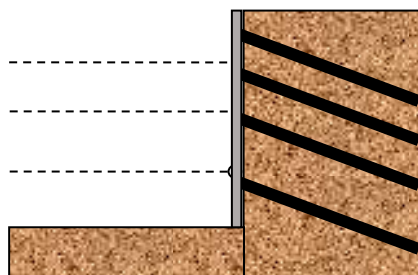
Etape 3
Installer et coulis le clou



Etape 4
Placer le drainage, couche de béton projeté initiale et installer des plaques d'appui /écrous



Etape 5
Répétez le processus pour la cote finale



Etape 6
Orientation place finale

Figure 1.7 : les différentes étapes de construction d'une paroi clouée.

a- Étape 1. (Excavation)

La profondeur de l'excavation initiale permet à la face d'excavation de rester sans support pendant une courte période de temps, généralement d'environ 24 à 48 heures. La profondeur de l'ascenseur d'excavation est généralement comprise entre 1 et 2 m, ce qui est légèrement inférieur à la hauteur des clous d'installation. La largeur de la plate-forme ou du banc souterrain doit être suffisante pour permettre l'accès aux équipements de l'installation.

b- Étape 2. Percer un trou des clous

Percez des trous pour installer des clous, les trous sont percés à une certaine longueur, diamètre spécifié, Après l'excavation de la terre, deux processus peuvent être effectués, les clous peuvent être poussés directement dans le sol avec un appareil approprié, et le clou lui-même poussera vers l'avant. Alternativement, un trou peut être percé avant le placement du matériel de forage pour enfoncer les clous. Ce dernier procédé est couramment utilisé.

c- Étape 3. Installation des clous et le jointement

Les clous doivent être installés peu de temps après l'excavation par enfoncement ou perçage, des clous courts, généralement jusqu'à 3 m de longueur, sont entraînés par percussion à l'aide de marteaux pneumatiques actionnés manuellement. Cette technique a été appliquée dans les murs temporaires mais ne devrait pas être applicable aux structures permanentes en raison du manque de protection contre la corrosion. D'autres méthodes d'installation utilisant des injections à haute pression.

L'enfoncement des clous est inadéquat dans les sols contenant des blocs rocheux, dans la plupart des sols résiduels durs et dans toutes les structures permanentes, car la barre d'acier n'est pas protégée contre la corrosion. Un autre inconvénient est le faible frottement sol-clou qui en résulte, qui varie de 30 à 40 kPa dans les sables et avec des valeurs encore plus faibles dans les argiles. La technique la plus courante est similaire à l'installation d'ancrages au sol, c'est-à-dire en perçant un trou de 50 à 100 mm de diamètre, en introduisant une barre d'acier de 20 à 32 mm de diamètre, suivi d'un scellement à basse pression. Ce processus conduit à un sol unitaire raisonnablement élevé, frottement des clous dans lequel des valeurs supérieures à 100 kPa peuvent être facilement obtenues dans la plupart des sols, une gamme de types d'équipement peut être utilisée pour l'installation des clous.

La figure 8 montre une foreuse pneumatique de taille moyenne utilisée pour forer un trou de forage dans des argiles résiduelles, ce type d'engin de forage a de bonnes performances dans une excavation mais peut être trop lourd pour une pente existante, où des machines comme

celles illustrées sur les figures 9, devraient mieux fonctionner, l'engin de forage léger peut être démonté en petits morceaux et facilement transporté sur la plate-forme de travail au sommet d'une pente.



Figure 1.8 : foreuse pneumatique pour l'installation de clous



Figure 1.9 : appareil de forage léger utilisé

d- Étape 4. Construction de béton projeté provisoire

Un système de parement provisoire est ensuite construit pour supporter la section de sol avant la prochaine levée de sol est excavé.

Le parement le plus typique provisoire est constitué d'une couche de béton projeté renforcé légèrement couramment 100 mm d'épaisseur. L'armature est constituée généralement d'un treillis métallique soudé, qui est placé à peu près au milieu de l'épaisseur de revêtement.

Cette technique, la plus couramment utilisée dans les parois clouées, consiste à projeter du béton à prise rapide sur la surface rocheuse brute, à l'aide de jets d'air comprimé et de liquide minéral qui accélère la prise du béton au moment de la projection tout en conservant une bonne plasticité au béton jusqu'au contact du support, le béton projeté est armé à l'aide de nappes de treillis, on appelle cela le ferrailage, Il peut être projeté par voie humide ou sèche.

-Deux types de projection existent :

d-1- La projection par voie sèche

Le mélange ciment + granulats est réalisé préalablement sans eau, l'ajout d'eau se faisant directement au niveau de la souplesse et d'atteindre de grandes distances de projection par rapport à la voie humide. . Figure 10.

d-2- La projection par voie humide

Il s'agit de projeter un béton mouillé mélangé en malaxeur, un ouvrage en béton projeté pourra se faire en une couche ou plusieurs couches suivant l'épaisseur à réaliser et le ferrailage à mettre en place. Figure 11.

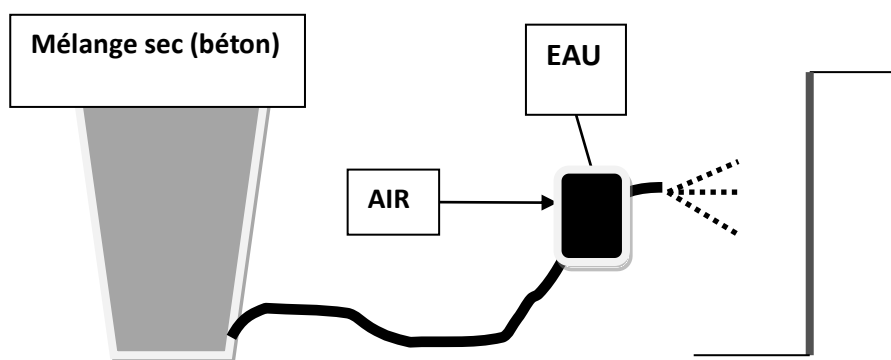


Figure 1.10 : Projection par voie sèche

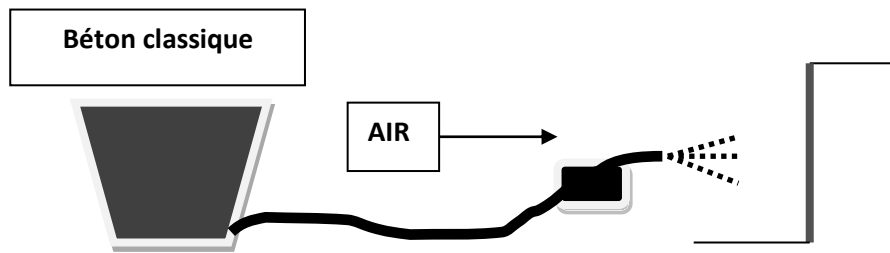


Figure 1.11 : Projection par voie humide

e-L'étape 5. Construction des niveaux suivants

Les étapes 1 à 4 sont répétées pour les remontées d'excavation restante, à chaque excavation, drainage vertical de la bande est déroulée vers le bas, un nouveau panneau de trie soudé est ensuite placé chevauchant au moins une cellule de filet intégral. Le béton projeté temporaire se poursuit avec un joint froid avec le béton projeté précédente, au fond de l'excavation, la bande de drainage est liée à un drain de collecte.

f-L'étape 6. Construction d'une finale, face permanent

Après le fond de l'excavation est atteint et les clous sont installés et testé en charge, un parement définitif peut être construit. Finale face peut être constituée de béton coulé sur place en béton armé, béton projeté armé ou panneaux préfabriqués. Le renforcement de parement permanent conventionnel barre et béton.

1.5) Détails de la tête de clou

La figure 12 présente les détails des têtes de clous pour mur vertical ou quasi vertical. Dans ce cas, le couple appliqué au système boulon-écrou applique une petite charge de l'ordre de 5 Kn à chaque clou afin de maintenir le contact du parement contre le sol.

Dans la stabilisation des pentes inclinées dans lesquelles des clous de petit diamètre (moins de 20 mm de diamètre) sont utilisés,

La tête de clou est encastrée dans une plaque de béton coulé en place creusée dans une niche derrière le versant. (Figure 13).

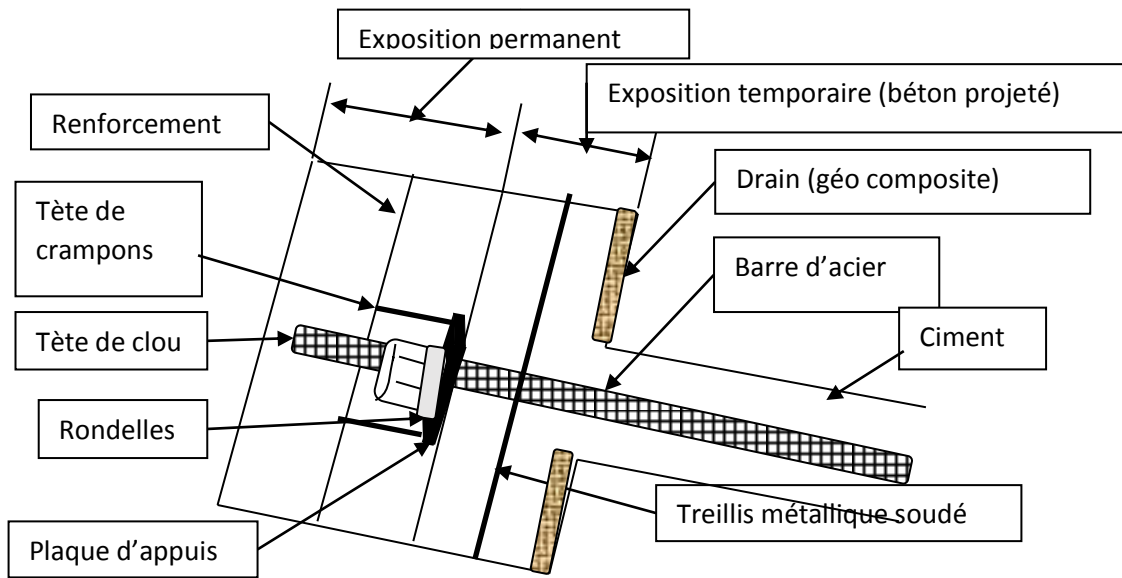


Figure 1.12 : Section transversale d'un mur de sol cloué



Figure 1.13 : Têtes de clous dans des niches [5]

1.6) Le revêtement de la pente

Le béton projeté est le type standard de revêtement dans les structures clouées au sol, contrairement à la plupart des murs de raccordement où du béton standard est utilisé, le béton projeté peut être appliqué par mélange sec ou humide. Pour les petits travaux, tels que les murs cloués au sol, le mélange sec est préféré (Figure 14),

L'épaisseur du parement varie entre 50 à 150 mm avec une ou deux mailles d'acier noyées dans le béton projeté. Les parements plus minces sont généralement utilisés sur les pentes

inclinées ; plus épais, pour les excavations verticales permanentes Ces dernières années, il y a eu un progrès considérable dans l'utilisation du béton projeté en fibre d'acier (SFRS), qui présente des avantages par rapport à l'utilisation de treillis de renfort.

Les fibres sont des éléments en acier à haute résistance à la traction ayant une longueur de 30 à 50 mm et un diamètre de 0,5 mm avec des extrémités à crochets qui sont mélangés dans le béton sous forme d'agrégat avec un dosage compris entre 35 et 60 kg/m³. Il peut être utilisé dans un mélange de béton pulvérisé sec ou humide. Les fibres n'ont aucun effet sur la résistance à la compression du béton, mais augmentent la ductilité, permettant de prendre en compte la résistance à la traction en flexion. Le produit SFRS final est un matériau homogène avec une résistance accrue aux fissures et à la corrosion.

Le SFRS économise de la main-d'œuvre pour le placement des mailles et économise le volume total de béton par rapport au béton projeté renforcé de mailles, le SFRS est conforme aux irrégularités de la surface du sol ou de la roche, économisant ainsi le volume total de béton, par rapport à l'utilisation d'un treillis en acier, Il est exclu que le SFRS remplacera la plupart des mailles en acier utilisées aujourd'hui pour la stabilisation des pentes et le clouage du sol, c'est une solution respectueuse de l'environnement apparaît dans les pentes inclinées où la végétation peut être combinée avec le renforcement du sol au moyen de clous, comme dans le cas représenté sur la figure 15.

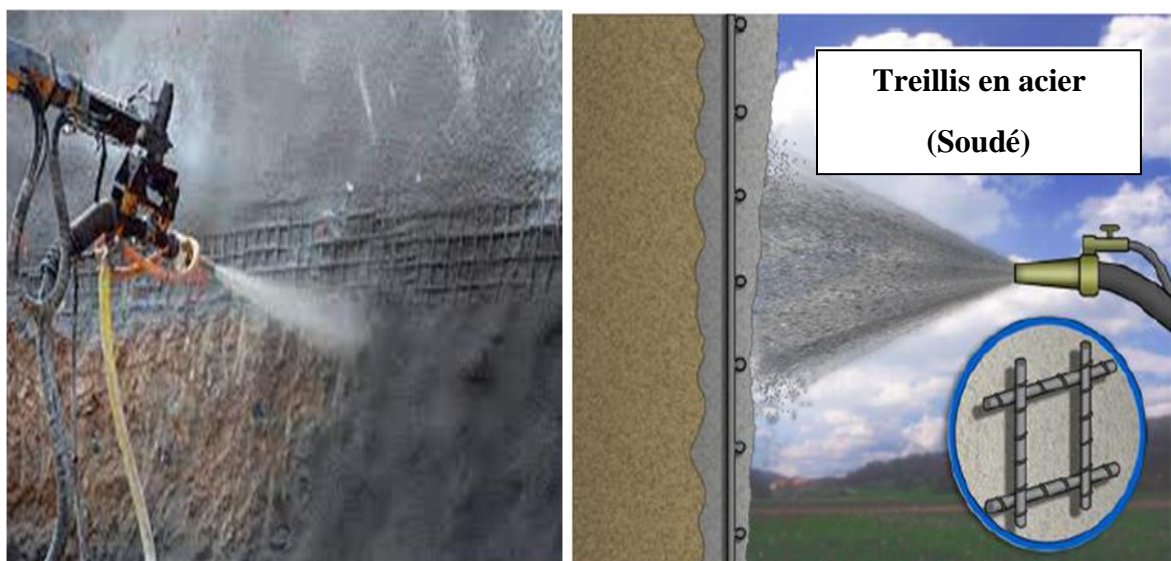


Figure 1.14 : application de béton projeté avec treillis soudé



Figure 1.15 : application de béton projeté mélangé avec des fibres d'acier

1.7) Avantages du clouage du sol

Le clouage du sol présente les avantages suivants qui ont contribué à la généralisation de cette technique dans plusieurs pays :

-Économie : l'évaluation économique de quelques projets a permis de conclure que le clouage du sol est définitivement une technique rentable par rapport aux autres techniques de renforcement.

-Taux de construction : des taux de construction rapides peuvent être atteints si un équipement de forage adéquat est utilisé. Le béton projeté est également une technique rapide pour la mise en place du parement.

-Inclinaisons de parement : comme mentionné précédemment, l'utilisation de béton projeté s'adapte facilement à un parement incliné, avec des avantages pour la stabilité globale, l'inclinaison vers l'arrière du parement réduit également les pertes de béton projeté dues au rebond.

-Comportement à la déformation : l'observation de structures clouées réelles a montré que la déformation horizontale au sommet du mur varie de 0,1 à 0,3 % de la hauteur du mur pour des murs bien conçus.

-Flexibilité de conception : une paroi souple clouée au sol peut être intégrée avec des ancrages au sol afin de limiter les déformations au voisinage des structures ou fondations existantes.

-Fiabilité de conception dans les sols meubles : les sols meubles présentent fréquemment des surfaces fragiles reliques qui peuvent ne pas être détectées lors de l'étude du site (Fig. 16). Le clouage du sol sur ces surfaces peut entraîner un facteur de sécurité et une fiabilité accrus, par rapport à d'autres solutions de stabilisation.

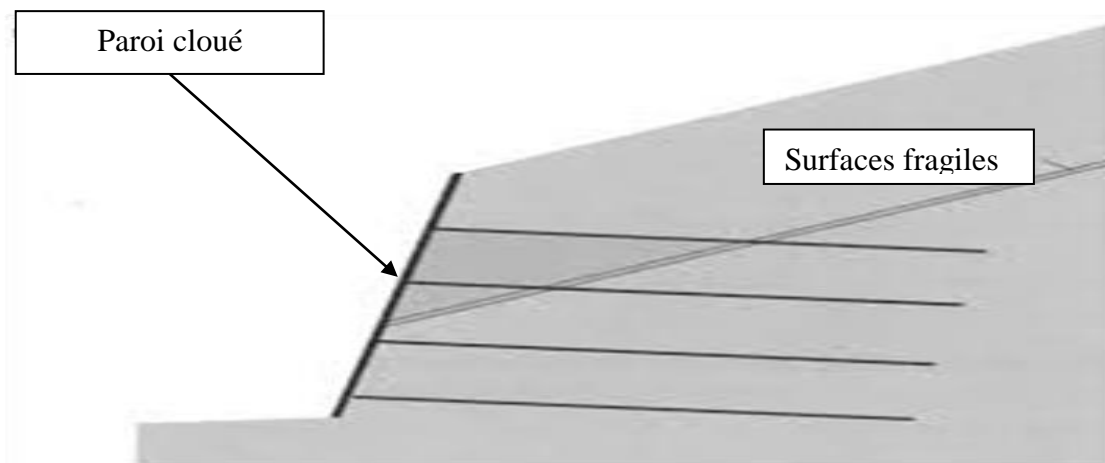


Figure 1.16 : renforcement du plan faible par clouage [5]

1.8) Exemples de clouage du sol

Clouage du sol au Brésil a eu lieu en 1970 à un portail de tunnel (figure 17) à São Paulo,

-Mur de 35 m de haut à la plage décarrai, Niterói, RJ

En 1984, à la plage décarrai, près de Rio de Janeiro, une tranchée verticale de 35 m de haut dans des saprolites de gneiss (figure 18) a été construite pour la construction d'un immeuble d'appartements de grande hauteur. Un mur d'ancrage avec des ancrages au sol soutenait les 18 m inférieurs de la tranchée. La paroi supérieure consistait en une structure clouée au sol inclinée de 75° vers l'arrière avec des clous en barre d'acier de 6 à 9 m de long et 25 mm de diamètre dans des trous de forage de 90 mm de diamètre. L'espacement était de 1,5 m dans les deux directions verticale et horizontale. Le parement en béton projeté avait une épaisseur de

150 mm, renforcé par deux treillis en acier. A la fin de la construction, quelques fissures ont été observées en crête de talus. Ils ont été remplis de coulis de ciment et aucun signe supplémentaire de déformation n'a été observé.

-Stabilisation de talus à la culée d'un pont ferroviaire, São Paulo, Brésil

La figure 19 montre une culée de pont ferroviaire de 26 m de hauteur qui a été stabilisée par clouage.

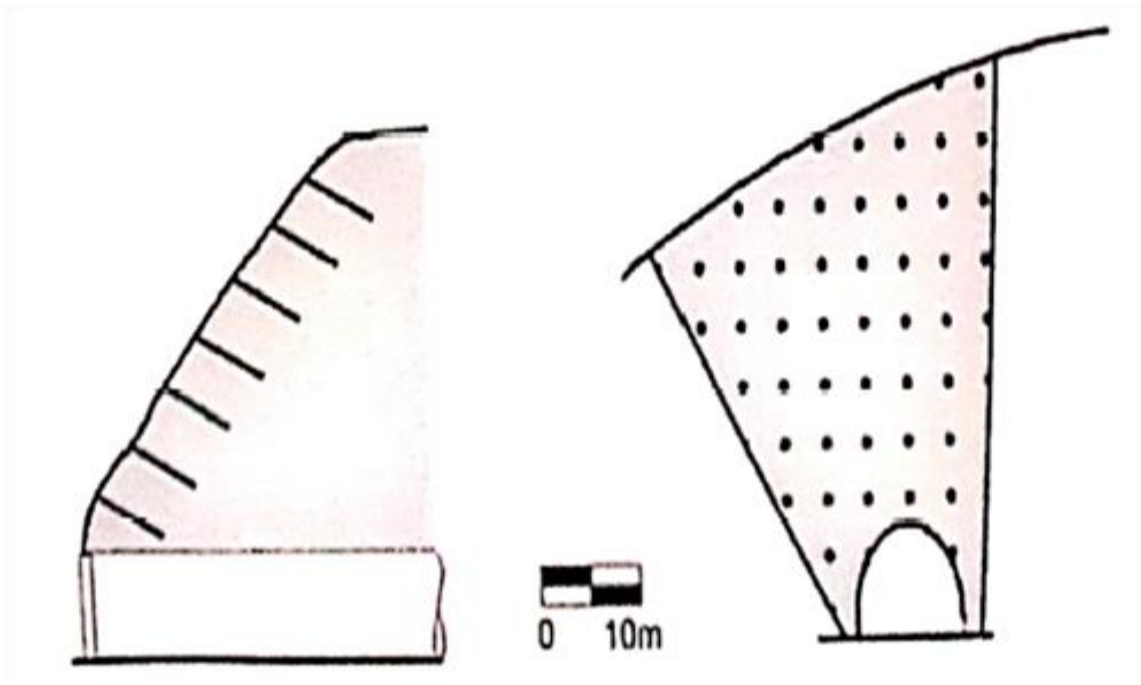


Figure 1.17 : première pente de clouage du sol au Brésil construite en 1970. [5]

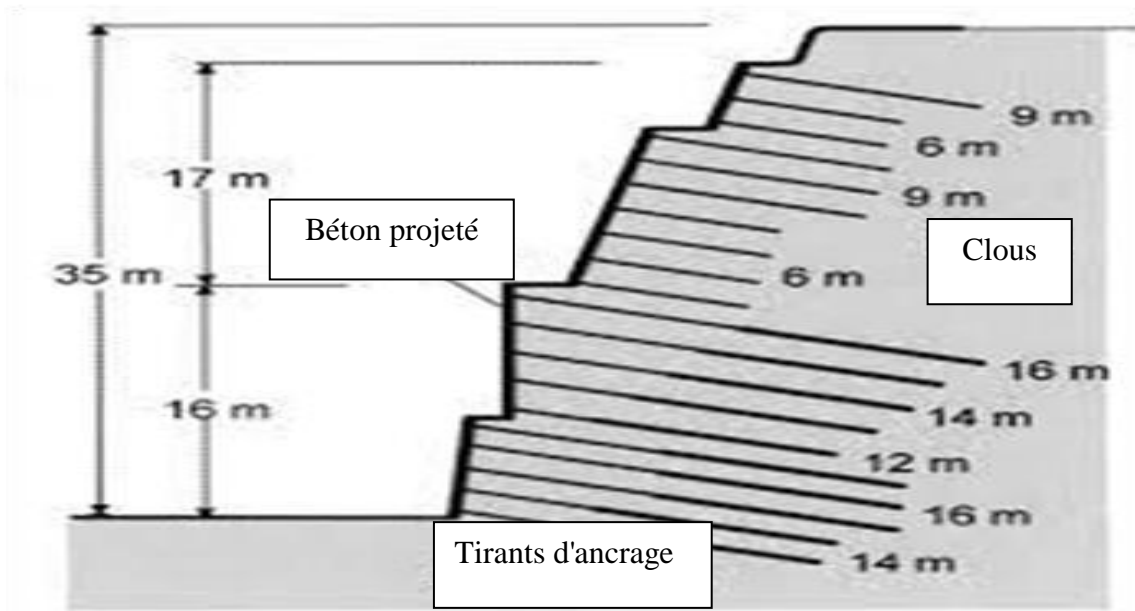


Figure 1.18 : Mur mixte pour stabiliser une pente artificielle derrière un bâtiment, Niteroi, Brésil. [5]

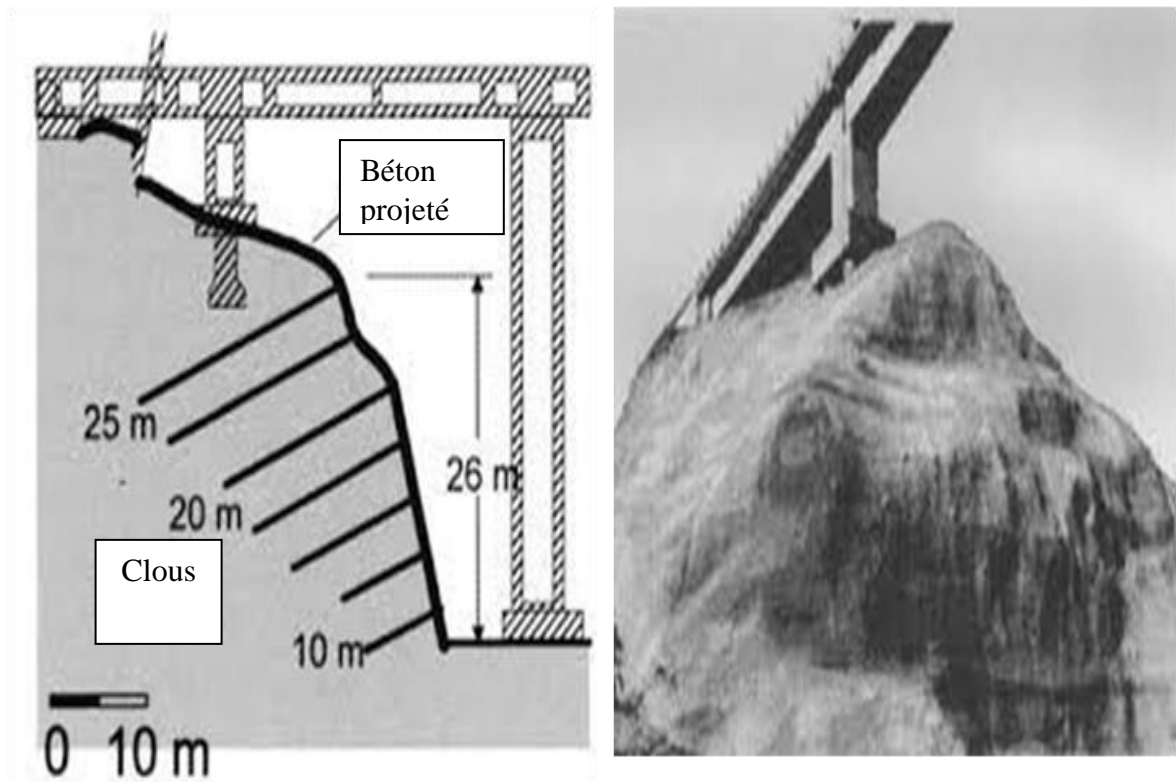


Figure 1.19 : stabilisation de talus par clouage à une culée de chemin de fer, Sao Paulo, Brésil. [5]

-En Algérie, le clouage des sols est aussi pratiqué dans le domaine des travaux public, un glissement survenu à la cité de béni Malek (à SKIKDA) , ou un glissement de terrain s'est produit sur une partie de la route, mettant en danger plusieurs constructions environnantes,



Figure 1.20 : un glissement de terrain s'est produit sur une partie de la route et les travaux pratiquement achevés.

1.9) Conclusion

Le clouage parmi les techniques des renforcements des sols, qui utilisé pour améliorer des propriétés mécaniques de ces sols par la mise en place d'inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion et qui peut être utilisé soit pour la réalisation de massifs de soutènement, en déblai, soit pour le renforcement de talus existants.

Les connaissances bibliographiques sur le clouage des sols, et les procédés de construction de la paroi clouée, pour objectif de présenter la technique des parois clouées, ses fondements, la formulation du béton projeté ainsi que les techniques de mise en œuvre, des règles de chantier strictes, concernant la projection du béton pour le parement et le scellement des clous doivent être observées, Pour ces raisons, il est logique de concevoir que la mise en œuvre d'un chantier de clouage soit confiée à une entreprise compétente spécialiste de cette méthode.

Le clouage apparait être une méthode d'avenir. Souple d'emploi, elle s'applique à de nombreux sites et présente par rapport à ses concurrentes, un moindre coût et une installation de chantier plus réduite par rapport à d'autres techniques de renforcements. Mais il convient de garder à l'esprit que le clouage des sols est une méthode délicate, une mauvaise mise en œuvre peut entraîner la ruine prématurée ou même stopper la construction.

Chapitre 2 : Présentation en utilisant le code d'éléments finis (PLAXIS 2D)

2) Présentation du logiciel

Le logiciel PLAXIS est le logiciel d'éléments finis de référence en géotechnique dont le développement commença en 1987 à l'initiative du ministère des travaux publics et d'hydrologie des Pays-Bas. Son but initial était de créer un code éléments finis facilement utilisable en 2D pour analyser l'effet de l'implantation d'une digue fluviale sur les argiles molles des Pays-Bas. En quelques années, PLAXIS a été étendu à plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998, la première version de PLAXIS pour Windows est développée. Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années de développement le logiciel 3D PLAXIS Tunnel program est sorti en 2001. PLAXIS 2D est donc un programme en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan (déformation plane) ou axisymétrique. L'algorithme général du code PLAXIS consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les valeurs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

2.1) Code de calcul Plaxis

La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous.

Le code Plaxis de la société Plaxis est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé en bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériques de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code de calcul éléments finis Plaxis est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, élastoviscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements. Très fiable sur le plan numérique. Le manuel d'utilisation du code Plaxis présente une description détaillée du

logiciel. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données facile et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage).

2.2) les avantages et les inconvénients de la MEF

La MEF est généralement préférée par la majorité des ingénieurs, elle permet de calculer le FOS sans aucune connaissance des conditions de l'état initial et est donc souvent utilisé pour évaluer l'analyse de stabilité. Pour résoudre le FOS, estimations sur les distributions des forces internes (par exemple la capacité d'extraction) doivent être faites, contrairement aux approches EL, les méthodes d'éléments finis considèrent une relation contrainte-déformation. Le FOS est gagné par la réduction des paramètres (C et ϕ), y compris les avantages suivants :

- La surface de défaillance critique est détectée automatiquement
- aucune hypothèse sur la distribution des forces inter-tranches
- employable pour des conditions complexes

Un inconvénient majeur peut être le temps de calcul, cependant, en utilisant ordinateur performant, le temps de calcul peut être sensiblement réduit. La sélection d'un modèle de comportement approprié et des conditions aux limites est bien sûr nécessaire. Plusieurs recherches ont vérifié que les méthodes EL et EF donnent des FOS similaires, lorsque l'on considère de simples géométries avec des pentes de sol homogènes.

2. 3) Description et implémentations de Plaxis 2D

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

Pour les problèmes de stabilité de pente, le FOS est obtenu au moyen d'une routine de réduction ϕ -c, la méthode de réduction de la force est menée avec des forces mobilisées pour l'angle de frottement ϕ' et la cohésion c' . Une diminution incrémentale de $\tan\phi'$ et de cohésion c' est effectuée en supposant un critère de rupture de Mohr-Coulomb. Dans le code EF, le critère de résistance est réduit jusqu'à l'équilibre ne peut plus être maintenu et la structure se rompt.

Le FOS est régi par l'équation suivante :

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

2.3.1) Configuration et densité du maillage

Pour modéliser des couches de sol, deux types d'éléments sont disponibles dans PLAXIS 2D, à savoir des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds (Fig. 1). Le type d'élément influence la consommation de mémoire, la vitesse et la précision du calcul. S'assurer une grande précision.

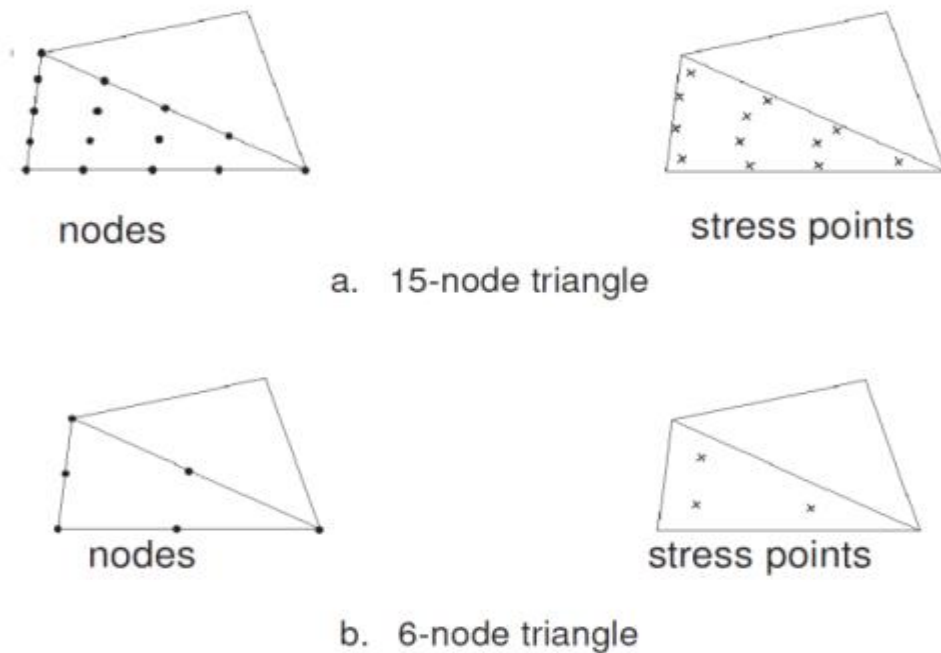


Figure 2.1 : Éléments Finis (FE) dans PLAXIS (Brinkgreve & et al., PLAXIS 2D 2015 - User Manual, 2015)

Dans PLAXIS, le maillage est généré automatiquement avec possibilité d'un raffinement de global et local. La densité du maillage est variée pour obtenir une précision appropriée et temps de calcul.

2.3.2) Modèle constitutif du sol

Pour la prédiction du comportement contrainte-déformation des sols, divers modèles de matériaux ont été développés. PLAXIS propose plusieurs modèles qui diffèrent par leur complexité et nombre de paramètres requis. Avec une 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 réalisées, l'utilisation du modèle de Mohr-Coulomb est suffisante. Ce modèle linéaire-élastique simple et parfaitement plastique satisfait également une comparaison avec les résultats MEL. Par rapport à d'autres modèles constitutifs du sol, un petit nombre de paramètres d'entrée est nécessaire. Paramètres élastiques (E , ν) et les paramètres plastique (c' , ϕ' , ψ') sont utilisés dans le programme.

2.3.3) Types de renforcement concernant la modélisation de sol dans PLAXIS 2D

2.3.3.1) Éléments d'interface

Les éléments d'interface sont utilisés pour modéliser les déformations relatives entre le sol et structure. PLAXIS utilise des formulations d'interface avec une épaisseur virtuelle. Si un l'élément de 15 nœuds de sol est utilisé, l'interface se compose de cinq paires de nœuds et la forme les fonctions sont compatibles avec les éléments du sol. Pour une évaluation des contraintes aux éléments d'interface, un schéma d'intégration Newton Cotes est mis en œuvre. Un schéma la visualisation des éléments d'interface est donné dans la Figure.2

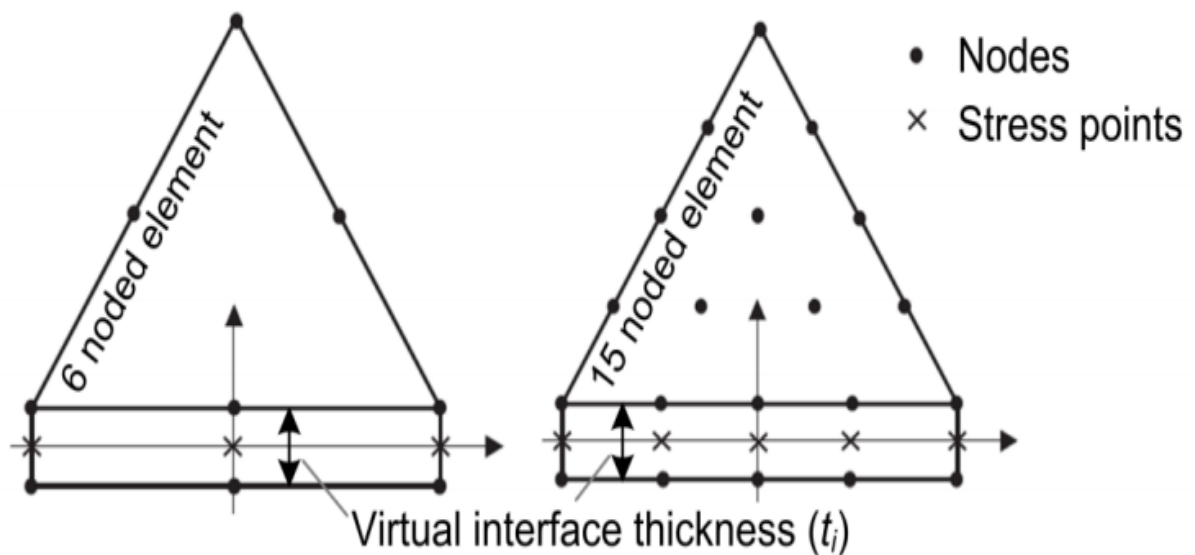


Figure. 2.2 : Interfaces utilisées dans PLAXIS 2D (Tschuchnigg F., 2013)

2.3.3.2) Éléments de géo grille (Geogrid)

Les éléments de géogrille représentent sont des éléments droits avec une rigidité axiale mais sans raideur de flexion. Par conséquent, ni la compression ni les moments de flexion ne peuvent être soutenus ; ça peut ne reçoivent que la traction. Pour modéliser une interaction appropriée entre le renforcement et le sol, la géo grille les éléments doivent être définis avec des éléments d'interface. Il y a un seul paramètre d'entrée, qui est la rigidité axiale (EA).

Les paramètres requis pour les géogrilles :

- Rigidité axiale d'entrée EA
- Sélection du modèle de rigidité isotrope/anisotrope
- Sélection du comportement élastique/élastoplastique.
- Force de traction axiale maximale N_p (en cas de comportement élastoplastique)

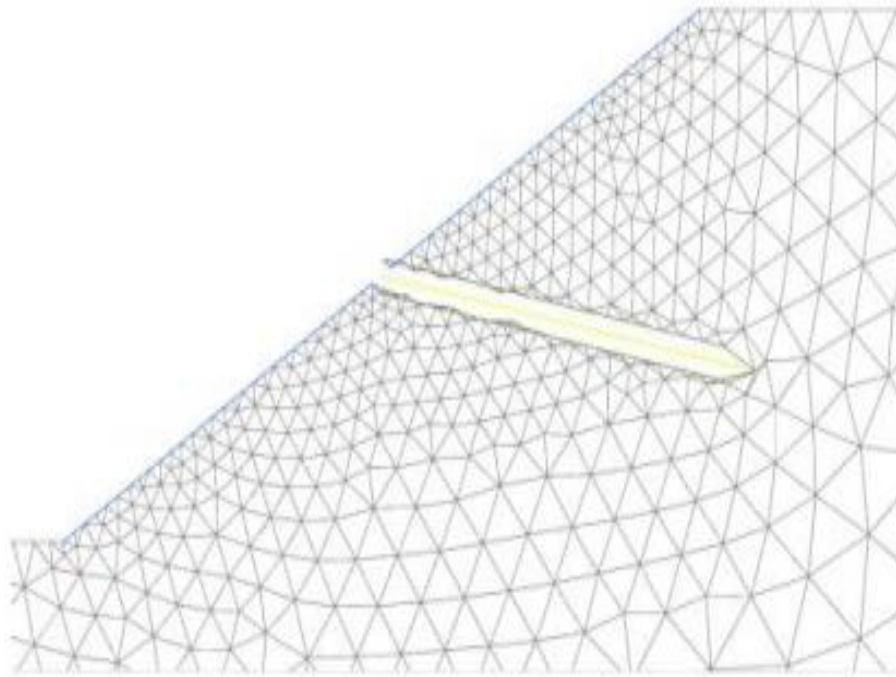


Figure 2.3 : Géo grille en combinaison avec des interfaces, tracée à partir de PLAXIS 2D

Si le comportement du matériau élasto-plastique du type de structure est sélectionné, l'entrée de la capacité de traction maximale (N_p) doit être saisie. Les contraintes sont redistribuées au sol adjacent si la traction maximale est dépassée.

2.3.3.3 Éléments en plaque (plate)

Les plaques ont des propriétés similaires à celles des géo grilles caractérisées ci-dessus. Ils sont aussi des éléments droits (linéaire), fournissant en outre une entrée de rigidité en flexion(EI). Semblable aux géogrilles, 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 la fin d'une assiette. Cette fonctionnalité est utile pour modéliser des pieux ou des parois moulées mais est inappropriée pour modeler les clous de sol, car ils n'agissent en général pas en compression.

Les caractéristiques requis pour les éléments de plaque :

- Rigidité à la flexion EI
- Rigidité axiale EA
- Sélection du modèle de rigidité isotrope/anisotrope

- Sélection du comportement élastique/élastoplastique
- Option d'appui d'extrémité (négligée pour la modélisation des éléments tendus)
- Force max de traction axiale N_p et moment fléchissant max M_p (en cas de comportement)

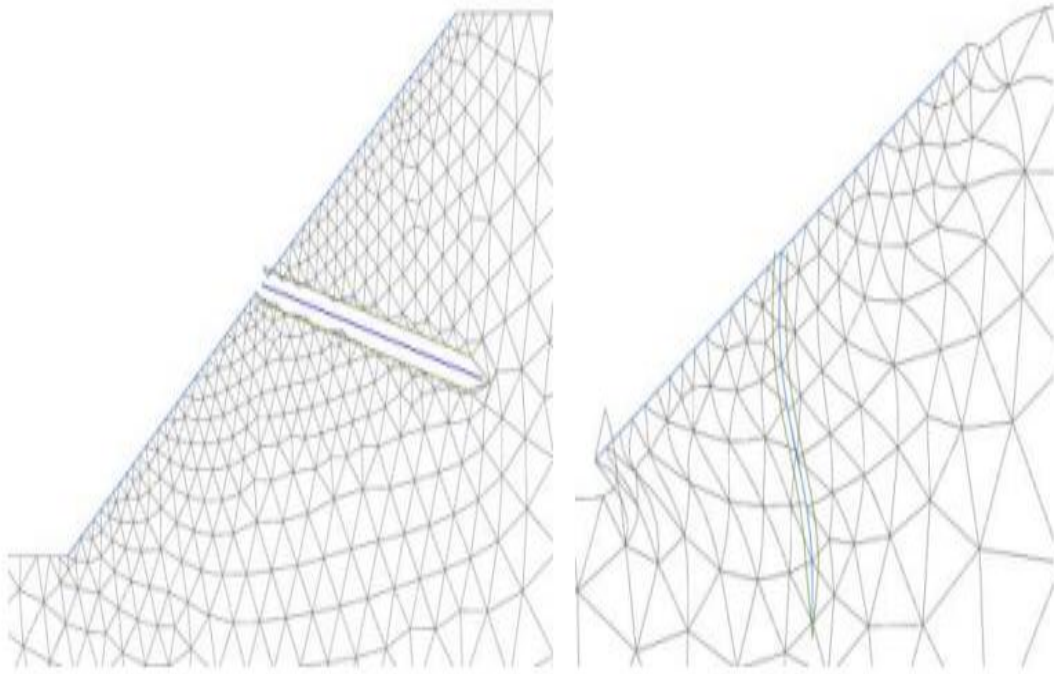


Figure 2.4 : Plaque en combinaison avec des interfaces, tracée à partir de PLAXIS 2D

Si le comportement du matériau élasto-plastique pour les plaques est choisi, la force axiale est limitée par N_p et le moment de flexion maximum est limité par M_p . Les contraintes sont redistribuées dans le sol adjacent si les limites sont atteintes.

2.3.3.4) Rangées de poutres encastrées (RPE)

Cette nouvelle fonction dans PLAXIS est implémentée pour simuler une rangée de barres avec une distance hors du plan perpendiculaire à la zone du modèle. Pour cette raison, les poutres encastrées sont schématisées comme une rangée d'éléments structurels en 2D. La figure 6 illustre les principes de la rangée de poutres encastrées 2D.

L'RPE est capable de supporter les forces axiales et la flexion. En raison de l'utilisation de spécial interfaces ligne à ligne, les éléments ne sont pas directement couplés au maillage. Les interfaces ligne à ligne se composent d'éléments à ressort et de curseurs (Figure 7), qui permettent un maillage continu (la terre peut s'écouler à travers l'RPE) et la prise en compte de la peau la résistance. L'image de droite pour (la Figure 5) (tracé de maillage déformé) montre que le clou et le sol peut se déplacer indépendamment.

Avec une interface point à ligne, une résistance de base peut être simulée (négligeable pour le sol clous). La capacité portante en direction axiale de la poutre est assurée par la peau (Tskin) et la résistance de pointe (Fmax). Le comportement élastique, ainsi qu'élastoplastique peut être défini pour ce type d'élément. Avec l'introduction de nouvelles fonctionnalités dans PLAXIS 2D v2015, il est possible de manipuler la résistance latérale de l'RPE. Avec la manipulation des résistances latérales et axiales il est possible de permettre une prise en compte de la 3D effets.

Les paramètres requis pour les RPEs :

- Module de Young E
- Poids unitaire γ
- Diamètre D de la poutre
- Sélection d'un type de poutre (par exemple circulaire ou carrée)
- Sélection du comportement élastique/élastoplastique.
- Espacement hors plan L_s
- Force max de traction axiale N_p et moment fléchissant max M_p (en cas de comportement)
- Frottement latérale
- Résistance latérale T_{lat}
- Résistance de base F_{max}

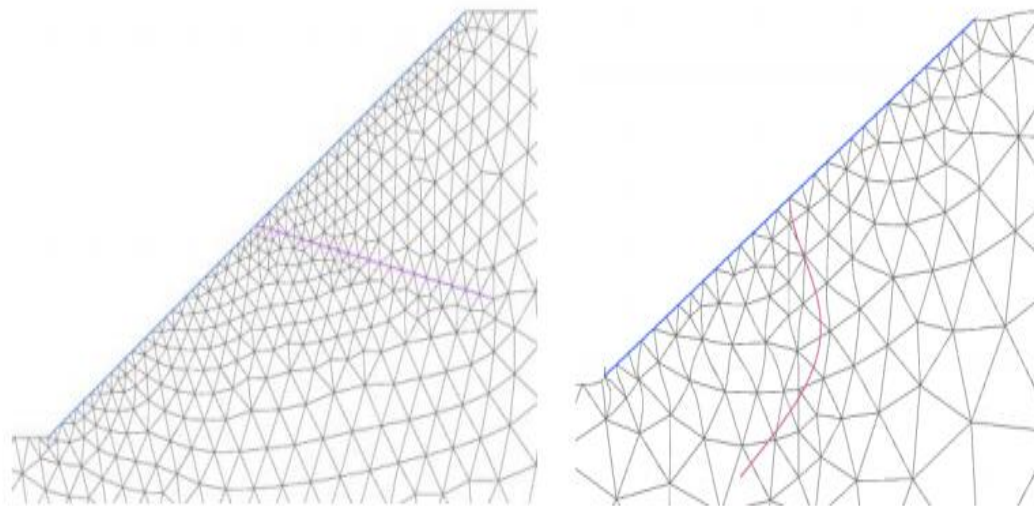


Figure 2.5 : RPE implémenté dans PLAXIS 2D, et maillage déformé

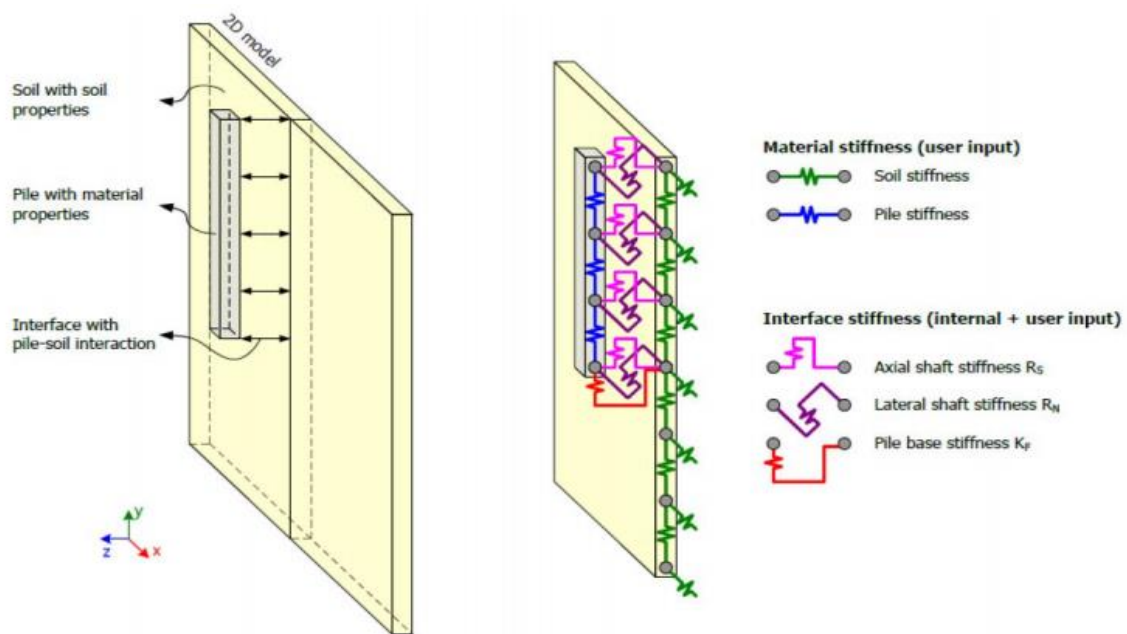


Figure 2.6 : Principe 2D de l'interaction d'une poutre encastree avec le sol (Sluis, 2012)

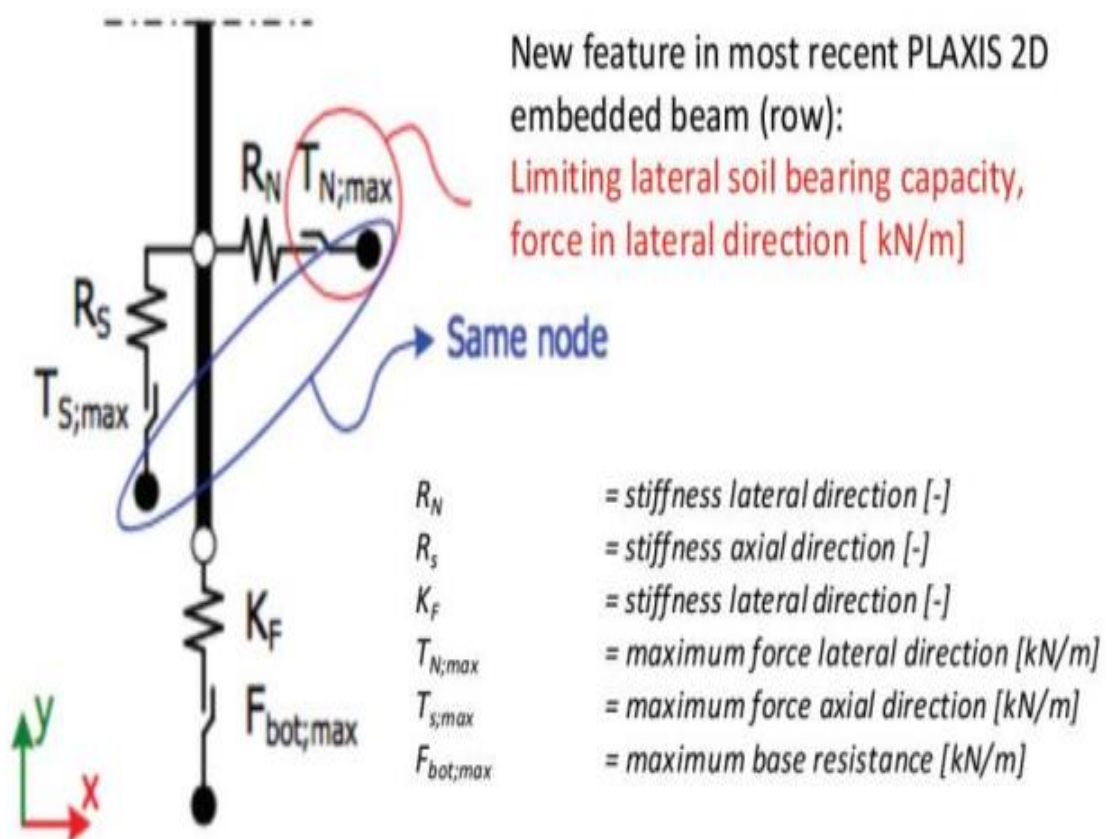


Figure 2.7 : Principe des interfaces (Sluis, 2012)

2.3.4) Phases de calculs

Les phases de calcul pour l'analyse de sécurité dans PLAXIS 2D se trouvent dans le Tab. Quatre phases sont calculées pour les études de cas. Puisque l'état initial est simulé avec une procédure K_0 et une géométrie non horizontale sont entrées, une étape est ajoutée.

Tab 2.1. Phases de calcul pour FOS_{FE} dans PLAXIS 2D

Phase nr	Phase ID	Calculation type	Loading type
Phase 0	Initial phase	K_0 -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

2.4) Les sous-programmes de Plaxis

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) :



a) 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.

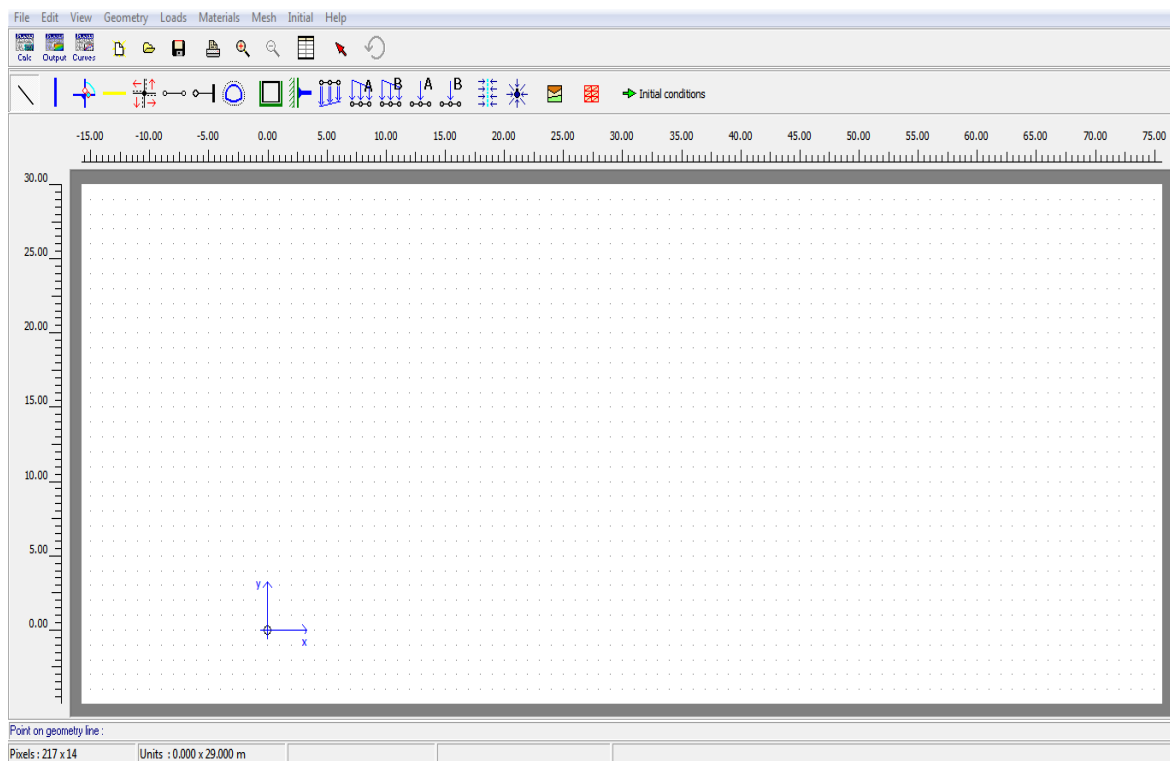


Figure. 2.8 : Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input)



b) Le programme de calcul (Calculate)

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.

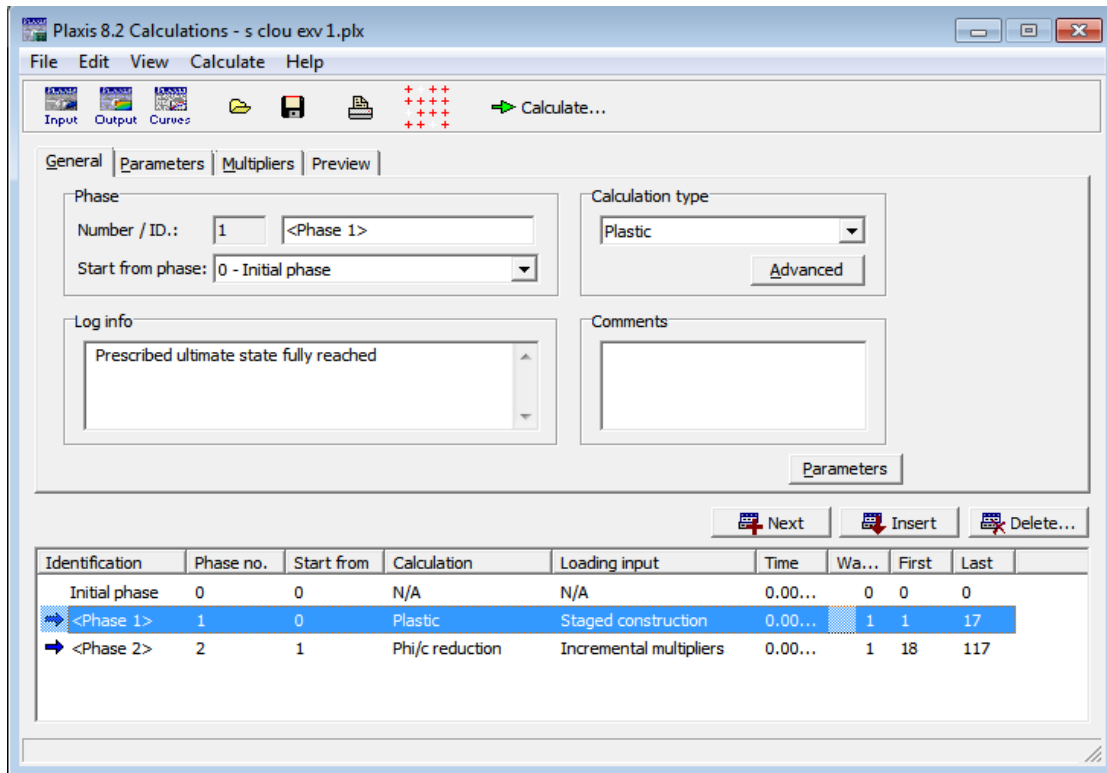


Figure. 2.9 : Fenêtre principale du programme de calcul.

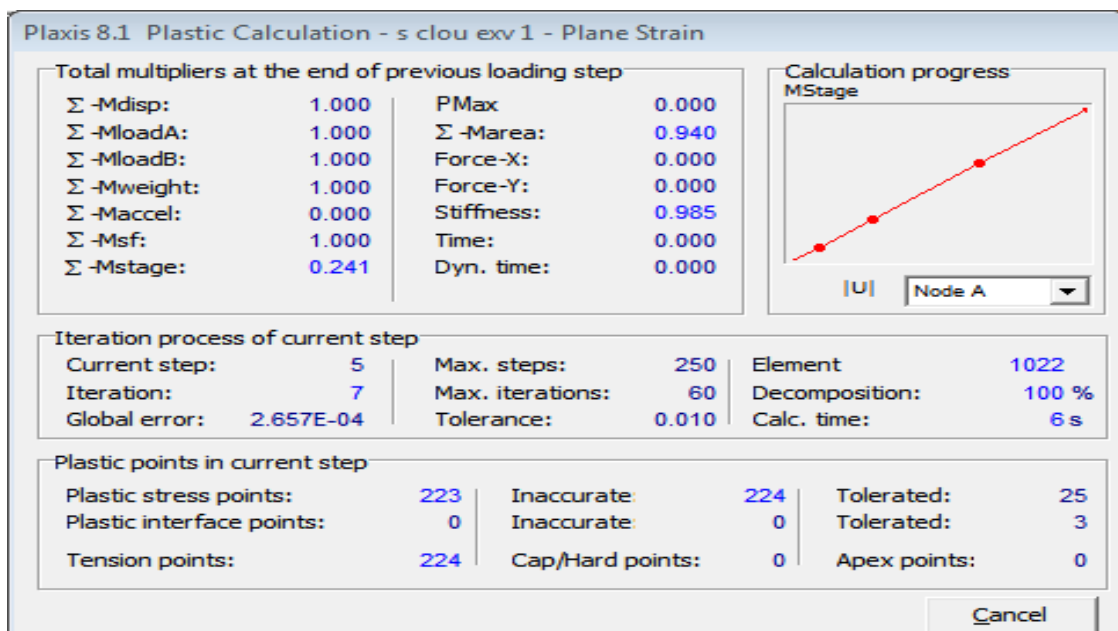


Figure. 2.10 : Fenêtre de calcul

RÉSULTATS

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points de contraintes. De plus, lorsqu'un modèle d'éléments finis inclut des éléments de structure, des efforts sont calculés dans ces éléments. Une vaste gamme d'outils est offerte par PLAXIS pour afficher les résultats d'une analyse aux éléments finis.

c) 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.

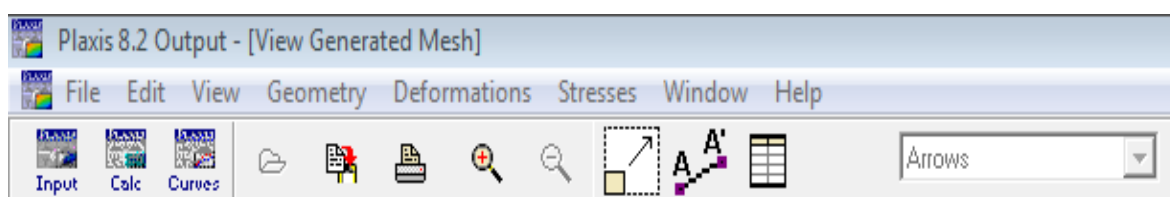


Figure 2.11 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme

d) Le programme courbes (Curves)

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes déformations. 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 Curves », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes,etc.)



Figure 2.12 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves.

2.5) Conclusion

Ce rapide tour d'horizon des différents modèles utilisés dans *PLAXIS* montre qu'il s'agit de modèles suffisamment simples pour qu'il soit possible d'en déterminer les paramètres avec une étude géotechnique classique ou avec des corrélations. Il n'y a dans ces modèles aucun paramètre de calage ou sans signification physique comme on en rencontre souvent dans des modèles sophistiqués. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation. Ces modèles appartiennent au domaine de recherche.

L'utilisateur doit se concentrer sur deux choix : l'un est inhérent à la géotechnique en général, l'autre concerne la simulation numérique.

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans *PLAXIS* n'est pas différente d'un choix de paramètres de calcul (*manuel*) pour un calcul de tassement ou de stabilité : à partir d'essais, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain. Certains des paramètres sont différents dans leurs expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le paramètre le moins courant est vraisemblablement l'angle de dilatance.

Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé : soutènement, tassement de remblai, fondation sur sol en pente, tunnel : quel modèle de comportement utiliser pour quel problème géotechnique ?

La question n'est pas simple car il n'existe pas de modèle universel.

Chapitre 3 : COMPARAISON EN UTILISANT LE LOGICIEL PLAXIS

3) Introduction de chapitre

Ce chapitre porte sur la méthode utilisée pour l'analyse de la stabilité des pentes, Une tentative a été faite pour mettre en évidence les différences dans les résultats de l'analyse de la stabilité des pentes renforcées obtenus à partir de PLAXIS 2D (basé sur les éléments finis). L'analyse est effectuée sur deux angles de pente de 45° et 60°, qui sont renforcés avec des clous à trois inclinaisons différentes de 0°, 15° et 30° respectivement. Les angles de pente et toutes les inclinaisons des clous sont tirés de l'horizontale, une étude comparative avec les résultats donnés de l'exemple de calcul de (**Rawat et Gupta, 2016**), sur les paramètres de stabilité tels que le facteur de sécurité, les surfaces de glissement critiques et les forces sur clous.

3.1.) présentation

Le clouage du sol est devenu une technique efficace d'amélioration du sol, en particulier en cas d'instabilité des pentes. Les pentes instables peuvent maintenant être améliorées et rendues stables par l'utilisation de la technique du clouage du sol. Ces talus renforcés doivent être analysés pour la stabilité et leurs méthodes de renforcement.

3.1.1) la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est également utilisée pour analyser la zone de rupture, la non-linéarité du sol et l'effet de construction par étapes afin de prédire les conditions réelles du site, la modélisation numérique des talus renforcés par la méthode des éléments finis s'est avérée très utile pour la prédiction de la déformation des talus, l'analyse des contraintes, la résistance à l'arrachement des clous, les forces du clou le long de la longueur du clou, les variations de force du clou avec la cohésion, l'angle de frottement et mouvement latéral de la pente, le calcul du facteur de sécurité par éléments finis est également possible en utilisant la méthode de réduction des paramètres de cisaillement.

Le procédé de réduction de la résistance est la réduction des paramètres de résistance (de ϕ et c) par le facteur de sécurité alors que les forces du corps en raison de la masse de sol et d'autres charges extérieures sont appliquées jusqu'à ce que le système ne peut pas maintenir un état stable, cette technique est également adoptée dans plusieurs programmes géotechniques commerciaux bien connus d'éléments finis ou de différences finies comme PLAXIS 2D, SNAIL, ANSYS, FLAC 2D, L'approche de réduction de résistance a également été utilisée pour résoudre des problèmes de stabilité pseudo-statique dans un matériau cohésif par friction.

La méthode des éléments finis (MEF) a été largement acceptée pour l'analyse de la stabilité des pentes, l'utilisation accrue de géométries complexes et de données matérielles a rendu l'analyse de nature non linéaire et itérative, PLAXIS 2D V8.1 a été utilisé dans l'étude

actuelle, dans ce logiciel, l'analyse MEF divise le continu en éléments distincts, chaque élément étant ensuite divisé en nœuds. Les inconnues dans le problème avec un ensemble défini de conditions aux limites correspondent au degré de liberté avec des valeurs discrètes pour chaque nœud, dans le présent travail, le degré de liberté des nœuds est lié aux composantes de déplacement, chaque élément de linéaire est divisé en trois nœuds auxquels sont attribuées des valeurs de déplacement, ces trois nœuds contribuent aux six nœuds du triangle, tandis que si l'élément de linéaire a cinq nœuds, il correspond au triangle à 15 nœuds, les triangles à 15 nœuds donnent des résultats plus précis que ceux à six nœuds, dans les cas impliquant des clous, des ancrages ou des géo grilles.

Dans l'analyse de réduction de résistance, le critère de convergence est le facteur le plus critique pour l'évaluation du facteur de sécurité. La méthode de réduction de la résistance, également connue sous le nom de méthode de réduction $\phi - c$, est réalisée en effectuant un nombre d'étapes d'avancement de la charge. La réduction des paramètres de résistance est effectuée en utilisant un multiplicateur incrémental M_{sf} . Le facteur de sécurité est calculé par l'expression :

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Contrainte de cisaillement disponible</p> <p>FOS: $\frac{\quad}{\quad}$</p> <p>Contrainte de cisaillement mobilisé</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>= valeurs de $\sum M_{sf}$ (rupture)</p> </div> </div>
--

3.2) modélisation par logiciel (PLAXIS) d'éléments finis

3.2.1) Présentation de l'exemple traité

La modélisation numérique réalisée sur des pentes de sol clouées à différents angles de pente de 45° et 60° en utilisant des inclinaisons de clous de 0°, 15° et 30° avec l'horizontale a été réalisée. La comparaison du facteur de sécurité, des surfaces de glissement de rupture et des forces de clou sont étudiées et validées par les résultats expérimentaux.

La pente étudiée à une largeur de 25 m et une hauteur de 15 m Le sol est constitué d'une seule couche de sable avec une cohésion de 13.7 kPa et un angle de frottement de 30°.

La géométrie du sol est montrée dans la Fig.3.1 ;

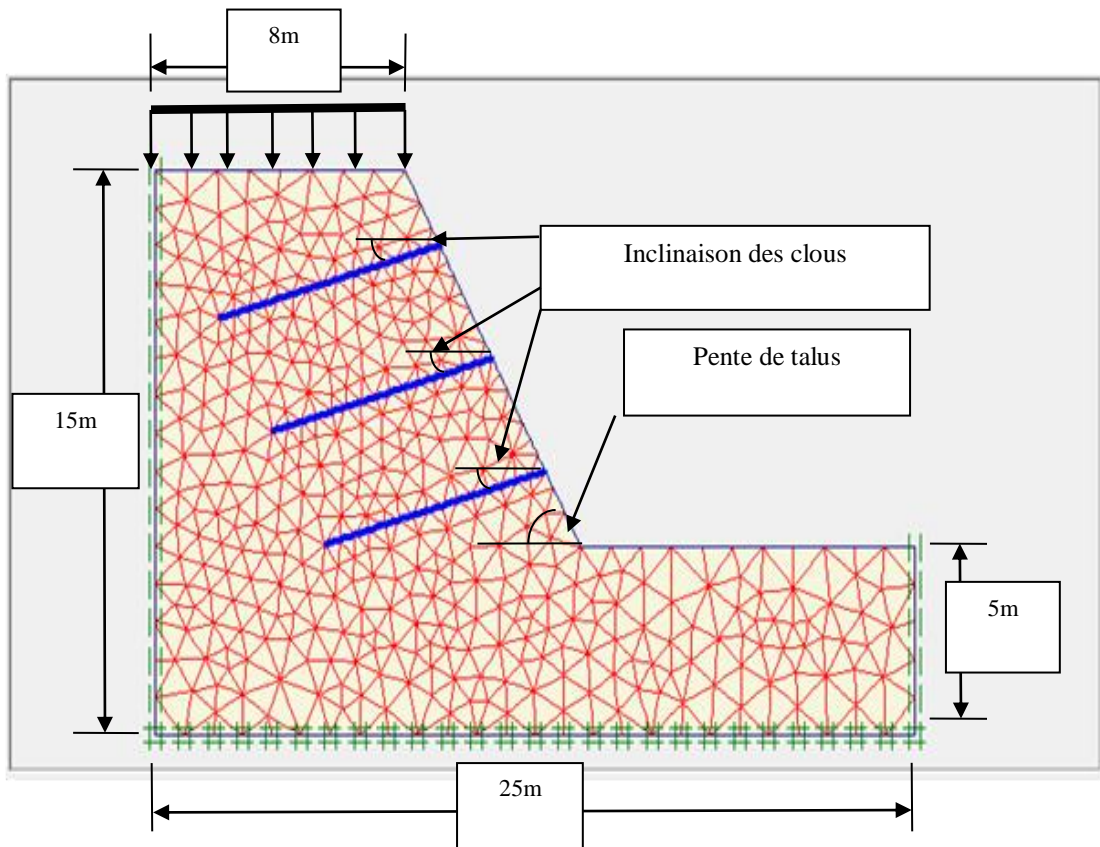


Figure 3.1 : Modélisation numérique de talus de sol renforcé dans PLAXIS 2D

-La modélisation des talus armés a été réalisée par la méthode des éléments finis. PLAXIS 2D considère la pente du sol en déformation simple avec une procédure de triangulation à 15 nœuds. Les dimensions du modèle sont similaires aux dimensions adoptées dans l'analyse. Les fixités standards sont utilisées pour simuler les conditions aux limites réelles du modèle de l'exemple, la base du modèle est restreinte dans la direction x-y, la limite latérale de la pente n'étant restreint que dans la direction x en utilisant la fixité standard, un modèle de Mohr-Coulomb avec un sol sableux bien calibré est utilisé pour simuler le modèle en MEF. Une condition de sol drainé est considérée avec la nappe phréatique positionnée à la base du modèle.

a) Propriétés des couches de sols et des interfaces :

Les propriétés des couches de sols et des interfaces sont résumées dans le tableau 3.1

propriétés	valeurs	unité
Model simulé	Déformation plane	-
Eléments	15-nœud	-
Model	Mohr-coulomb	-
Type de sol	drainé	-
γ_{unsat}	13.6	kN/m ³
γ_{sat}	19.68	kN/m ³
K_0	0.5	-
E_{ref}	50000	kN/m ²
ν	0.3	-
G_{ref}	115400	kN/m ²
$E_{\text{réf}}$	403800	kN/m ²
$C_{\text{réf}}$	1.37	kN/m ²
ϕ	30°	-
Ψ	0°	-

Tableau. 3.1 - Propriétés des couches de sols et des interfaces. [13]

b) éléments structuraux :

- clous : Pour les clous, on saisi les propriétés présentées dans le tableau 3.2 en choisissant les matériaux de type poutre (*plate*),

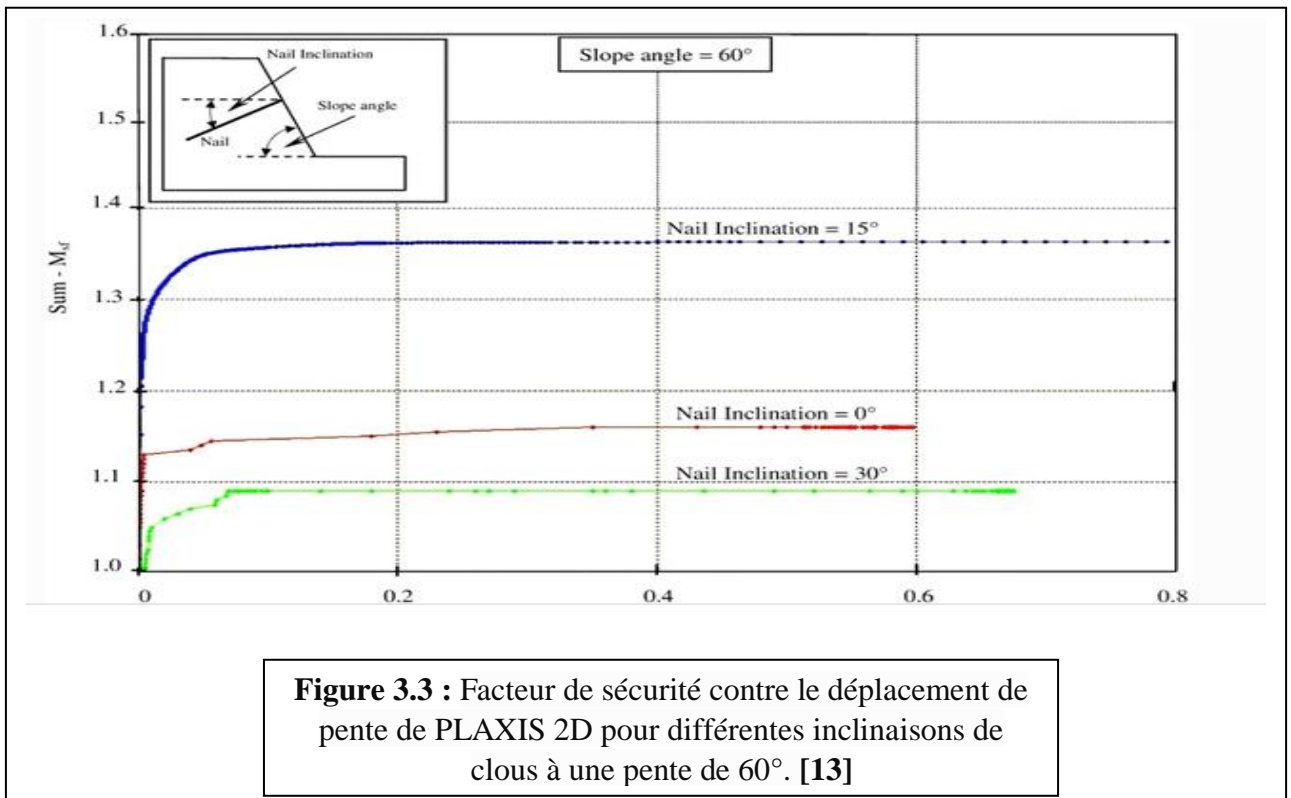
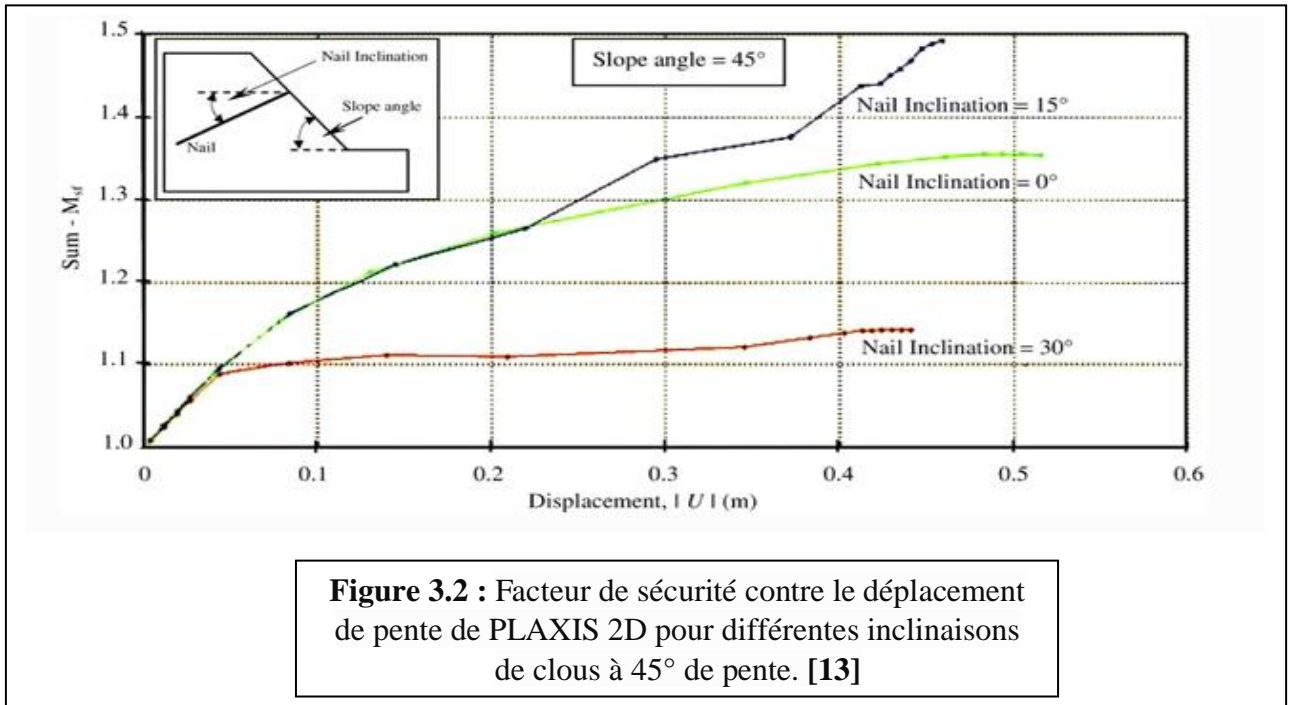
Paramètre	Nom	Valeur	unité
Type de comportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normal	EA	2.98×10^6	kN/m
Rigidité de flexion	EI	113.64×10^3	kN.m ² /m
Epaisseur équivalente	d	0.676	m
Longueur de clou	L	7.5	m
Coefficient de poisson	ν	0.35	-

Tableau. 3.2 - Propriétés mécaniques du clou/ciment. [13]

3.2.2) Résultats de la méthode (MEF) avec PLAXIS 2D (donné)

a) Facteur de sécurité :

Les figures suivantes représentent le Facteur de sécurité en fonction de déplacement de pente de PLAXIS 2D pour différentes inclinaisons de clous ;



-Les résultats de calcul de facteur de sécurité résumés dans le tableau suivant :

	Fos		
Inclinaison des clous(°)	0°	15°	30°
Pente de 45°	1.36	1.43	1.15
Pente de 60°	1.17	1.37	1.08

Tableau 3.3 : résultats de FOS (donné). [13]

b) Surface de glissement de PLAXIS 2D :

Les figures suivante représentent les surfaces de glissement de PLAXIS 2D pour différentes inclinaisons de clous ;

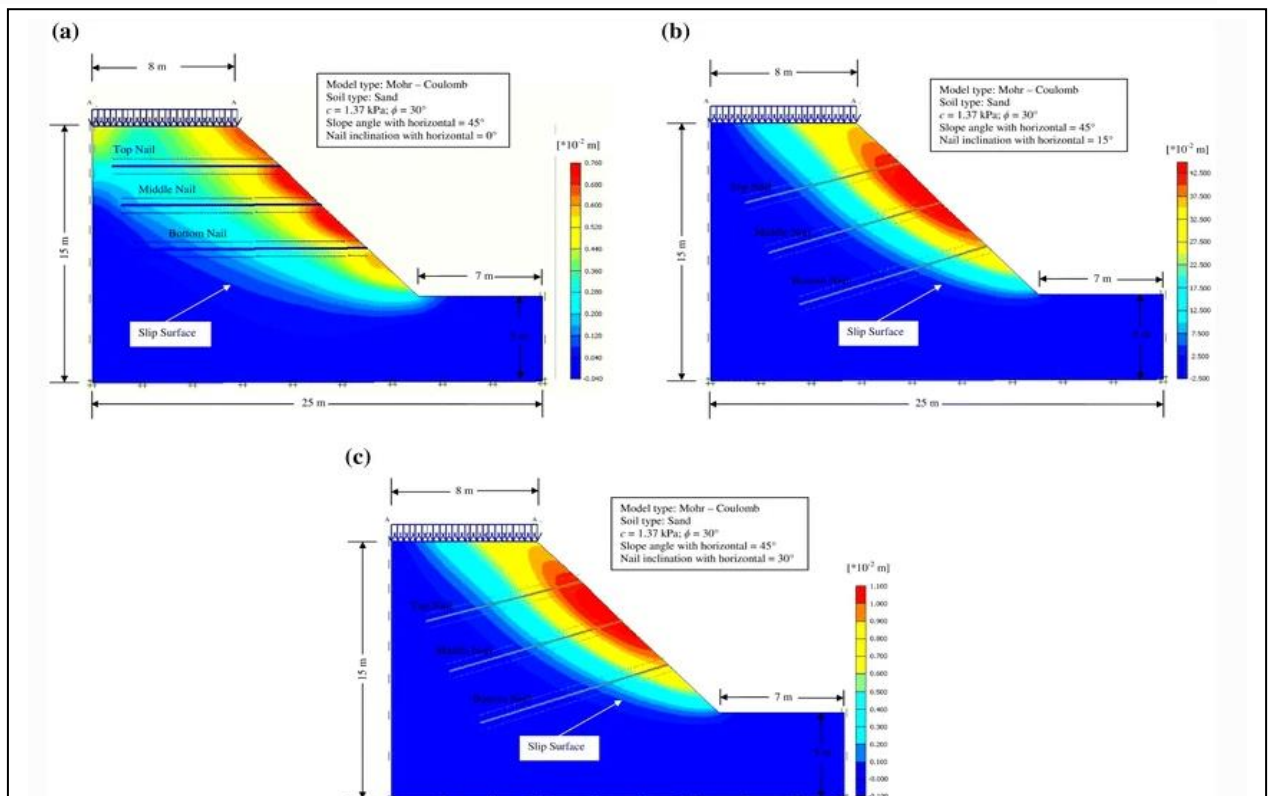


Figure 3.4 : (a) Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0°. (b) Surface de glissement à rupture pour un angle d'inclinaison de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 15°. (c) Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 30°. [13]

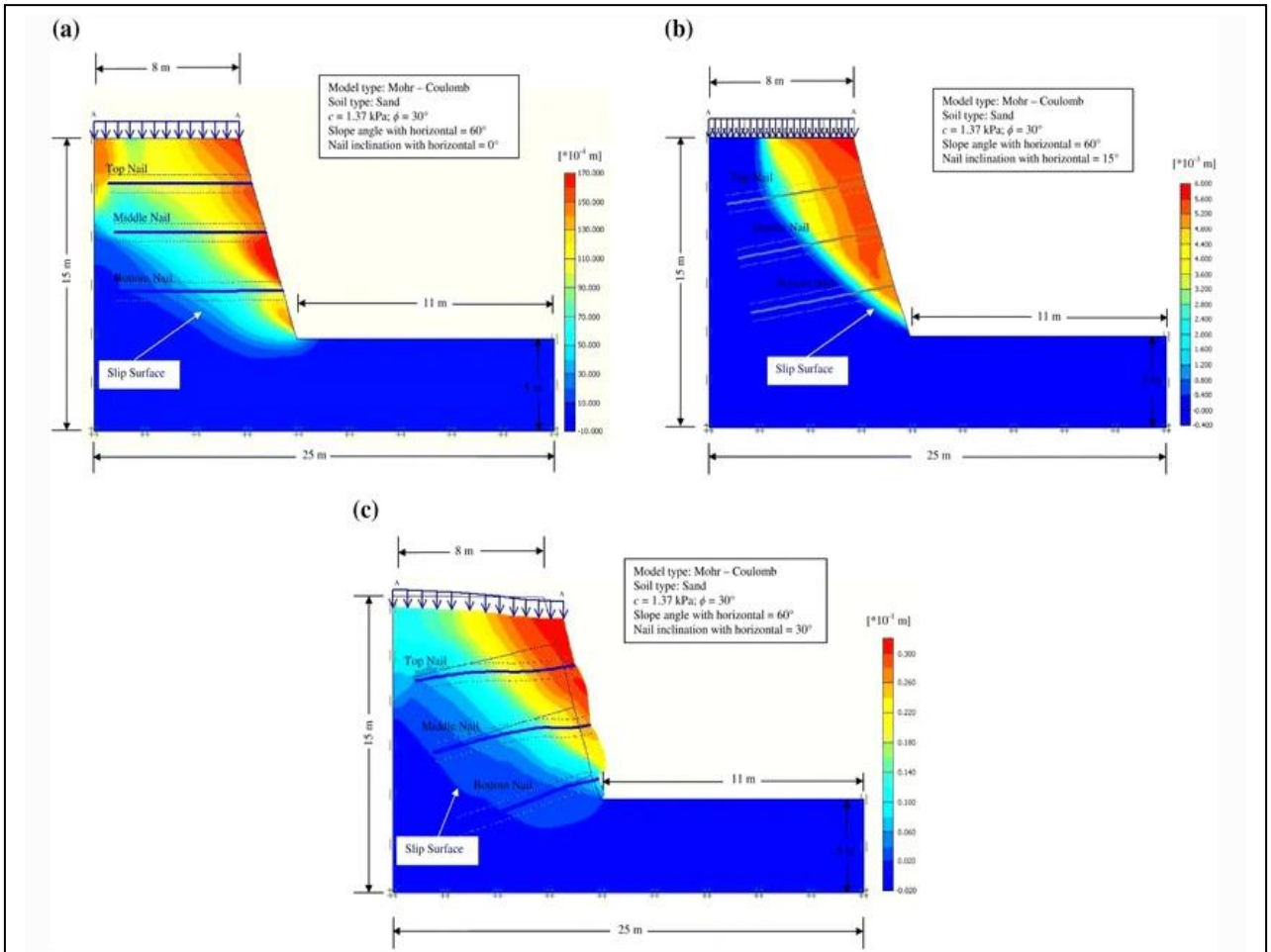


Figure 3.5 : (a) Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0° . (b) Surface de glissement à rupture pour un angle d'inclinaison de 60° de PLAXIS avec une inclinaison du clou de 15° . (c) Surface de glissement à rupture pour un angle d'inclinaison de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 30° . [13]

c) Forces axiales des clous de PLAXIS 2D

-Les résultats des forces axiales de la pente 45° et 60° résumés dans le tableau suivant :

Pente $\theta(^{\circ})$	45°			60°		
	0°	15°	30°	0°	15°	30°
Force sur clou supérieure (kN)	5.09	23.05	11.06	83.08	57.41	50.7
Force sur clou du milieu (kN)	31.07	47.1	21.08	49.05	124.68	64.68
Force sur clou inférieure (kN)	53.06	59.34	25.39	40.09	208.08	65.42

Tableau 3.4 : résultats de forces axiales sur clous (donné). [13]

-Les figures suivantes représentent les forces axiales sur toute la longueur des clous pour différentes inclinaisons de clous à 45° et 60° de pente.

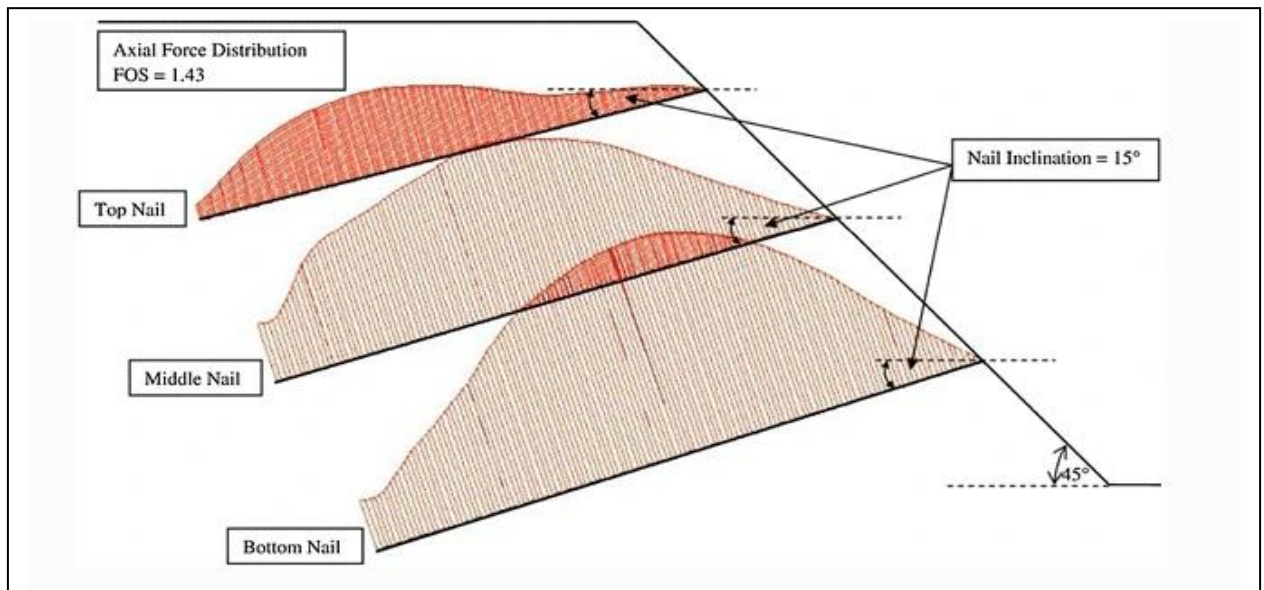


Figure 3.6 : Répartition de la force axiale du clou de PLAXIS 2D pour une pente de 45°. [13]

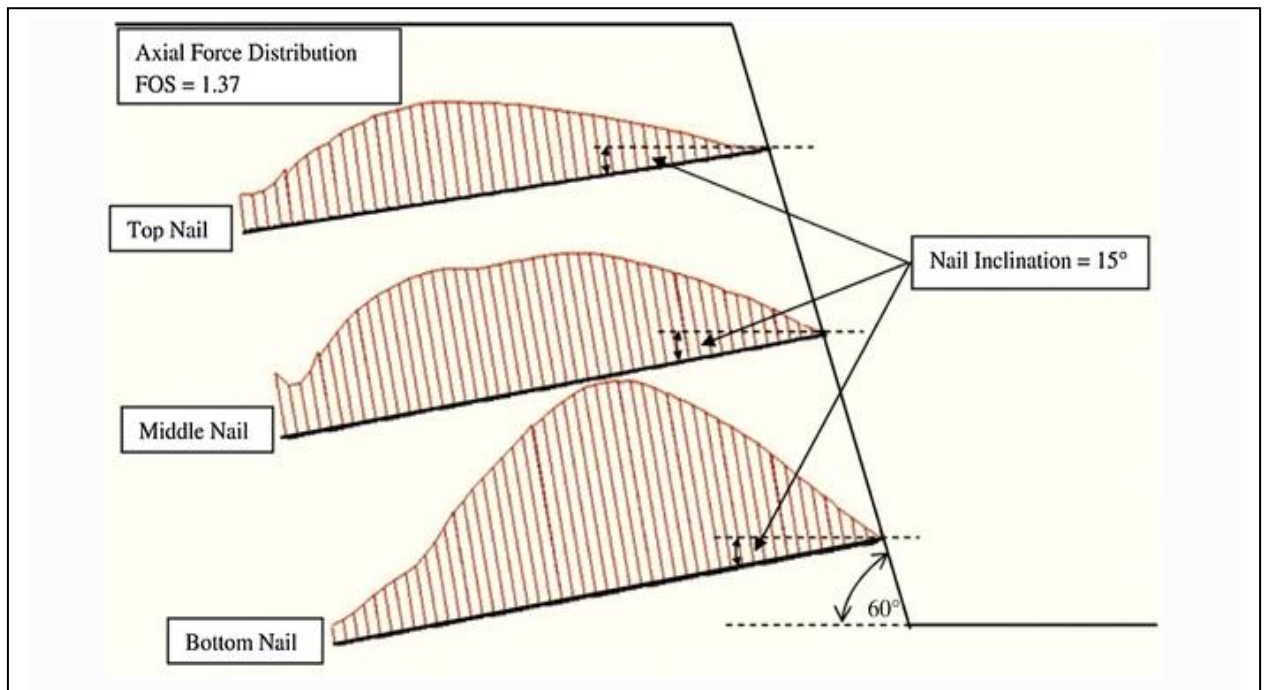


Figure 3.7 : Répartition de la force axiale du clou de PLAXIS 2D pour une pente de 60°. [13]

3.3) Les cas étudié :

- pente de 45° et 60° :
- avec des clous de 7.5 m de longueur
- inclinaison 0°,15°,30°.
- une surcharge de $q=0.294 \text{ kN/m}^2$

Remarque :

Dans notre calcule avec PLAXIS 2D on a rencontré un problème en utilisant les donnés de l'exemple (Rawat et Gupta, 2016), a la phase de calcule le sol ne résiste pas car le modèle traité est un sable avec une très faible cohésion $C=1.37 \text{ kPa}$,même avec l'effet de renforcement il na pas supporté la surcharge , il passe a la rupture directement surtout avec des pente 45°et 60°, donc on a fait un petit changement dans les paramètres de sol est amélioré le avec une petite augmentation dans la cohésion,

-La figure suivante montre le résultat obtenu par PLAXIS 2D en utilisant les donnés de l'exemple ;

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	F
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 ...	0	C
✘ <Phase 1>	1	0	Plastic	Total multipliers	0.00 ...	0	
➔ <Phase 2>	2	1	Plastic	Staged construction	0.00 ...	2	
➔ <Phase 3>	3	2	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0.00 ...	2	

Figure 3.8 : rupture de sole directement par PLAXIS 2D

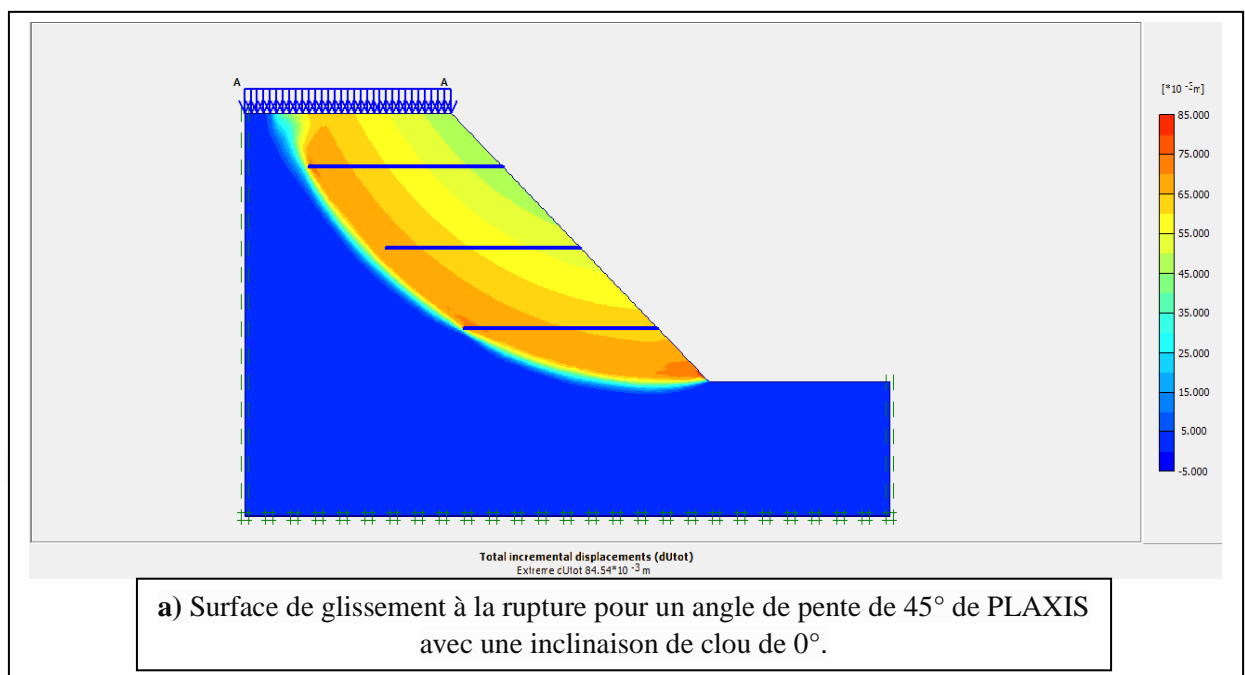
-Pour résoudre le problème on opte pour : $C=13.7 \text{ Kn/m}^2$ et on garde les autre donnés.

propriétés	valeurs	unité
Model simulé	Déformation plane	-
Eléments	15-nœud	-
Model	Mohr-coulomb	-
Type de sol	drainé	-
γ_{unsat}	13.6	kN/m^3
γ_{sat}	19.68	kN/m^3
K_0	0.5	-
E_{ref}	50000	kN/m^2
ν	0.3	-
G_{ref}	115400	kN/m^2
E_{ref}	403800	kN/m^2
C_{ref}	13.7	kN/m^2
\emptyset	30°	-
Ψ	0°	-

Tableau 3.5 : propriété de sole modifié

-Les figures suivantes représentent les Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 45° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0° 15° 30° .

(FIG 3.9) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (c) ;



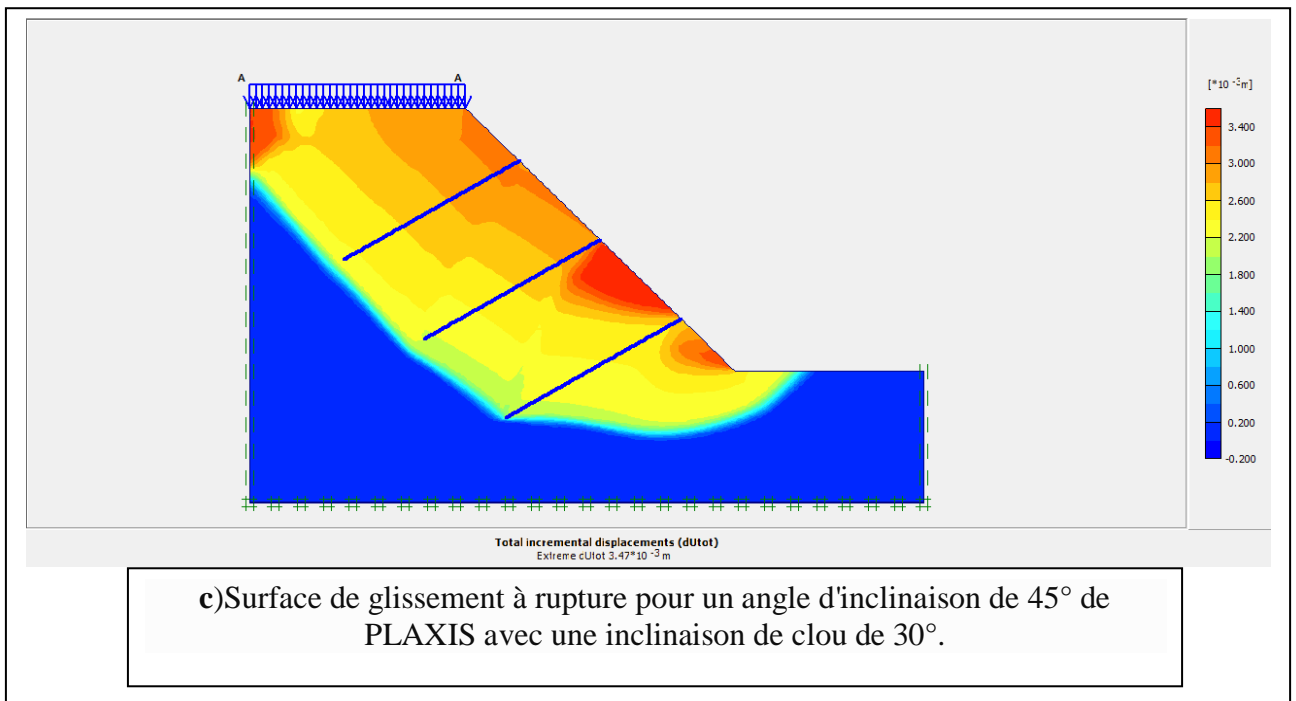
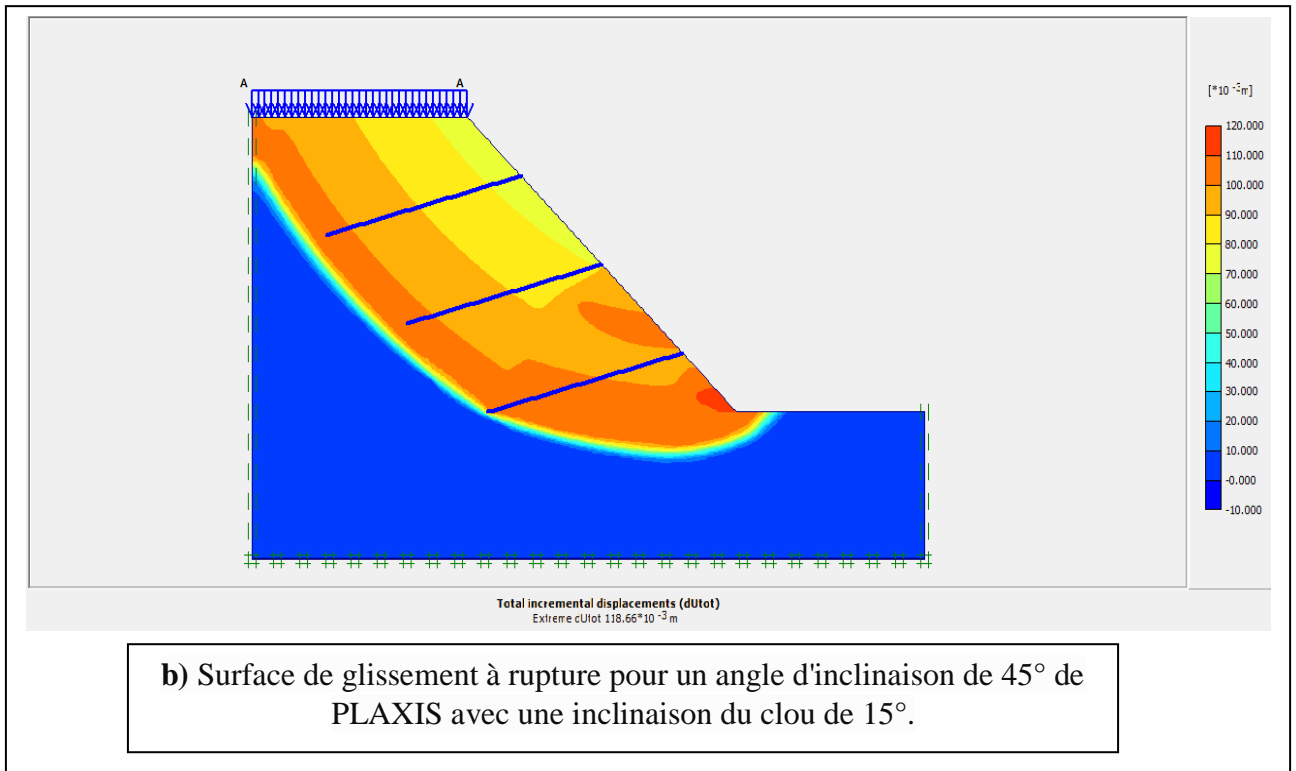
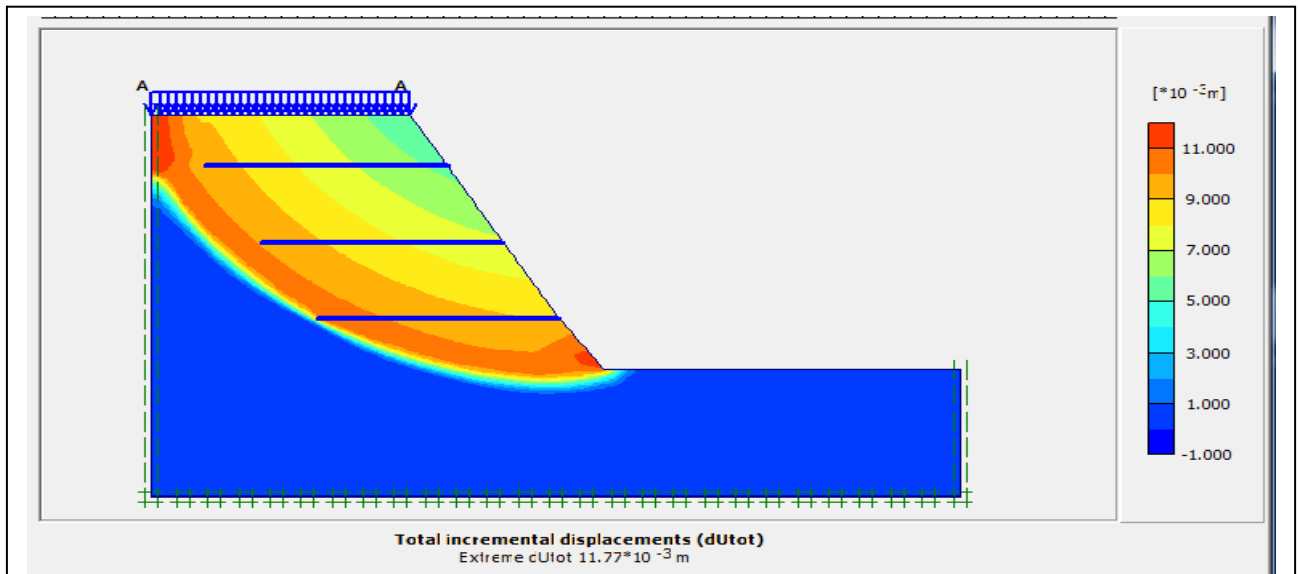


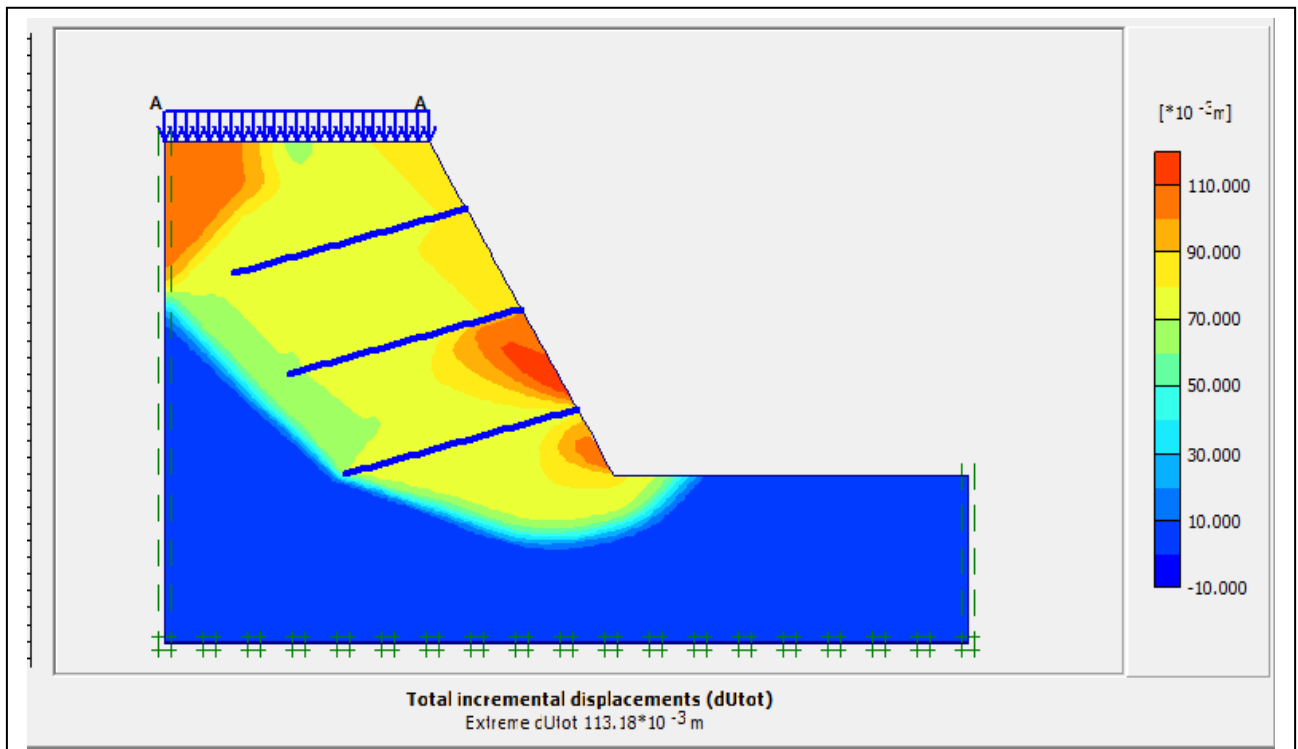
Figure 3.9 : représentation des surfaces de glissement avec PLAXIS 2D sur une pente de 45°

-Les figures suivantes représentent les Surface de glissement à la rupture pour un angle de pente de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0° 15° 30°.

(FIG 3.10) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (c) ;



a) Surface de glissement à rupture pour un angle de pente de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 0°.



b) Surface de glissement à rupture pour un angle de pente de 60° de PLAXIS avec une inclinaison de clou de 15°.

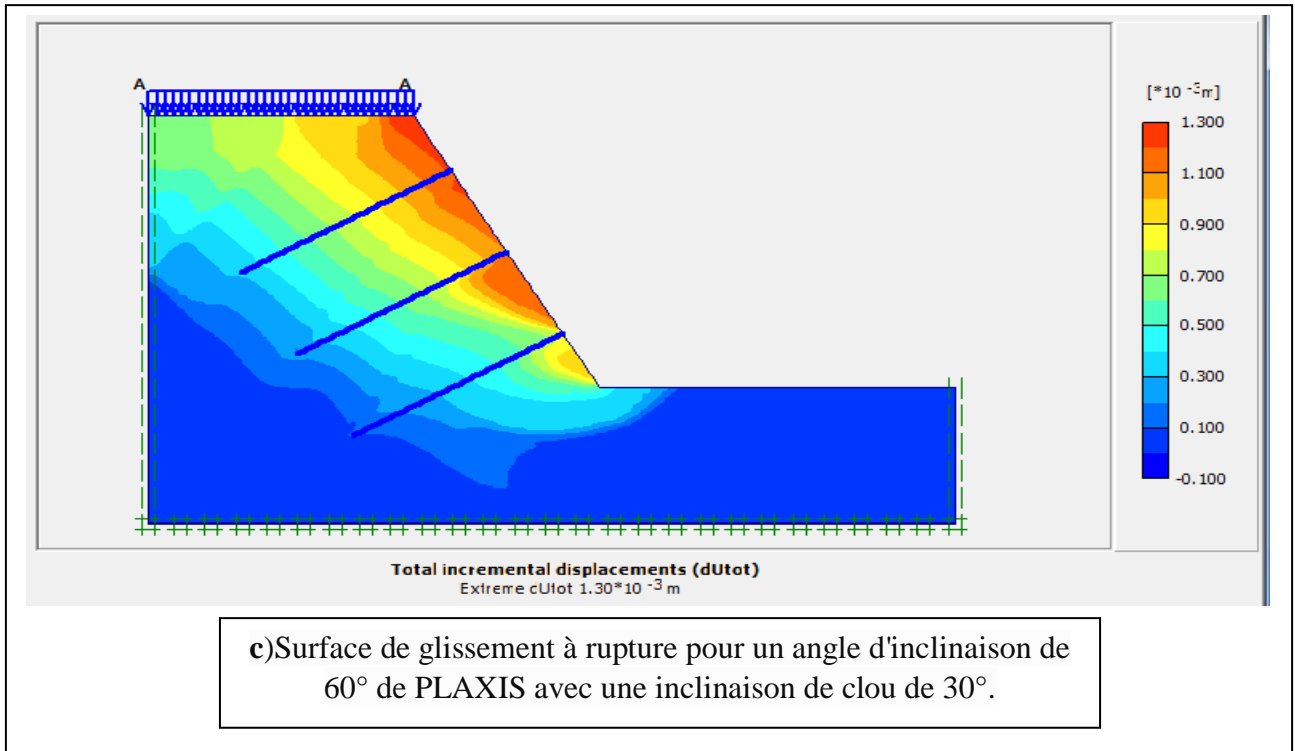


Figure 3.10 : représentation des surfaces de glissement avec PLAXIS 2D sur une pente de 60°

3.3.1) Pour les surface de glissement

À partir de l'analyse des pentes renforcées, il est observé que différentes pentes avec une inclinaison de clou variable subissent une rupture de surface de glissement non circulaire. Bien que ces surfaces de glissement varient avec le changement d'inclinaison de l'ongle.

-La figure 3.2(a) montre que l'analyse donne une surface de glissement circulaire a la face de la pente dans le cas d'un clou incliné à 0° pour une pente de 45° . Un modèle similaire de surfaces de glissement circulaires est obtenu à partir de la rupture d'une pente de 45° avec des inclinaisons de clou de 15° mais la zone de danger de glissement s'éloigne de la face de la pente et commence plus profonde a l'extrémité de la surcharge.

-On peut également observer à partir de la Fig3.2(b), les surfaces de glissement traversent les ongles avec des inclinaisons de l'ongle de 15° . Cependant, le déplacement horizontal maximal se trouve loin et plus profond de la face de la pente renforcée.

-la figure 3.2(c) montre une surface de glissement non circulaire passant à proximité immédiate de la face de la pente dans le cas d'un clou incliné à 30° pour une pente de 45° . et une partie plus sollicitée s'est déplacé sous la surcharge.

-Les résultats d'une pente à 60° montre un modèle de rupture différent de celui des pentes à 45° , on peut voir dans la figure 3.3(a) que pour une inclinaison de 0° du clou dans une pente

de 60°, il subit une surface de glissement circulaire et le déplacement horizontal maximal se trouve loin et plus profond de la face de la pente renforcée.

-la fig3.3(b) montre une surface de glissement non circulaire passant à proximité immédiate de la face de la pente dans le cas d'un clou incliné à 15° pour une pente de 60°. et une grande partie plus sollicitée s'est déplacé sous la surcharge.

- Pour la fig3.3(c) à l'inclinaison de clou 30°, une surface de glissement bien définie est obtenue à partir de l'analyse, le déplacement horizontal maximal se trouve près de la face de la pente renforcée. La surface de glissement provient de la crête de la pente et se termine au pied. Il peut être défini comme un type de rupture de surface de glissement non circulaire et non linéaire. On peut également observer que la surface de glissement a recoupé les clous lors de la rupture

3.3.2) pour les Facteurs de sécurité

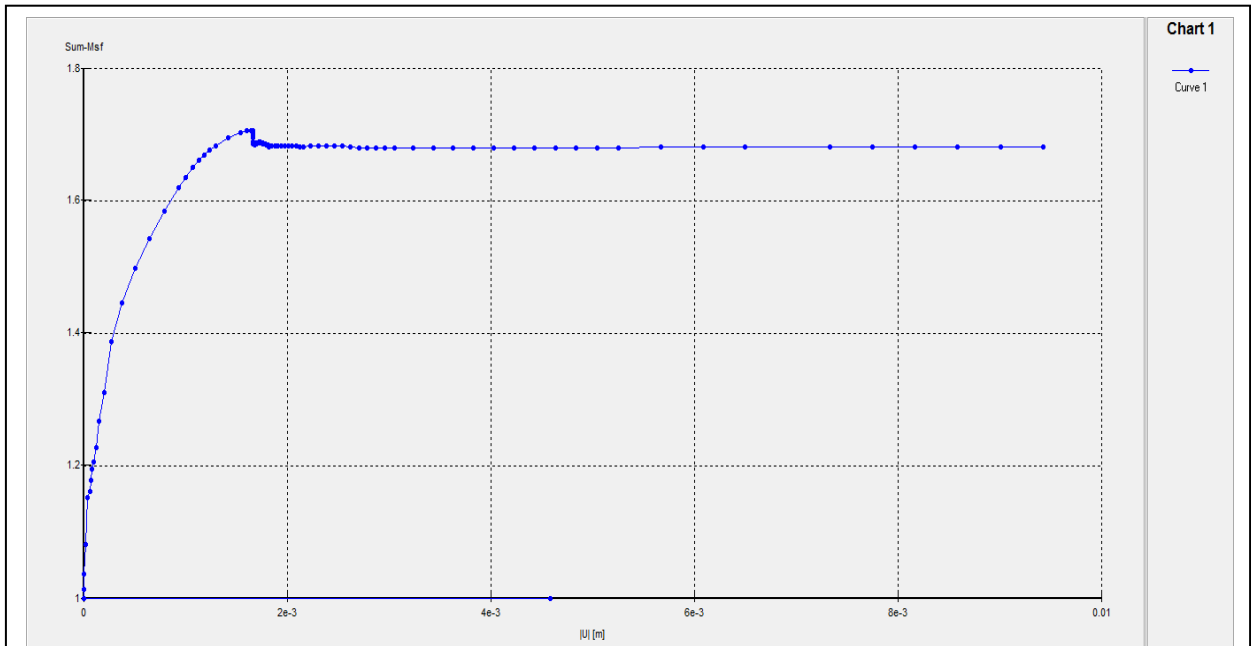
Les résultats de calculs du facteur de sécurité résumés dans le tableau suivant :

	Fos		
Inclinaison des clous(°)	0°	15°	30°
Pente de 45°	1.681	1.908	1.765
Pente de 60°	1.637	1.816	1.71

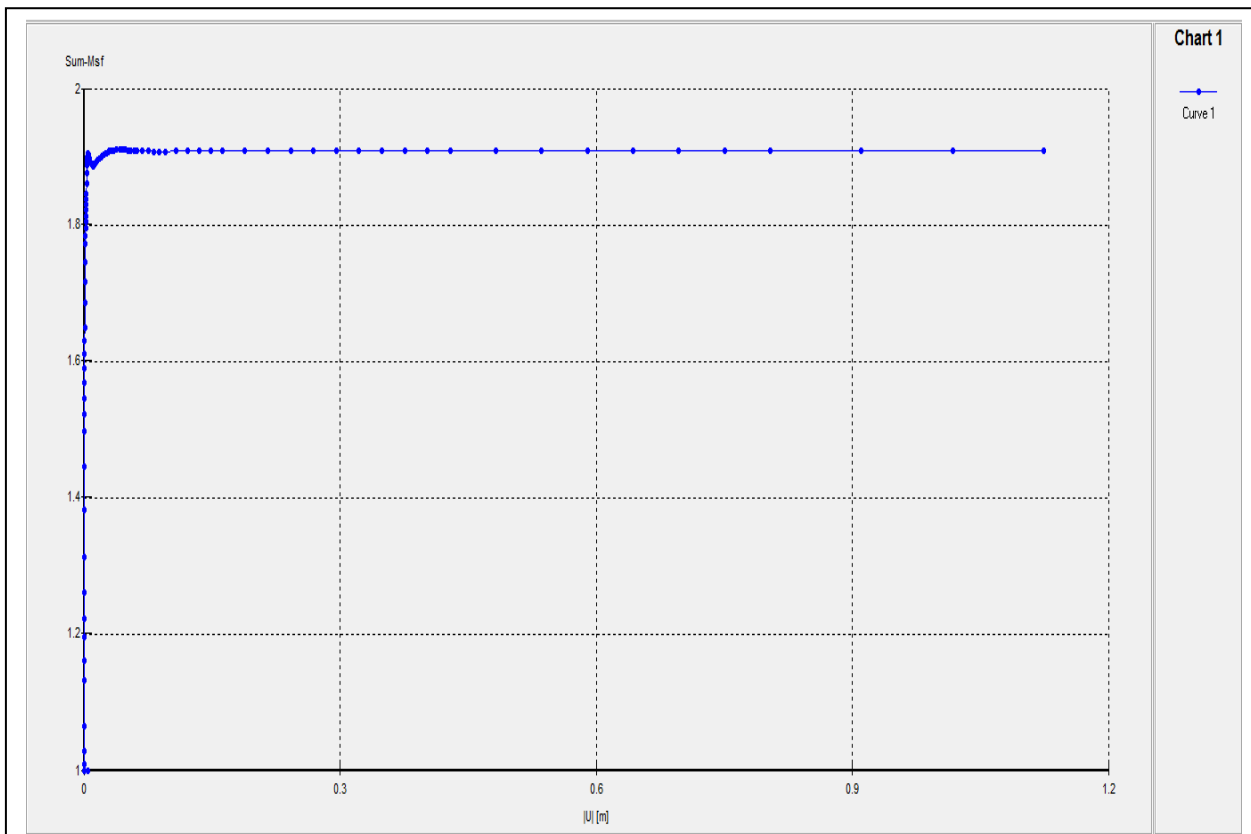
Tableau. 3.6 - Résumé des résultats de Msf pour tous les angles

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction de déplacement pour différentes inclinaisons de clous à 45° et 60° de pente.

(FIG 3.11) montre les résultats de pente 45° des 3 inclinaisons de (a) jusqu'a (c) ;



a) coefficient de sécurité (clouds inclinés 0°)



b) coefficient de sécurité (clouds inclinés 15°)

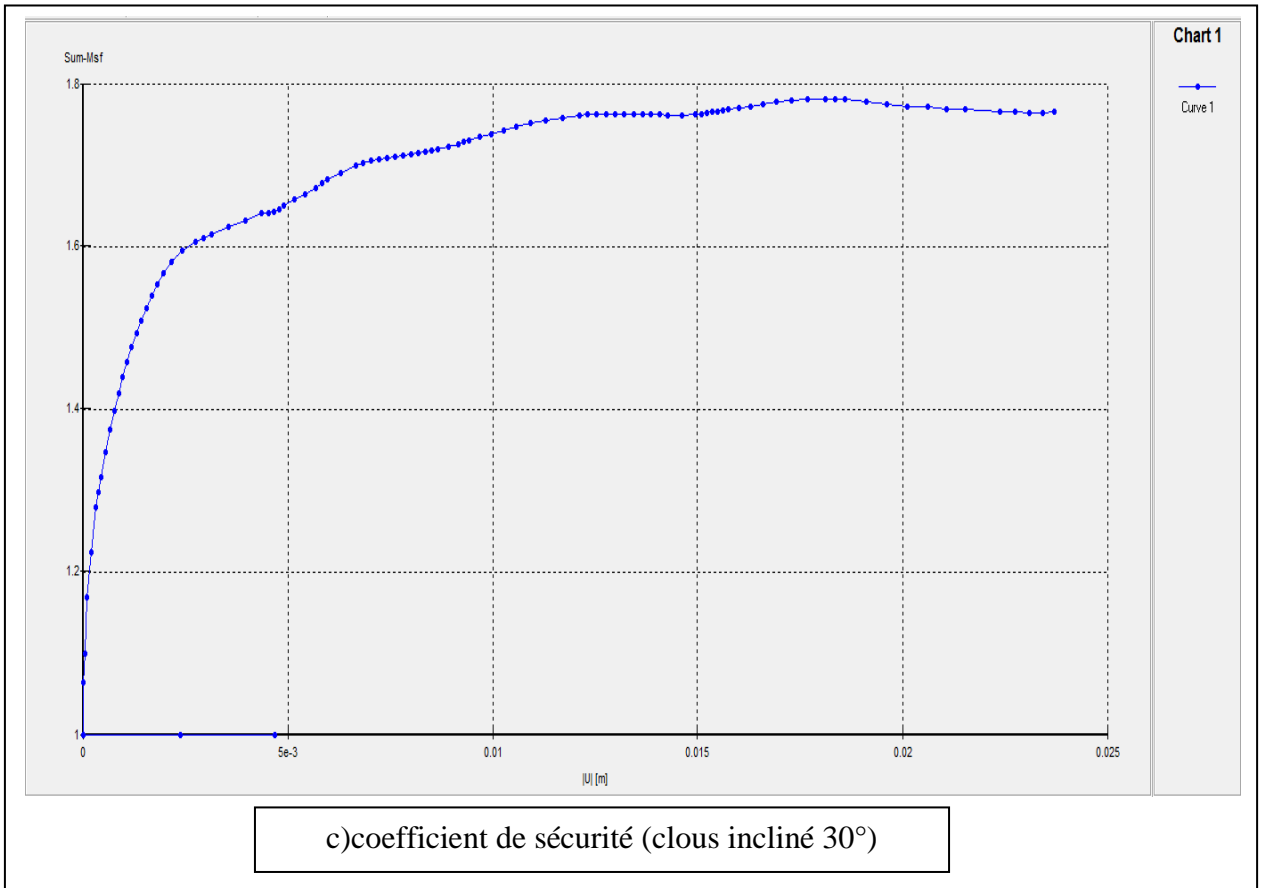
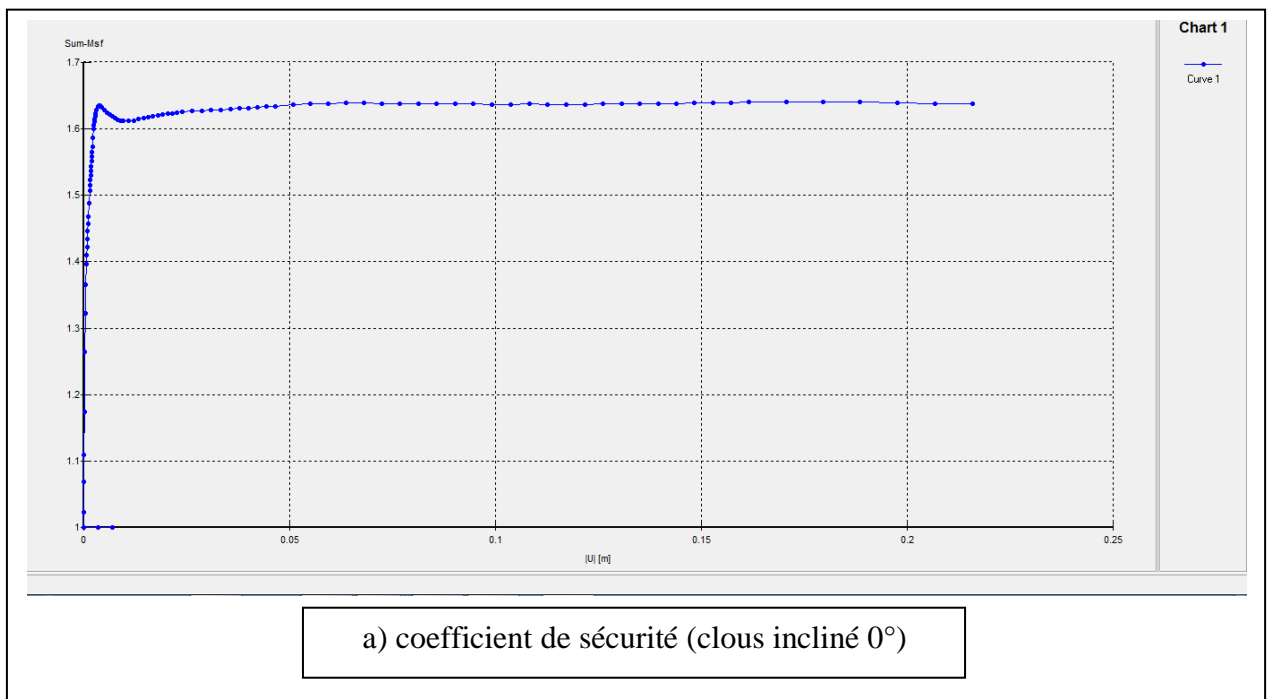
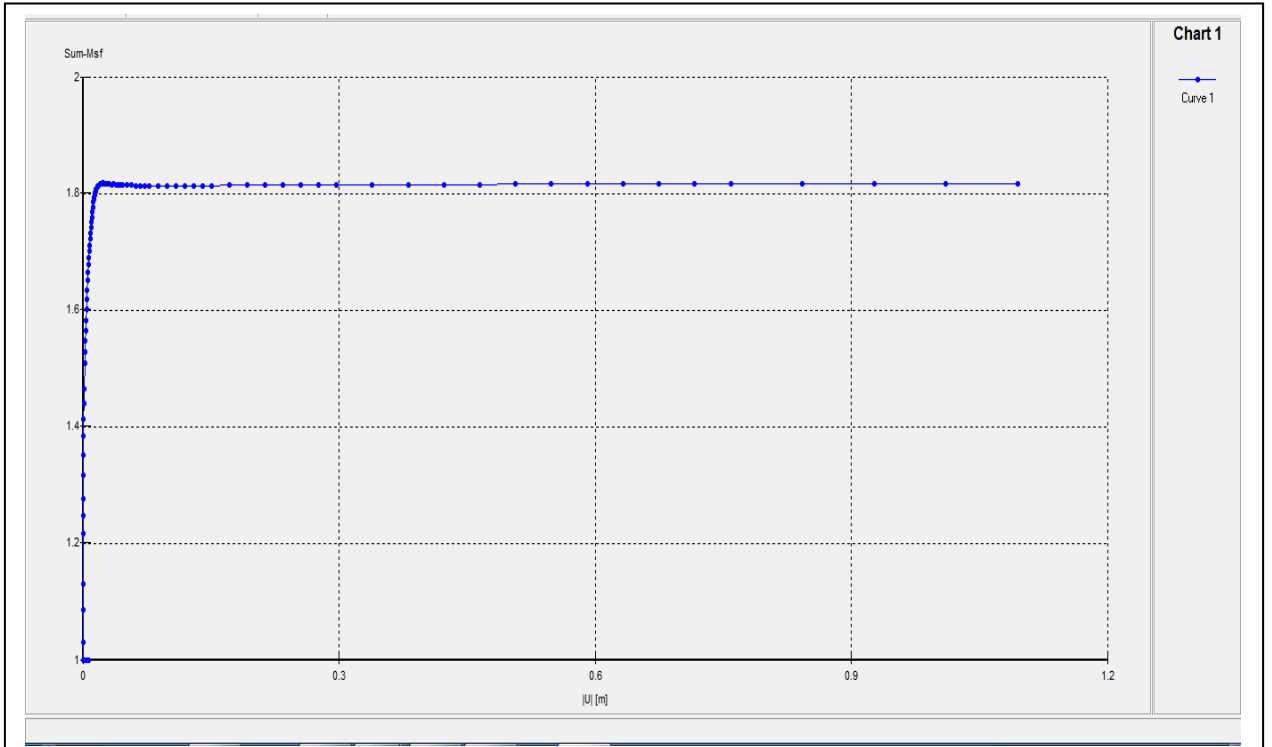


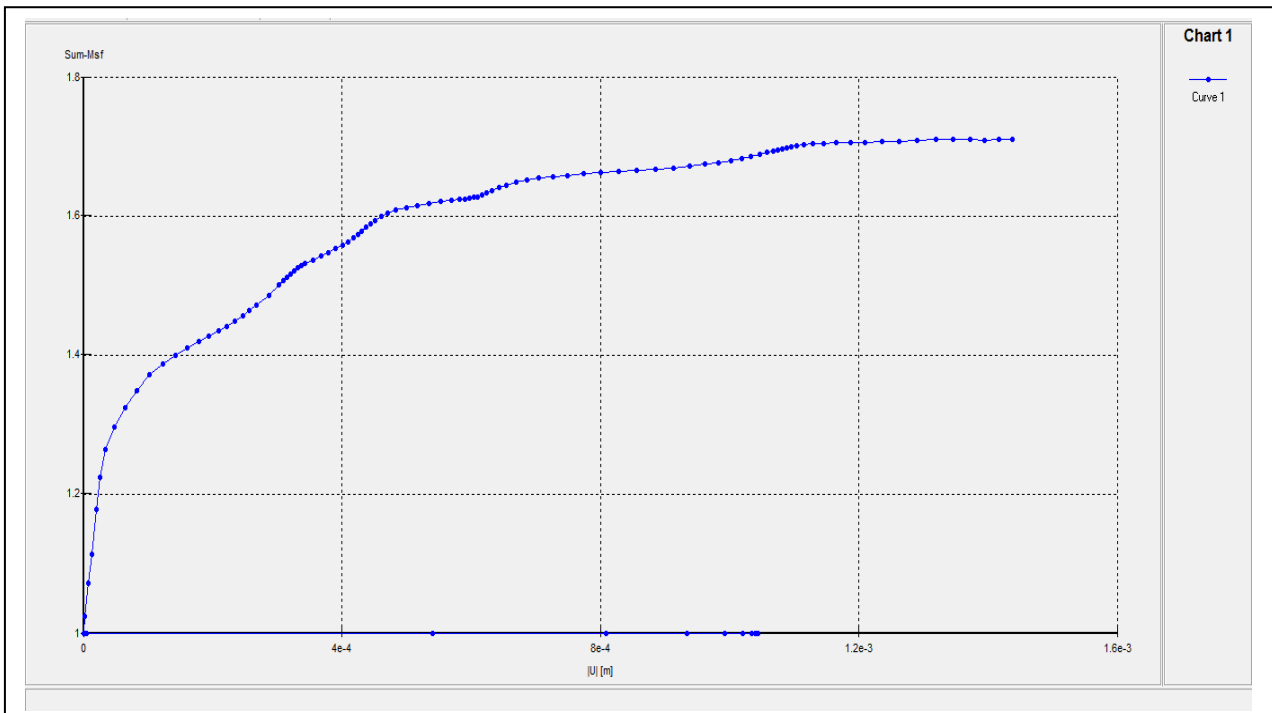
Figure 3.11 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction de déplacement pour les 3 inclinaisons des clous de la pente de 45°.

(FIG 3.12) montre les résultats de pente 60° des 3 inclinaisons de (a) jusqu'a (c) ;





b) coefficient de sécurité (clous inclinés 15°)



c) coefficient de sécurité (clous inclinés 30°)

Figure 3.12 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction de déplacement pour les 3 inclinaisons des clous de la pente 60°.

-PLAXIS 2D montre qu'une pente de 45° renforcée avec une inclinaison de clou de 15°, donne le facteur de sécurité maximum de 1,908.

- Pour toutes les autres inclinaisons de 0° et 30°, le facteur de sécurité est respectivement de 1,681 et 1,765. Comme on peut le voir sur la Fig.3.4, pour une inclinaison du clou de 15°, le facteur de sécurité augmente avec le déplacement de la pente sous surcharge est atteint pour un déplacement total de 1.125 m de pente.

-On peut également observer sur les Fig3.4 et 3.5, que l'inclinaison du clou de 0° dans les deux pentes de 45° et 60° donne le facteur de sécurité minimum de 1,681 et 1,637 respectivement.

- L'inclinaison du clou de 30° correspond à un facteur intermédiaire de valeur de sécurité 1,765 pour une pente de 45° et 1,71 pour une pente de 60° respectivement.

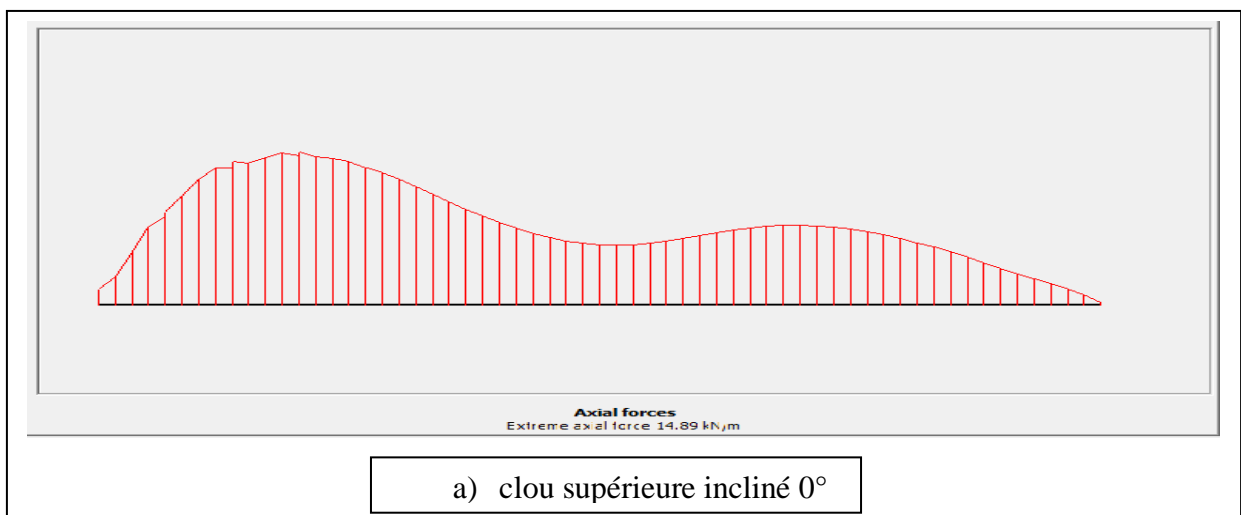
- Un autre aspect important qui peut être mis en lumière est que pour une pente de 60°, le facteur de sécurité augmente rapidement pour un petit déplacement < 0,1 m puis reste constant jusqu'à la rupture lorsque le déplacement de la pente augmente.

-Le facteur de sécurité maximum pour 60° est de 1,816 atteint pour une inclinaison du clou de 15°. Semblable à une pente de 45°, 0° et 30° montrent des valeurs de facteur de sécurité beaucoup plus faibles. Une inclinaison du clou de 0° s'avère avoir le facteur de sécurité minimum pour une pente de 60° qui est concurrente à un angle de pente de 45°.

3.3.3) Pour les Forces axiales des clous

- Les figures suivantes représentent les forces axiales sur toute la longueur des clous pour différentes inclinaisons de clous à 45° et 60° de pente.

(FIG 3.13) montre les résultats des clous inclinés 0° de pente 45° de (a) jusqu'à (c) ;



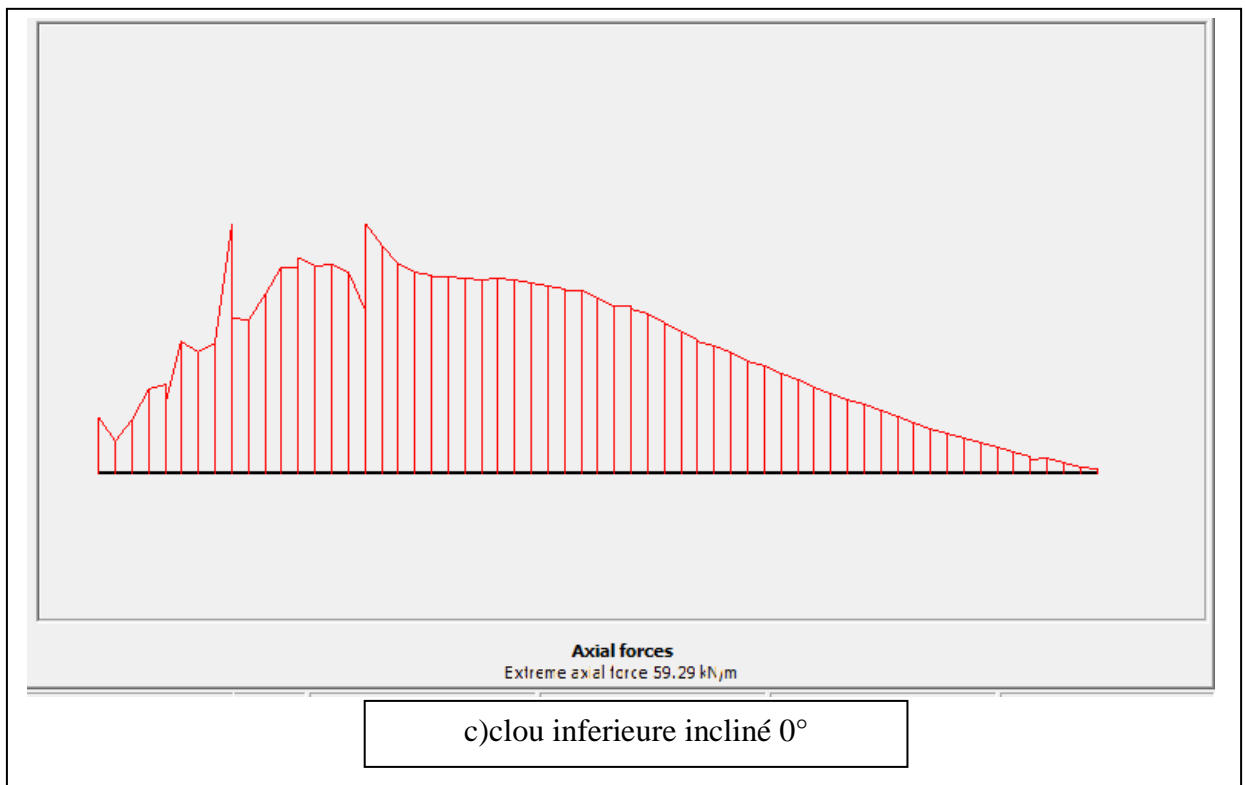
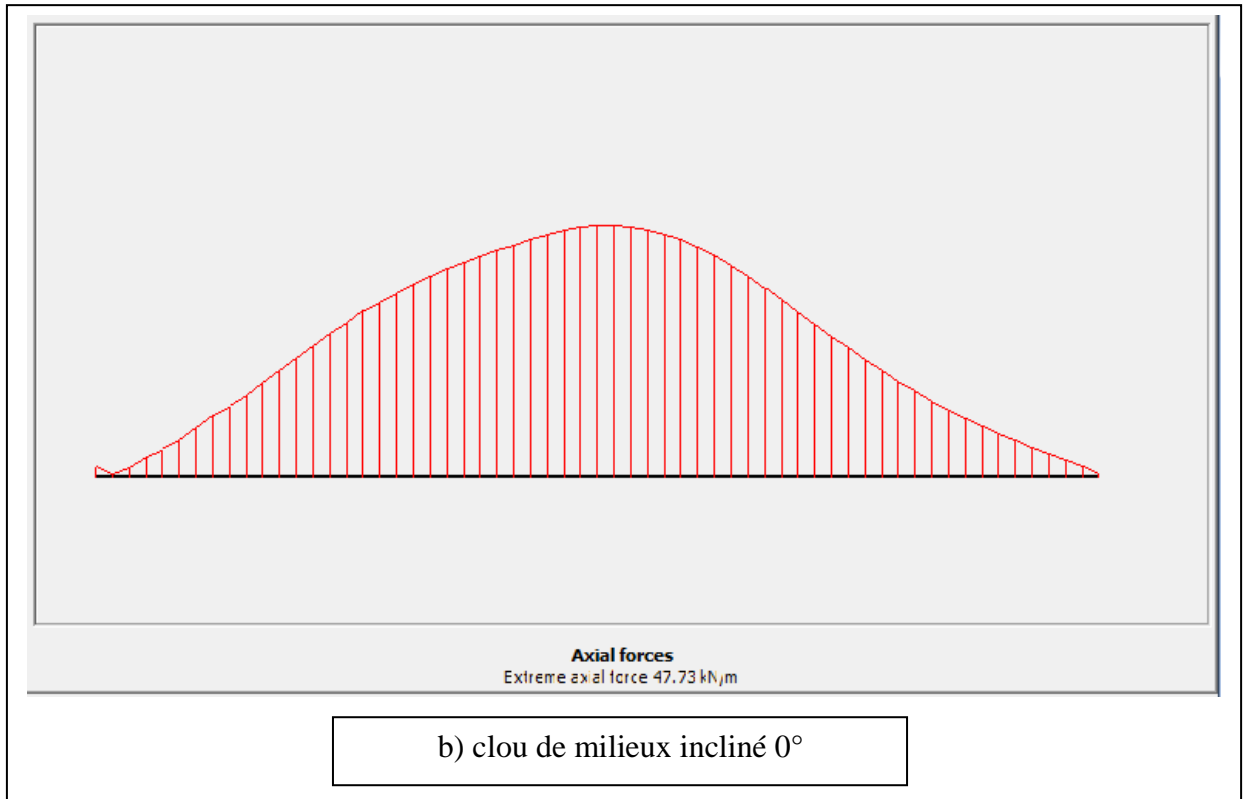
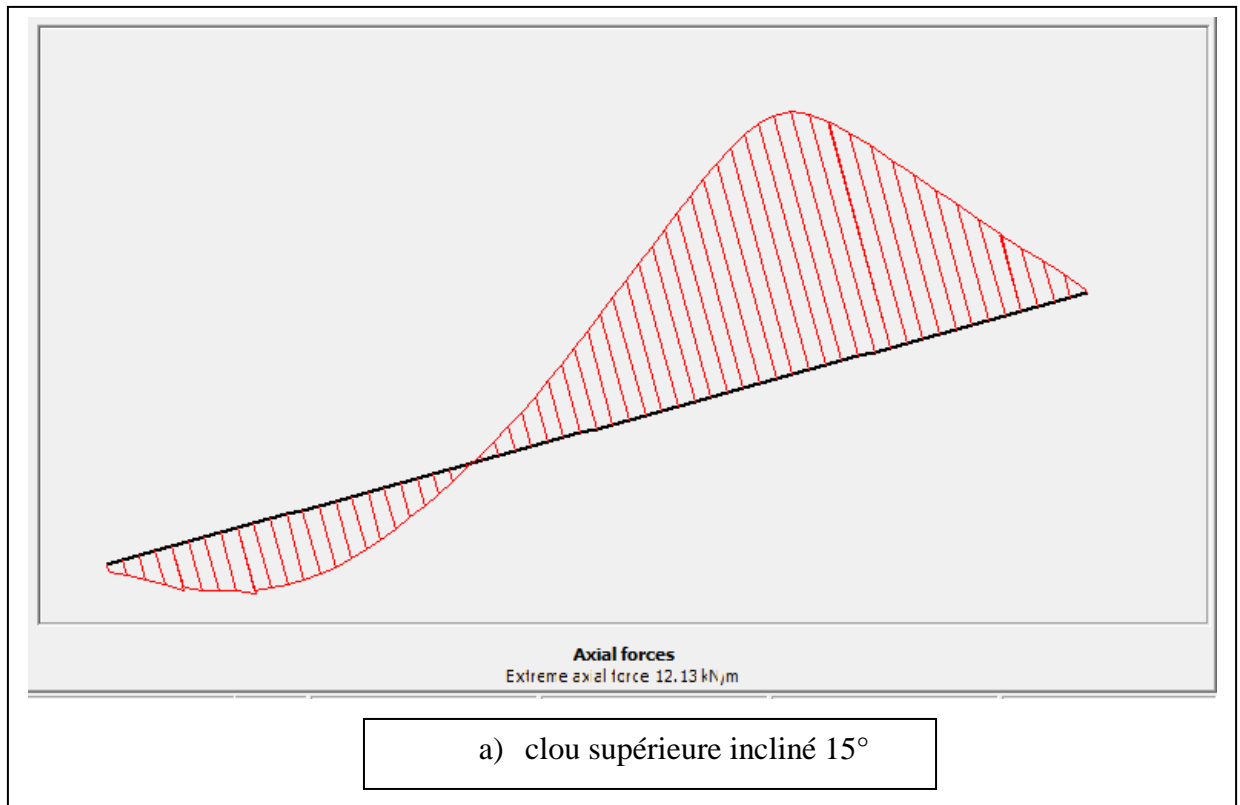


Figure 3.13 – Répartition de la force axiale des clous inclinés de 0° de PLAXIS 2D pour la pente 45°.

(FIG 3.14) montre les résultats des clous incliné 15° de pente 45° de (a) jusqu'a (c) ;



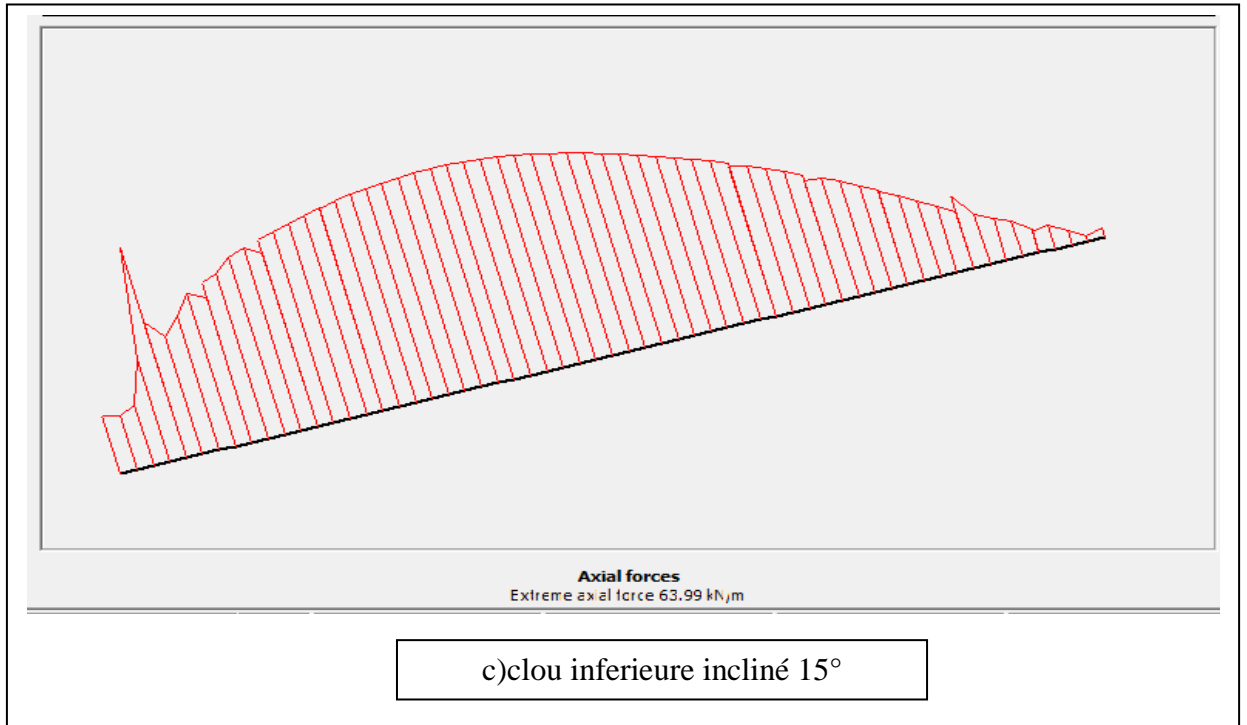
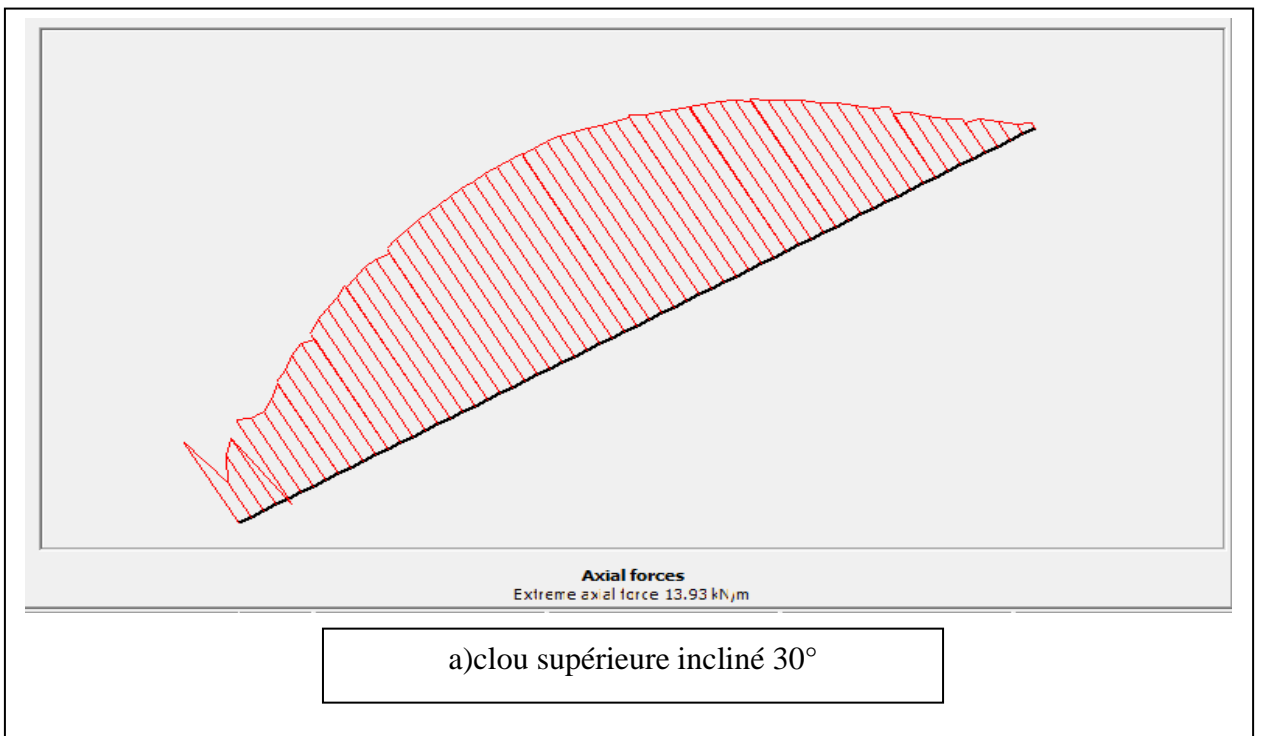


Figure 3.14 – Répartition de la force axiale des clous inclinés de 15° de PLAXIS 2D pour la pente 45°.

(FIG 3.15) montre les résultats des clous incliné 30° de pente 45° de (a) jusqu'a (c) ;



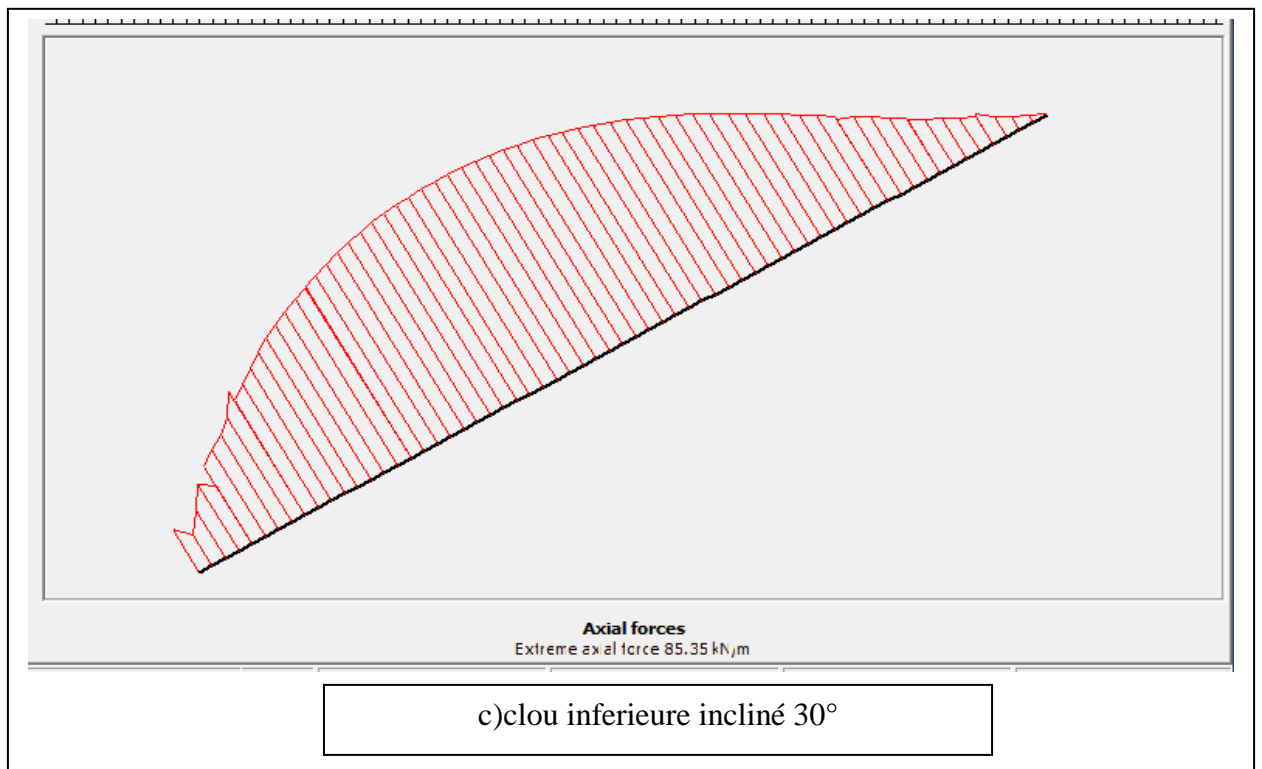


Figure 3.15 – Répartition de la force axiale des clous inclinés de 30° de PLAXIS 2D pour la pente 45°.

-Les résultats des forces axiales de la pente 45° et 60° résumés dans le tableau suivant :

Pente	45°			60°		
$\Theta(^{\circ})$	0°	15°	30°	0°	15°	30°
Force sur clou supérieure (Kn)	14.89	12.13	13.93	22.85	24.96	26.14
Force sur clou du milieu (Kn)	47.73	65.37	37.27	73.61	67.61	48.87
Force sur clou inférieure (Kn)	59.29	63.99	85.35	82.06	110.13	124.28

Tableau 3.7- les résultats des forces axiale appliqué sur les clous

-Les forces axiales calculées à partir de la MEF montrent clairement que les forces de clou maximales sont trouvées pour une inclinaison de clou de 15° pour les pentes de 45° et 60°.

- Une force maximale de 67.61 kN et 65.37 kN est trouvée dans le clou de milieu incliné à 15°.

-La force axiale dans le clou du bas se trouve au maximum parmi les trois emplacements des clous, à savoir les clous du haut, du milieu et du bas.

-L'inclinaison du clou de 0° a une force de clou axiale maximale au clou inférieur d'une magnitude de 59.29 kN, la même remarque pour les 2 inclinaisons de pente 45° et 60°.

-On constate que la répartition de la force du clou augmente à partir de l'extrémité du clou, atteint une valeur maximale puis diminue vers la tête du clou.

- La valeur maximale de cette force de clouage peut être trouvée pour le clou du bas suivi du clou du milieu et minimale pour le clou du haut.

-Pour une pente de 60°, la force axiale maximale est trouvée pour le clou inférieur à une inclinaison de 30°.

- Le schéma de diminution des forces axiales du clou inférieur vers le clou supérieur est également visible.

- L'inclinaison du clou de 15° a une valeur de 110.13 kN pour le clou du bas, 67.61 kN pour le clou du milieu et 24.96 kN pour le clou le plus haut.

-La répartition de la force du clou montre que le clou inférieur a les deux conditions limites des forces du clou. L'augmentation initiale de la distribution montre que le clou a mobilisé toute sa capacité d'arrachement.

-En absence de parement pour les pentes clouées utilisées dans ce travail, la répartition de la force du clou se termine à la tête du clou.

3.4) Comparaison du facteur de sécurité (résultats de l'exemple et les résultats obtenu)

Angles de pente avec l'horizontale (°)	Inclinaison des ongles à l'horizontale			
	FOS	0°	15°	30°
45	Résultats de l'exemple	1,36	1,43	1,15
	Résultats obtenu	1,681	1,908	1,765
60	Résultats de l'exemple	1,17	1,37	1.08
	Résultats obtenu	1.637	1,816	1.71

Tableau 3.8 : tout les résultats de facture de sécurité (donné et calculé)

- Comme observé à partir du tableau 3.8, le facteur de sécurité calculé est plus élevé par rapport aux facteurs donné de l'exemple, on trouve ca logique, parce que on a augmenté la cohésion dans notre calcule ($C=13.7$ kPa), est sella est un paramètre de résistance, donc le coefficient de sécurité va augmenter directement.
- On trouve un coefficient de sécurité optimale a l'inclinaison 15° , on remarque le même résultat dans l'exemple.

3.5) Conclusion :

- Le FOS obtenu à partir de la MEF signifie également que la stabilité des pentes n'augmente pas par l'augmentation de l'inclinaison des clous, on constate que la variation d'inclinaison du clou entre 0° et 15° augmente le FOS des pentes qui diminue lorsque l'inclinaison du clou passe de 15° à 30° .
- Les surfaces de glissement obtenues à partir de la MEF montrent qu'à mesure que l'angle de pente devient plus raide, la surface de rupture montre également un changement d'une surface de glissement circulaire à une surface de glissement non linéaire.
- la force maximale du clou se trouve dans le clou inférieur pour toutes les inclinaisons du clou.
- la MEF est indépendante de la longueur du clou, l'analyse dépend de la rigidité en flexion du clou ; rigidité axiale et interaction sol-clou, Une rigidité à la flexion et une interaction sol-clou plus élevées.
- notre résultats de calcul donne des coefficients de sécurité supérieures par rapport à l'exemple calculé avec PLAXIS 2D, à cause d'augmentation d'un des paramètres de résistance.

Chapitre 4 : modélisation d'une pente renforcée par clous (étude paramétrique)

4. Introduction

Après l'établissement du modèle et les résultats obtenus, l'étude paramétrique sera effectuée. Il sera question de montrer l'effet de différents paramètres sur les résultats, l'utilisation de clouage, permet une meilleure mobilisation du frottement à l'interface. L'interaction sol/clou est complexe et fonction de nombreux Paramètres notamment, la taille des particules de sol, leurs caractéristiques mécaniques (angle de frottement, angle de dilatance et module d'élasticité). L'étude engagée consiste à mettre au point un modèle numérique pour décrire le comportement des structures renforcées par le clouage avec une attention particulière sur l'effet de phasage de construction sur le comportement de la paroi clouée, l'effet de l'espacement des clous et Effets de la longueur des clous.

Ce chapitre présente un système de clouage du sol qui a été étudié en termes d'inclinaison, d'espacement et de longueur pour déterminer le plus approprié valeurs pour une stabilisation efficace de la pente du sol. Pour trouver le système de clou de sol optimal, inclinaison, longueur et l'espacement a été appliqué à une pente (avec une inclinaison de 30°, 45°,60°,) et le facteur de sécurité (FOS) a été évalué dans chaque cas. Pour étudier les résultats.

4.1 Définition des données

Pour que le logiciel *PLAXIS* puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes les données du projet suivantes :

4.1.1 Hypothèses et géométrie

a) Les hypothèses générales données

- Les déformations sont considérées planes.
- Les ouvrages sont modélisés comme des poutres ou des éléments continus.
- Définition d'une interface entre les ouvrages est le sol.

b) La géométrie du modèle

Le projet n'est pas symétrique (figure 4.1), il sera modélisé par un modèle géométrique plan (2D) de 50 m de largeur sur 20 m de profondeur. Ce modèle est présenté sur (la figure 4.2) deux couches de sol composent la géologie du site :

- Une couche de remblai de sable en surface de 10 m de profondeur avec une pente de 30° ; 45° ; 60°.
- Une couche d'argile sableuse de 10 m de Profondeur ;

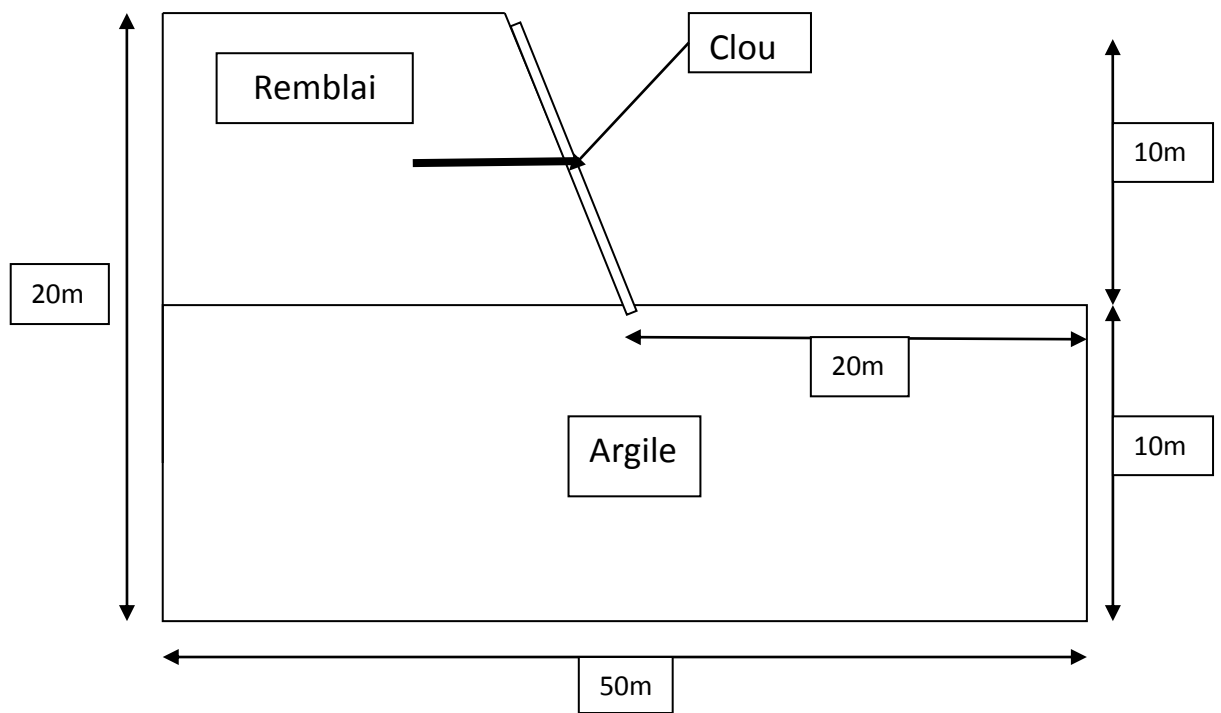


Figure. 4.1 - Vue en coupe du projet

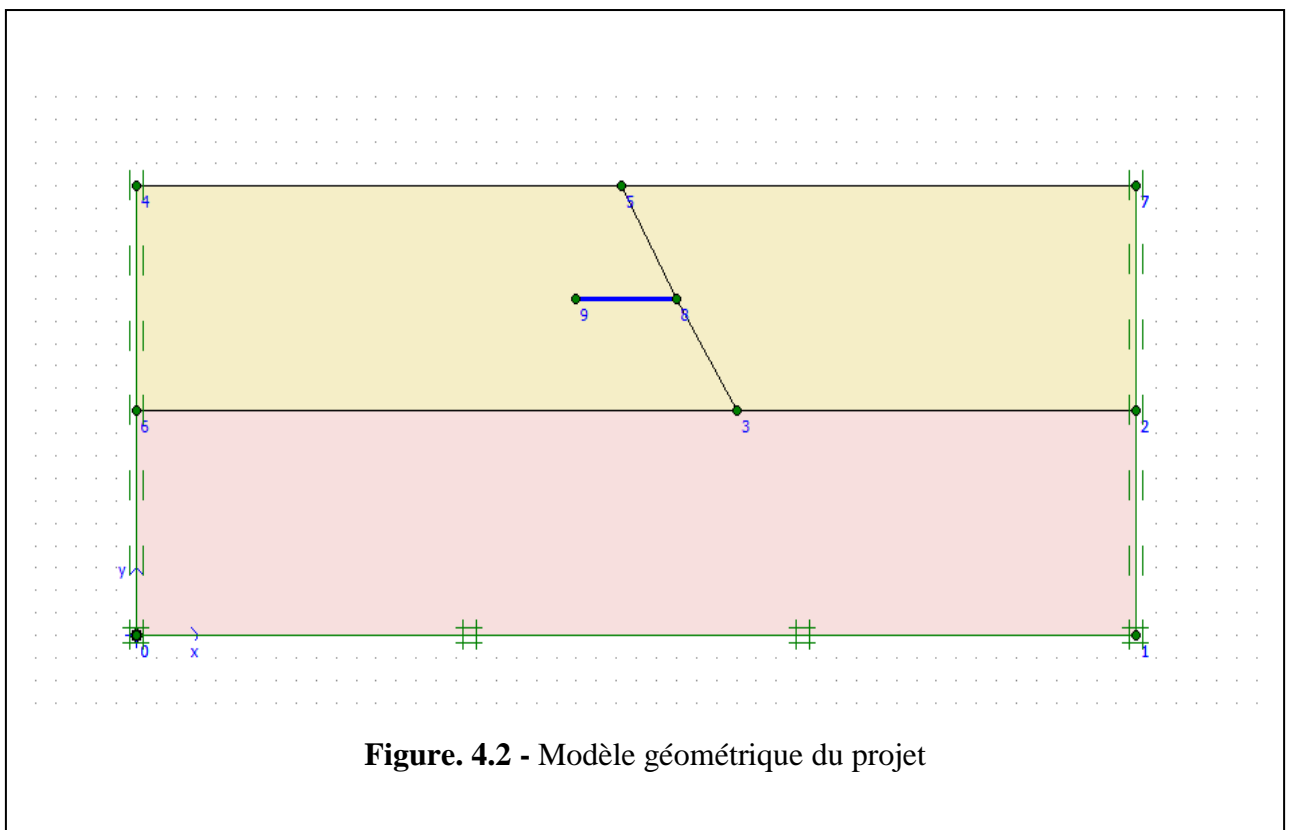


Figure. 4.2 - Modèle géométrique du projet

c)- Les conditions aux limites

Avant de commencer on procède à des simulations préliminaires, pour fixer les dimensions du modèle, et pour choisir les limites. Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant les déplacements horizontaux et verticaux du modèle en utilisant l'option par défaut (Standard Fixities).

Les blocages

Les limites du domaine sont fixées, pour que les conditions aux limites n'aient pas d'influence sur le comportement du modèle. En sélectionnant les blocages standards (Standard fixities), PLAXIS impose automatiquement un réglage standard des conditions aux limites générales du modèle géométrique. Ces conditions aux limites sont générées suivant les règles suivantes :

- la limite horizontale inférieure comporte des blocages horizontaux et verticaux ($u_x = u_y = 0$).
- Les limites verticales comportent seulement des blocages horizontaux ($u_x = 0$)

4.2 Dimensionnement de la paroi clouée

4.2.1. Principes

Nous avons considéré dans cette phase de calcul les éléments suivants :

- files de clous disposés en maillage carré avec :
- un espacement horizontal de 0.50m,
- forage, diamètre $\varnothing 200$ mm,
- armature barre HA32mm

Les calculs ont été effectués avec les paramètres suivants :

- Pour modéliser utilise le critère non linéaire de Mohr-coulomb due à sa simplicité et la disponibilité des paramètres dont on a besoin.
- des clous de 2, 3, 5,7m de longueur
- inclinaison de 0° ; 15° et 30° par rapport à l'horizontale,

4.2.2 Caractéristiques des matériaux

a) Propriétés des couches de sols et des interfaces

Les propriétés des couches de sols et des interfaces sont résumées dans le tableau 4.1

paramètre	Nom	remblai	Argile sableux	unité
Model de matériau	Model	M-C	M-C	-
Type de comportement de matériau	Type	Drainé	Non drainé	-
Poids volumique (non saturé)	γ_{unsat}	17	16	kN/m ³
Poids volumique (saturé)	γ_{sat}	20	18	kN/m ³
Module de Young (constant)	E_{ref}	30000	10000	kN/m ²
Coefficient de poisson	ν	0.3	0.33	-
Cohésion	C_{ref}	15	40	kN/m ²
Angle de frottement	ϕ	35	30	°
Angle de dilataance	Ψ	0	0	°

Tableau. 4.1 - Propriétés des couches de sols et des interfaces.

b) Éléments structuraux

- clous

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

Module d'élasticité de clou $E_n = 200$ GPA

Module d'élasticité de produit injecté (coulis) $E_g = 22$ GPA

Diamètre de forage $D = 200$ mm

Diamètre de clou $d = 32$ mm

L'équivalence entre les clous et le coulis

$$E^{NG} = E_n (A_{\text{clou}}/A) + E_g (A_{\text{coulis}}/A) \dots\dots\dots E^{NG} = 26005 \times 10^3 \text{ (kPa)}$$

$$E_{eq} \times A = \frac{E_{ng} \times A_{ng}}{s h}$$

$$E_{eq} \times I = \frac{E_{ng} \times I_{ng}}{s h}$$

$$E_{eq} \times 1 \times d = \frac{E_{ng} \times \frac{\pi D^2}{4}}{s h} \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{eq} \times \frac{1 \times d^3}{12} = \frac{E_{ng} \times \frac{\pi D^4}{64}}{s h} \dots\dots\dots (2)$$

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^{NG} = module d'élasticité de (clou/coulis) ;

- A_{ng} = surface de (clou/coulis) ;

- I_{ng} =moment d'inertie de la géométrie (plate) ;

- sh = espacement entre les colonnes ($sh=0.5m$) ; D =diamètre de (clou/coulis)

-De l'équation (1) on a : $E e q = \frac{E n g \times \pi \times D^2}{s h \times d \times 4} \dots\dots\dots(3)$

En remplace l'équation (3) dans l'équation (2) on obtient :

$$d^2 = \frac{3 D^2}{4} \rightarrow d = \sqrt{\frac{3}{4}} D \text{ on a: } d = 0.173 \text{ m;}$$

On remplace $d = 0.173 \text{ m}$ dans l'équation (1)

$$E e q = \frac{E n g \times \pi \times D^2}{4 \times s h \times d} \rightarrow E e q = 9609577.53 \text{ kN/m}^2$$

La rigidité axiale :

$$E A = \frac{E e q}{s h} \left(\frac{\pi D^3}{4} \right) \approx E A = 603787.56 \text{ kN/m}$$

La rigidité a la flexion :

$$E I = \frac{E e q}{s h} \left(\frac{\pi D^4}{64} \right) \approx E I = 1509.47 \text{ kN.m}^2/\text{m}$$

-Pour les clous, on saisi les propriétés présentées dans le tableau 2.2 en choisissant les matériaux de type poutre (*plate*),

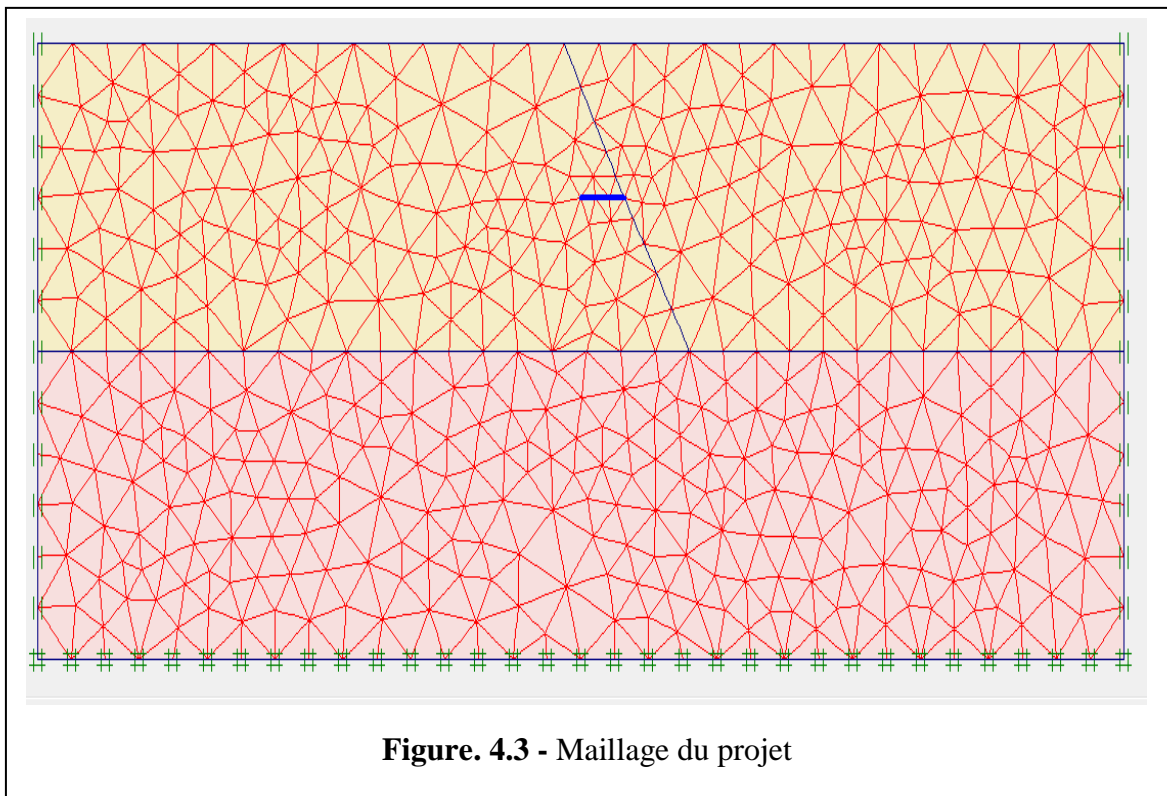
Paramètre	Nom	Valeur	unité
Type de comportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normal	EA	6.037×10^5	kN/m
Rigidité de flexion	EI	1.509×10^3	kNm ² /m
Epaisseur équivalente	d	0.173	m
Poids	W	8.3	kN/m/m
Coefficient de poisson	v	0.15	-

Tableau. 4.2 - Propriétés mécaniques du clou

4.2.3 Génération du maillage

L'élément choisi dans cette étude est le triangle à 15 nœuds qui fournit une interpolation du second ordre pour les déplacements et une intégration numérique qui se fait sur trois points de Gauss (points de contrainte).

Le maillage : j'ai commencé avec des maillages grossiers, On règle la finesse du maillage (*global Coarseness*) sur « *very fine* », puis, on le raffine localement au niveau des éléments structuraux, comme indiqué sur la figure 2.3. dans le quelle j'ai procédé à Un raffinement local du maillage a été effectué dans les zones où de forts gradients risquent d'apparaître, c'est-à-dire, de manière à obtenir une bonne estimation des champs des contraintes et des déplacements.

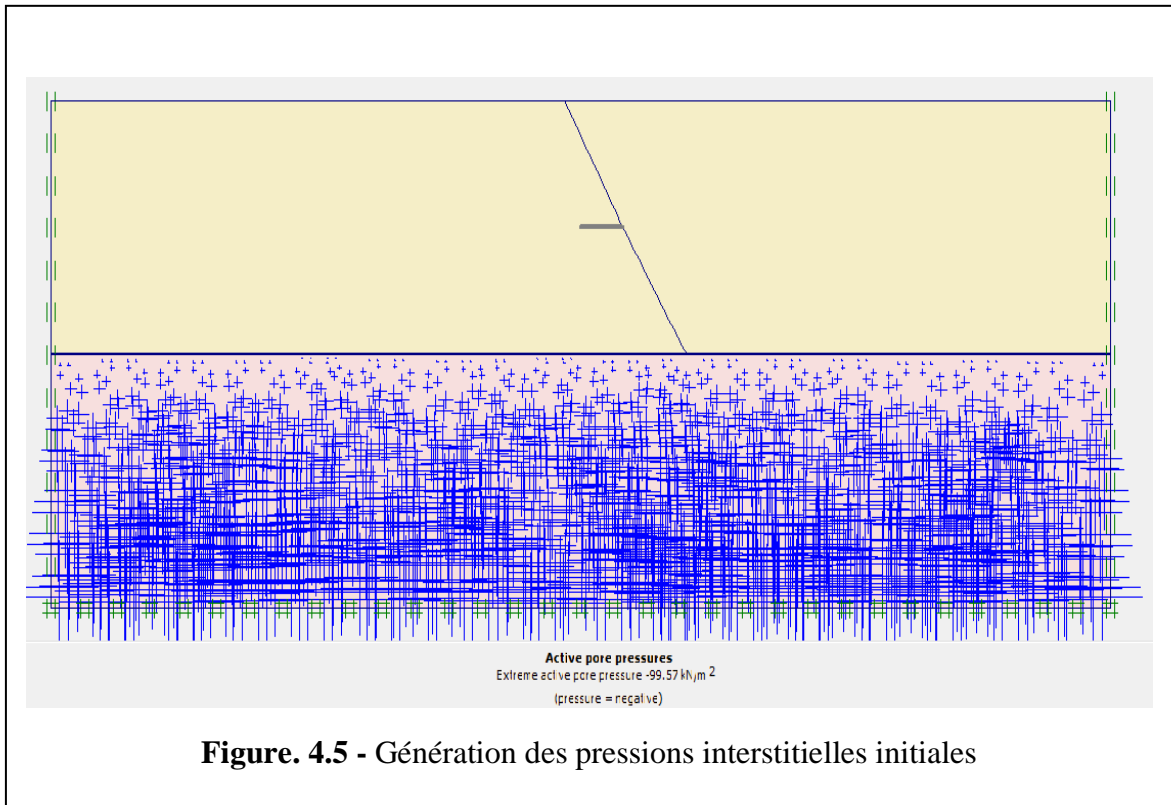
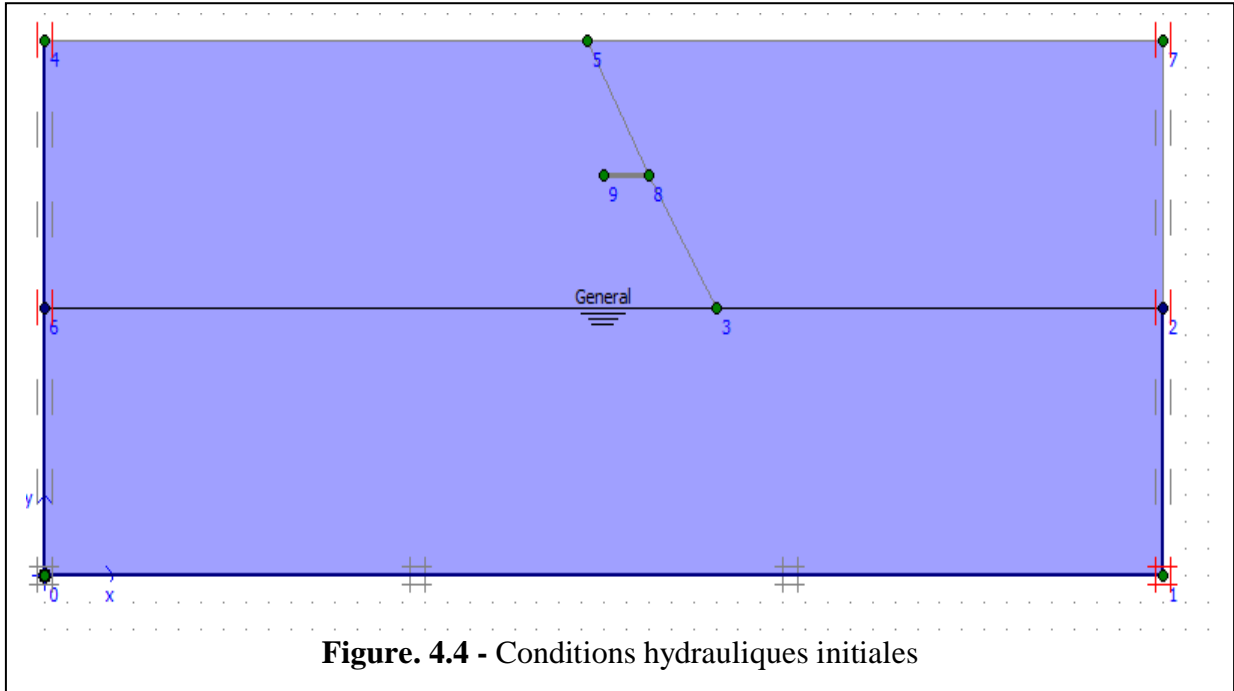


4.2.4 Conditions initiales

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

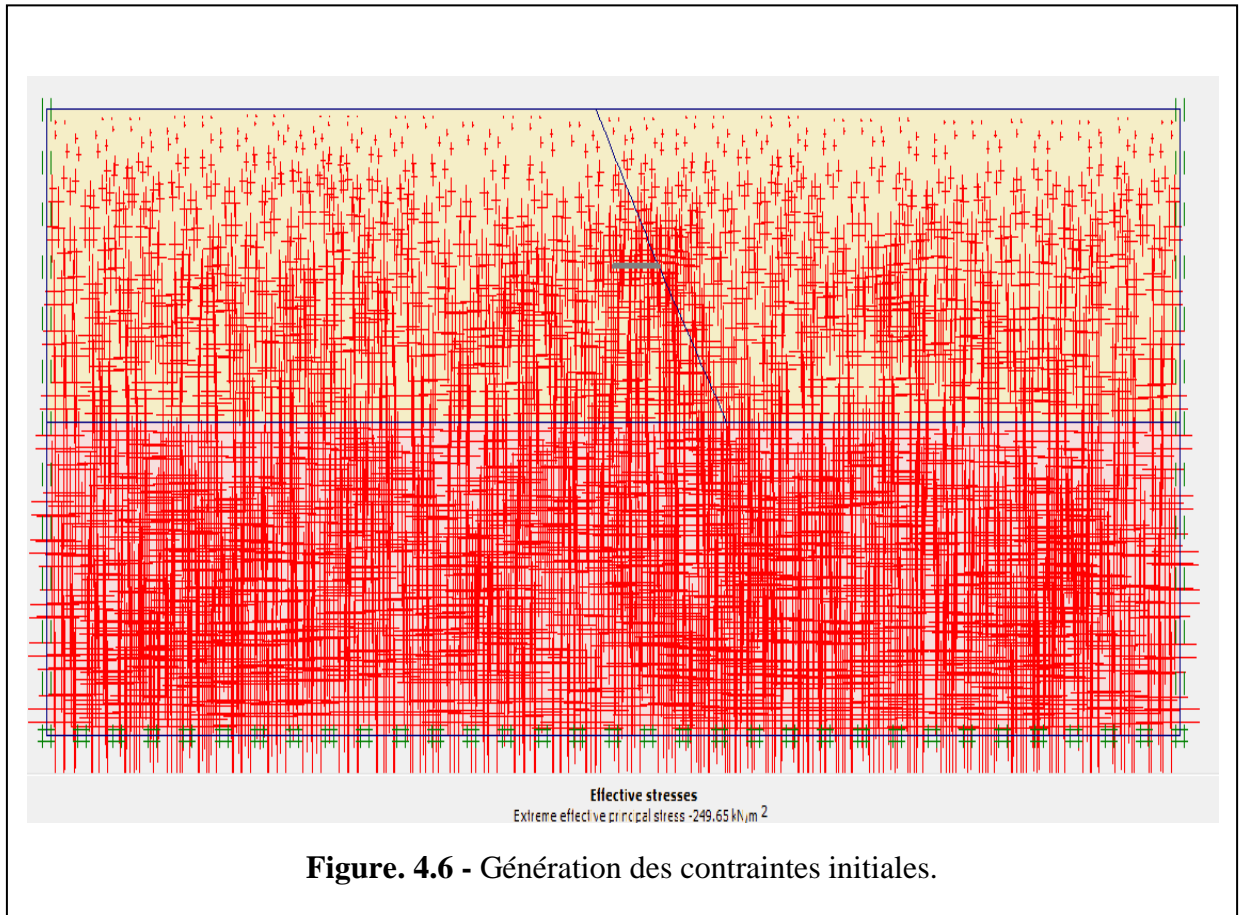
a) Conditions hydrauliques (figure 4.4)

Le niveau de la nappe phréatique initiale est à $-10,0$ m de la surface.



b) Contraintes initiales (figure 4.6)

On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de K_0 par défaut. La valeur de K_0 est proposée automatiquement d'après la formule de Jacky. On garde le poids du sol à 1, ce qui correspond à une application totale de la gravité. $K_0=1-\sin\phi$ (la formule de Jacky).



4.3 Procédure de calculs

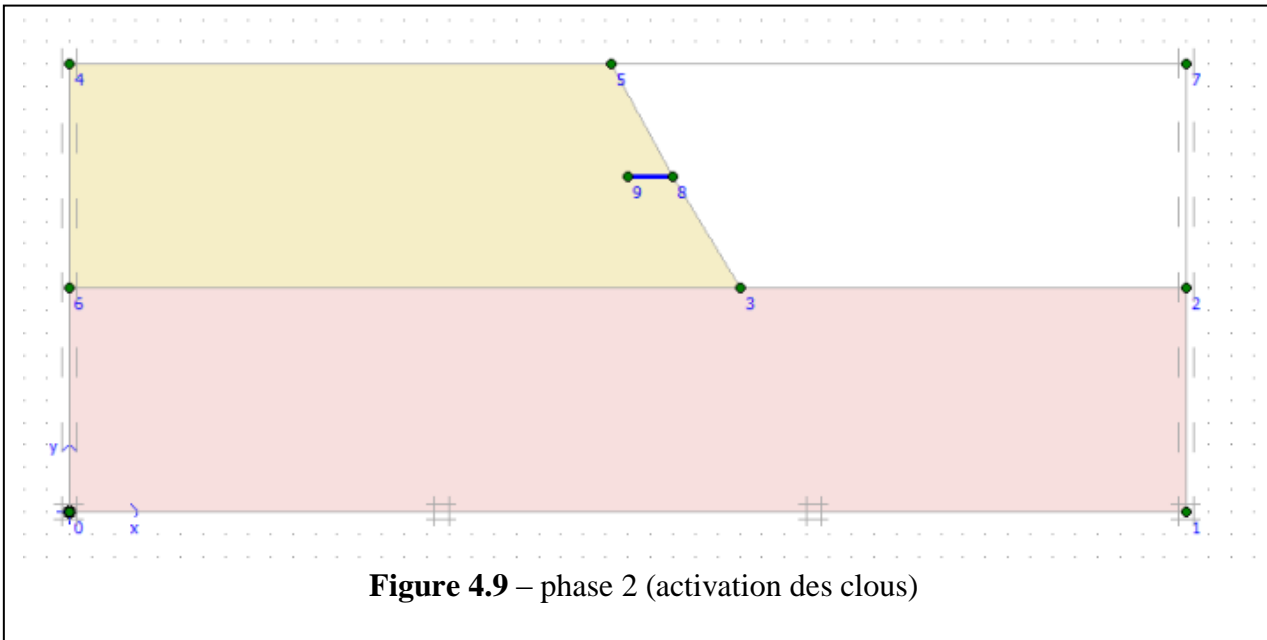
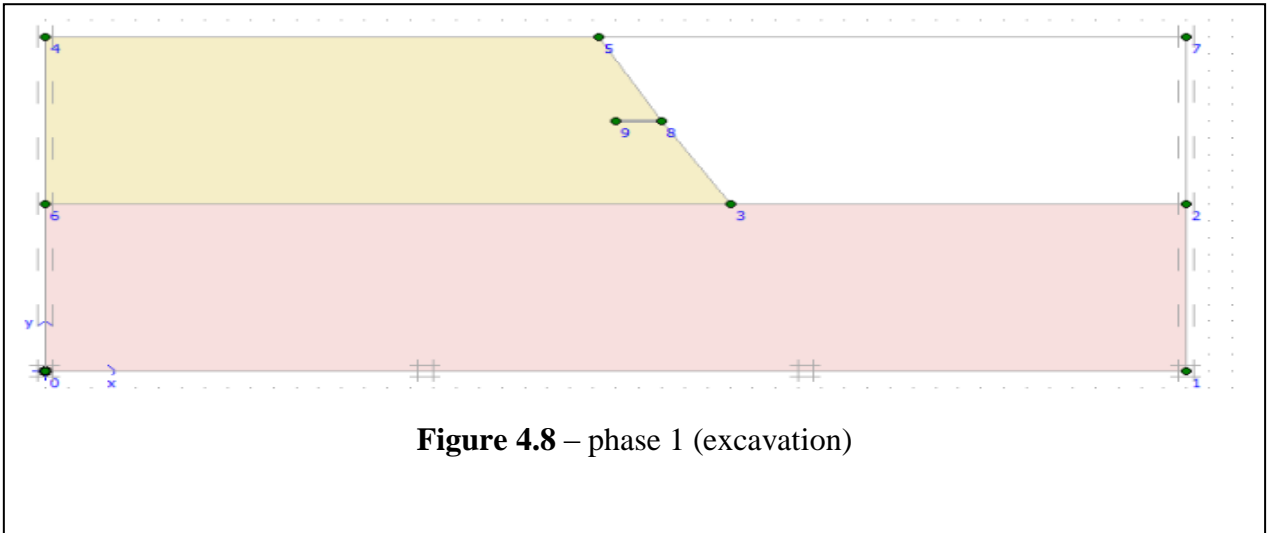
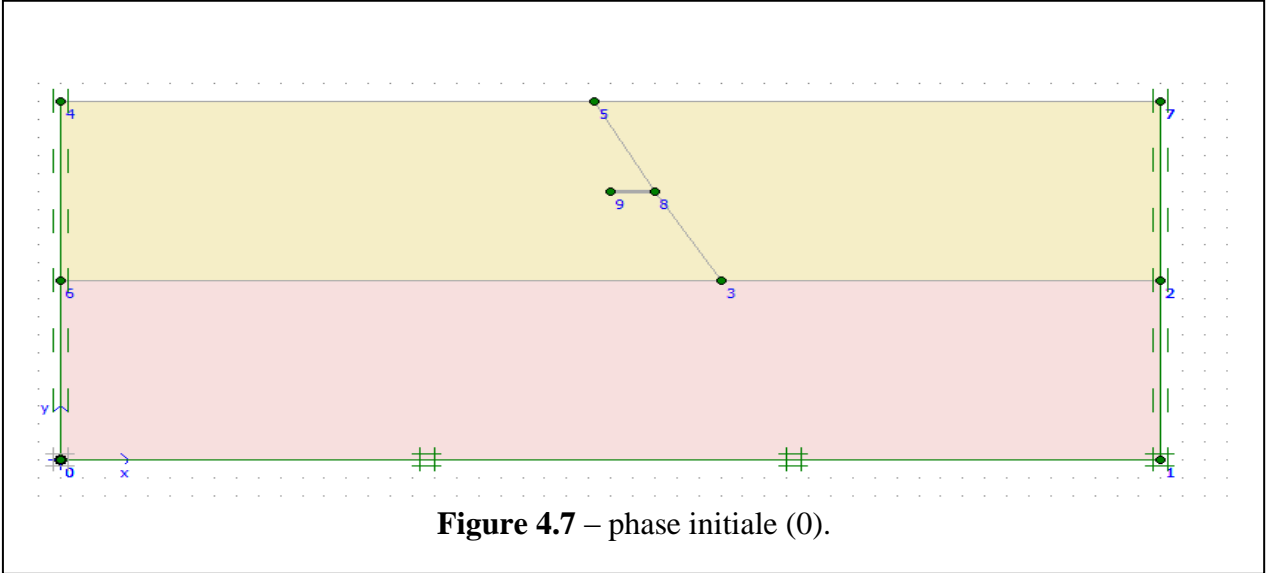
Le calcul du modèle se fait défini en 3 phases dans l'ordre, passant par une ou deux phases d'excavations.

Comme suit :

- Phase 0 : initiation des contraintes (procédure K_0) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

Construction de la paroi clouée :

- **Phase 1** : terrassement jusqu'à $Z=10\text{m}$ ou par 5m
- **Phase 2** : Mise en place des clous (activer les clous).
- **phase 3** : calcul de coefficient de sécurité.



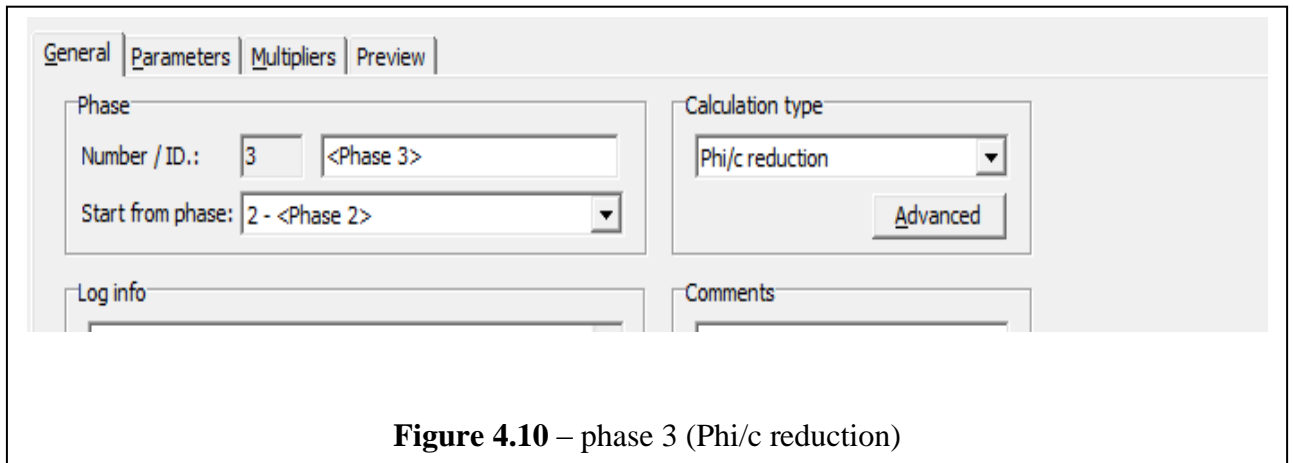


Figure 4.10 – phase 3 (Phi/c reduction)

4.3.1 Les principaux résultats

a- L'effet de phasage de construction sur le comportement de la paroi clouée

On s'intéressera à deux types de déformation : déformation de forme et déformation interne telle que :

1. Déformation de maillage.
2. Déformation des éléments structuraux.
3. le coefficient de sécurité globale

4.4 Les cas étudié

Dans le premier cas on a choisie une pente de 30° commençant par une excavation de 10m directement du remblai, en installent des clous de (2, 3, 5, 7m) avec inclinaison des clous (0° ; 15° ; 30°) et on a discuté les résultats.

Le même travaille est faite pour les pentes de (45° et 60°).

4.4.1) Pente de 30°

4.4.1.1) excavation de 10m directement

- avec des clous de 2.3.5.7m de longueur
- inclinaison $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$.

Les figures suivantes représentent les cas étudier ;

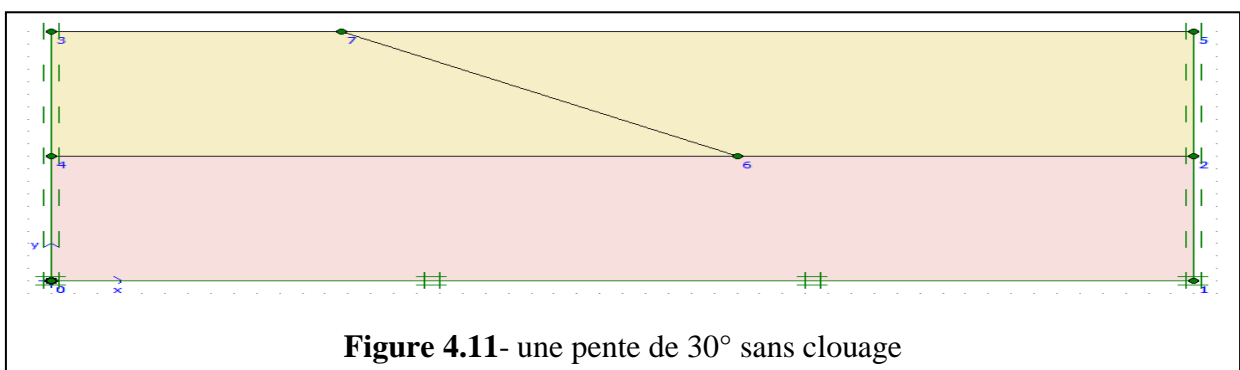
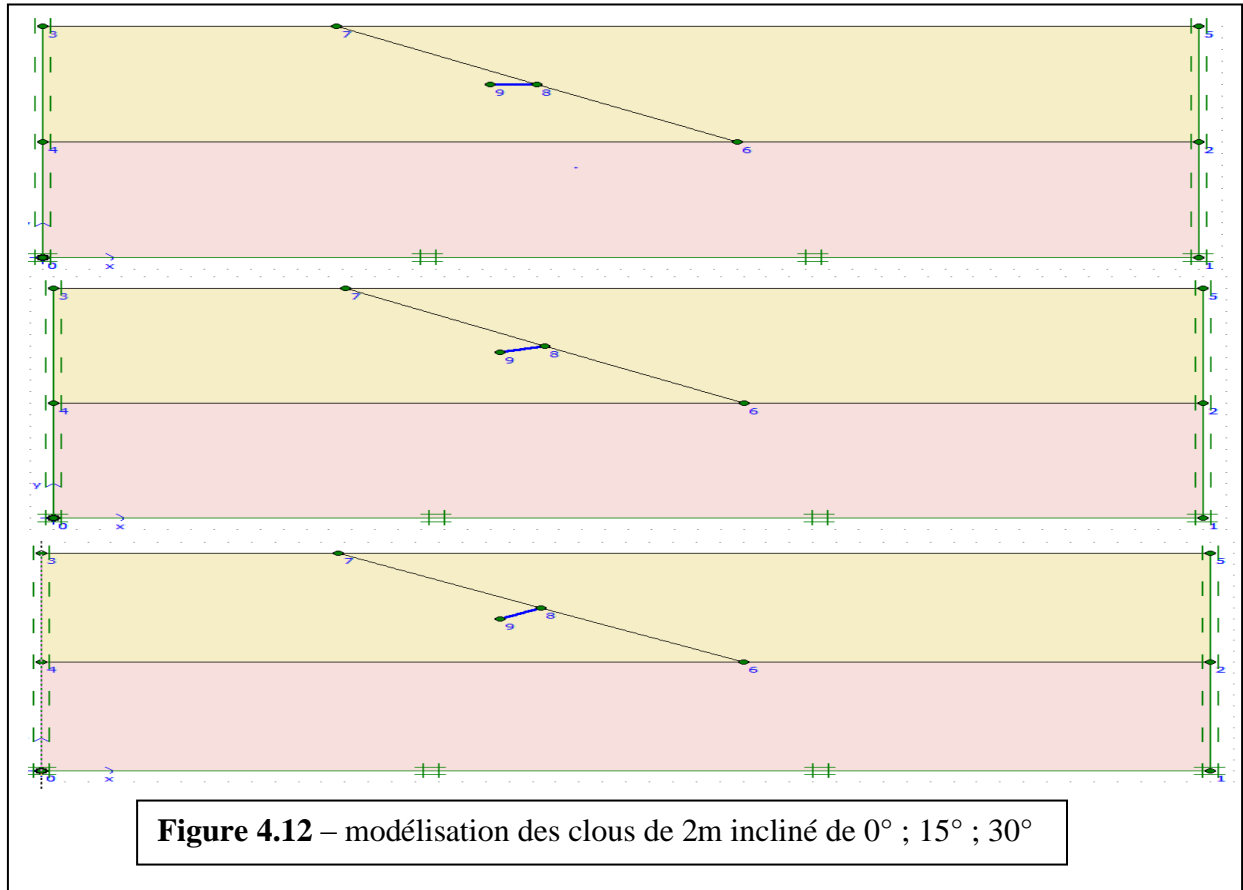


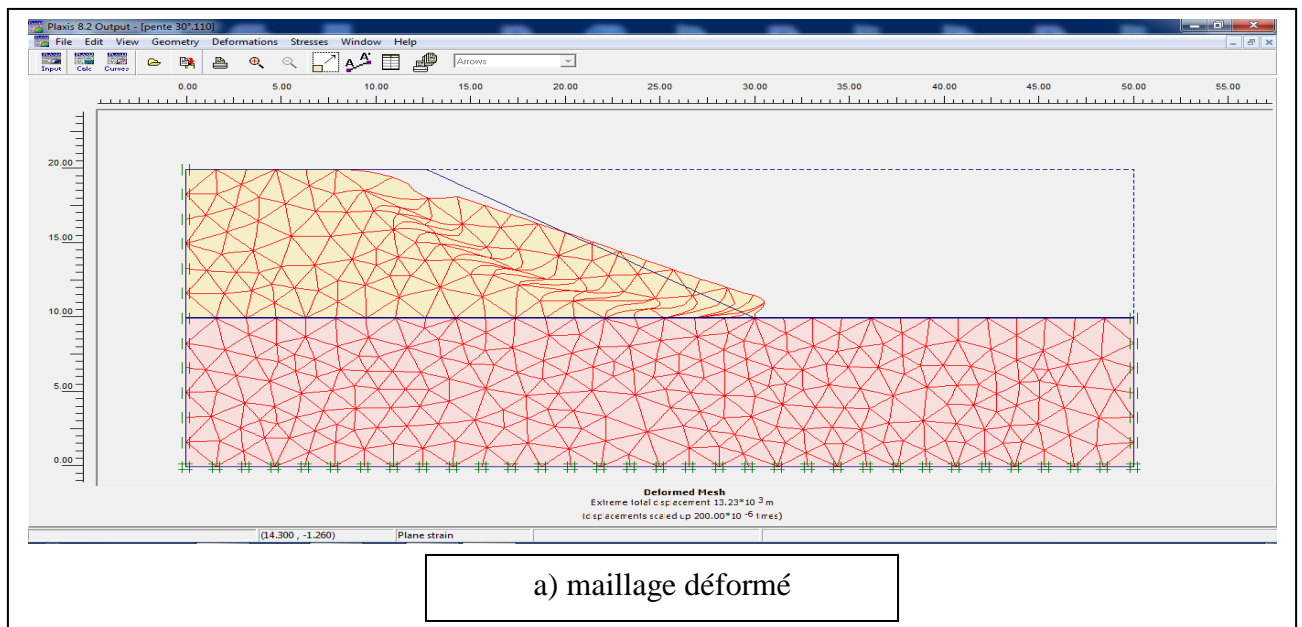
Figure 4.11- une pente de 30° sans clouage

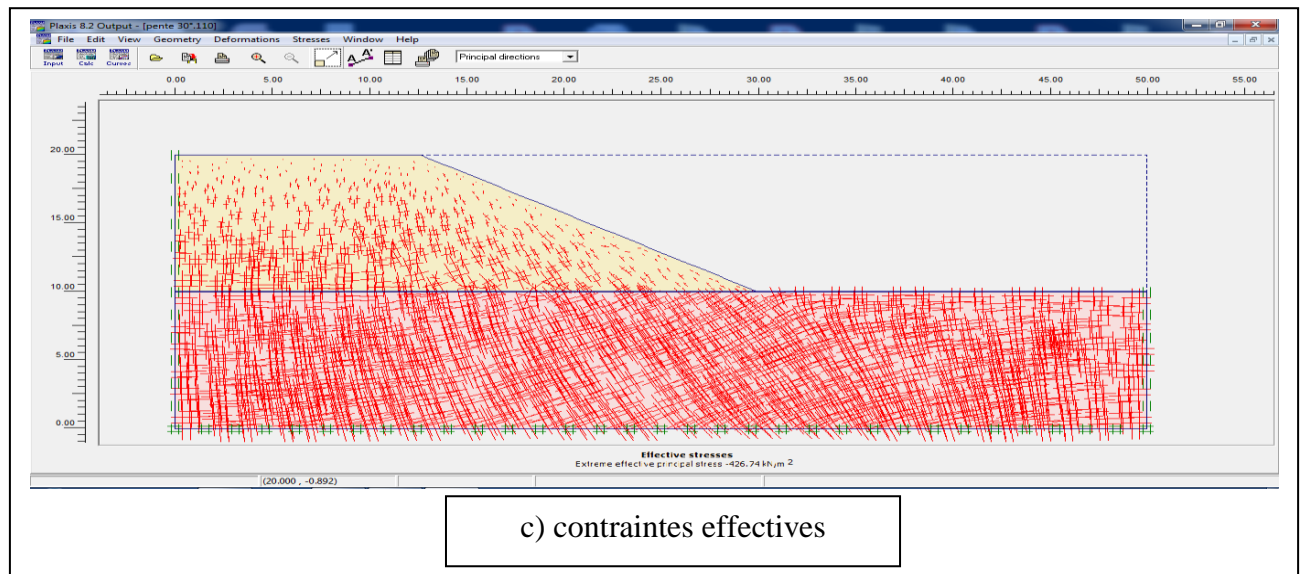
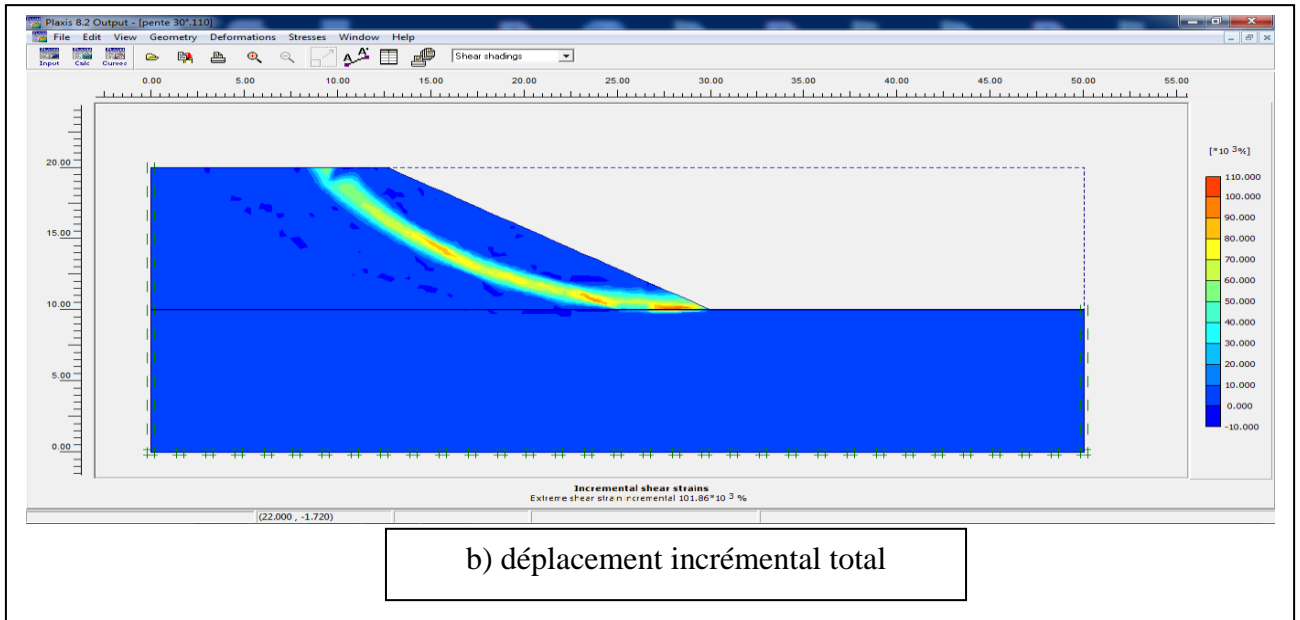


a) les résultats de calcul

-pour une pente de 30° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4.13) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	110 of 110	Extrapolation factor	1.000
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
Strength reduction factor	Msf:	0.000	Σ -Msf:	2.267
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000

OK Print Help

d) coefficient de sécurité

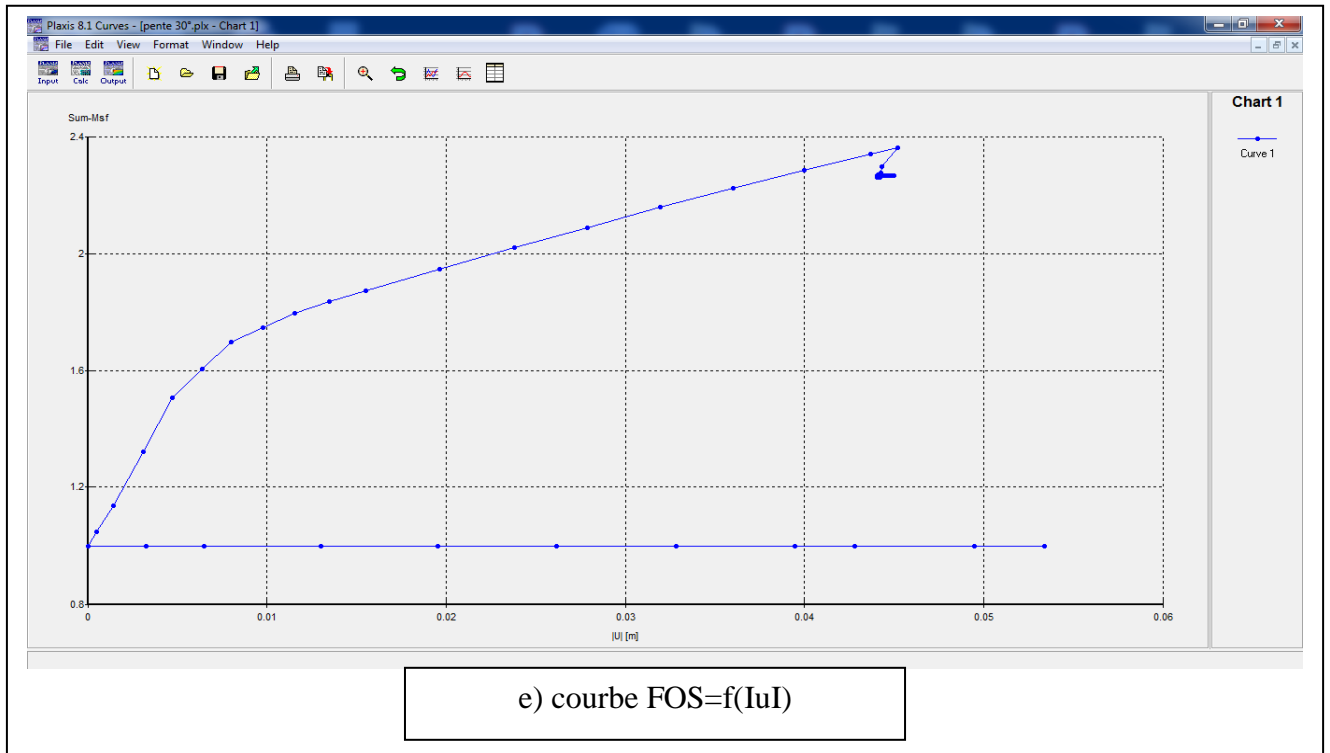
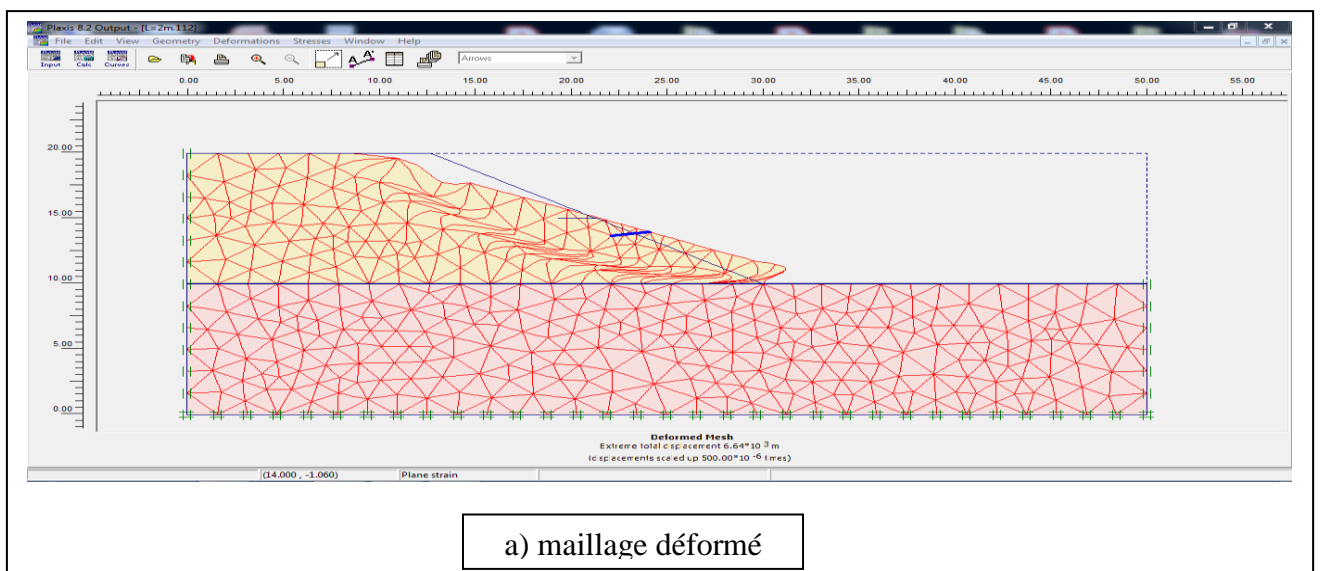
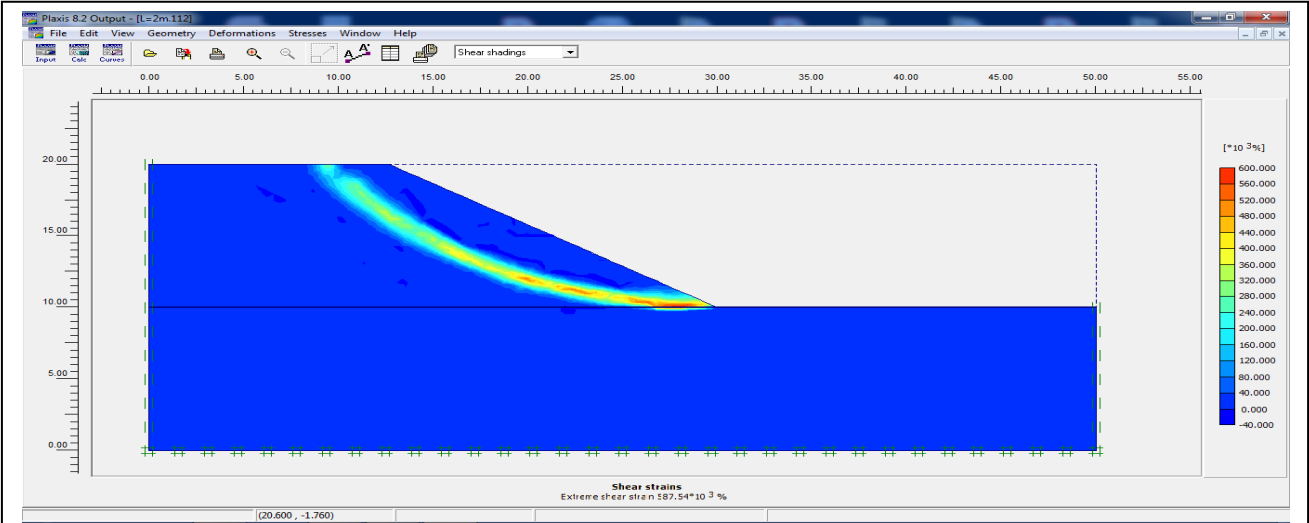


Figure 4.13 – les résultats de calcul (pente de 30° sans clouage)

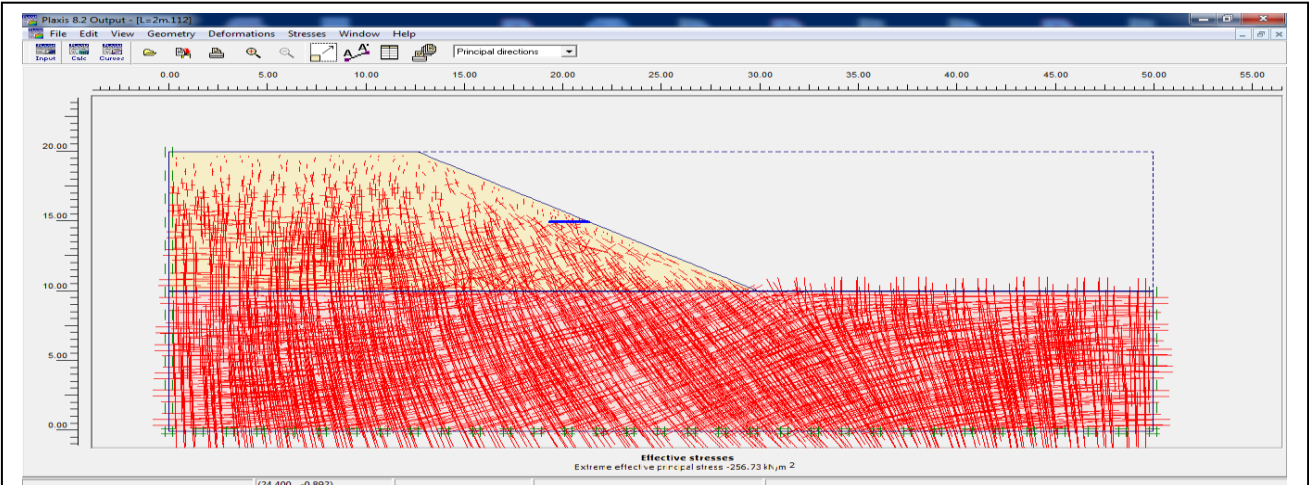
-pour $L=2m$ incliné 0° :

(FIG 4.14) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	112 of 112	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: 2.263
Time		Increment: 0.000	End time: 0.000
Dynamic Time		Increment: 0.000	End time: 0.000

OK Print Help

d) coefficient de sécurité

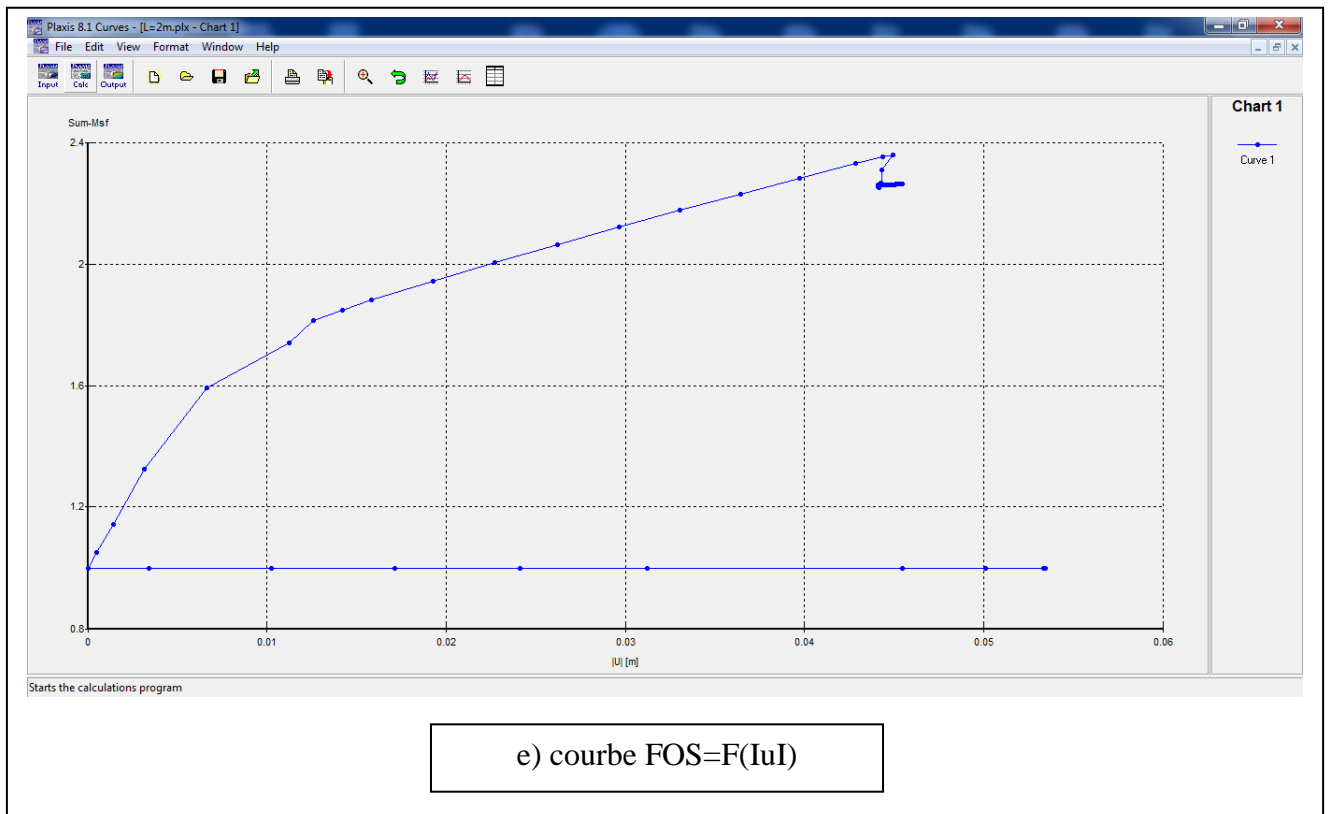
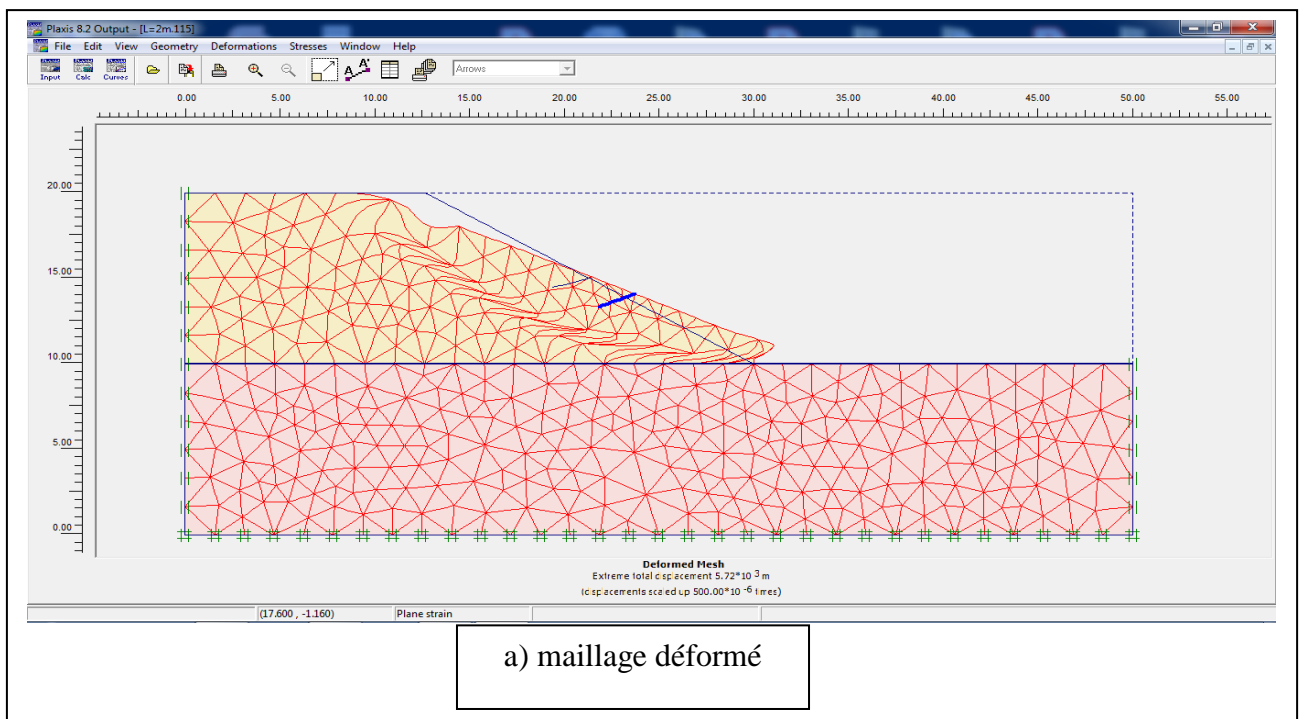
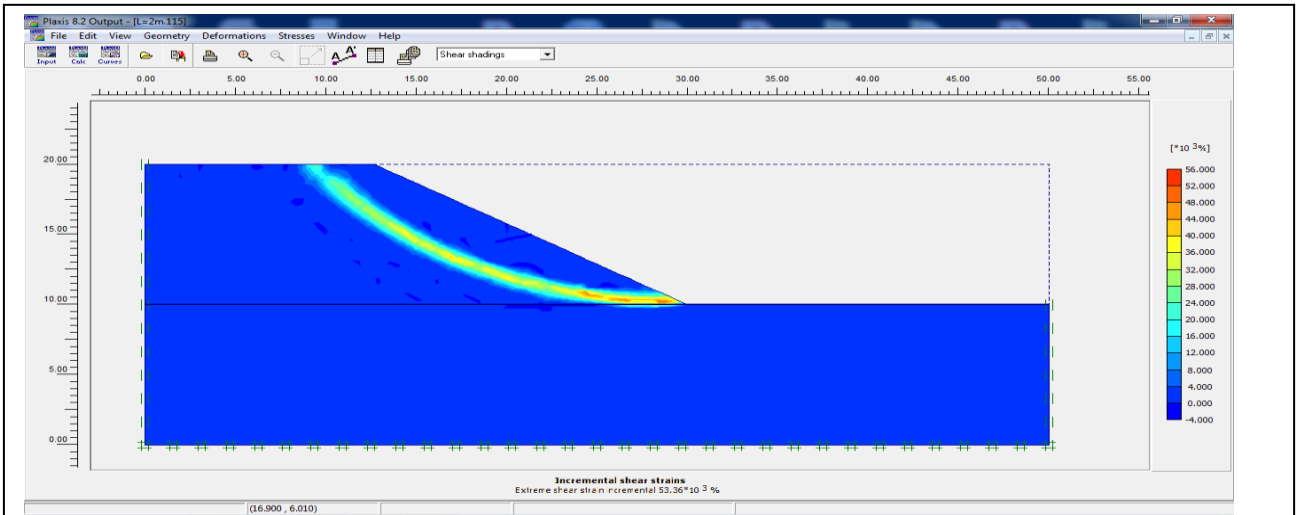


Figure 4.14 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 2m incliné 0°)

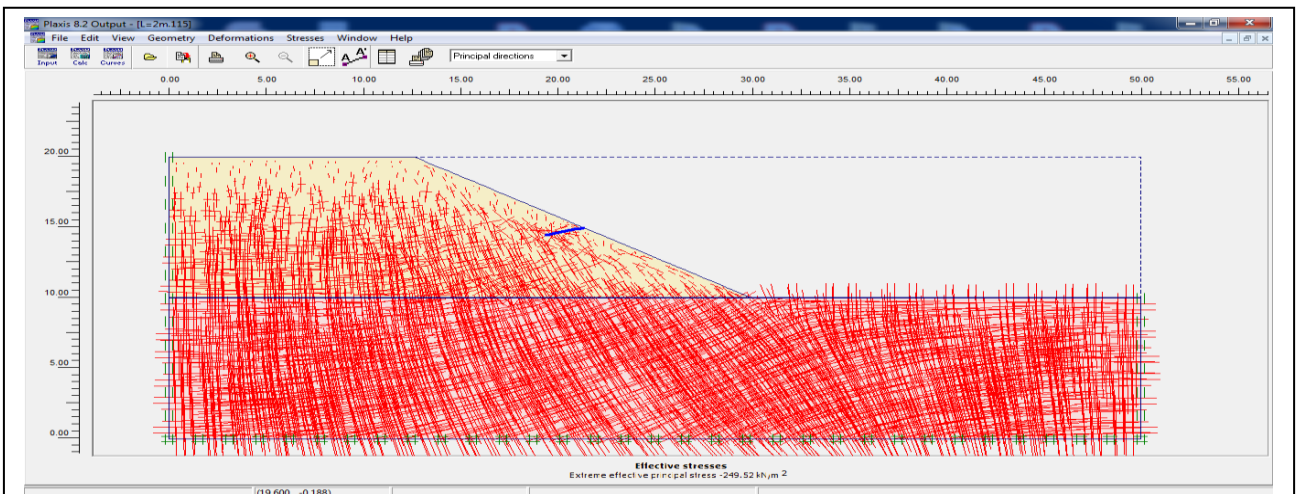
-pour L= 2m incliné 15° ;

(FIG 4.15) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	115 of 115	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:	2.257
Time		Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time		Increment:	0.000	End time:	0.000

OK Print Help

d) coefficient de sécurité

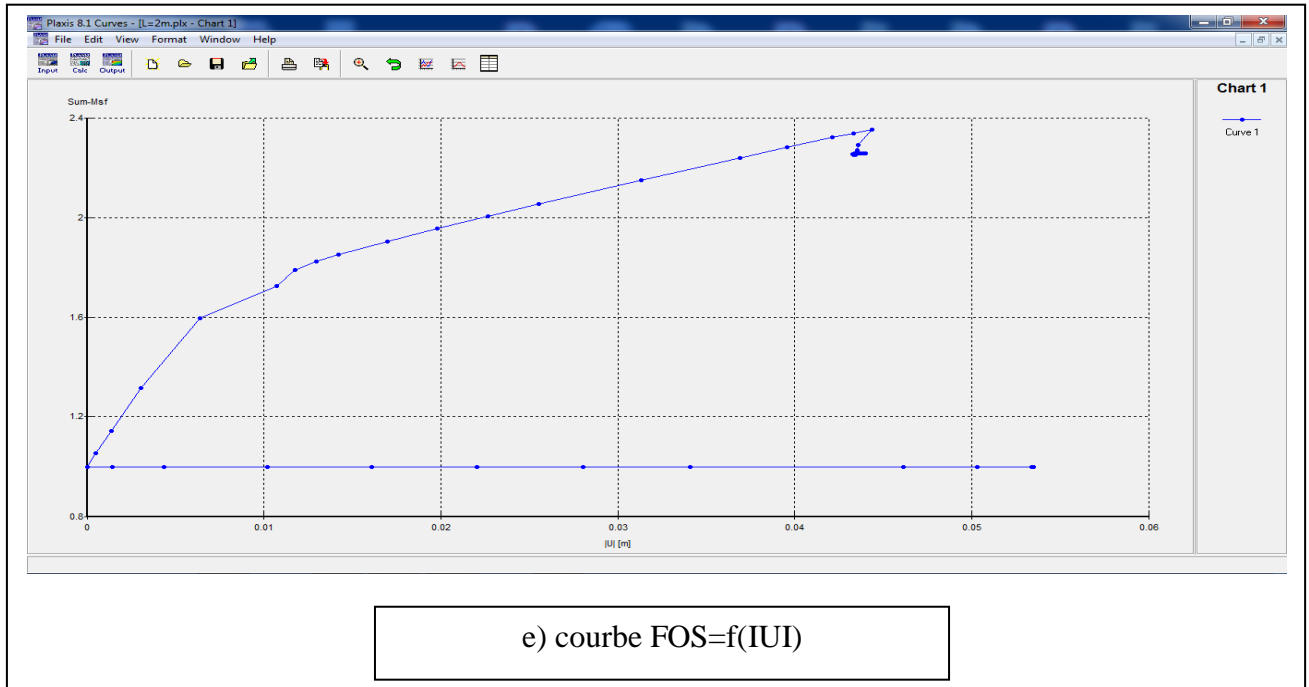
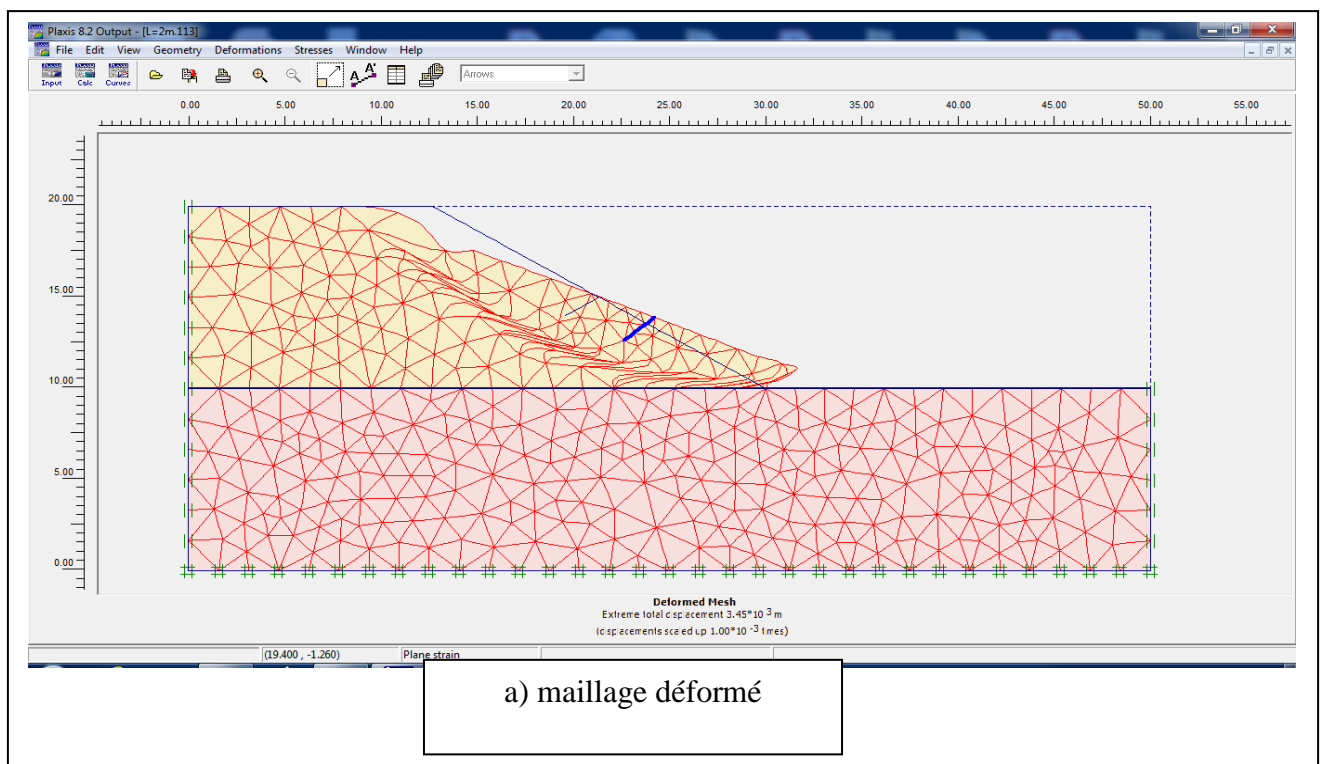
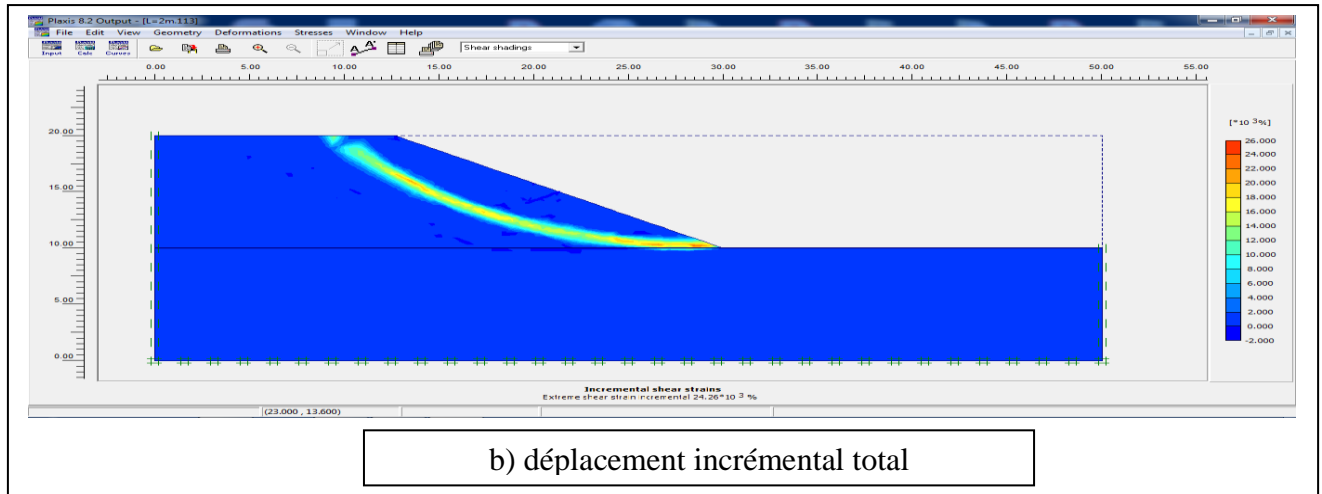


Figure 4.15 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 2m incliné 15°)

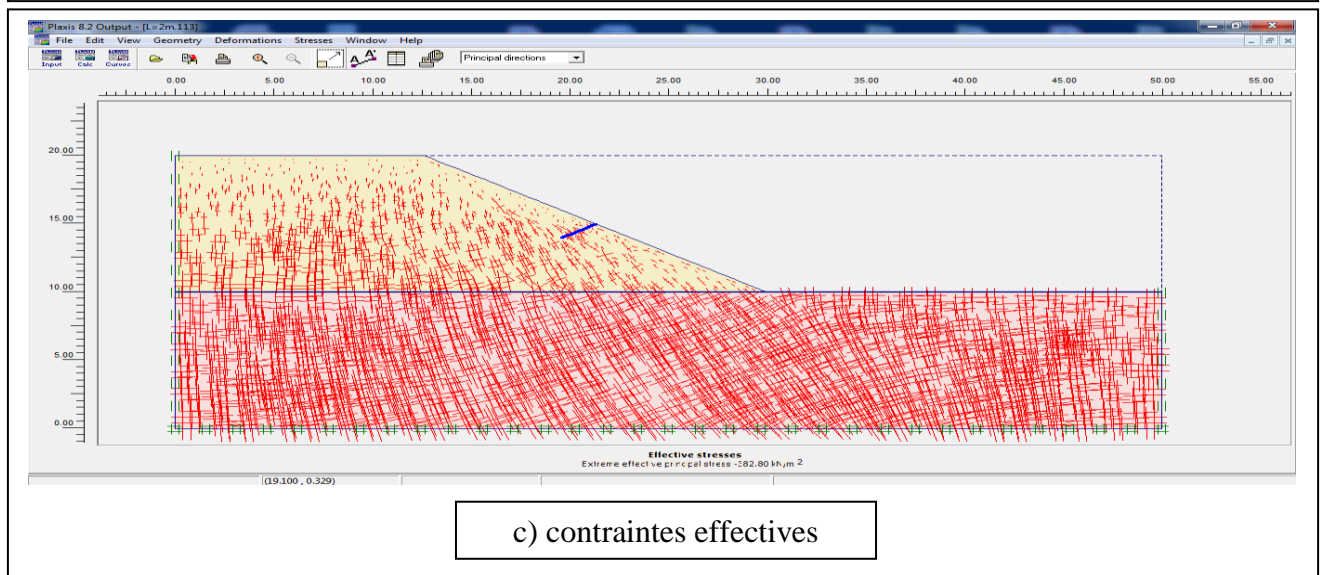
-pour L= 2m incliné 30° ;

(FIG 4.16) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	113 of 113	Extrapolation factor	0.500
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:	2.248
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000

OK Print Help

d) coefficient de sécurité

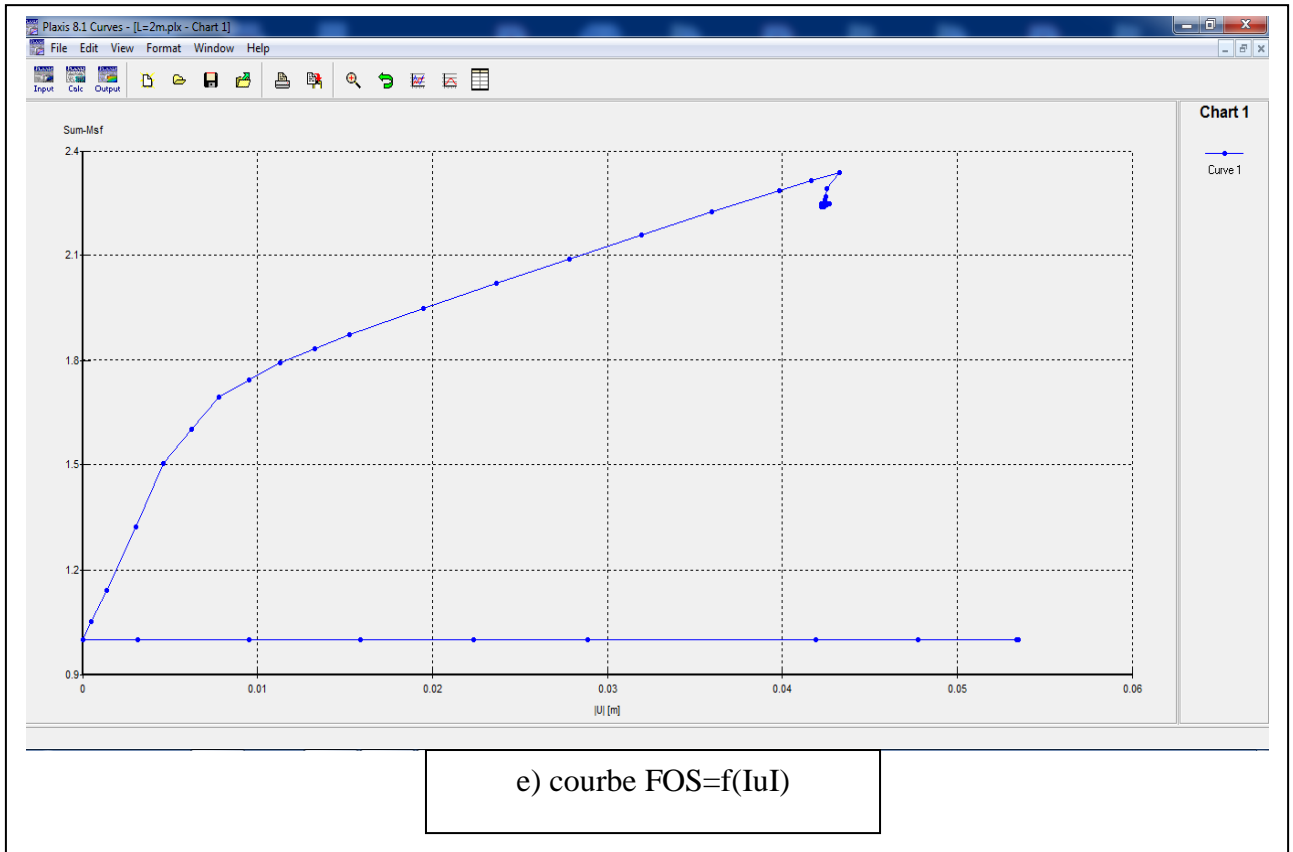


Figure 4.16 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 2m incliné 30°)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **3 ; 5 ; 7m** pour les mêmes inclinaisons **0° ; 15° ; 30°**.

-Pour la pente de 30° sans amélioration (**sans clouage**) le coefficient de sécurité globale est de :

$$\text{FOS} = 2.267$$

Les résultats résumés dans le tableau suivant :

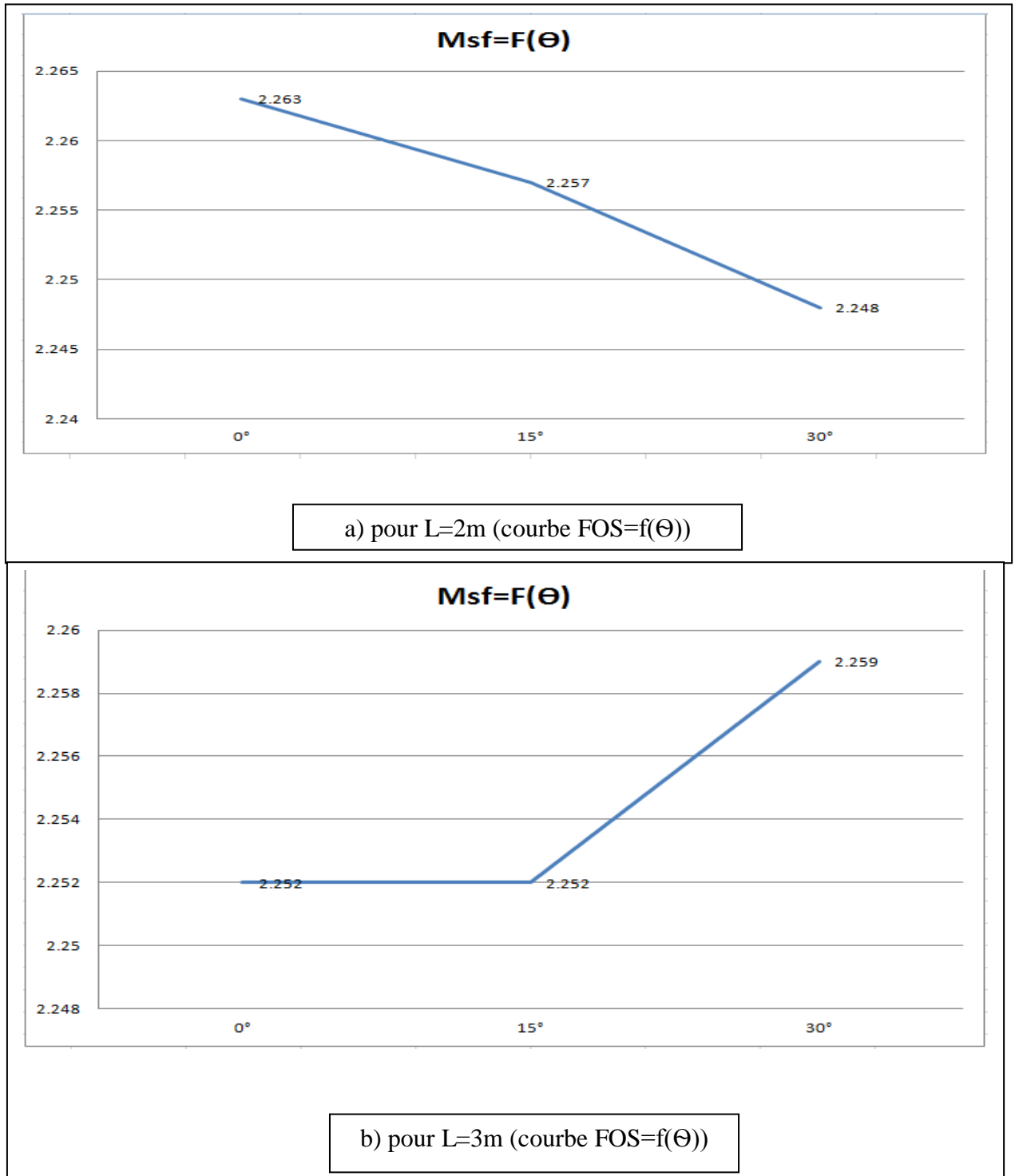
Pente de 30°												
Inclinaison	0°				15°				30°			
n	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	2.263	2.252	2.254	2.256	2.257	2.252	2.26	2.393	2.248	2.259	2.337	2.588

Tableau. 4.3 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

b) discussions de résultats

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.17) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;



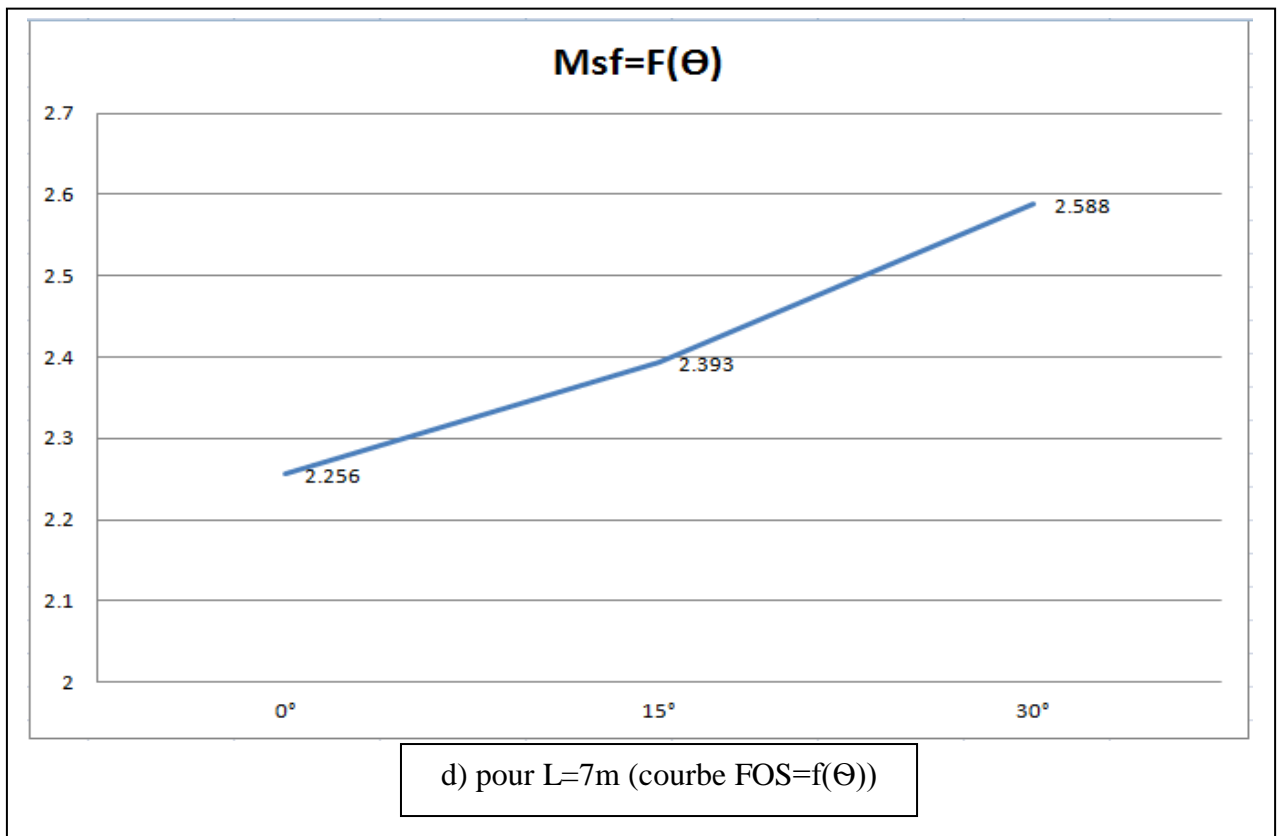
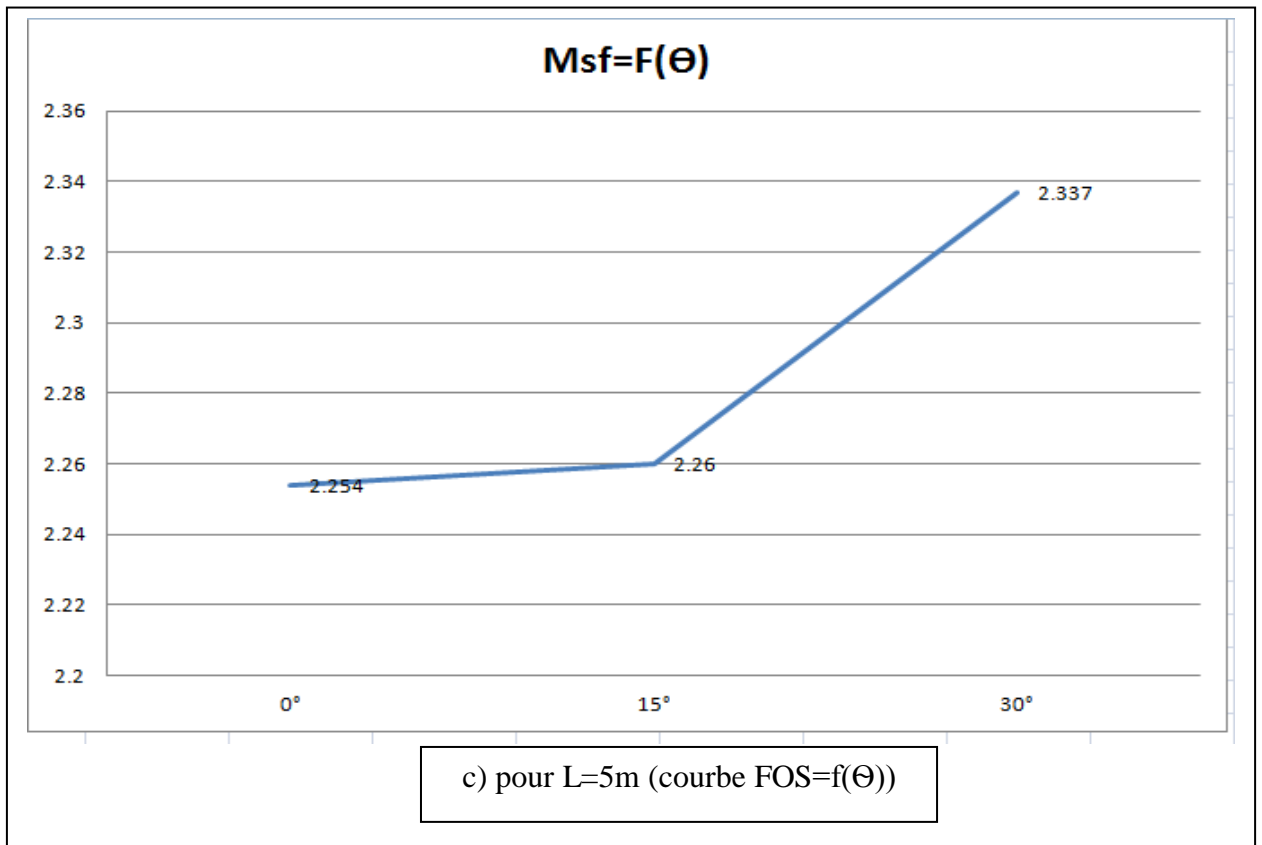


Figure 4.17 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que

Le terrain est déjà stable FOS=2.267 donc on va étudier le développement de coefficient de sécurité en présence des clous avec des différentes longueurs et différentes inclinaisons.

-avec des clous de 2m et 3m inclinés de 0° ; 15° ; 30° on remarque que FOS diminue, en peut dire que les clous dans ce cas travaillent comme une surcharge.

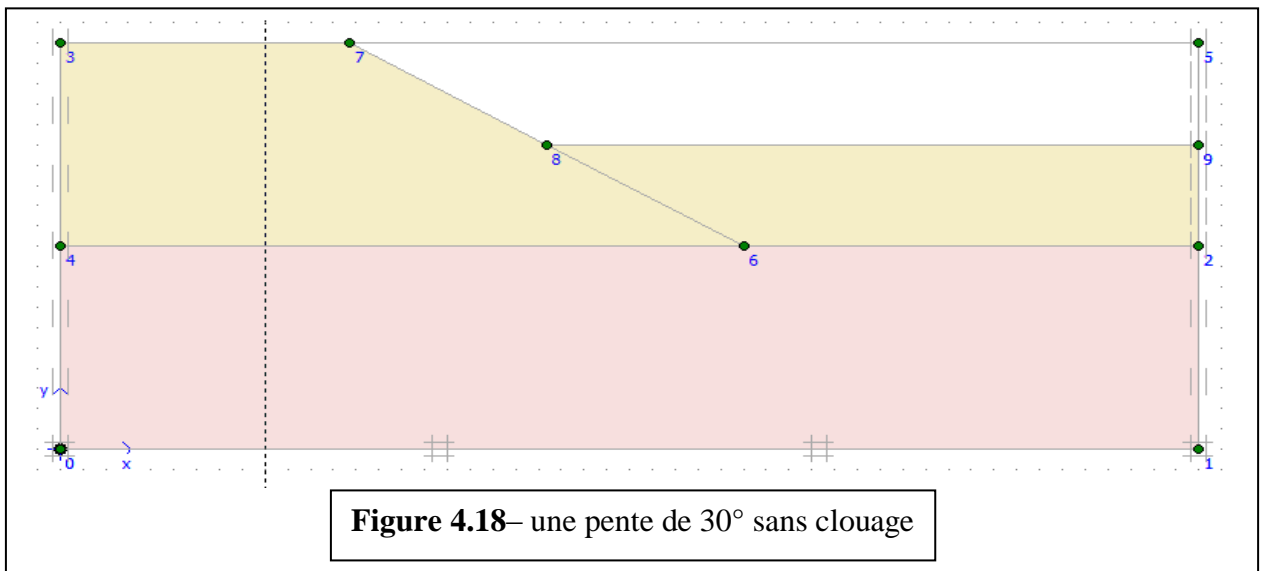
-avec des clous de 5 m le coefficient de sécurité commence à augmenter et dépasse l'état initial seulement avec une inclinaison de 30° FOS=2.337.

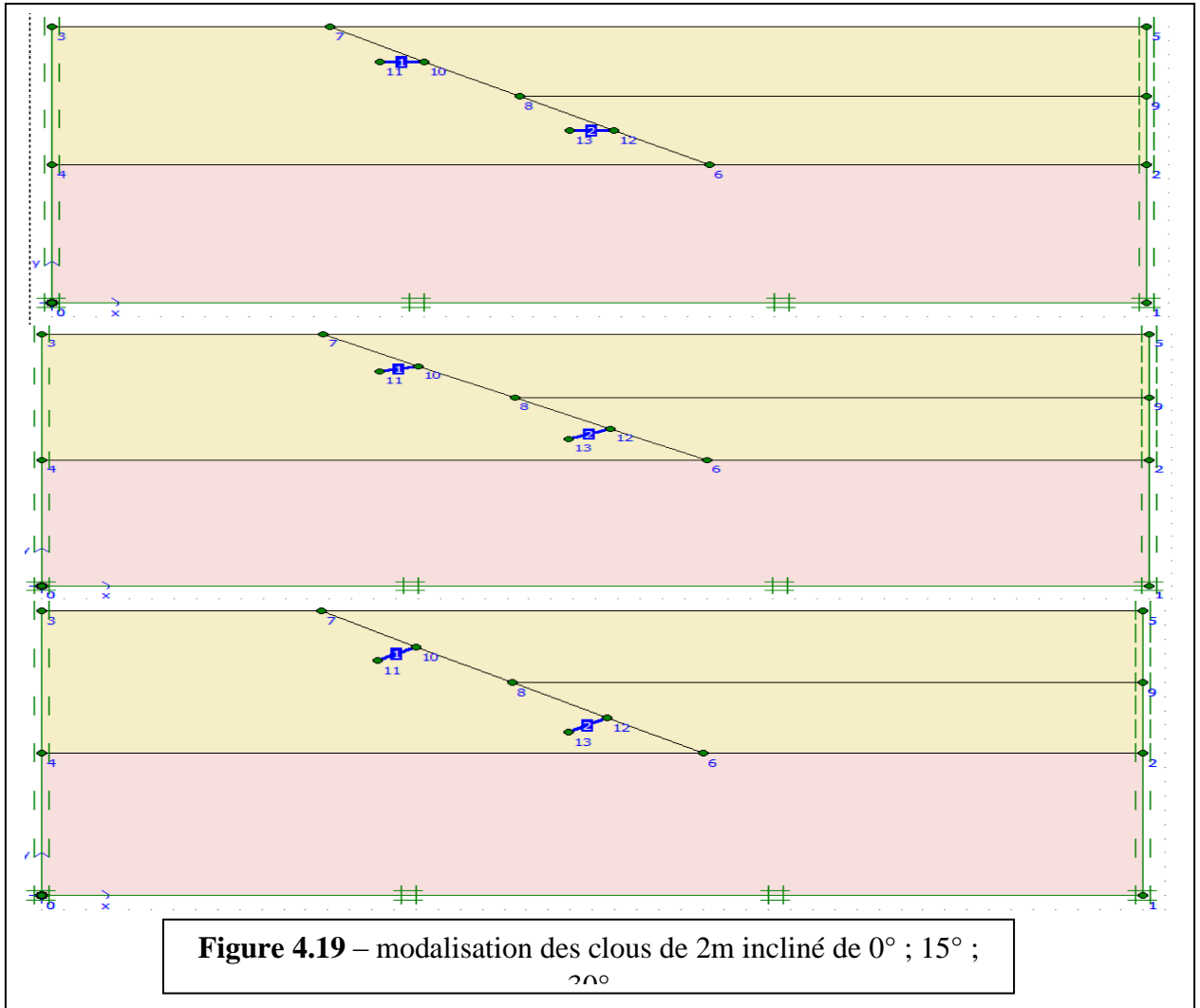
- avec des clous de 7m le coefficient de sécurité dépasse l'état initial et commence à travailler pour une inclinaison de 15° FOS=2.393.

- la longueur des clous augmente le coefficient de sécurité augmente et l'inclinaison des clous diminue.

4.4.1.2) excavation par partie

a-excavation 1 :

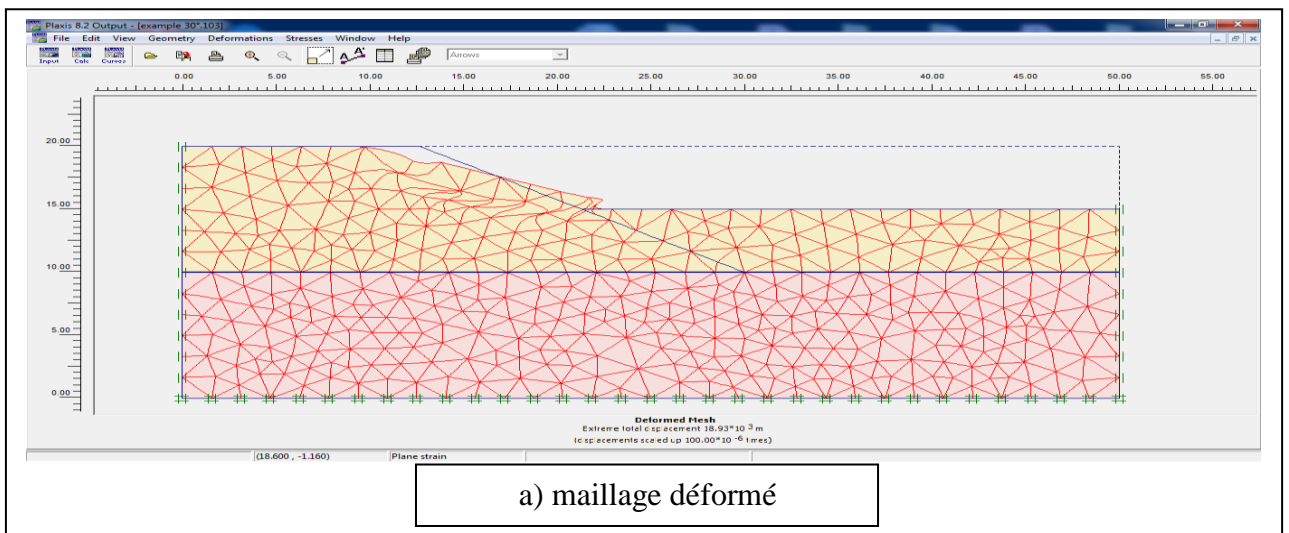


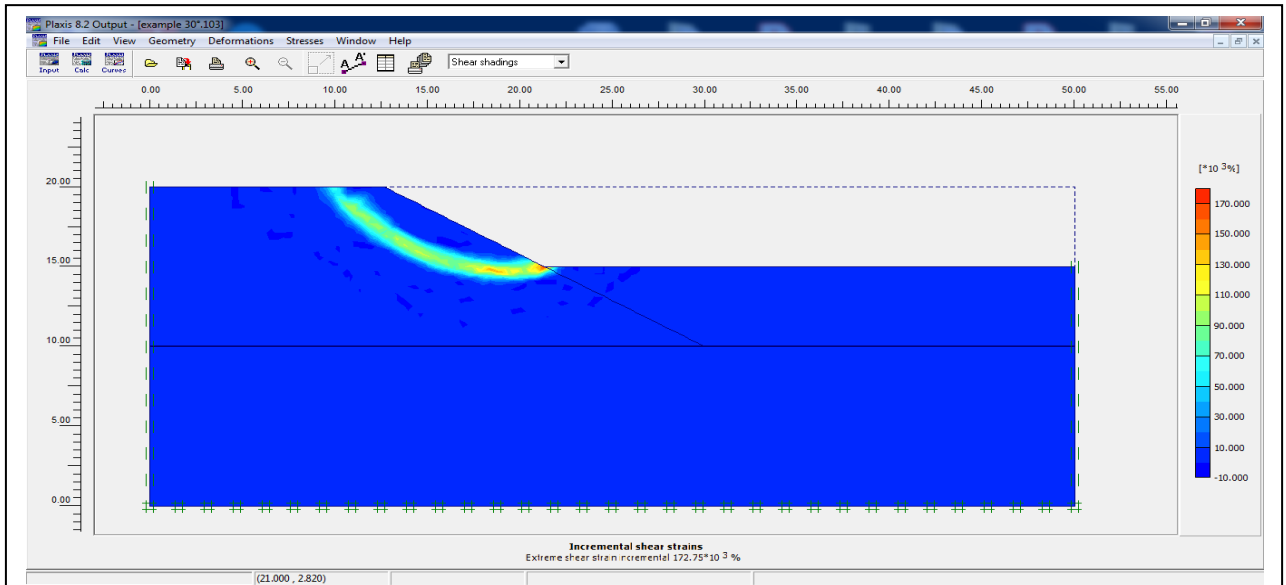


-les résultats de calcul :

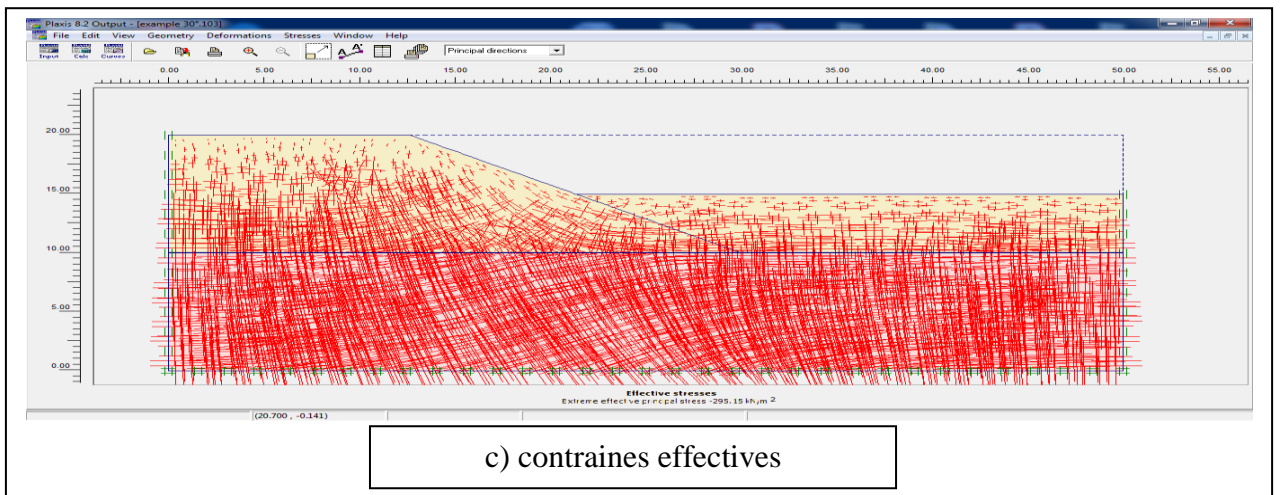
-Pour une pente de 30° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4.20) montre les résultats de (a) jusqu'a (e) :





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	103 of 103	Extrapolation factor	0.500
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
Strength reduction factor	Msf:	0.000	Σ -Msf:	3.028
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000

OK Print Help

d) coefficient de sécurité

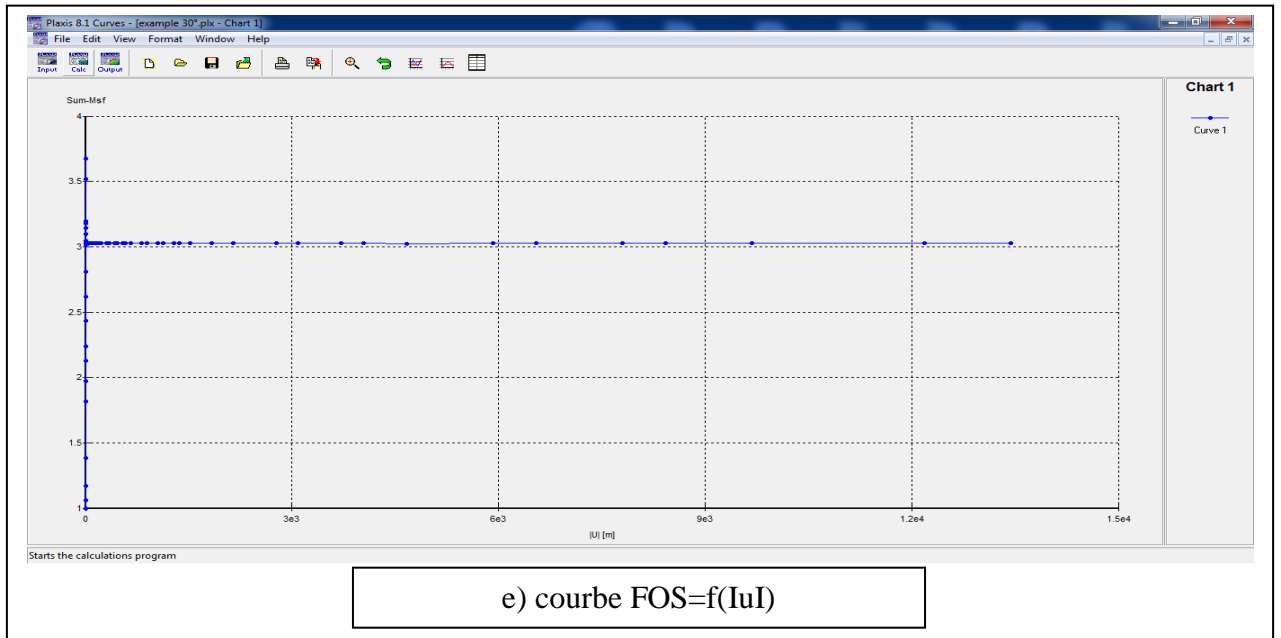
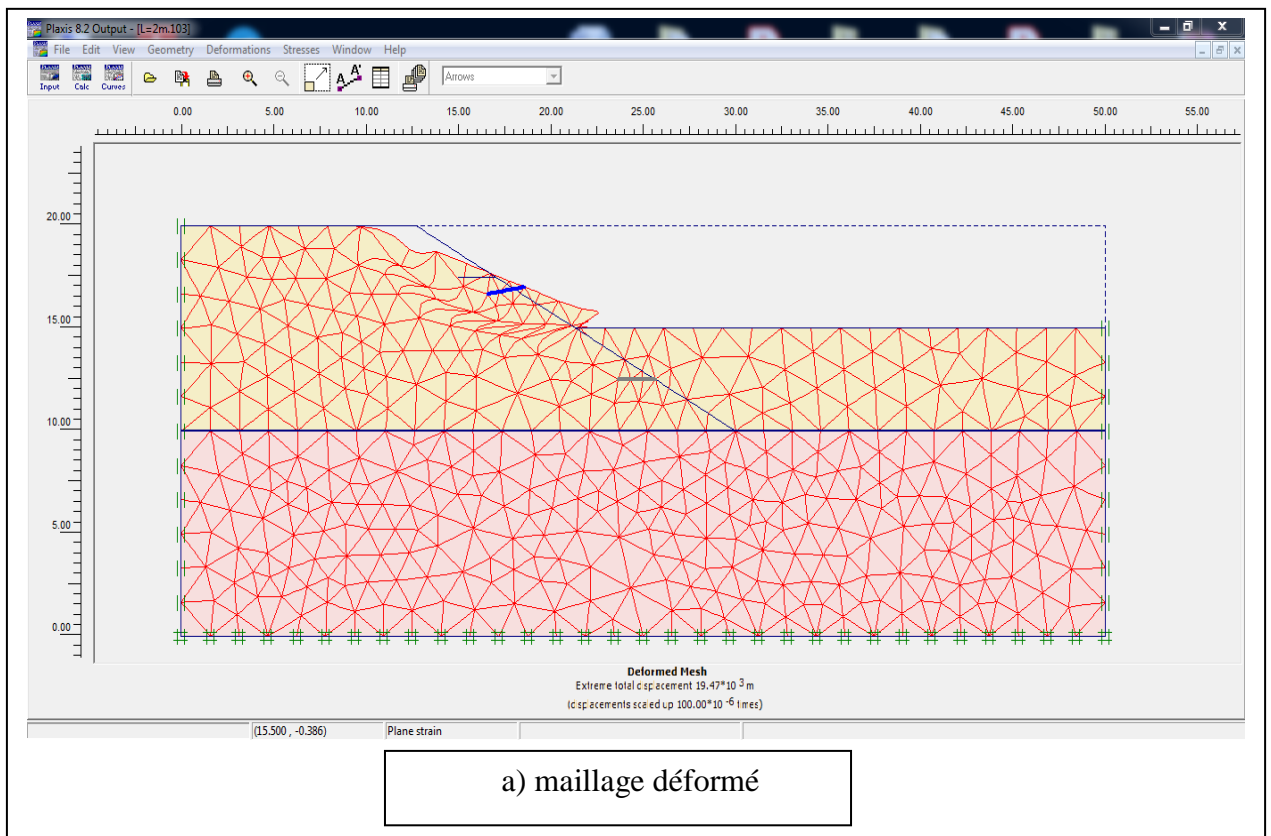
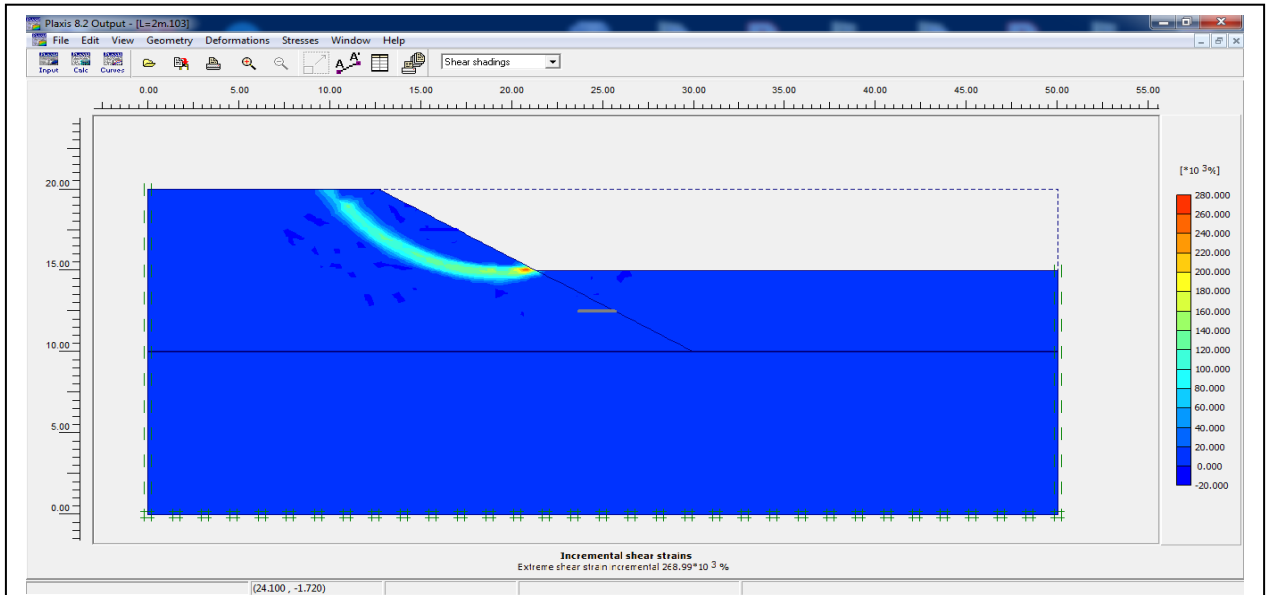


Figure 4.20 – les résultats de calcul (sol sans clouage)

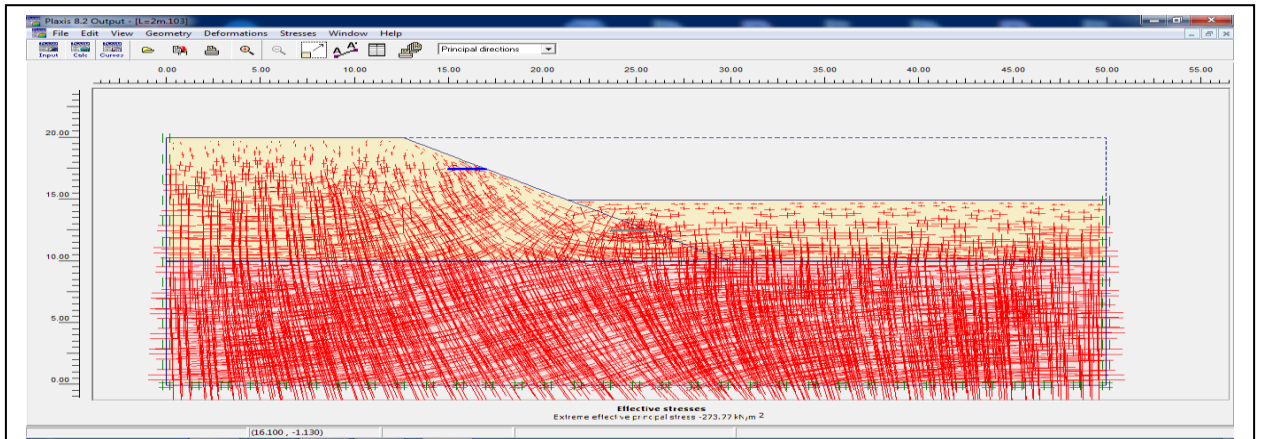
-Pour $L=2\text{m}$ incliné 0° :

(FIG 4.21) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step	103 of 103	Extrapolation factor	0.500
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:	3.033
Time		Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time		Increment:	0.000	End time:	0.000

d) coefficient de sécurité

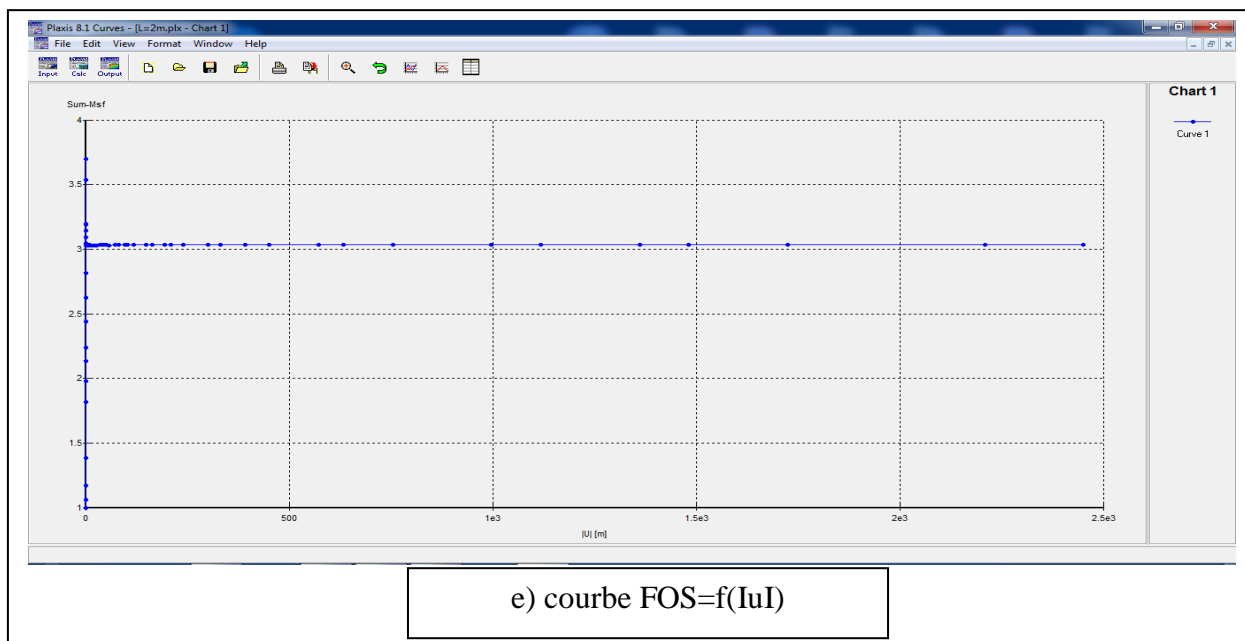


Figure 4.21 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 2m incliné 0°

Remarque : le même travail est calculé pour les clous 3, 5,7m pour les mêmes inclinaisons 0° ; 15° ; 30°.

-pour la pente de 30° (excavation 1) sans amélioration (sans clouage) le coefficient de sécurité globale est de :

$$\text{FOS}=3.028$$

-Les résultats résumés dans le tableau suivant :

Pente de 30° (excavation 1)												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	3.03	3.035	3.096	3.349	3.018	3.036	3.481	3.664	3.051	3.063	3.62	3.666

Tableau. 4.4 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

- discussions de résultats :

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.22) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;

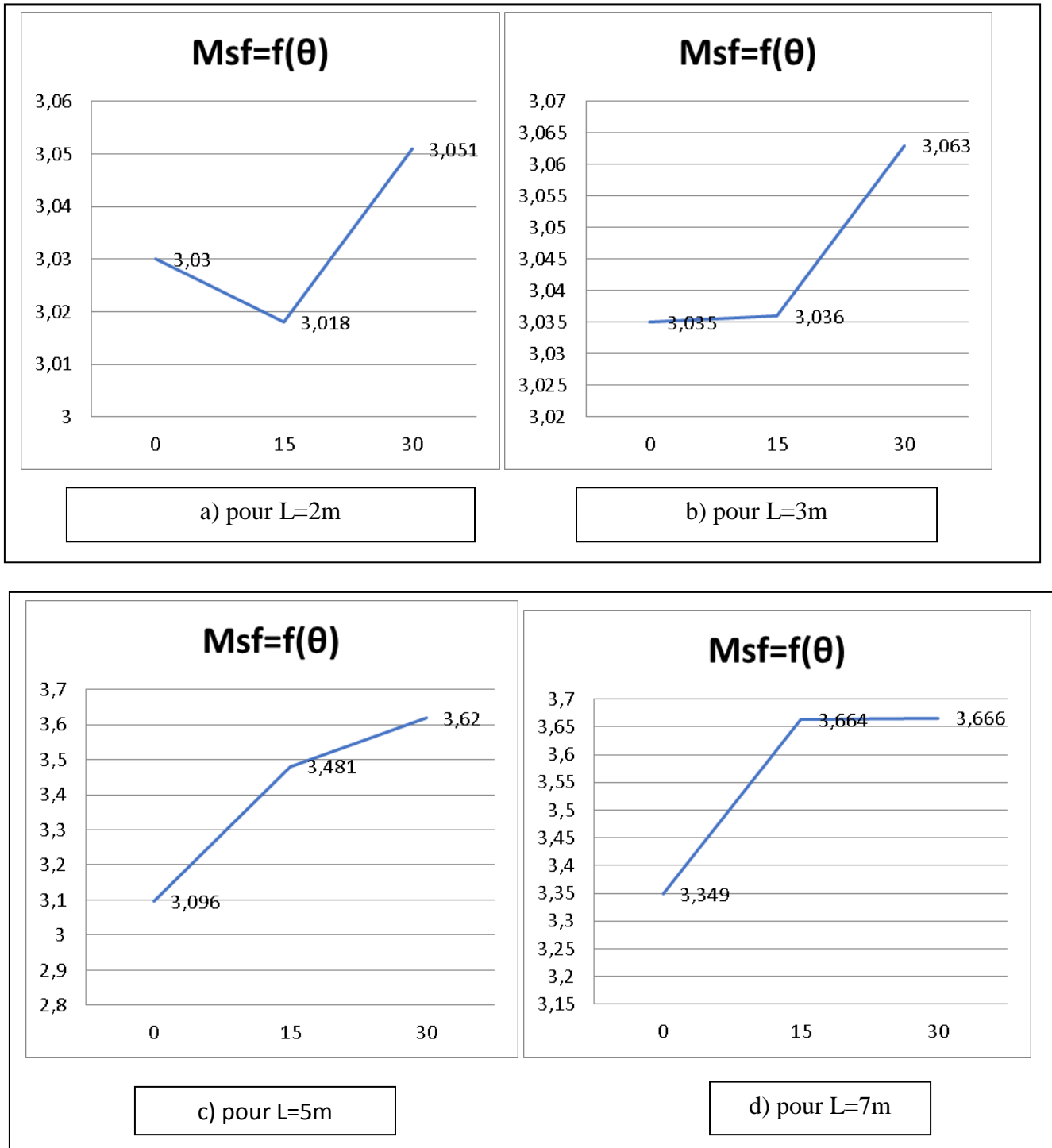


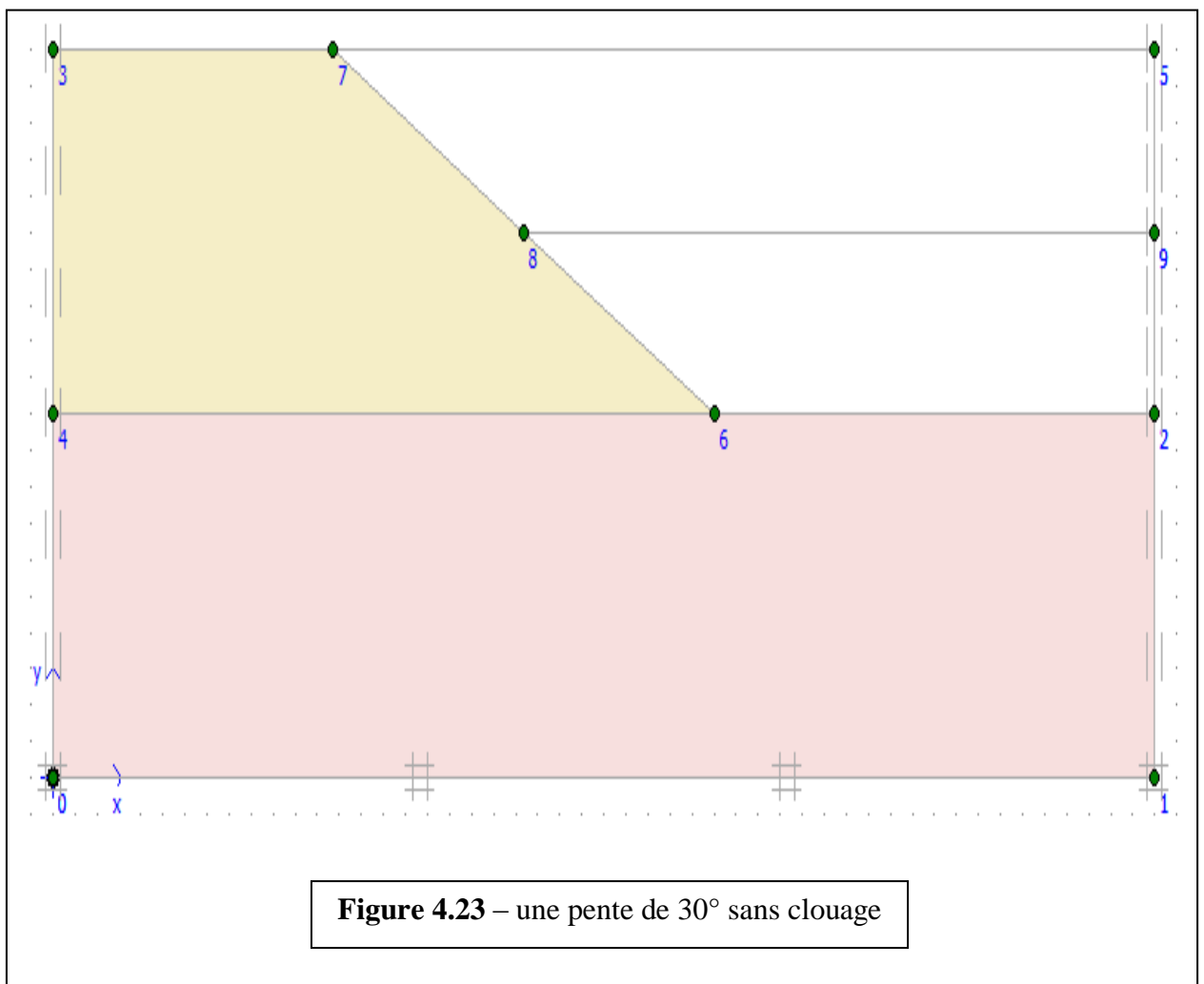
Figure 4.22 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que :

-avec les clous de 2 m incliné 0° et 15° en remarque que le coefficient de sécurité reste le même ou inférieure par rapport a FOS (sans clouage), dans ce cas les clous travaillent comme une surcharge, par contre l'inclinaison 30° a donné un coefficient supérieure a la valeur initiale (sans clouage).

-avec des clous de 3, 5,7m incliné de 0° ; 15° ; 30° le coefficient de sécurité augment avec l'augmentation de la longueur et l'inclinaison.

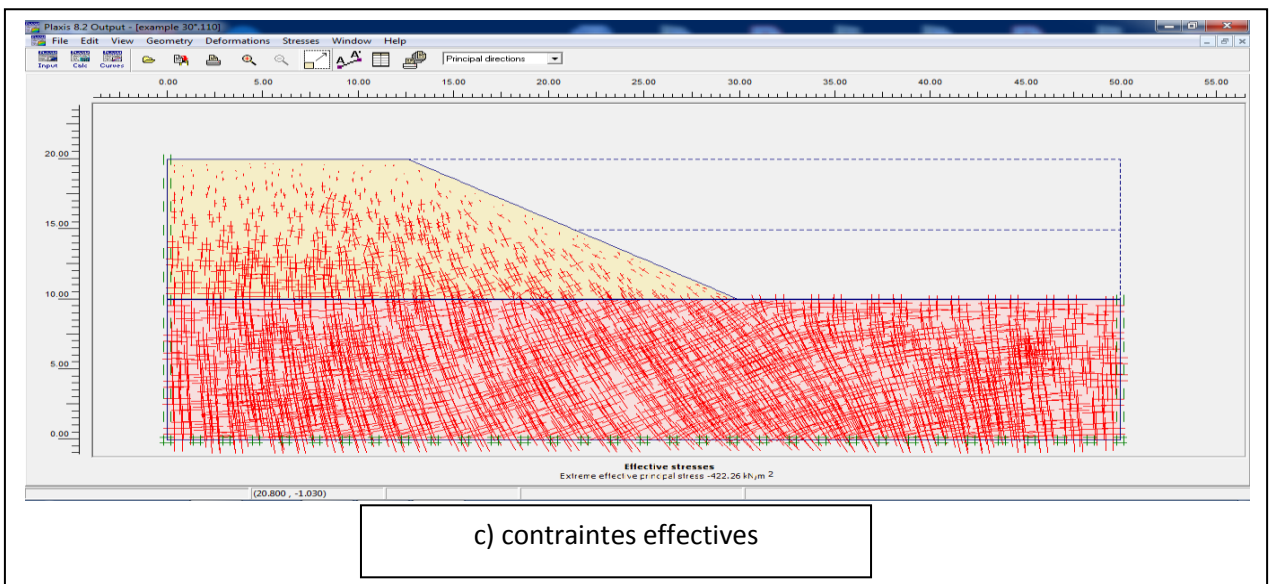
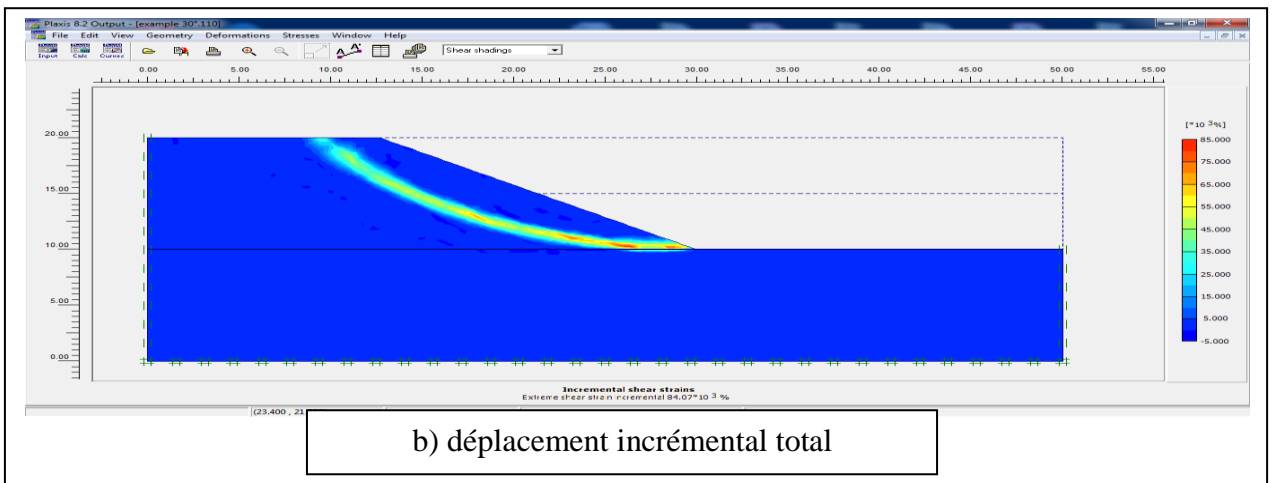
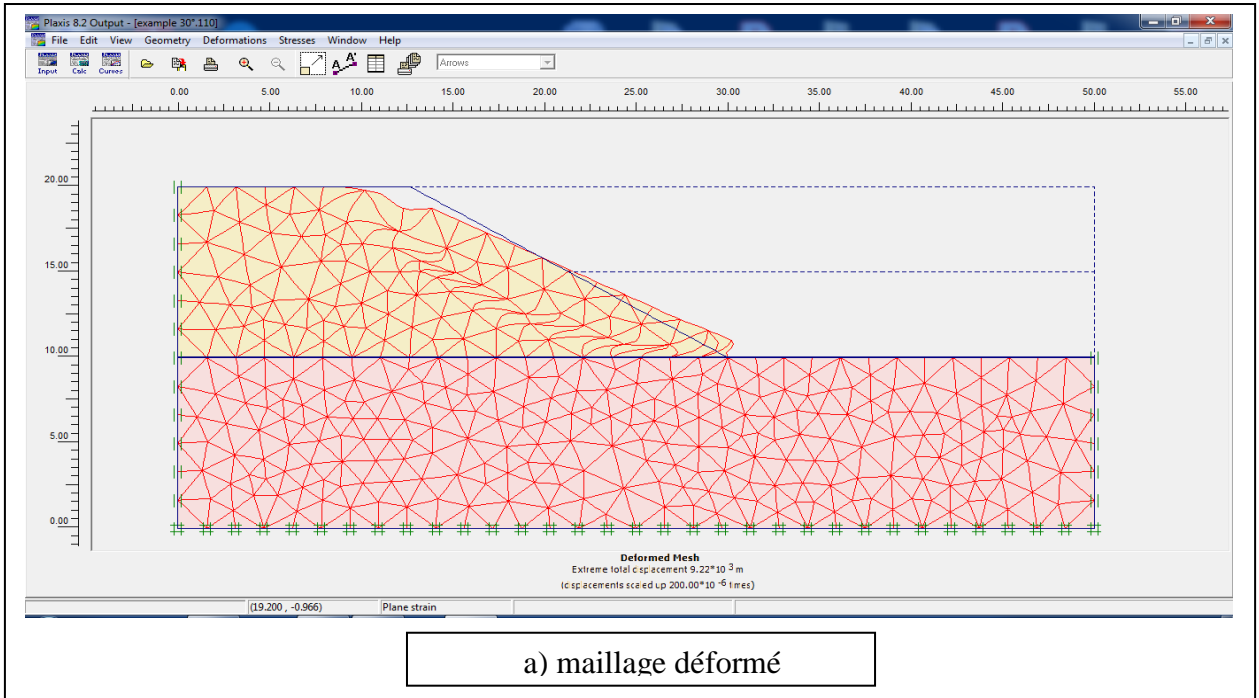
b) excavation 2 :

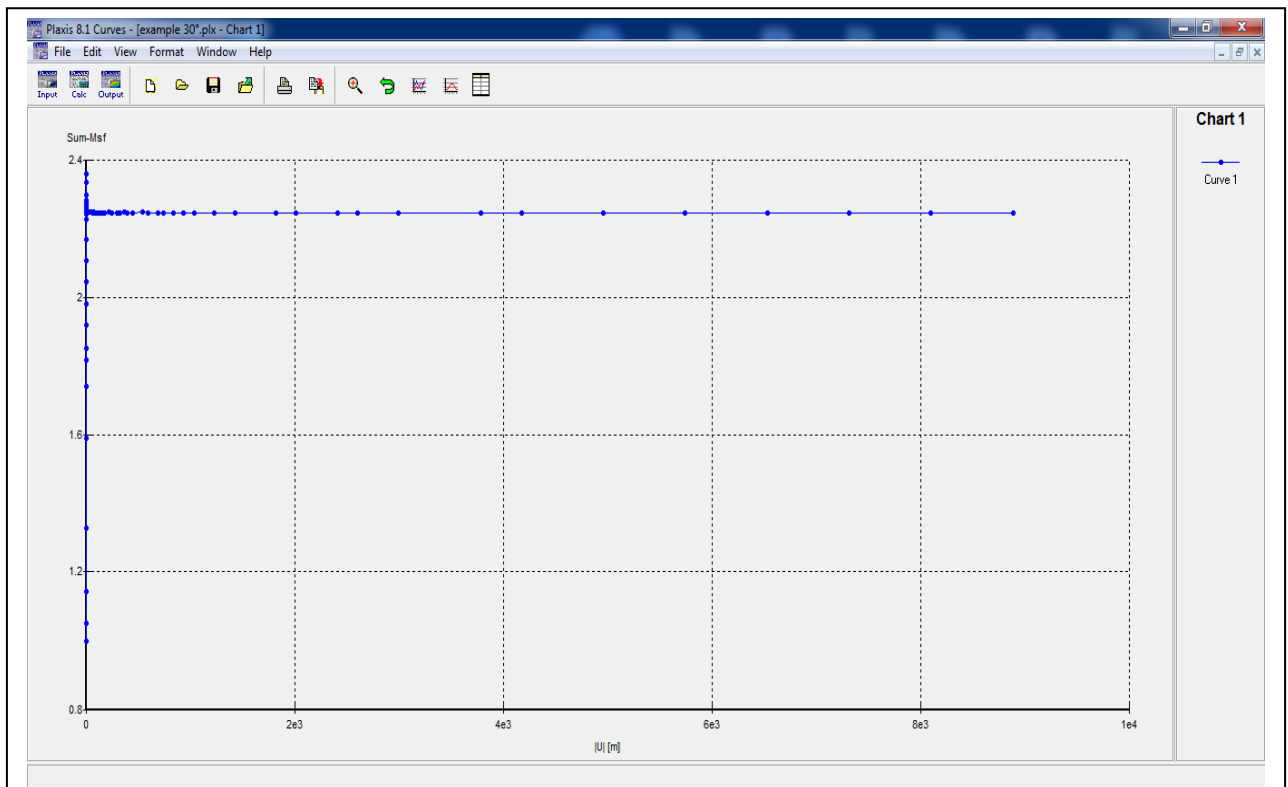
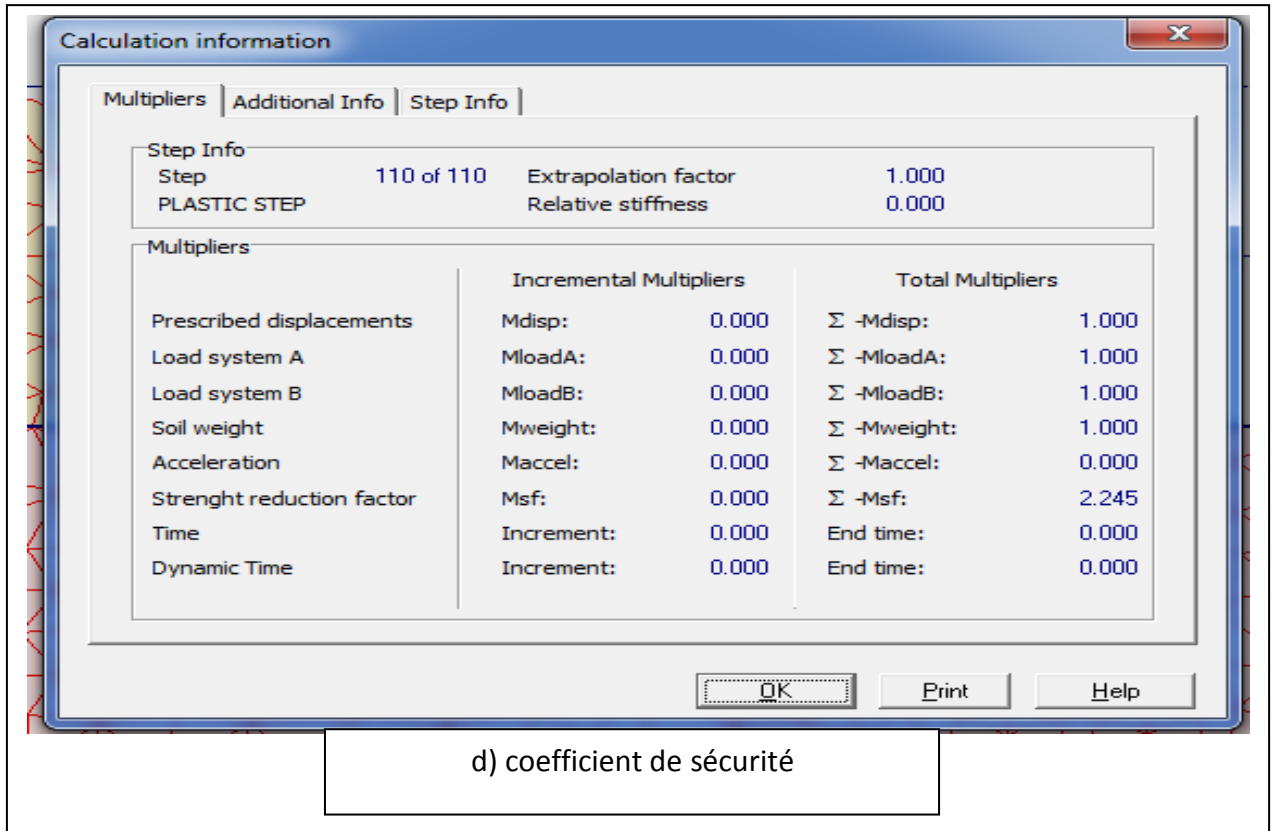


-les résultats de calcule :

-Pour une pente de 30° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4.24) montre les résultats de (a) jusqu'a(e) :



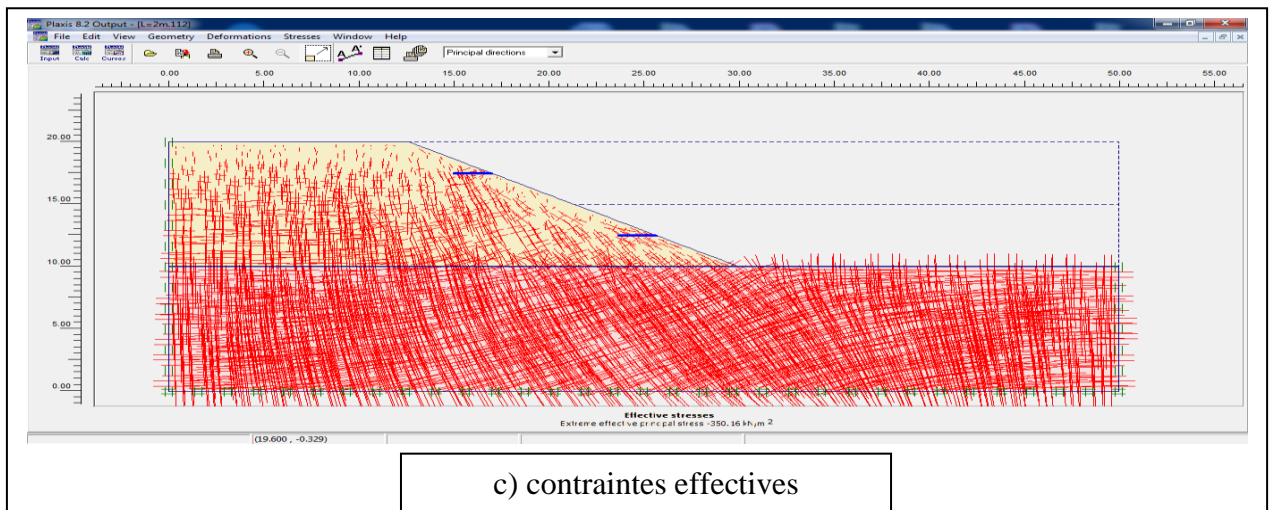
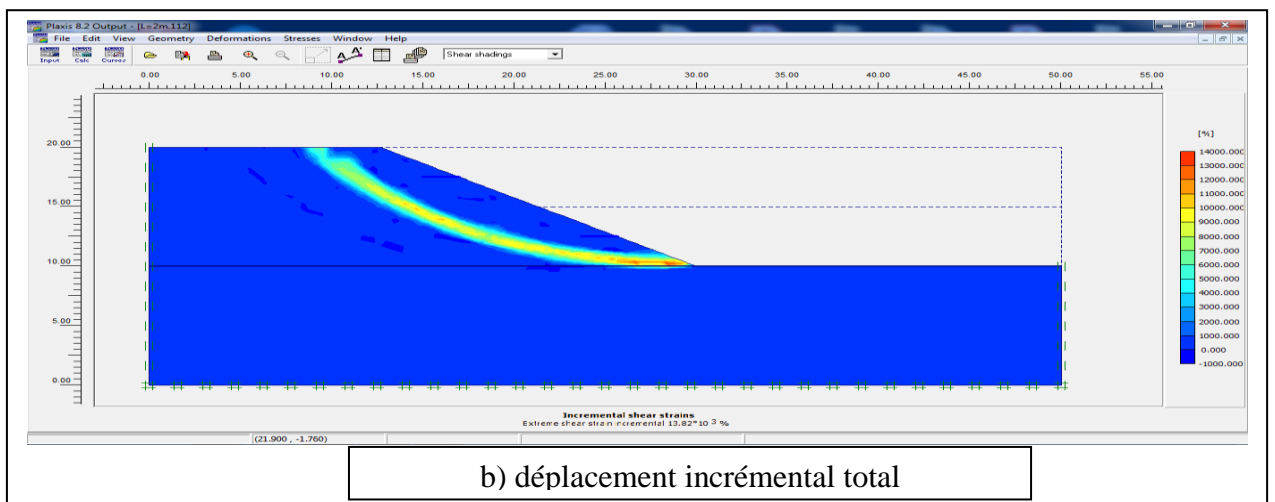
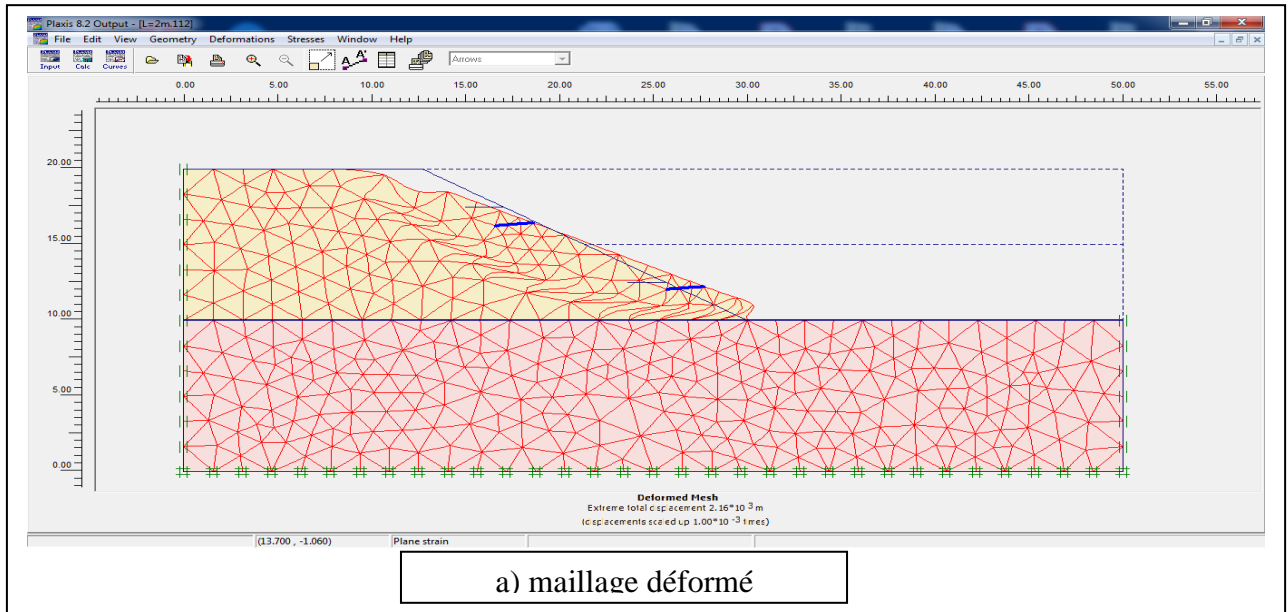


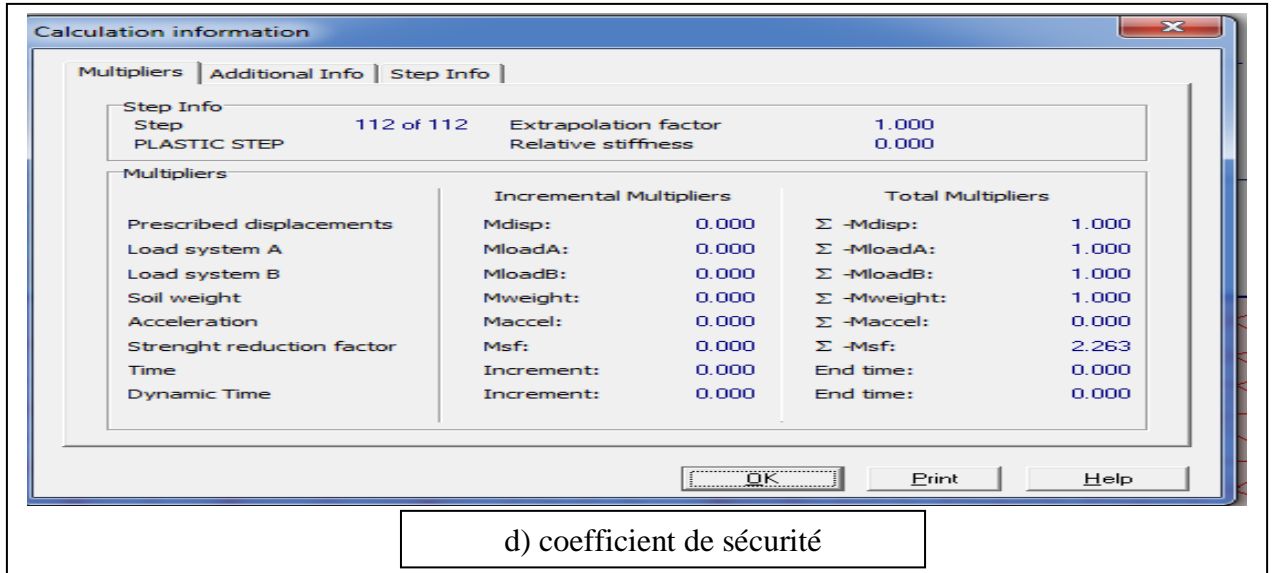
e) courbe FOS=f(IuI)

Figure 4.24 – les résultats de calcul (pente de 30° sans clouage)

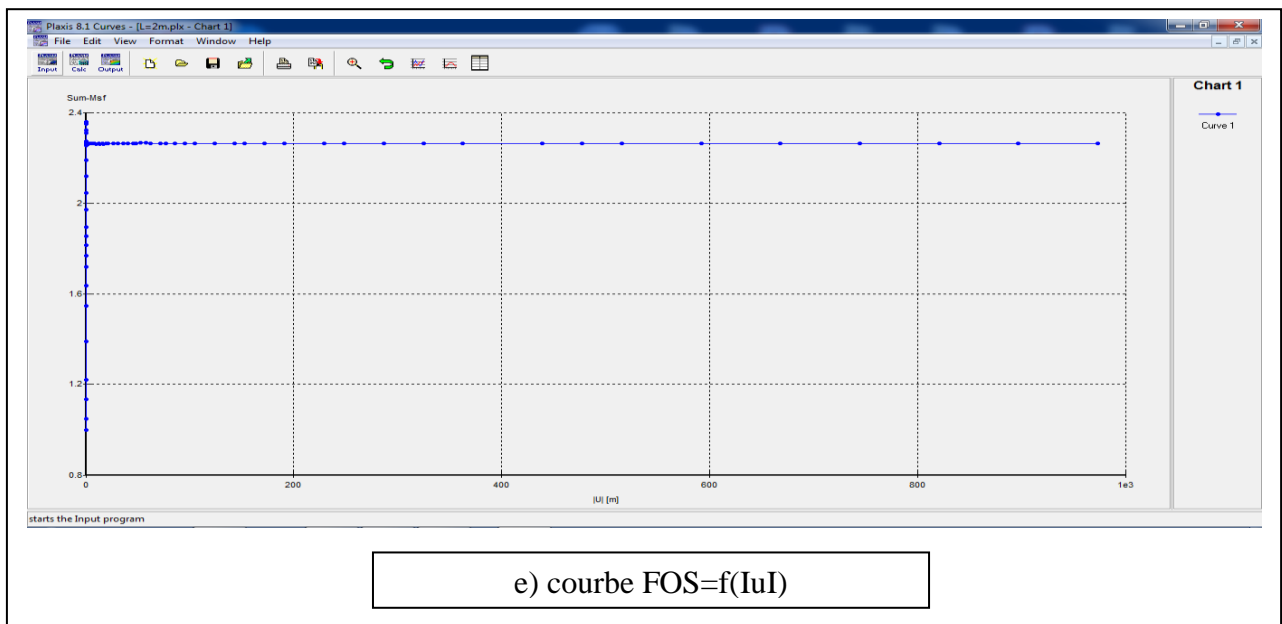
-Pour $L=2\text{m}$ incliné 0° :

(FIG 4.25) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





d) coefficient de sécurité



e) courbe FOS=f(IuI)

Figure 4.25 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 2 m incliné 0°)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **2 ; 3 ; 5 ; 7m** pour les mêmes inclinaisons **0° ; 15° ; 30°**.

-Pour la pente de 30° (excavation 2) sans amélioration (**sans clouage**) le coefficient de sécurité globale est de :

$$\mathbf{FOS = 2.245}$$

Les résultats résumés dans le tableau suivant :

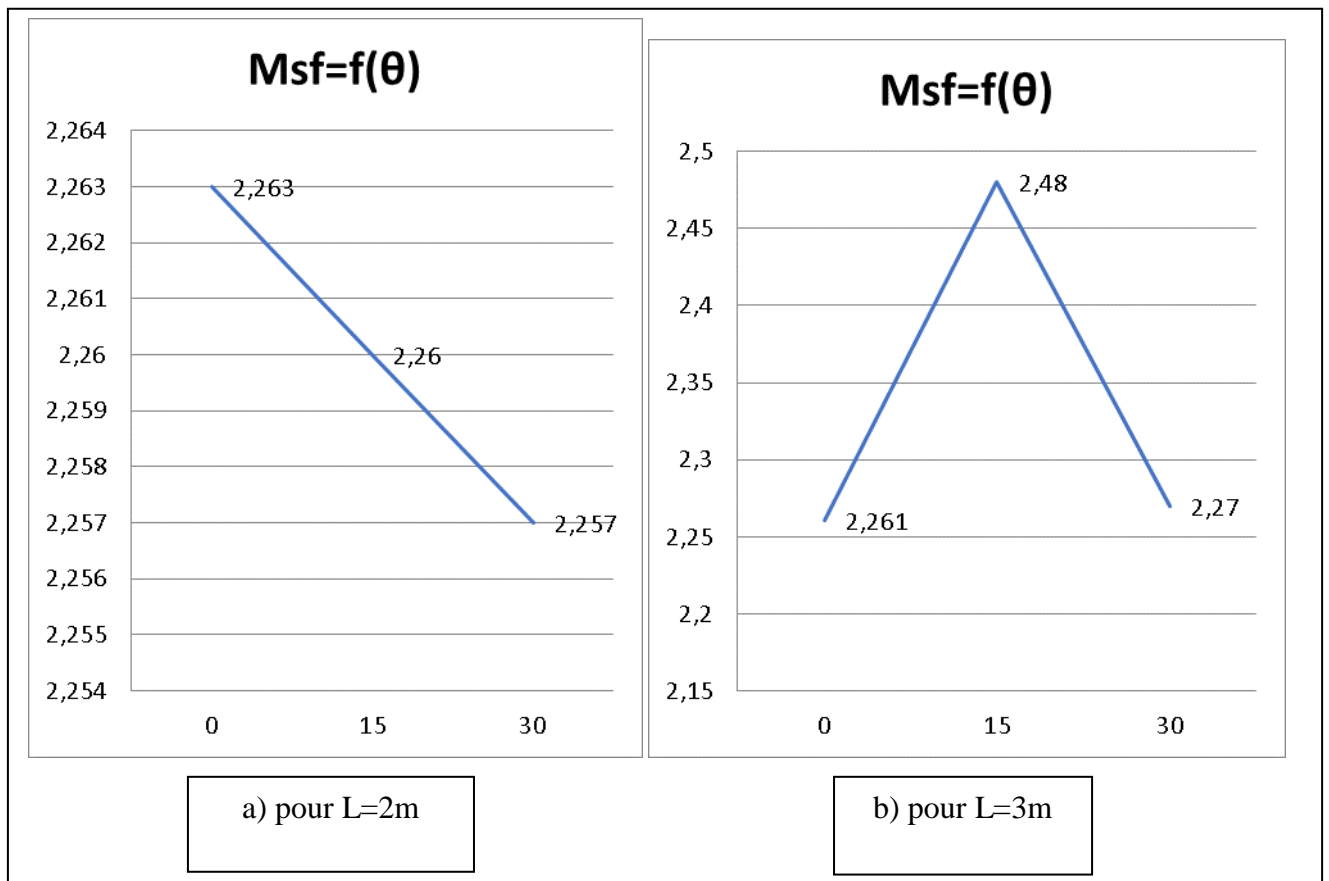
Pente de 30° (excavation 2)												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	2.263	2.261	2.265	2.335	2.260	2.48	2.322	2.566	2.257	2.27	2.764	2.837

Tableau. 4.5 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

- discussions de résultats :

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.26) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;



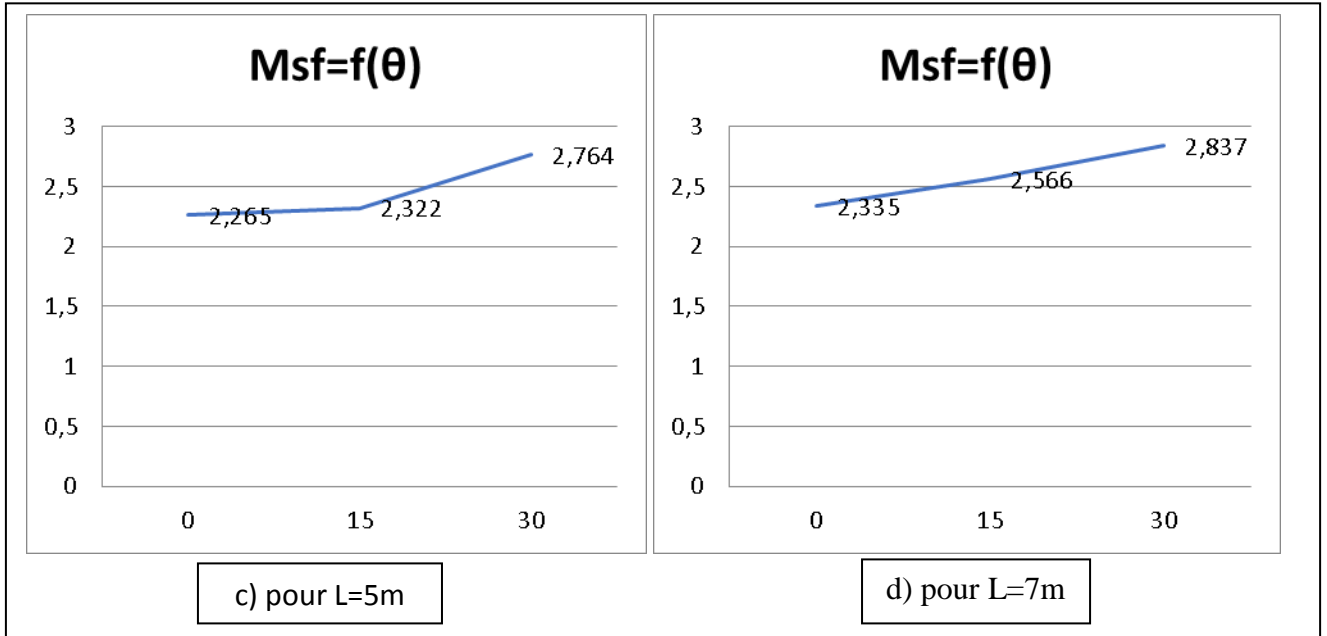


FIG 4.26 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d’inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que :

-avec toutes les longueurs 2, 3, 5, 7 et inclinaison 0°, 15°, 30° le coefficient de sécurité obtenu est supérieur à FOS (sans clouage).

- cette résultat c’est à cause de changement de nombre des clous (une nappe supérieure et une nappe inférieure)

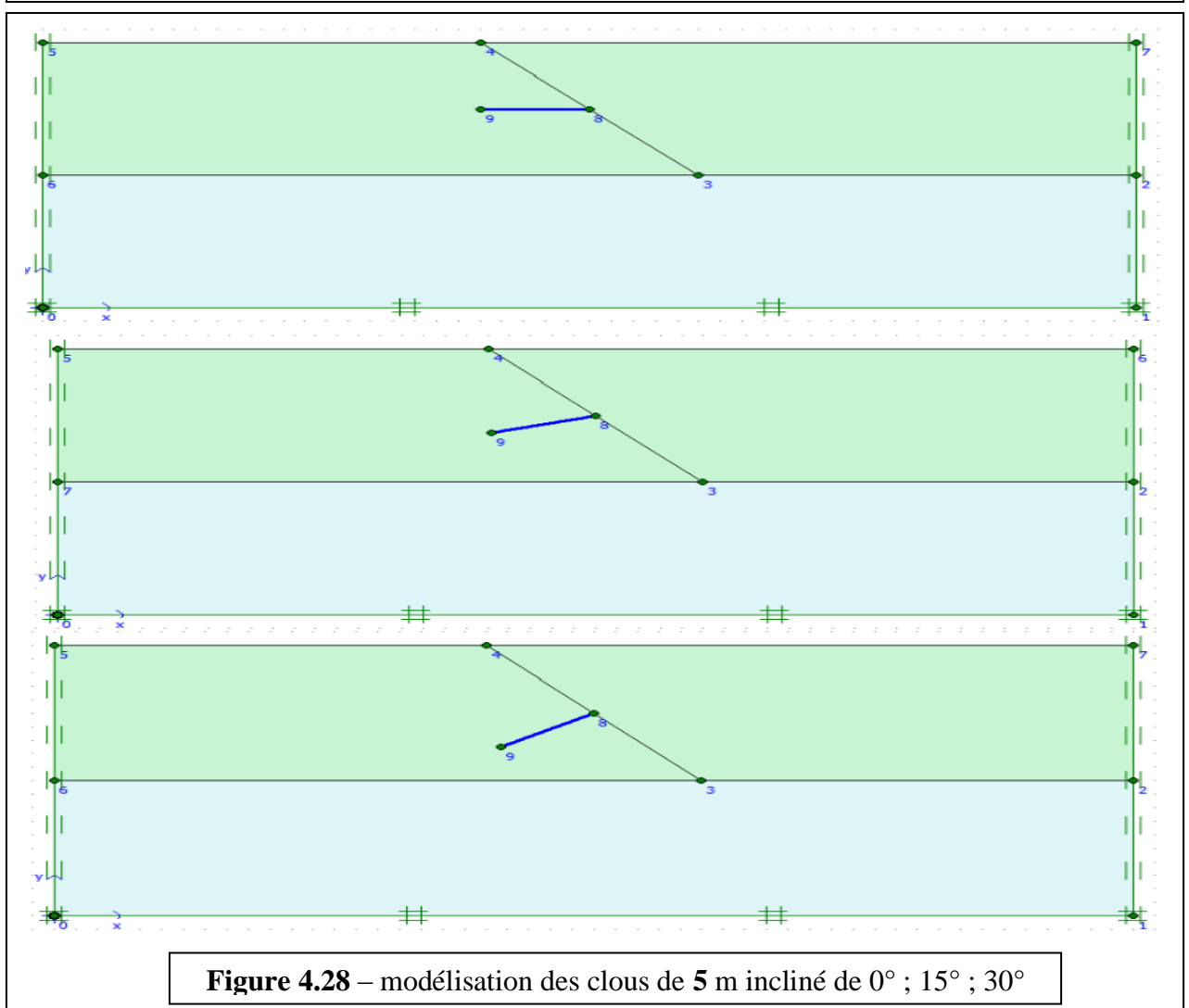
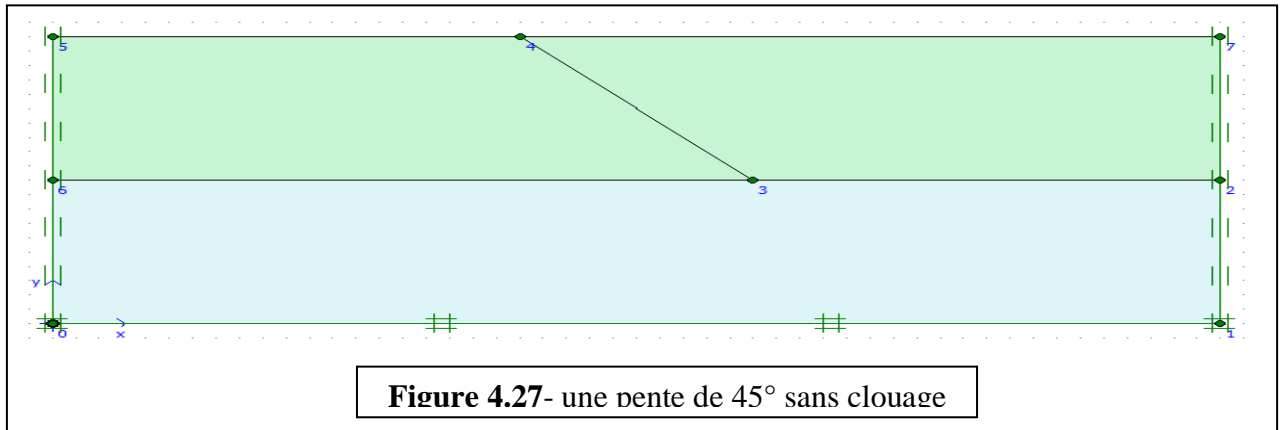
4.4.2) pente de 45° :

4.4.2.1) excavation de 10 m directement :

- avec des clous de 2.3.5.7m de longueur

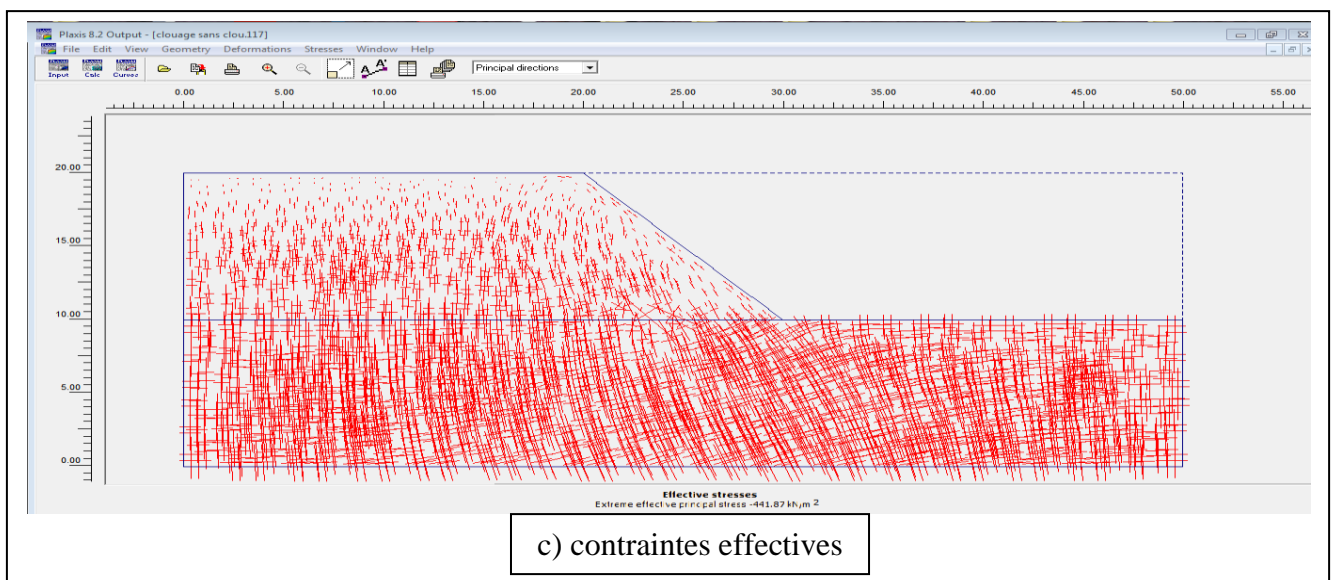
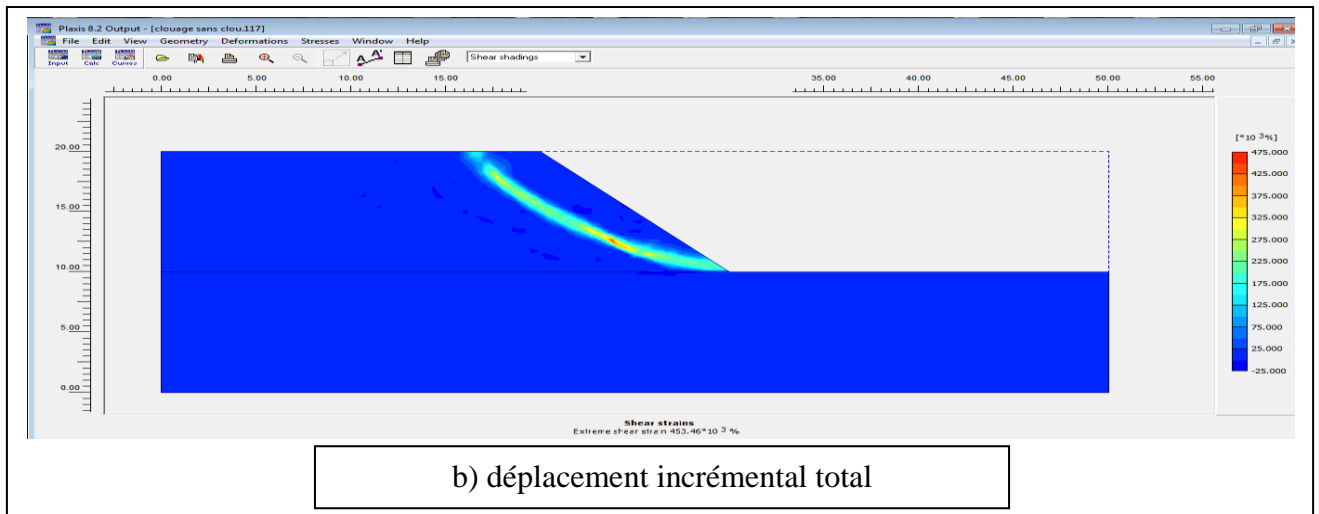
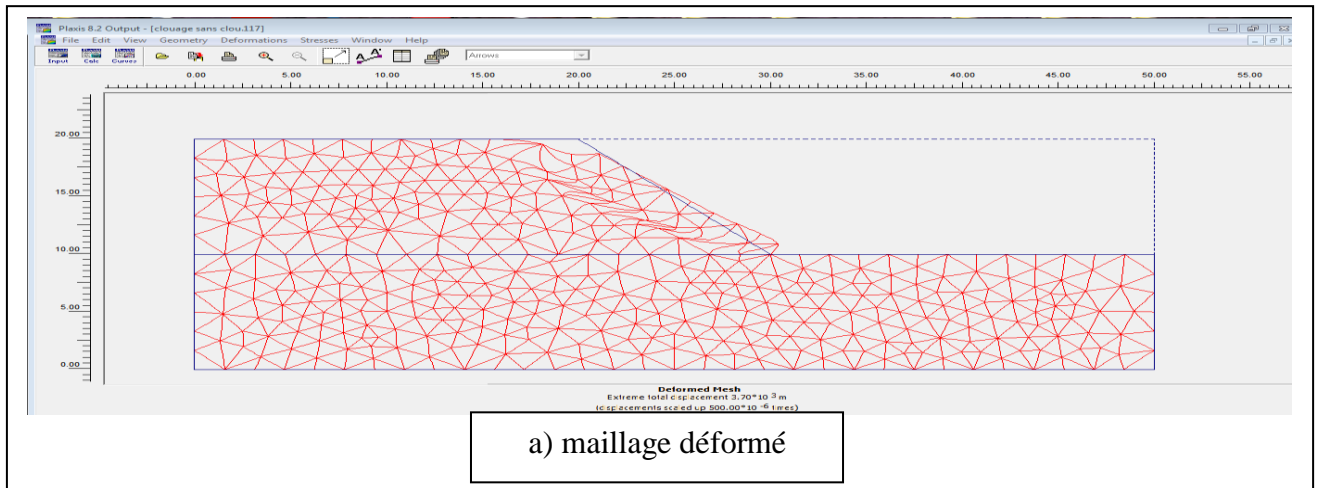
- inclinaison 0°,15°,30°.

Les figures suivantes représentent les ça étudier ;



-pour une pente de 45° sans amélioration (**sans clouage**)

(FIG 4.29) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;



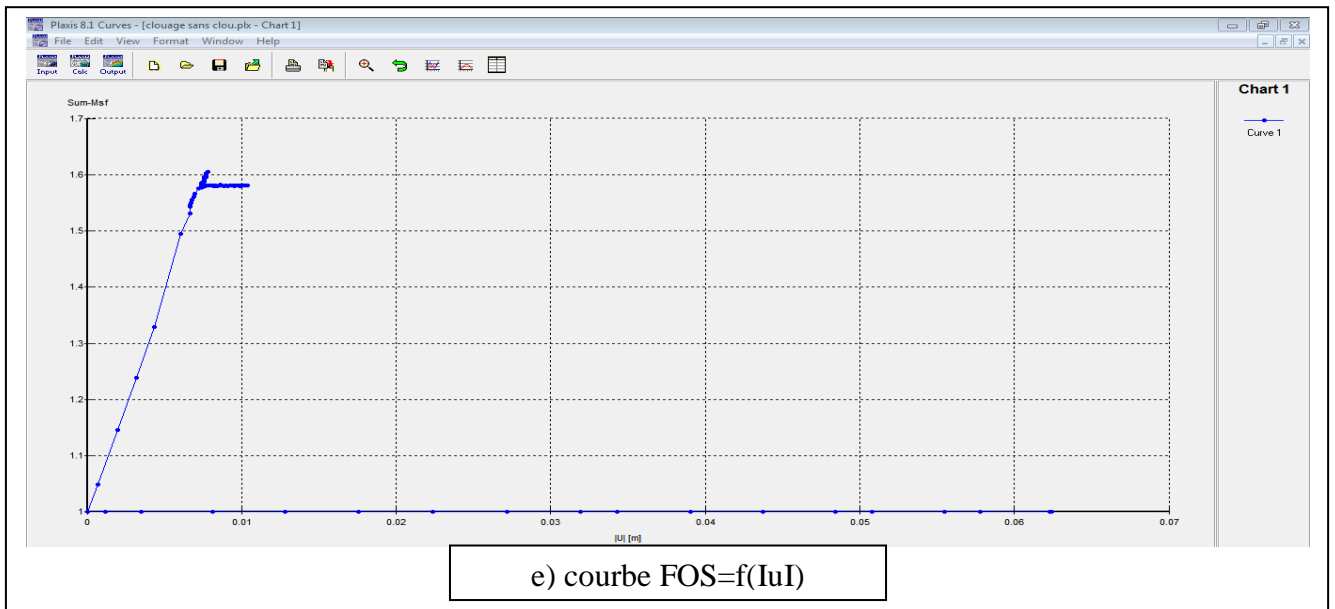
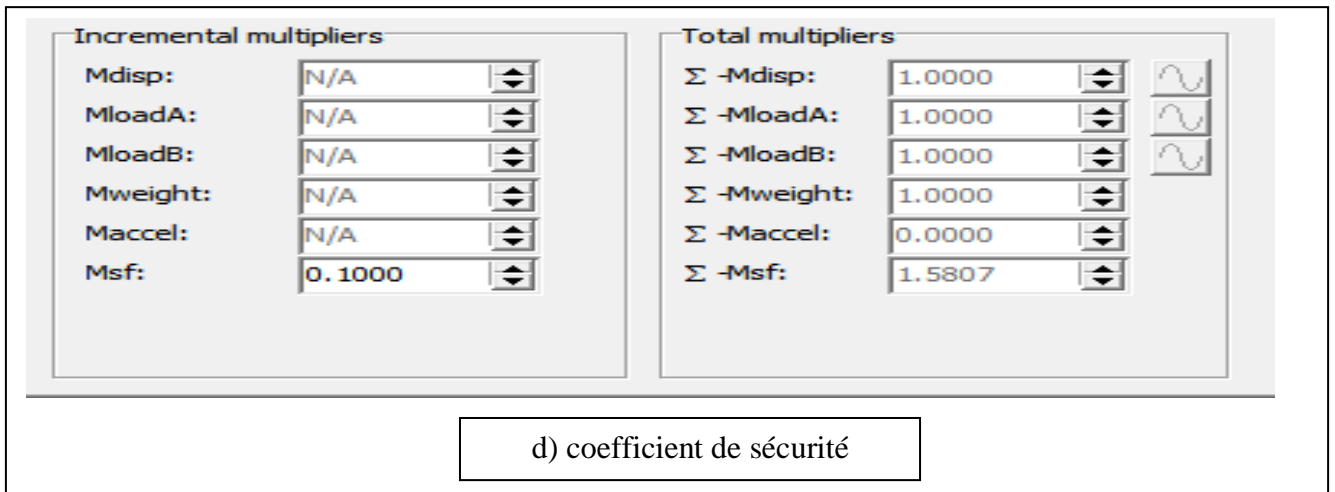
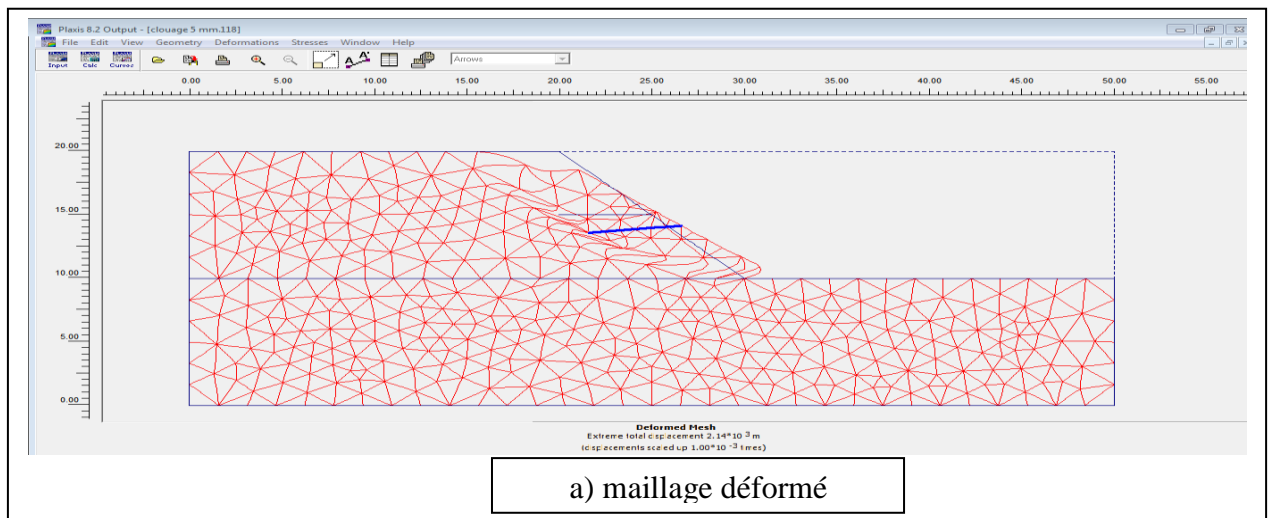
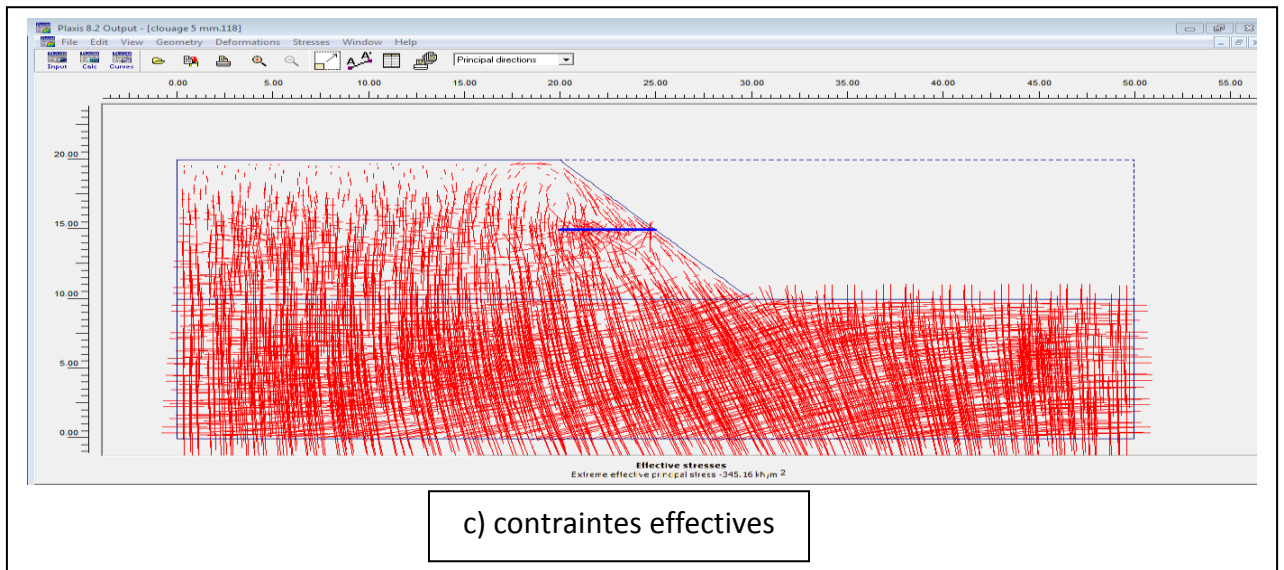
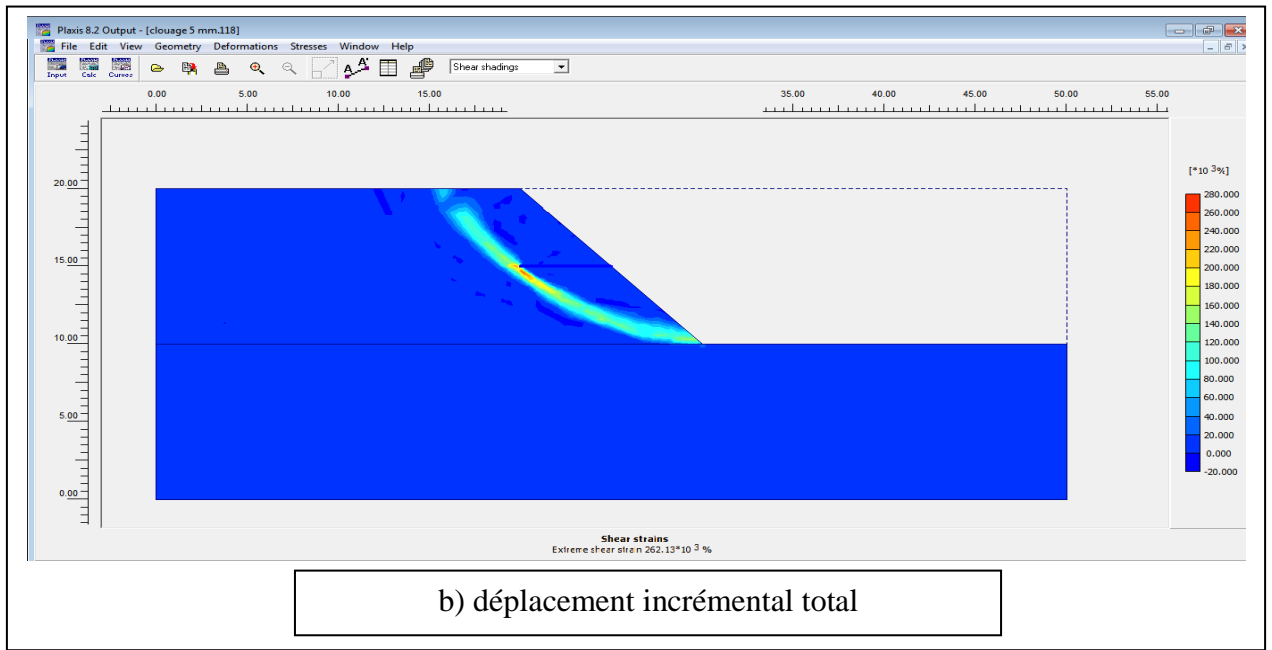


Figure 4.29 – les résultats de calcul (pente de 45° sans clouage)

-pour $L=5$ m incliné 0° :

(FIG 4.30) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





Incremental multipliers		Total multipliers	
Mdisp:	N/A	Σ -Mdisp:	1.0000
MloadA:	N/A	Σ -MloadA:	1.0000
MloadB:	N/A	Σ -MloadB:	1.0000
Mweight:	N/A	Σ -Mweight:	1.0000
Maccel:	N/A	Σ -Maccel:	0.0000
Msf:	0.1000	Σ -Msf:	1.6032

d) coefficient de sécurité

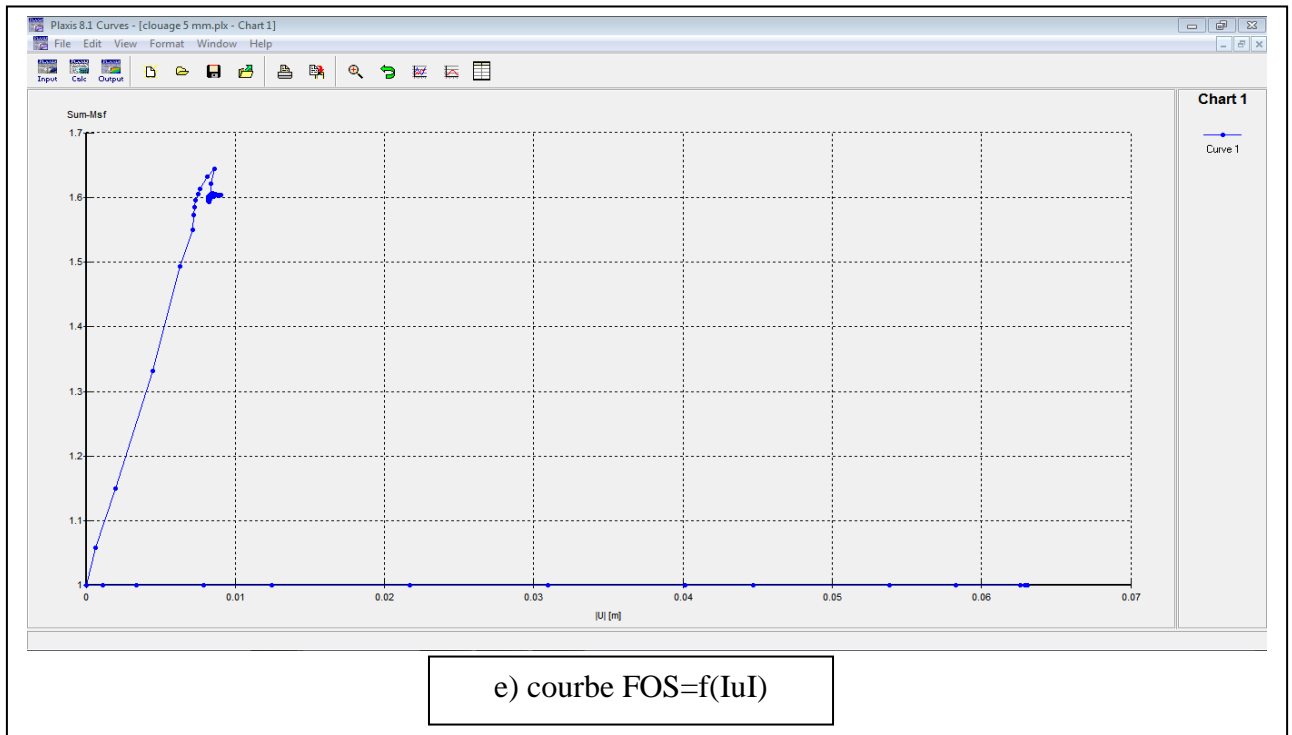
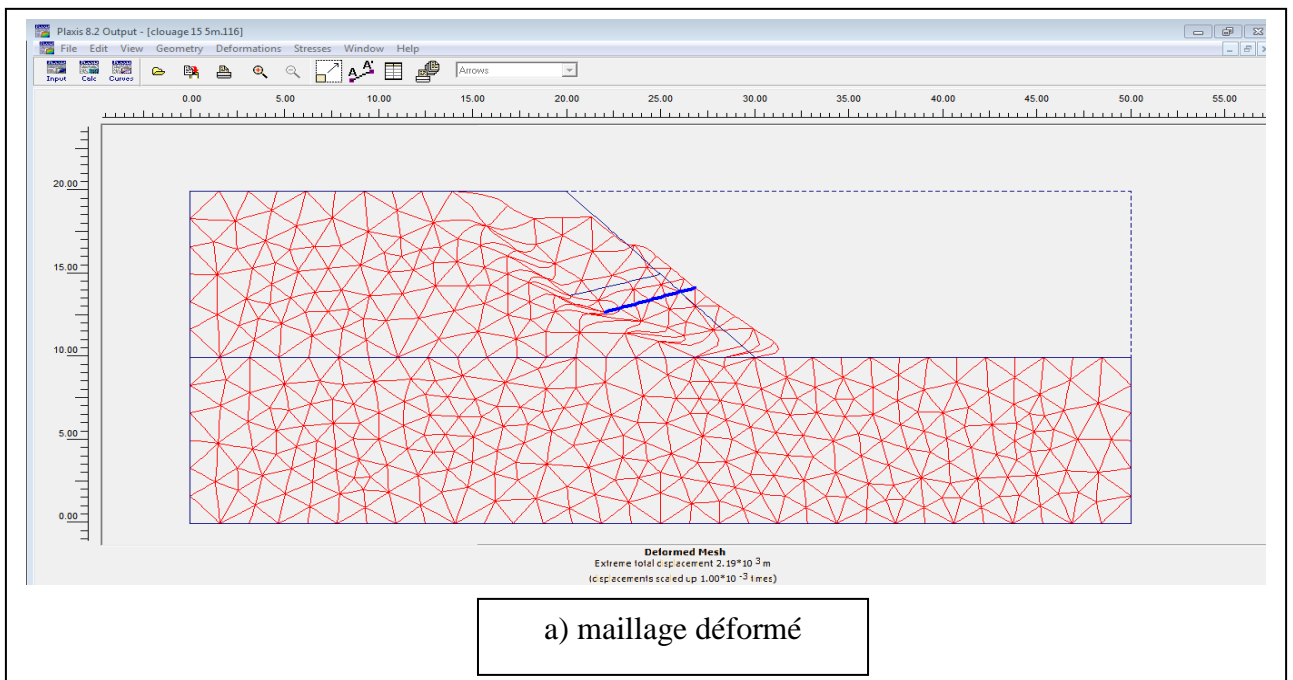
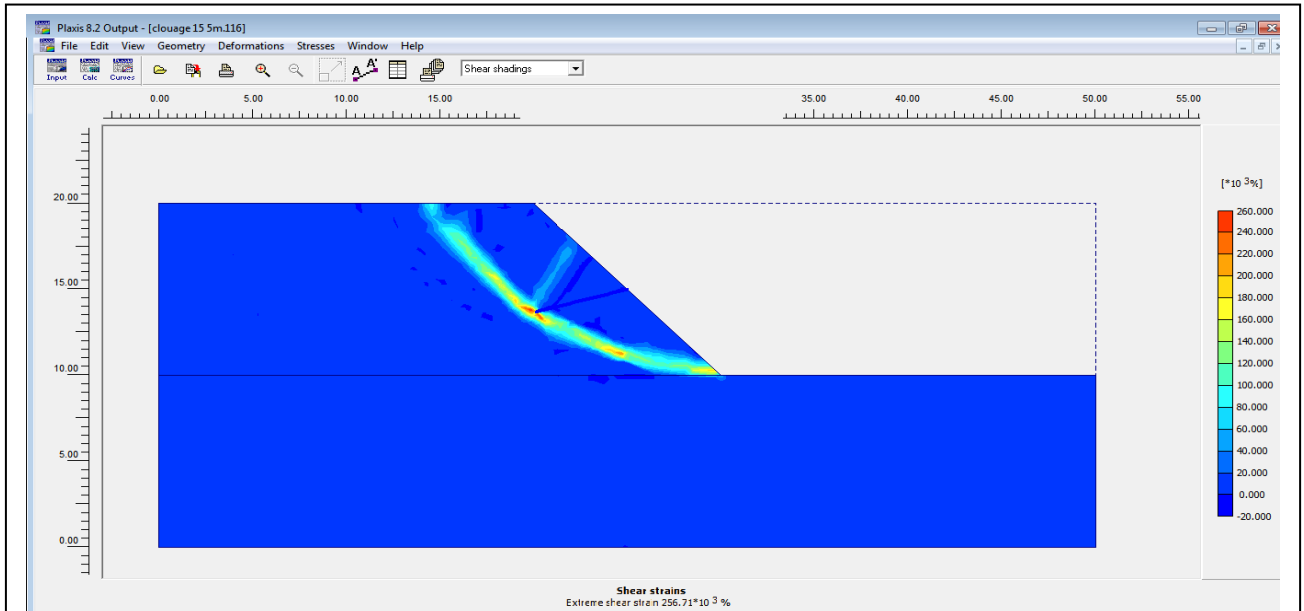


Figure 4.30 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 5 m incliné 0°)

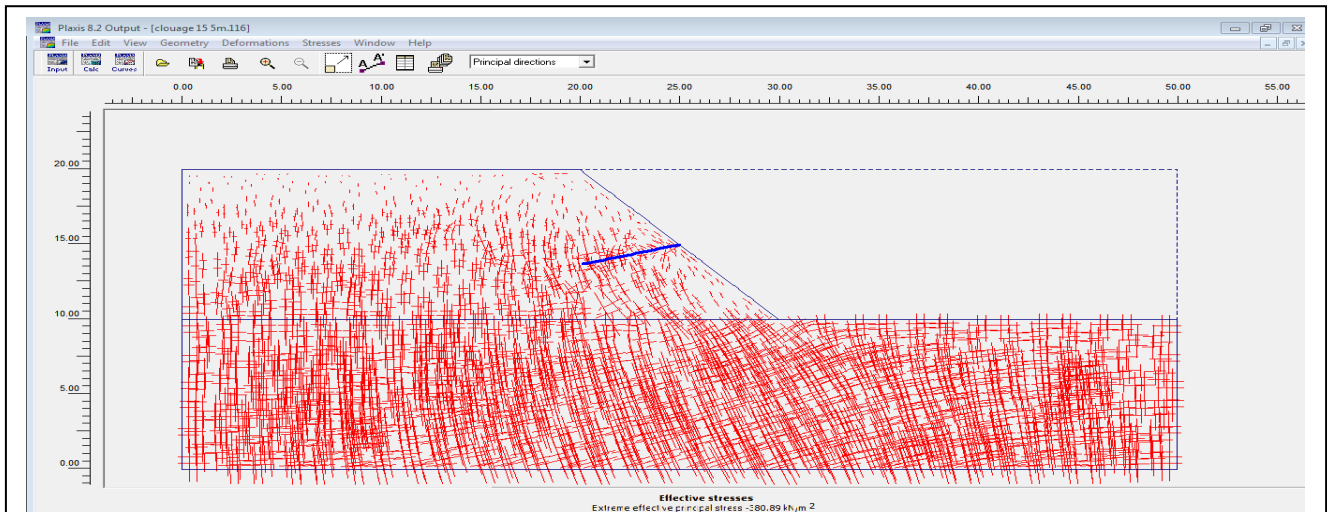
-pour un **L= 5 m** incliné **15°** ;

(FIG 4.31) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Incremental multipliers		Total multipliers	
Mdisp:	N/A	Σ -Mdisp:	1.0000
MloadA:	N/A	Σ -MloadA:	1.0000
MloadB:	N/A	Σ -MloadB:	1.0000
Mweight:	N/A	Σ -Mweight:	1.0000
Maccel:	N/A	Σ -Maccel:	0.0000
Msf:	0.1000	Σ -Msf:	1.7202

d) coefficient de sécurité

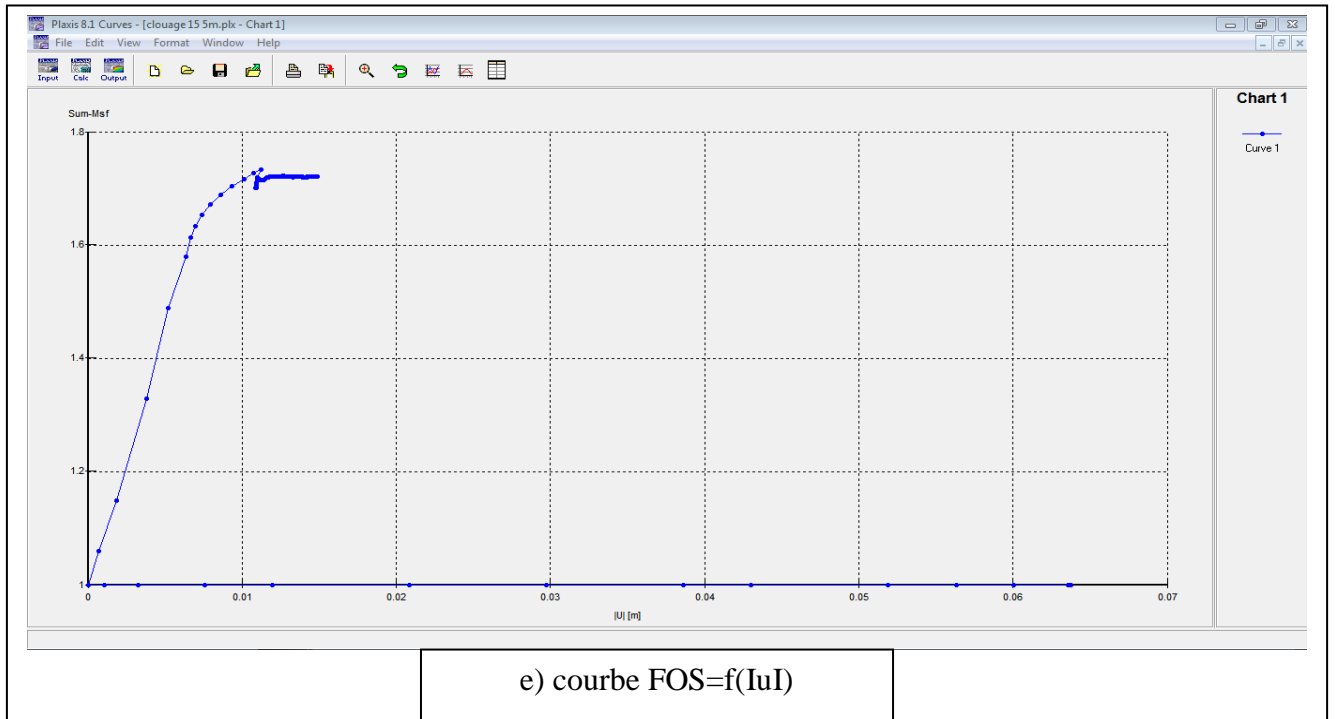
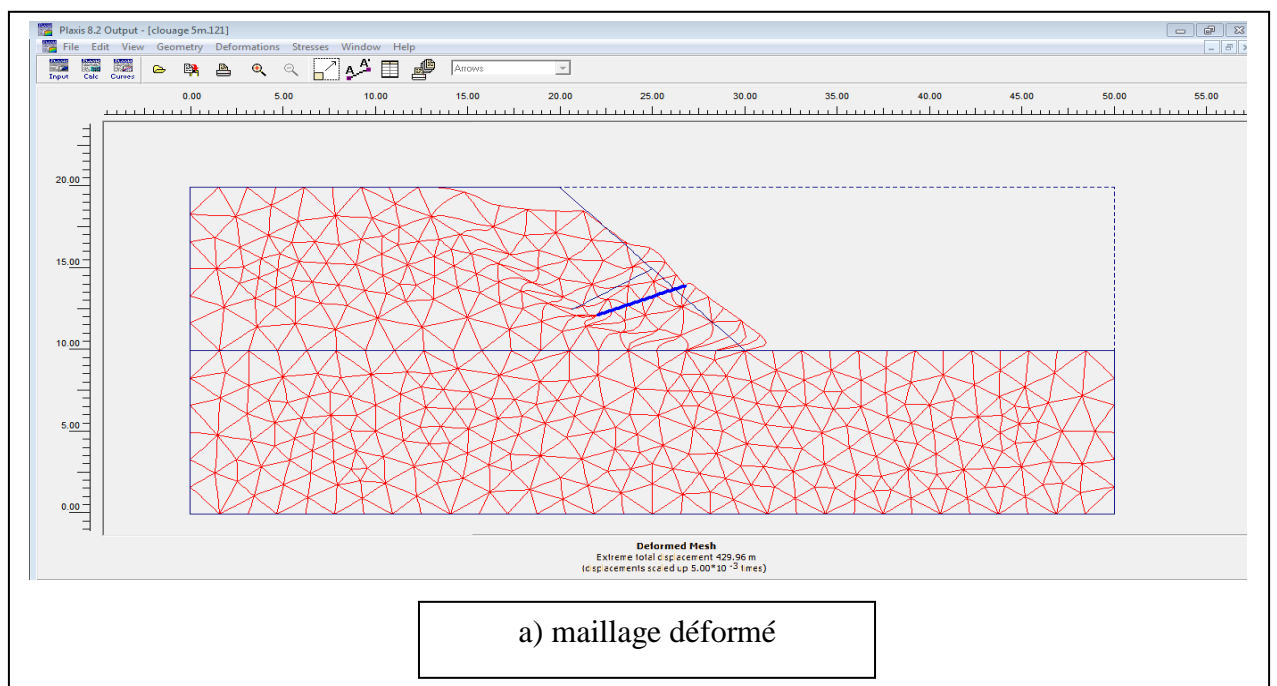
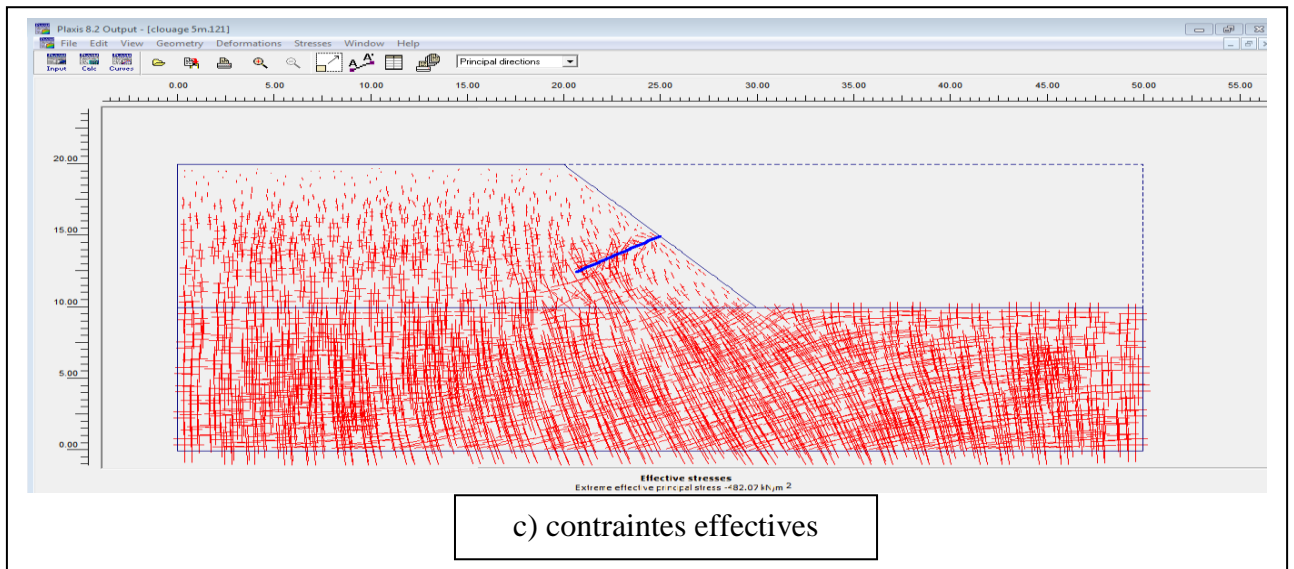
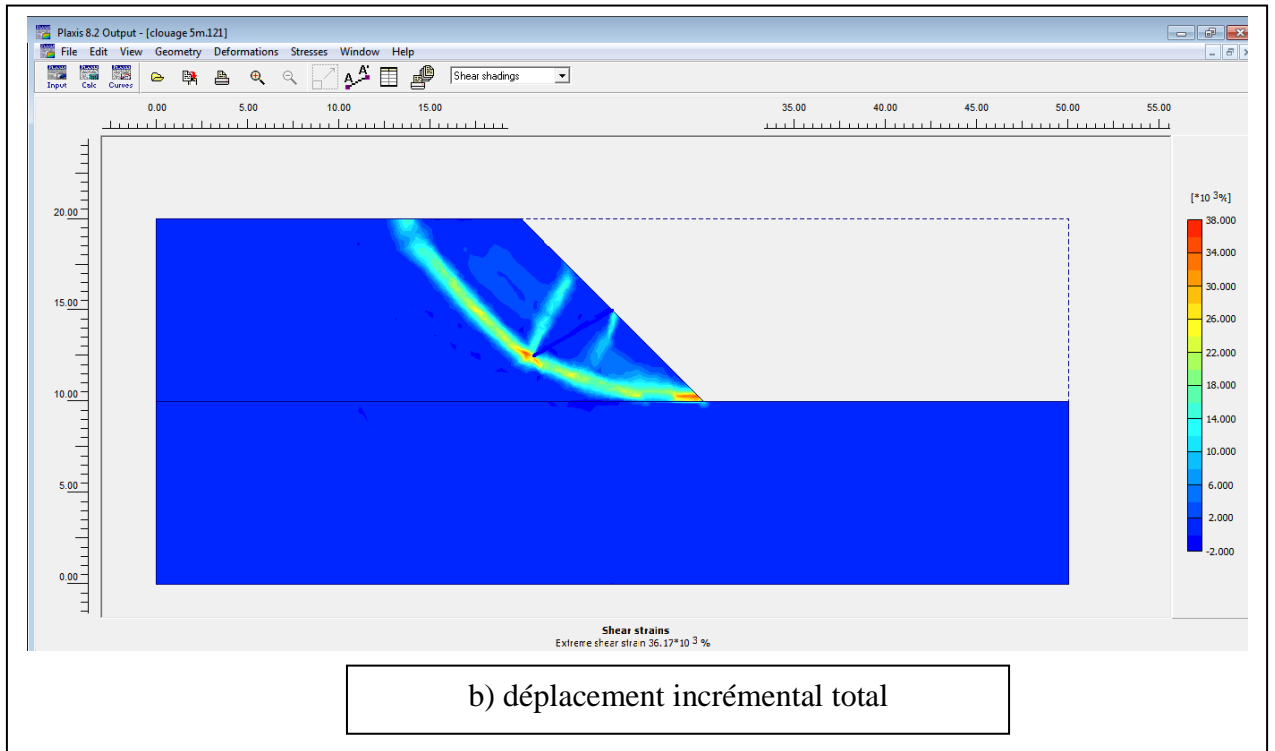


Figure 4.31 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 5 m incliné 15°)

-pour un L= 5 m incliné 30° ;

(FIG 4.32) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





Incremental multipliers		Total multipliers	
Mdisp:	N/A	Σ -Mdisp:	1.0000
MloadA:	N/A	Σ -MloadA:	1.0000
MloadB:	N/A	Σ -MloadB:	1.0000
Mweight:	N/A	Σ -Mweight:	1.0000
Maccel:	N/A	Σ -Maccel:	0.0000
Msf:	0.1000	Σ -Msf:	1.8064

d) coefficient de sécurité

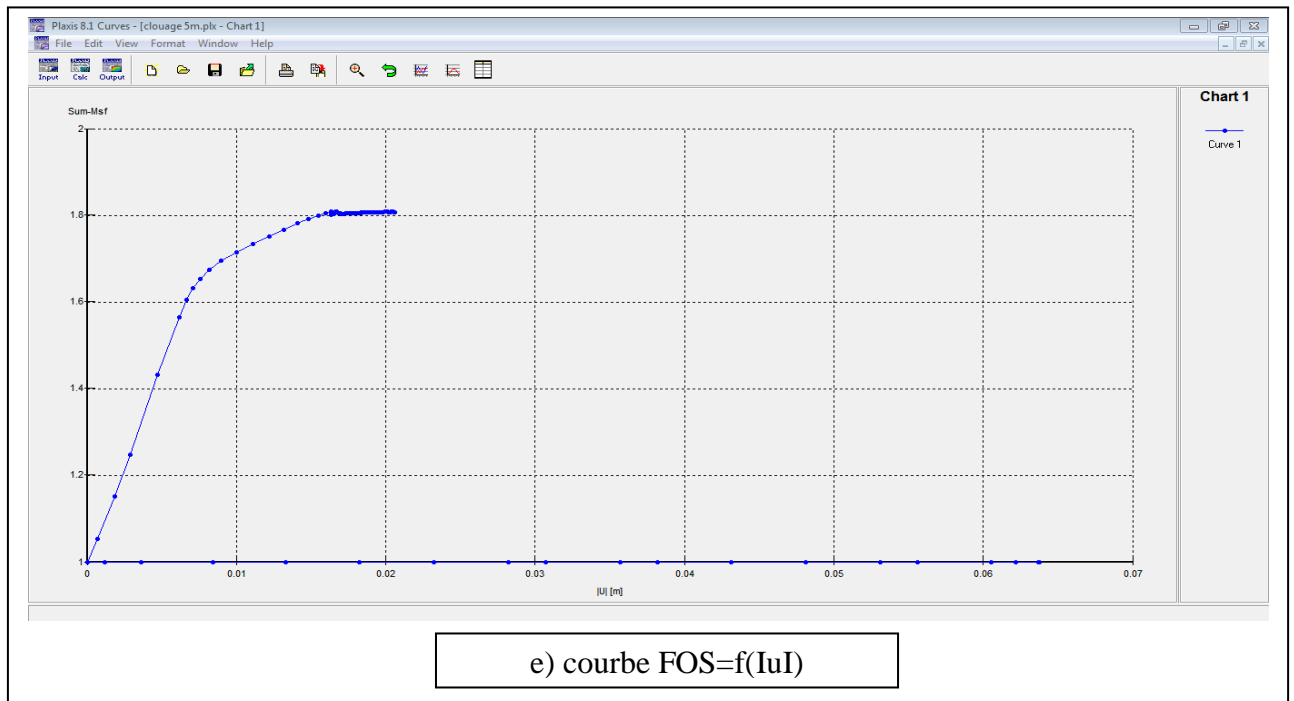


Figure 4.32 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 5 m incliné 30°)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de 2 ; 3 ; 5 ; 7m pour les mêmes inclinaisons 0° ; 15° ; 30°.

-Pour la pente de 45° sans amélioration (sans clouage) le coefficient de sécurité globale est de :

$$\mathbf{FOS = 1.5807}$$

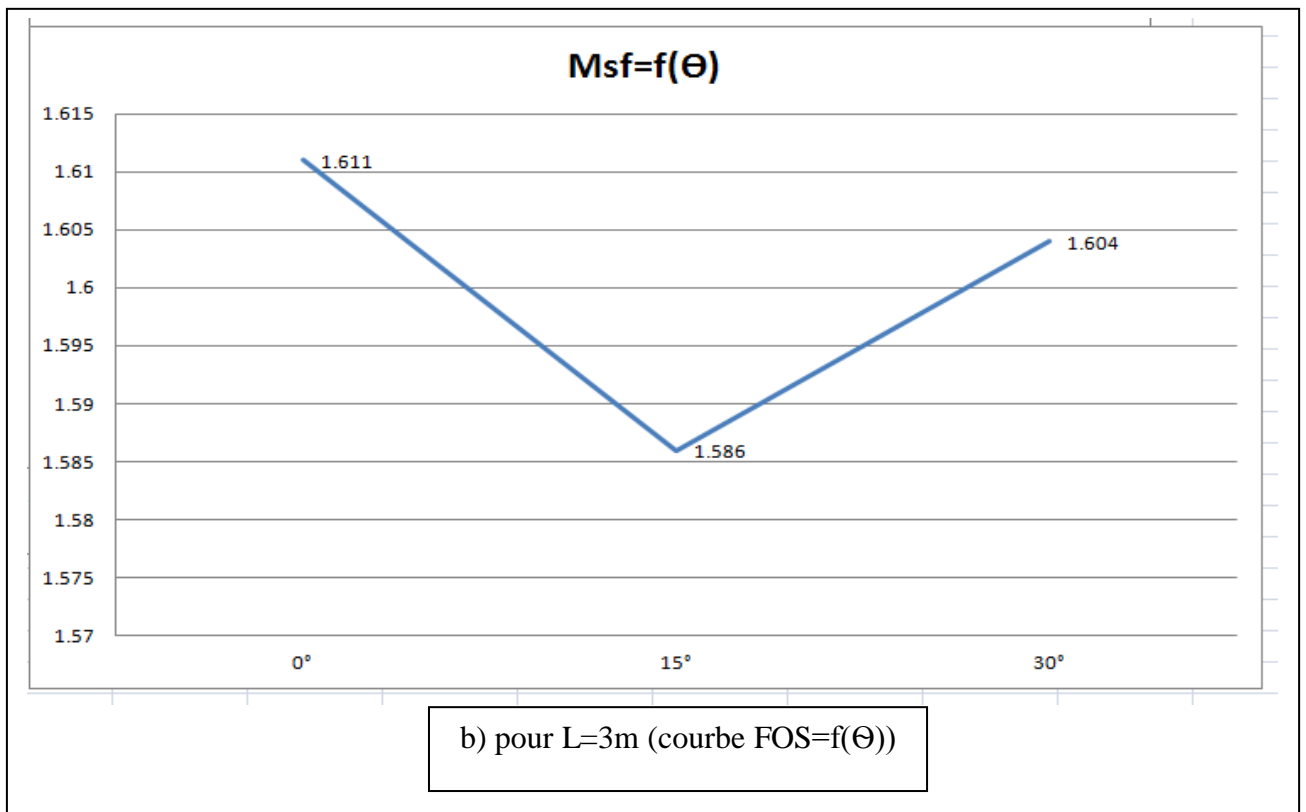
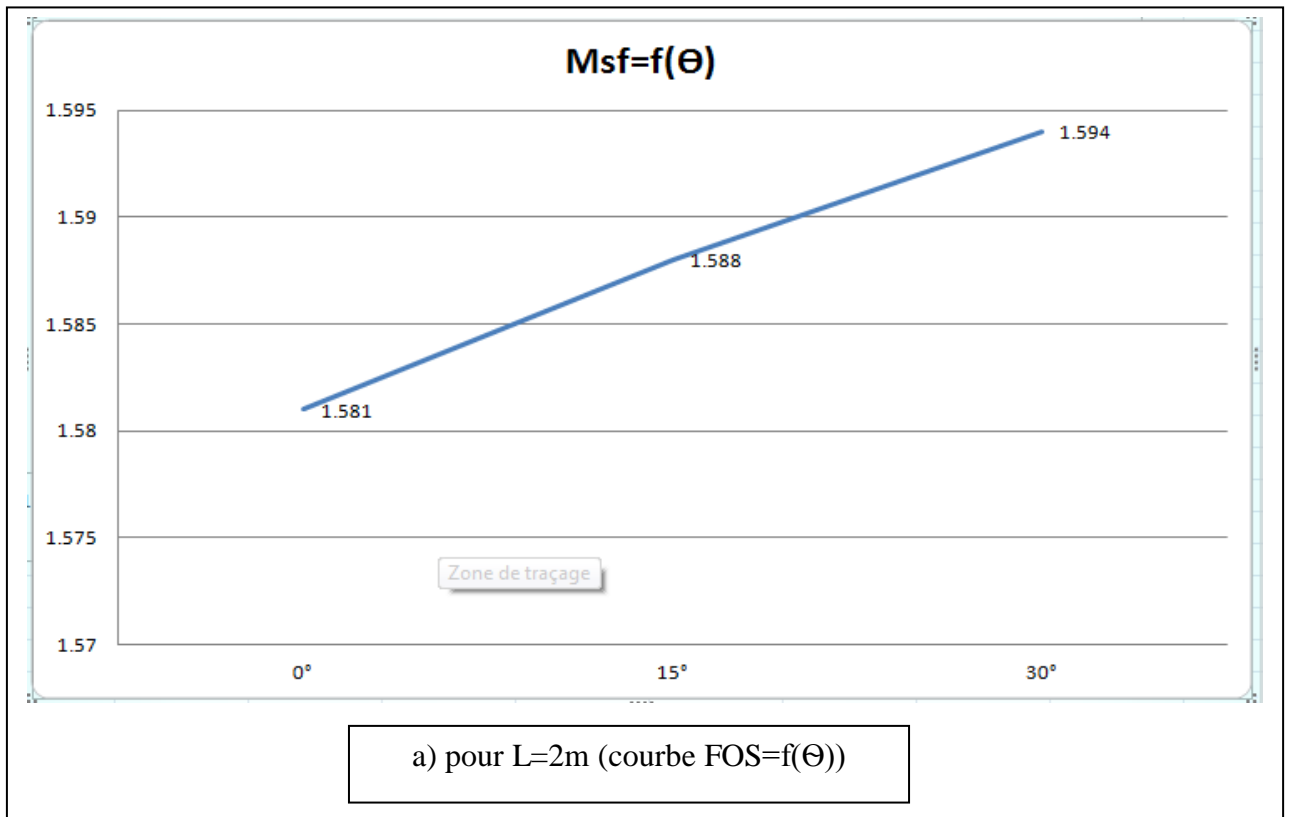
Les résultats résumés dans le tableau suivant :

Pente de 45°												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	1.581	1.611	1.603	1.758	1.588	1.586	1.72	1.925	1.594	1.604	1.806	1.978

Tableau 4.6 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

b) discussions de résultats :-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.33) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;



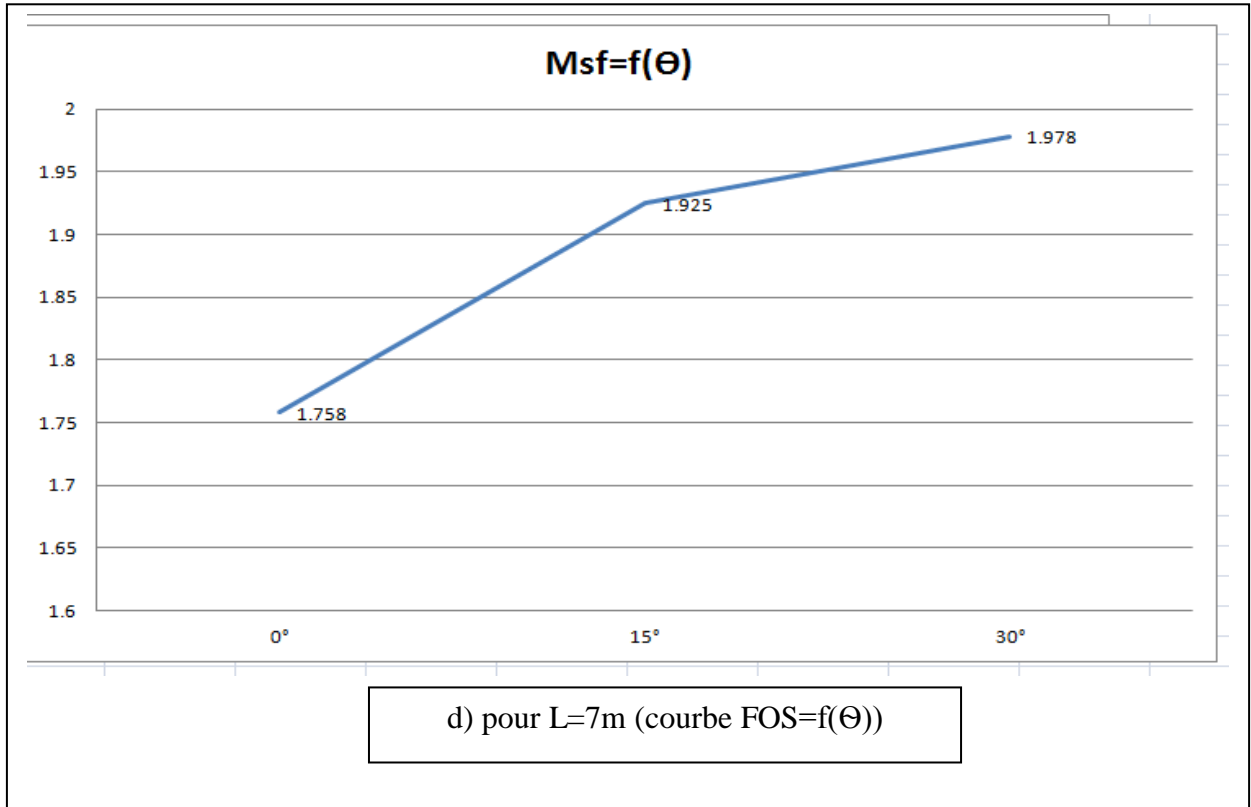
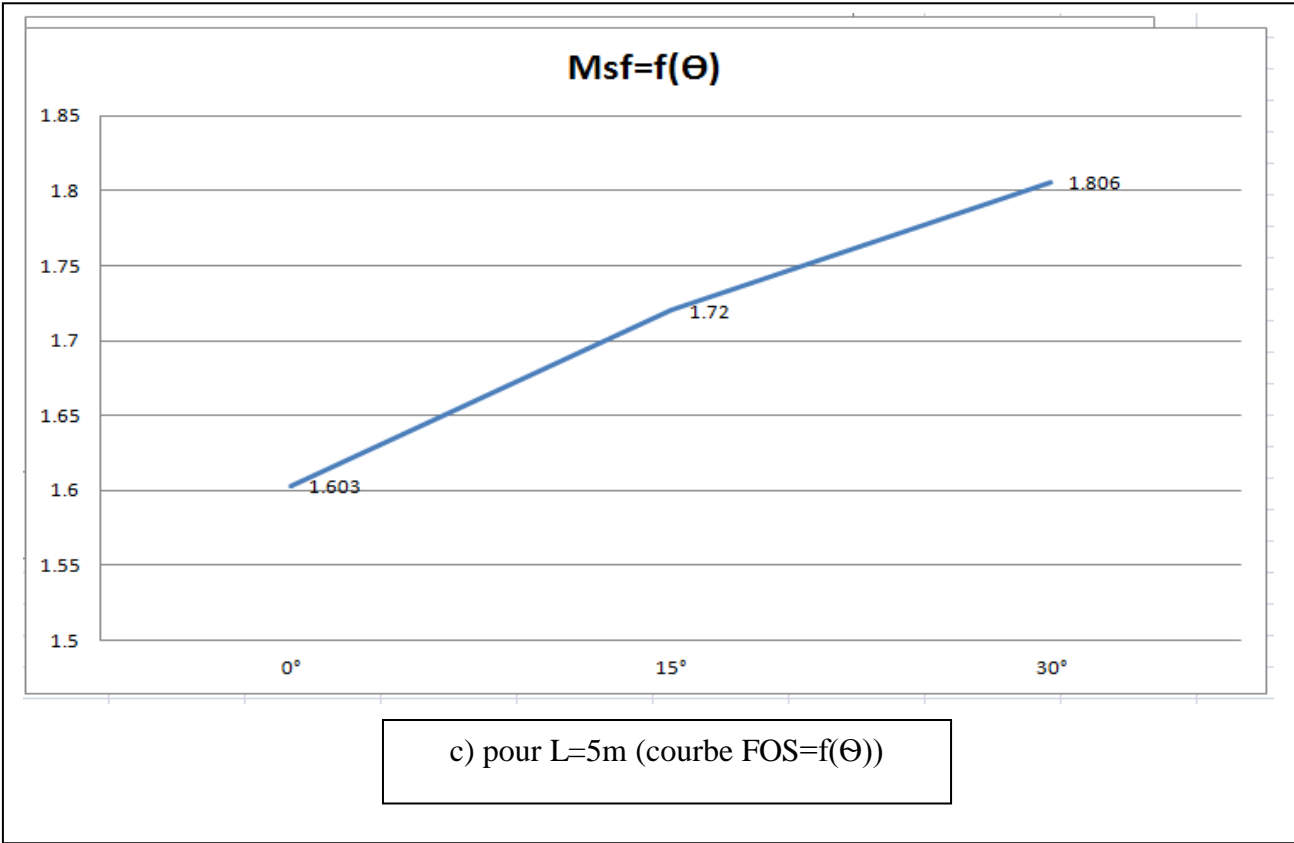


Figure 4.33 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d’inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que :

-avec des clous de 2m, l'inclinaison 0° ; 15° ; 30° a donné presque les mêmes valeurs de FOS=1.581 ; 1.588 ; 1.594.

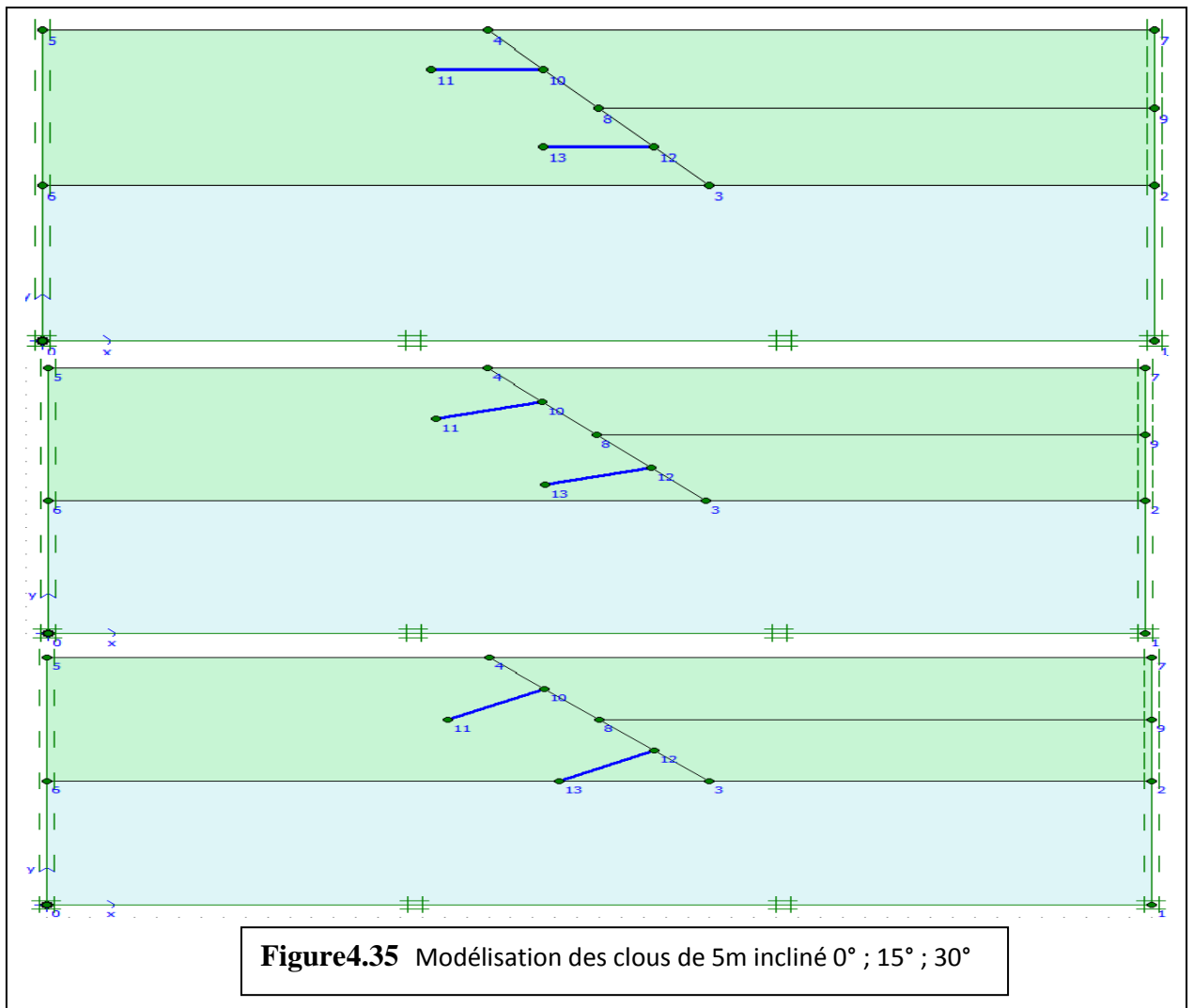
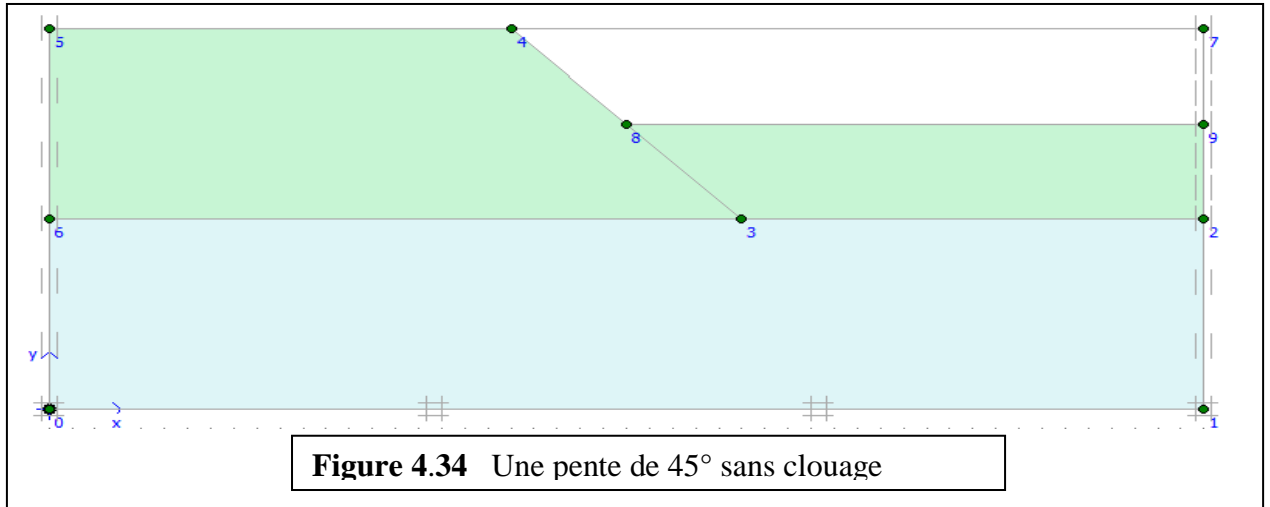
-avec des clous de **3 ; 5 ; 7m** l'inclinaison 30° a donné des valeurs optimales.

- lorsque on augmente la longueur des clous le coefficient de sécurité augmente, ainsi que l'inclinaison.

4.4.2.2) excavation par partie

- excavation 1 : (5m)

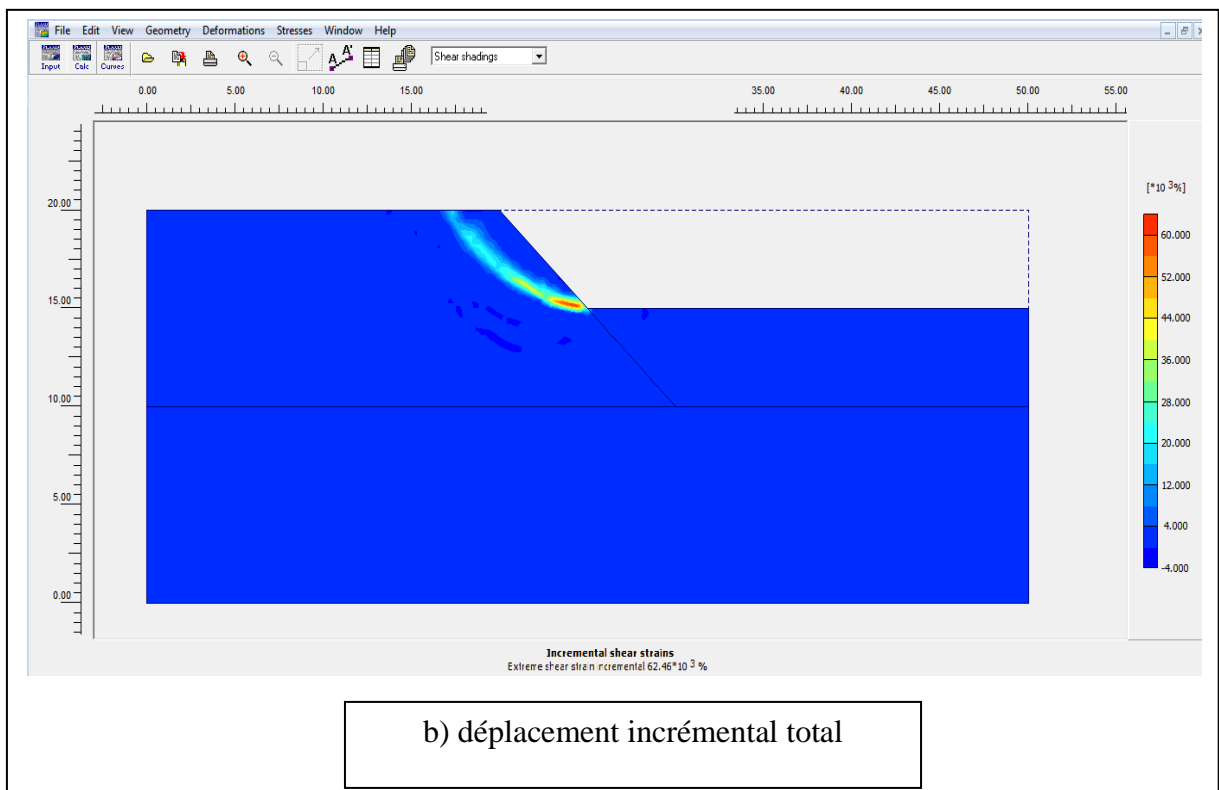
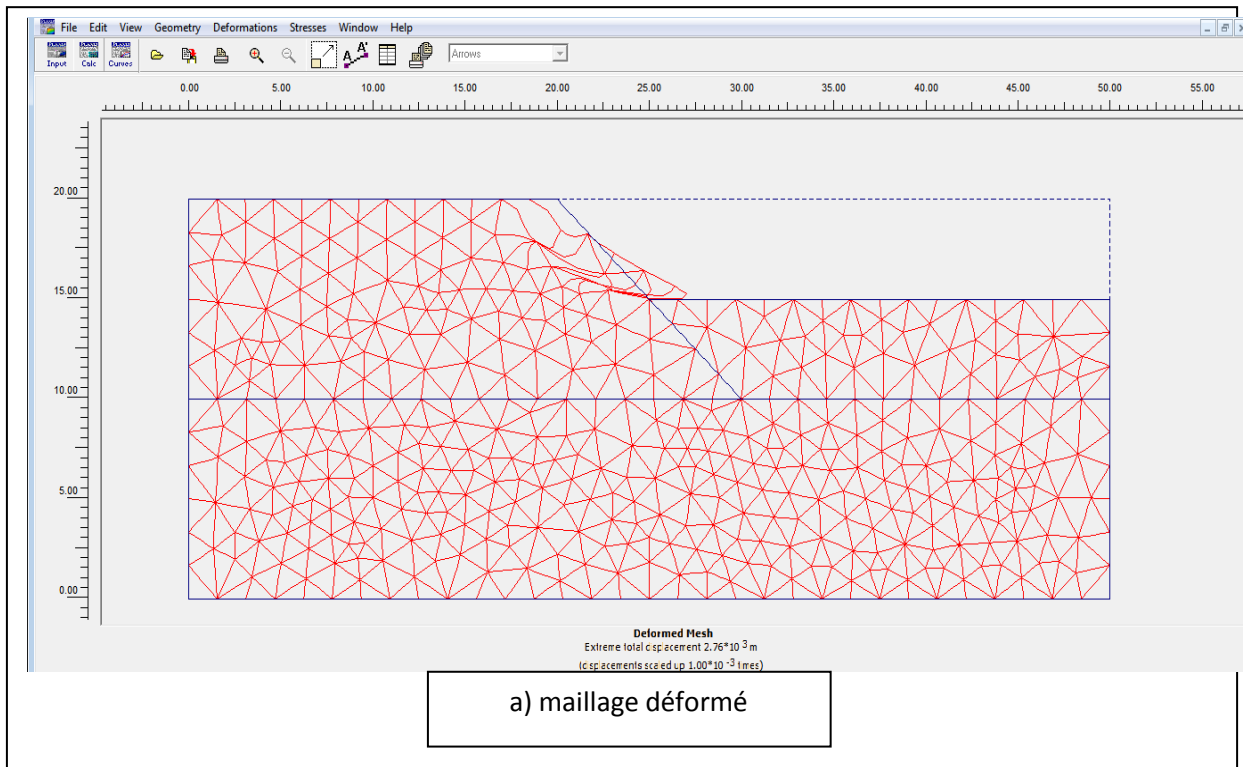
Les figures suivantes représentent les cas étudiés

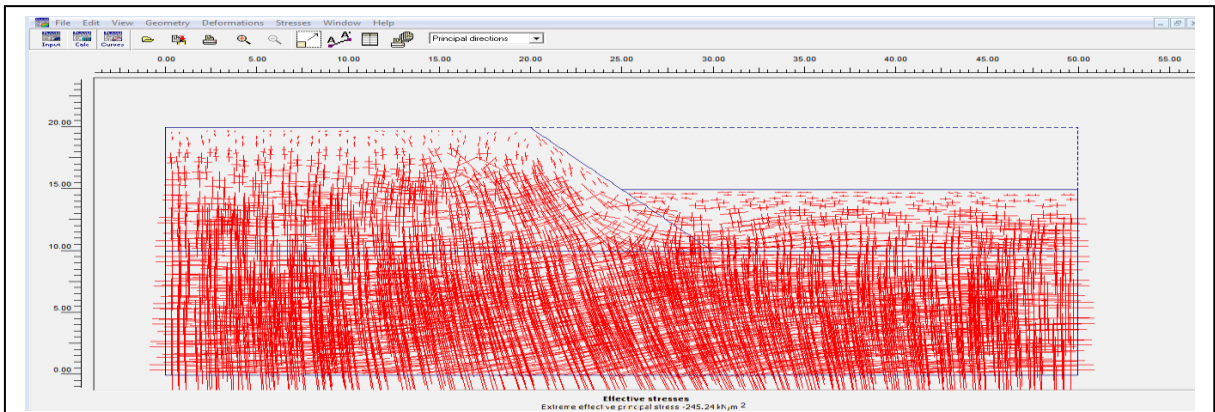


a) les résultats de calcul :

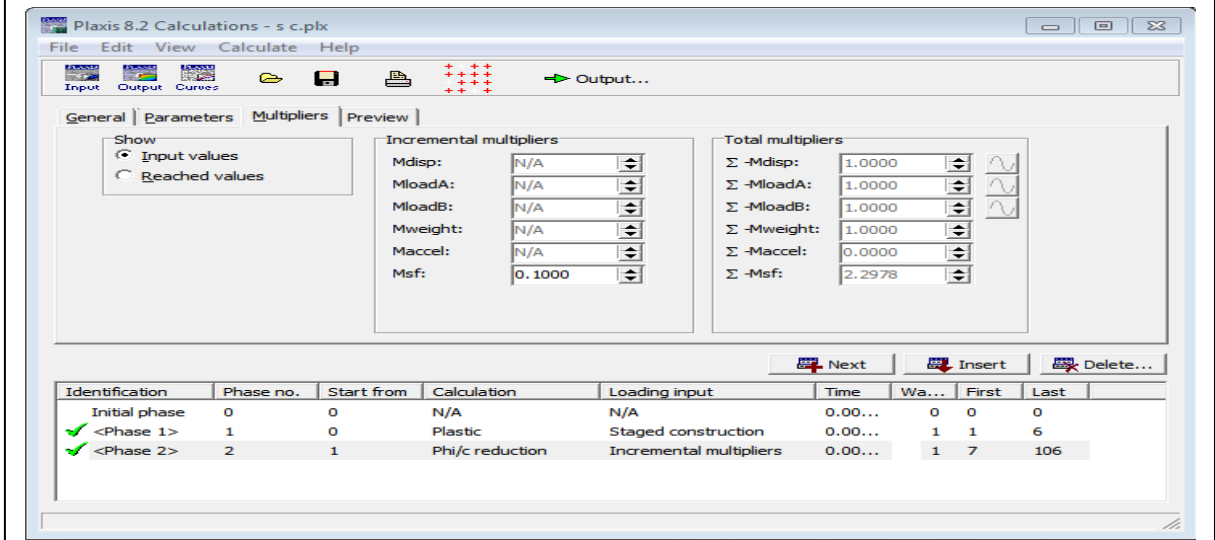
-pour une pente de 45° sans amélioration (**sans clouage**)

(FIG 4.36) Montre tout les résultats de (a) jusqu'à (e)

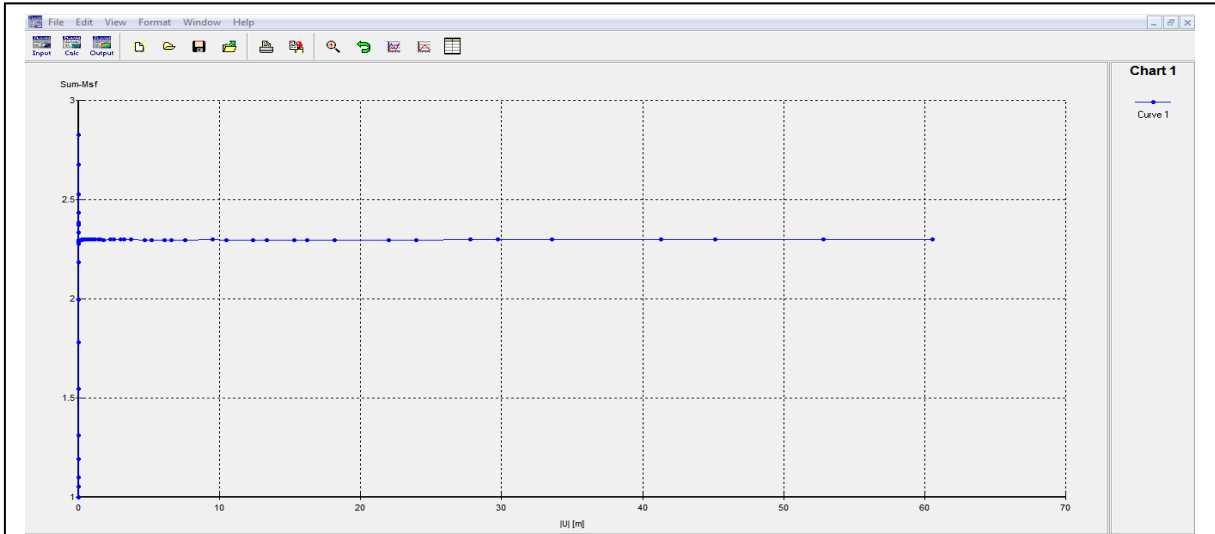




c) contraintes effectives



d) coefficient de sécurité

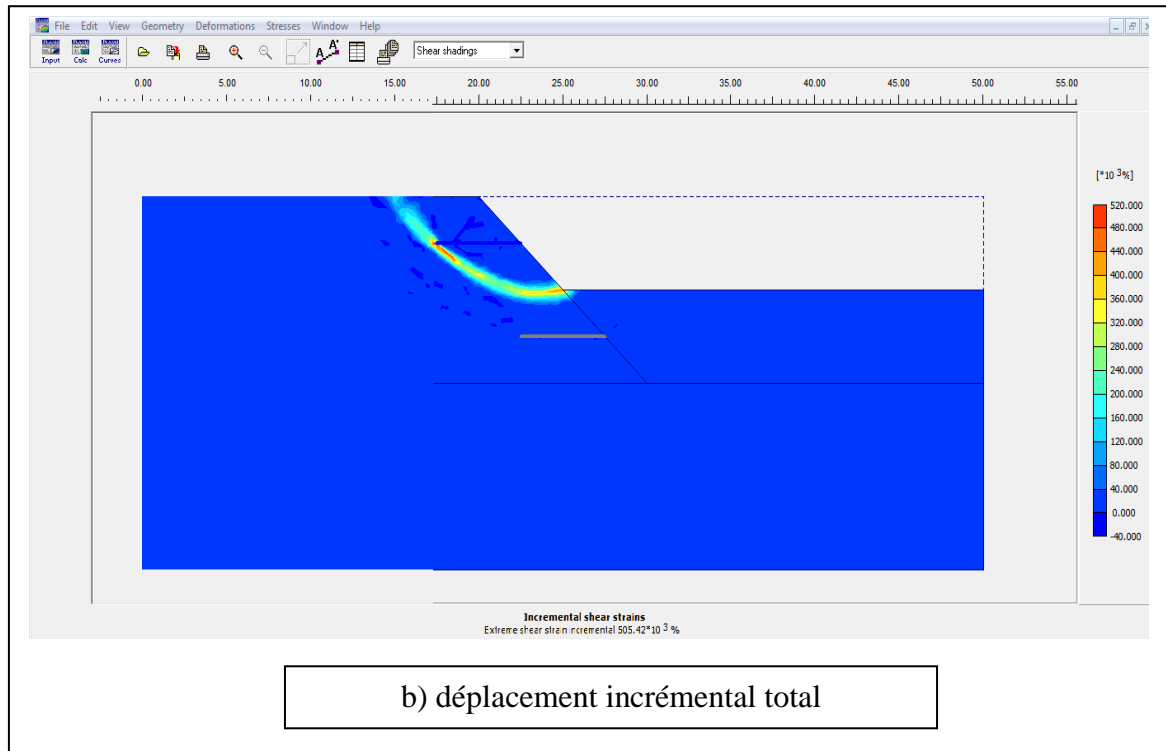
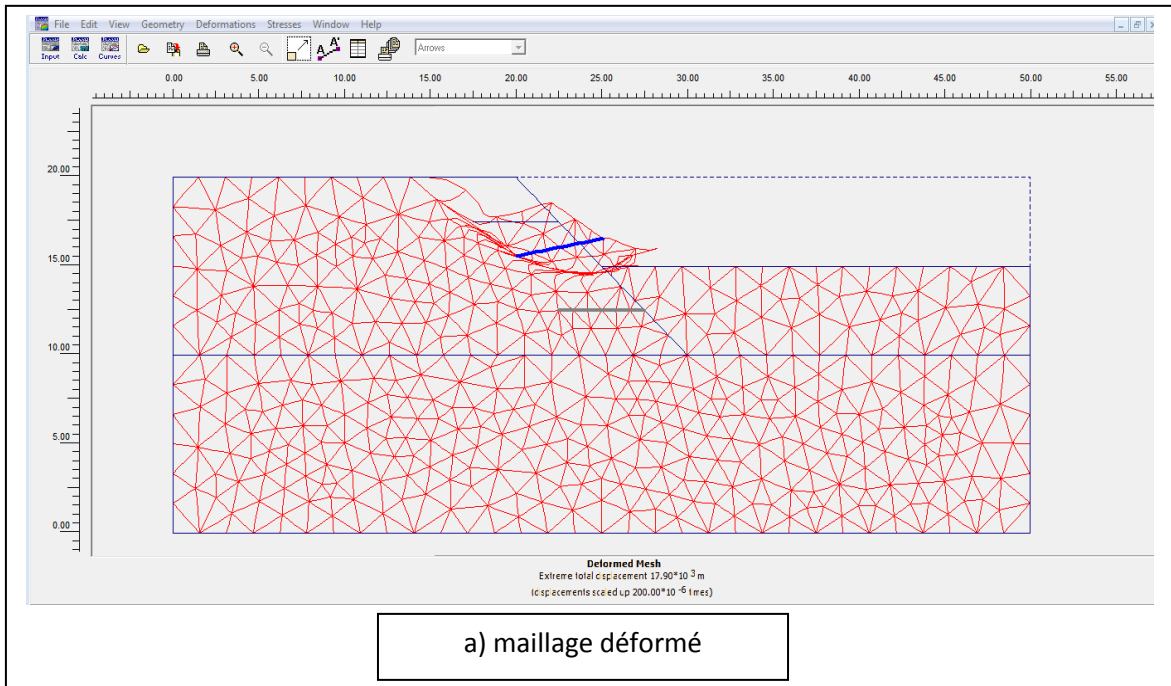


e) courbe FOS=f(|u|)

Figure 4.36 – les résultats de calcul (pente de 45° sans clouage)

-pour un clou de **5m** horizontale **0°**

(FIG4.37) Montre tout les résultats de (a) jusqu'à (e)



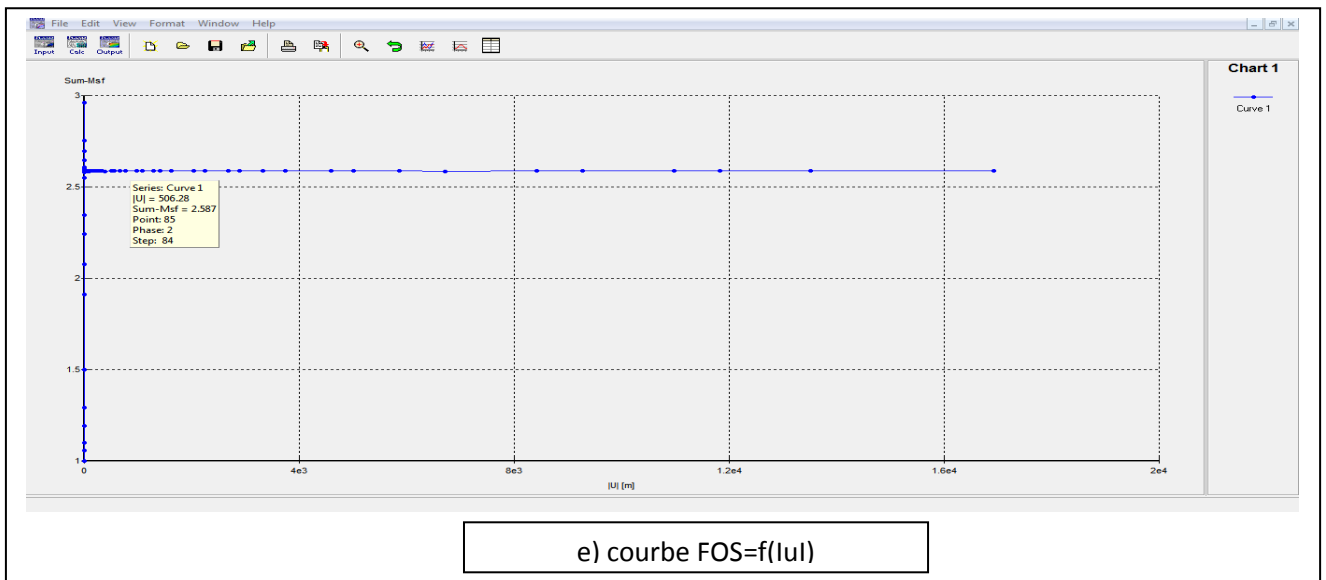
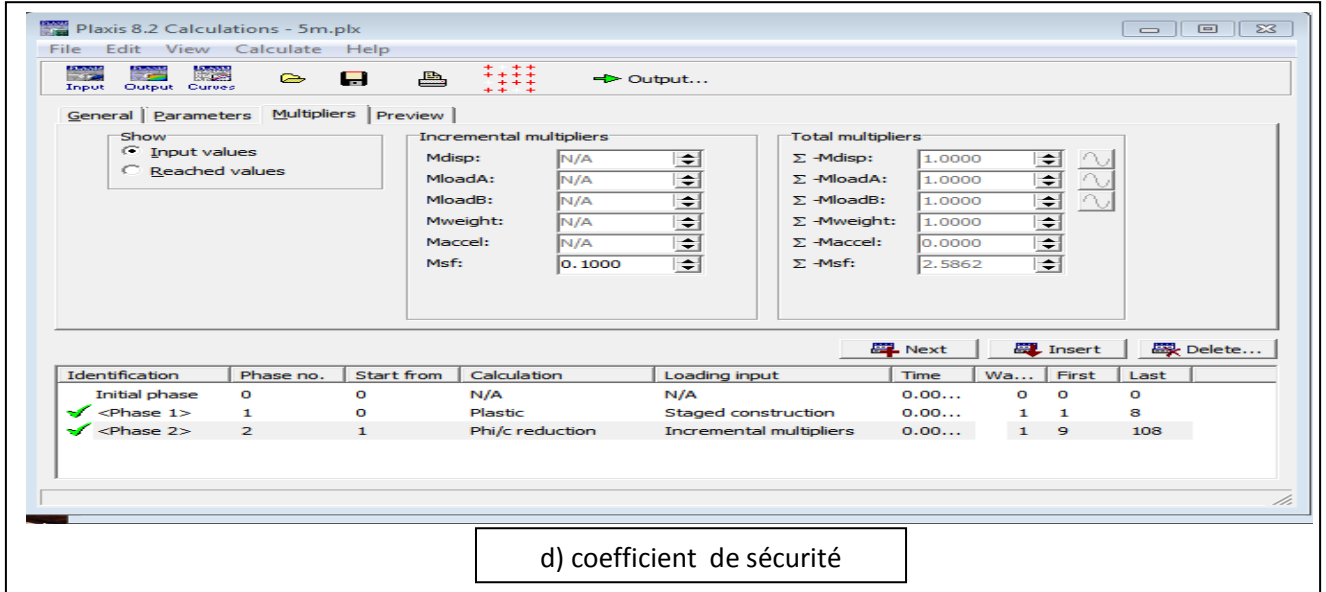
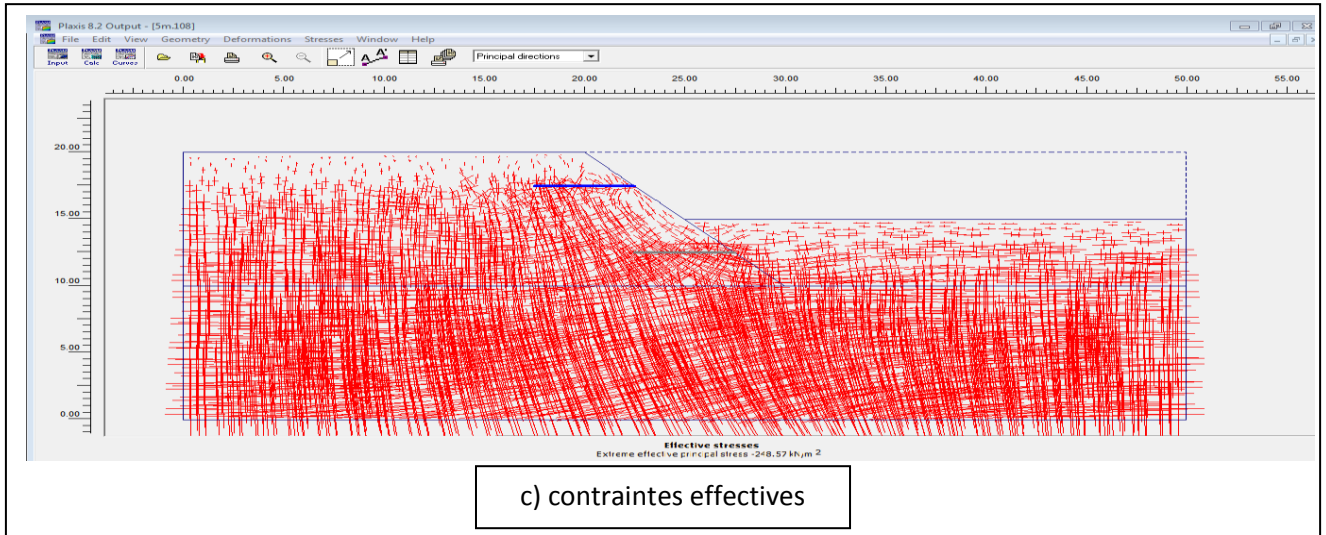
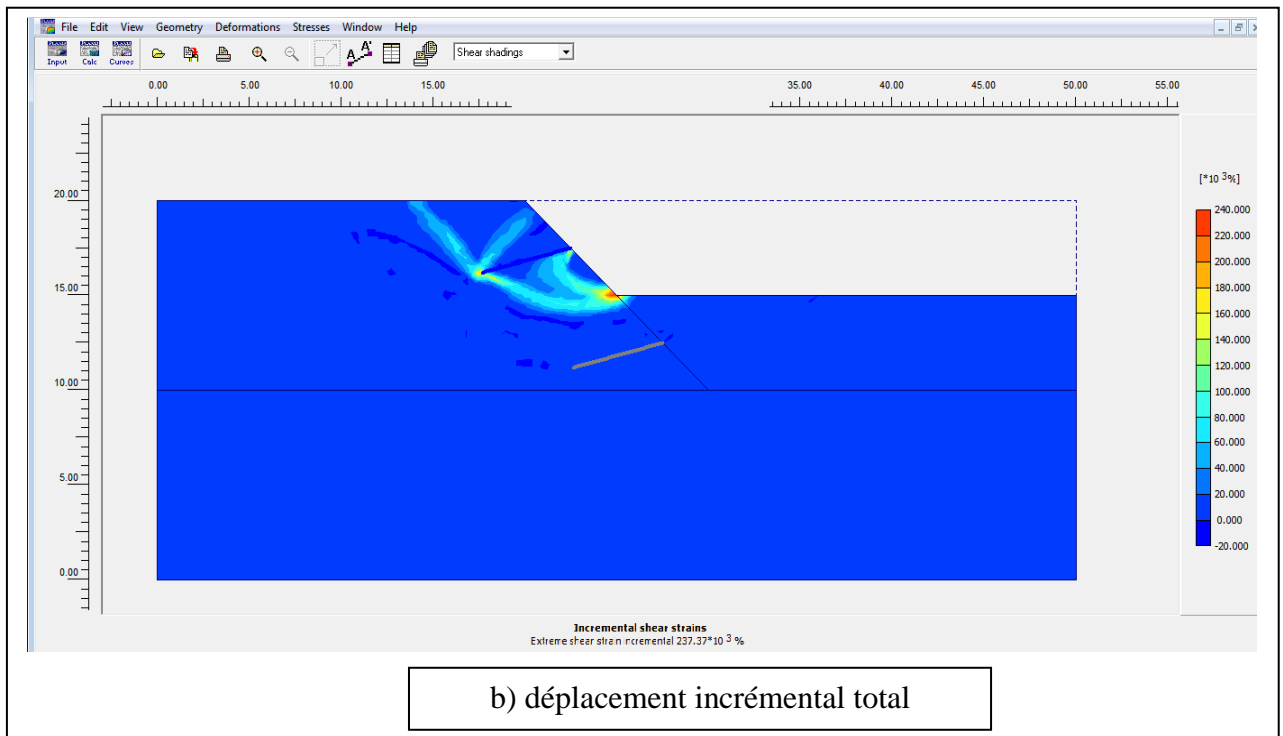
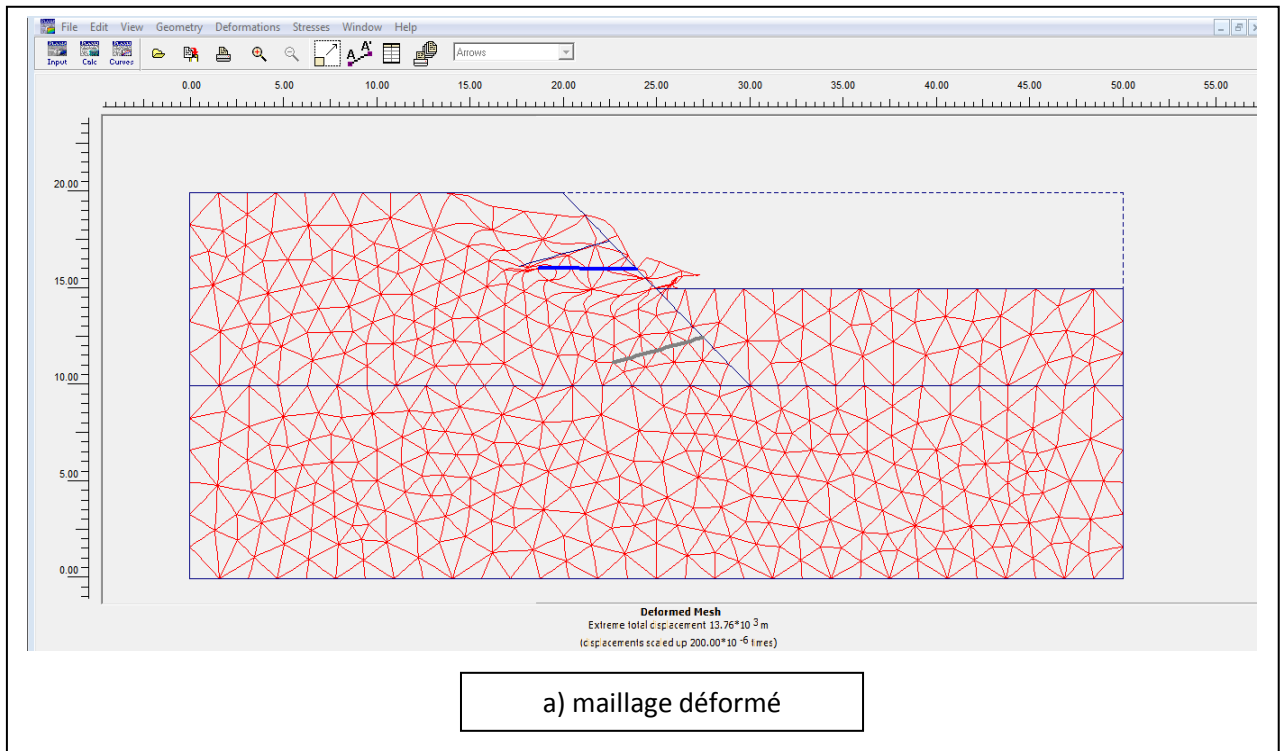


Figure 4.37 –les résultats de calcul (pente de 45° avec un clou de 5m)

-pour un clou de **5m** inclinai par un angle de **15°**

(FIG4.38) Montre tout les résultats de (a) jusqu'à (e)



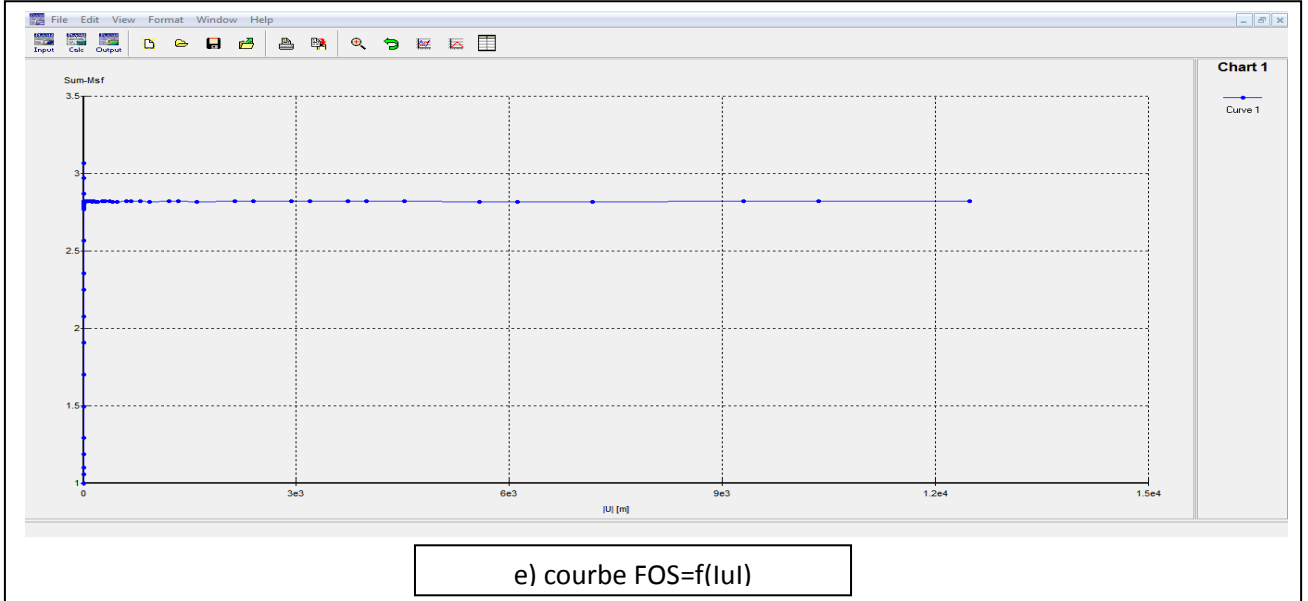
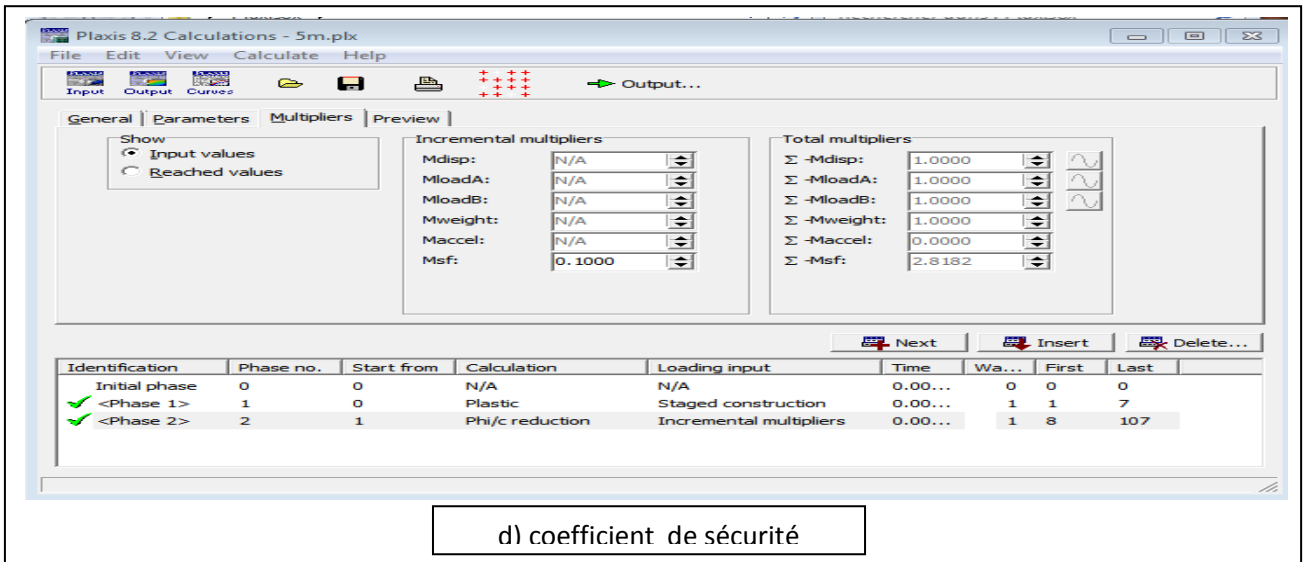
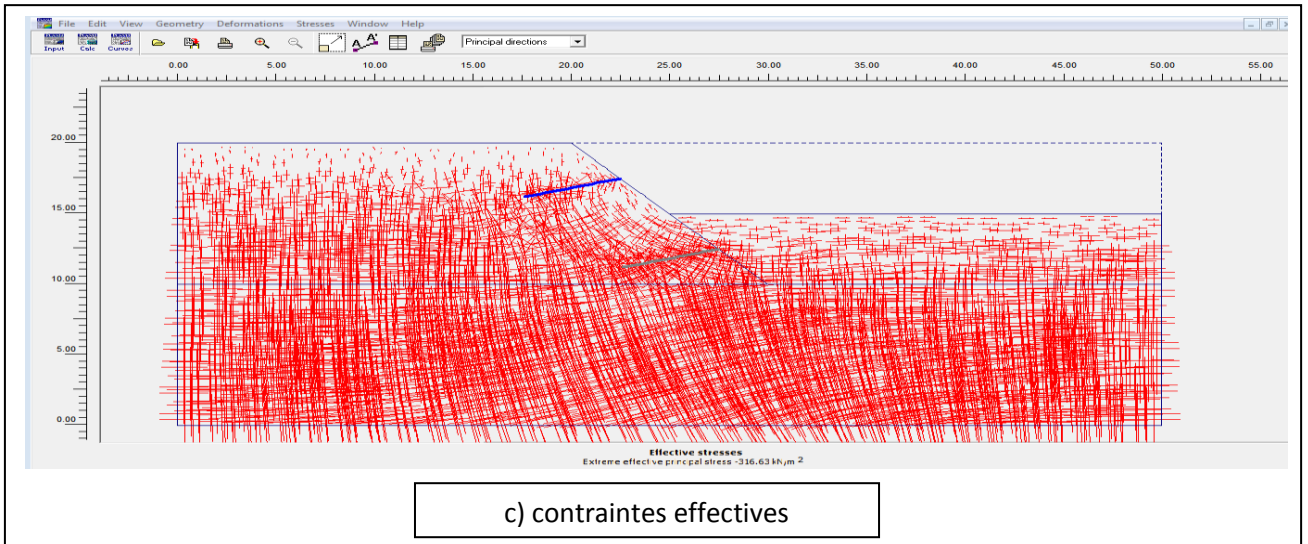
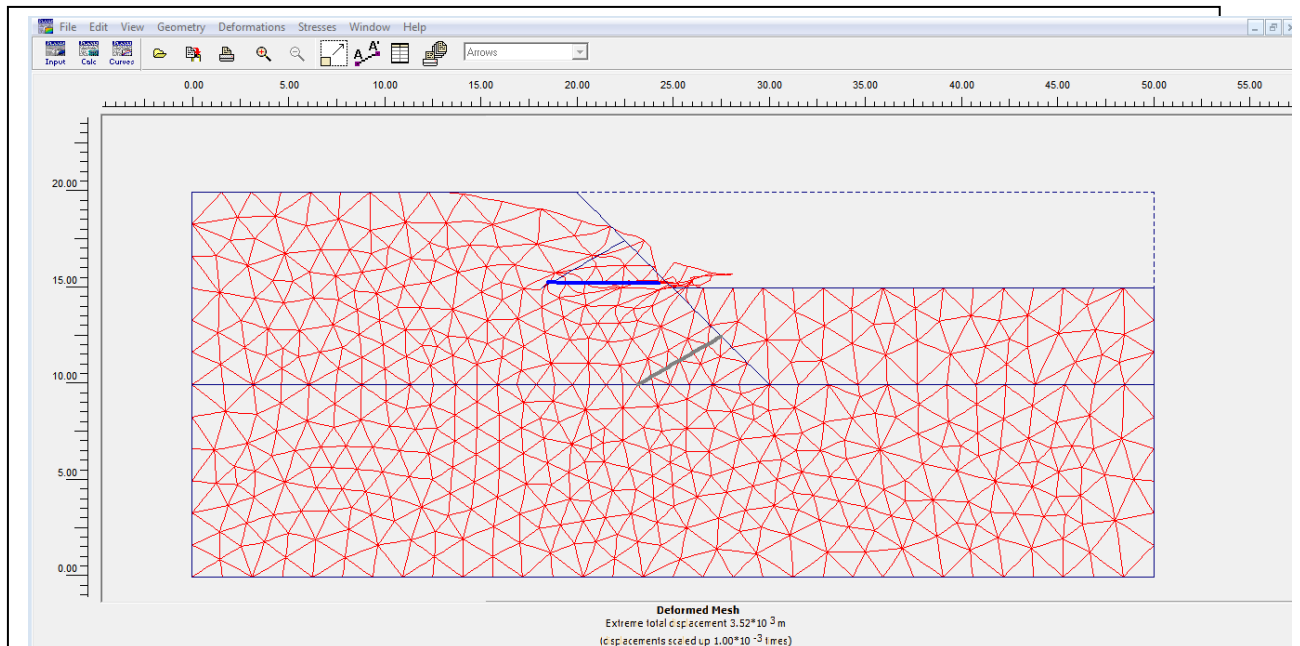


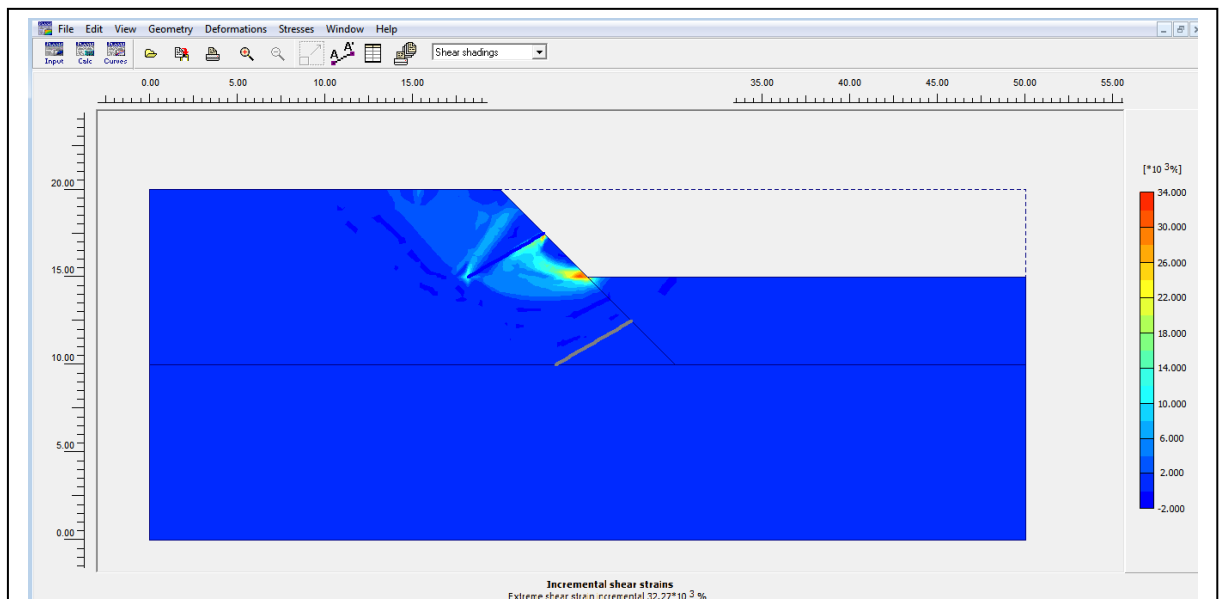
Figure 4.38 –les résultats de calcul (pente de 45° avec un clou de 5m inclinaï par 15°)

-pour un clou de **5m** incliné par un angle de **30°**

(FIG 4.39) Montre tout les résultats de (a) jusqu'à (e)



a) maillage déformé



b) déplacement incrémental total

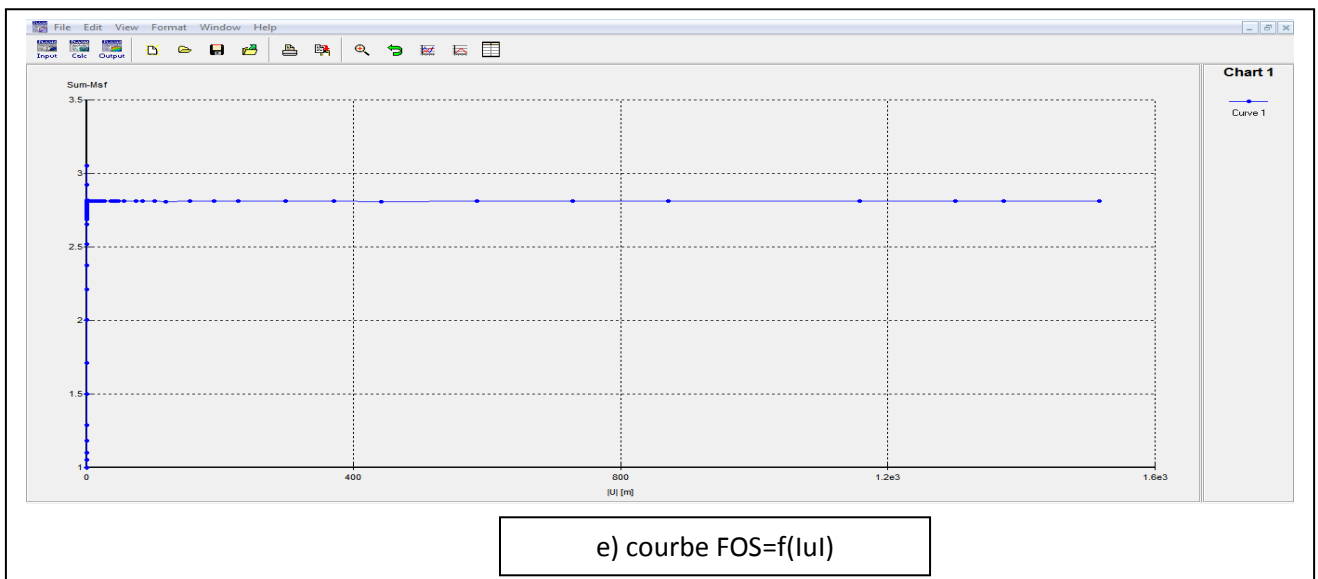
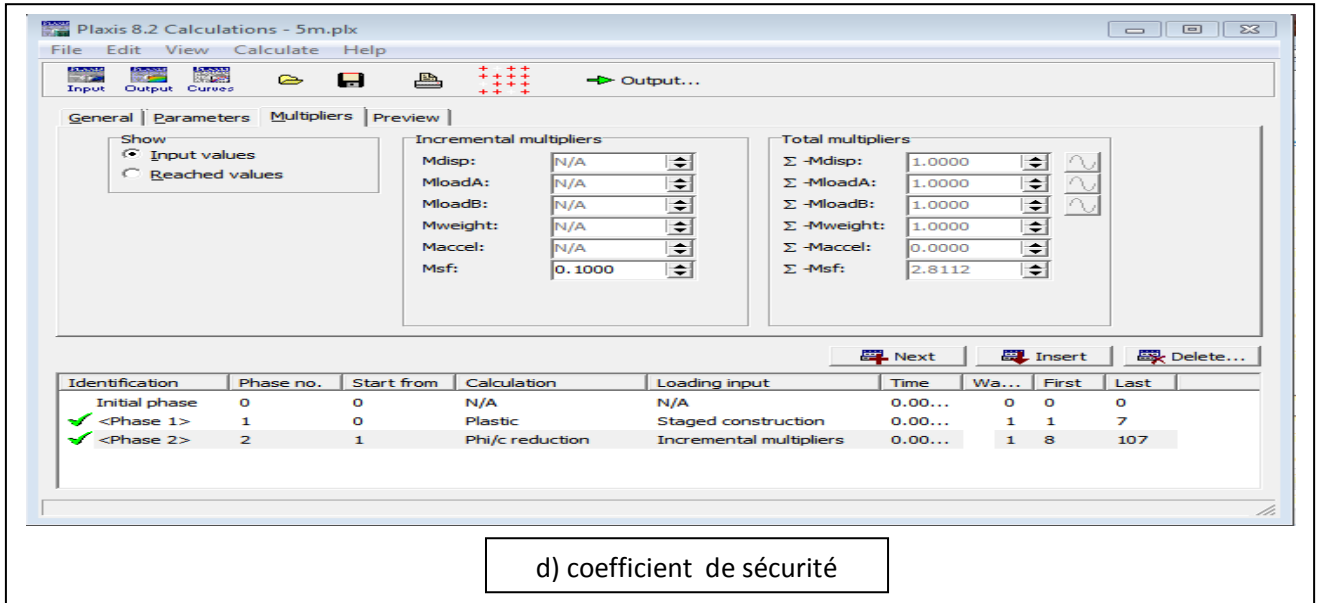
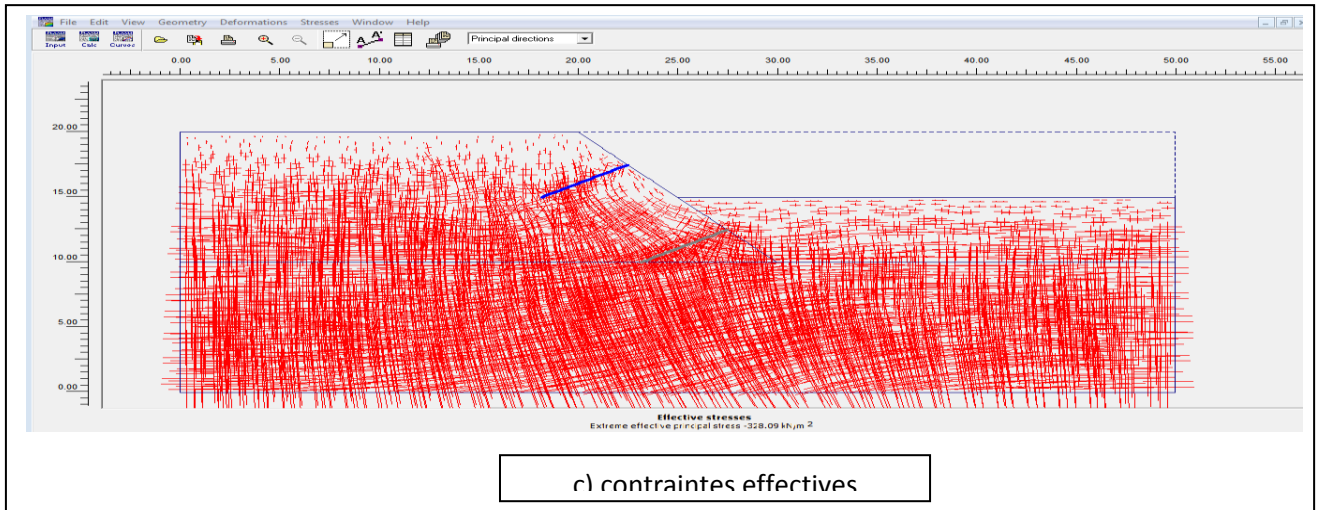


Figure 4.39 – les résultats de calcul (pente de 45° avec un clou de 5m incliné par 30°)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **2,3 et 7m** avec les mêmes inclinaisons **0° ; 15° et 30°**

-pour la pente de 45° sans amélioration (**sans clouage**) et pour une seule excavation de **5m** le coefficient de sécurité globale est de

FOS=2.29

Les résultats résumés dans le tableau suivant

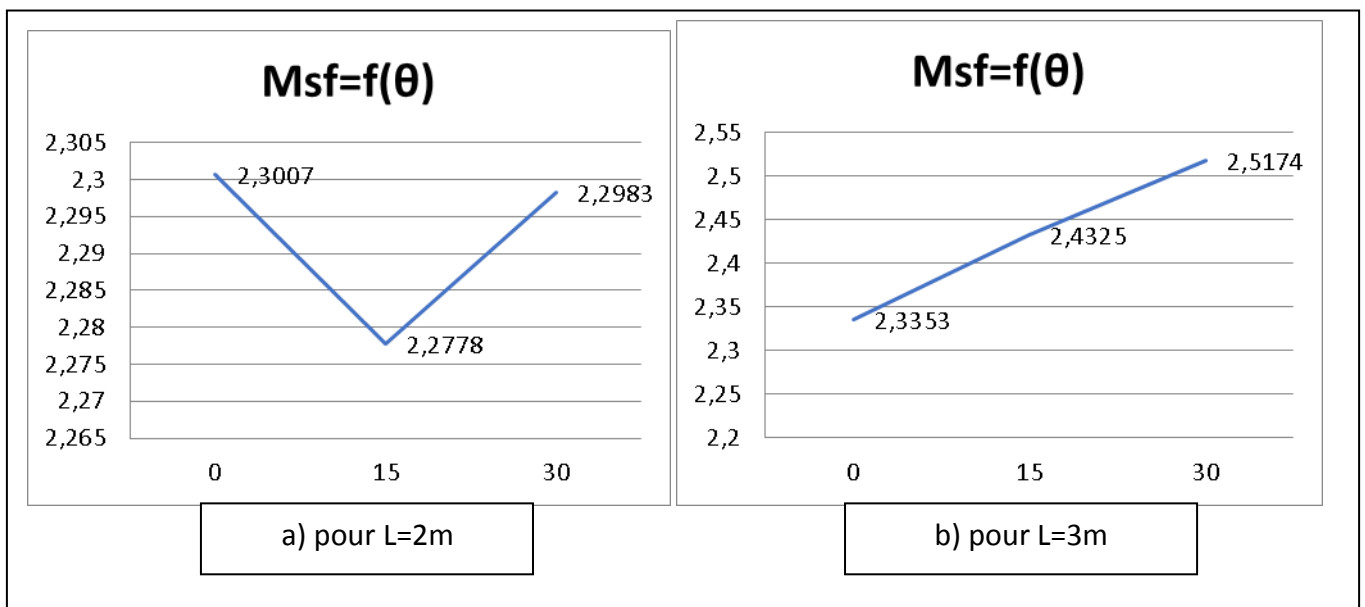
Pente de 45° (excavation 1)												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	2.3067	2.3353	2.5862	2.8970	2.278	2.4325	2.8172	3.1012	2.2983	2.5174	2.8112	3.132

Tableau. 4.7 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

b-discutions de résultats :

- Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG4.40) montre tout les résultats de (a) jusqu'à (d)



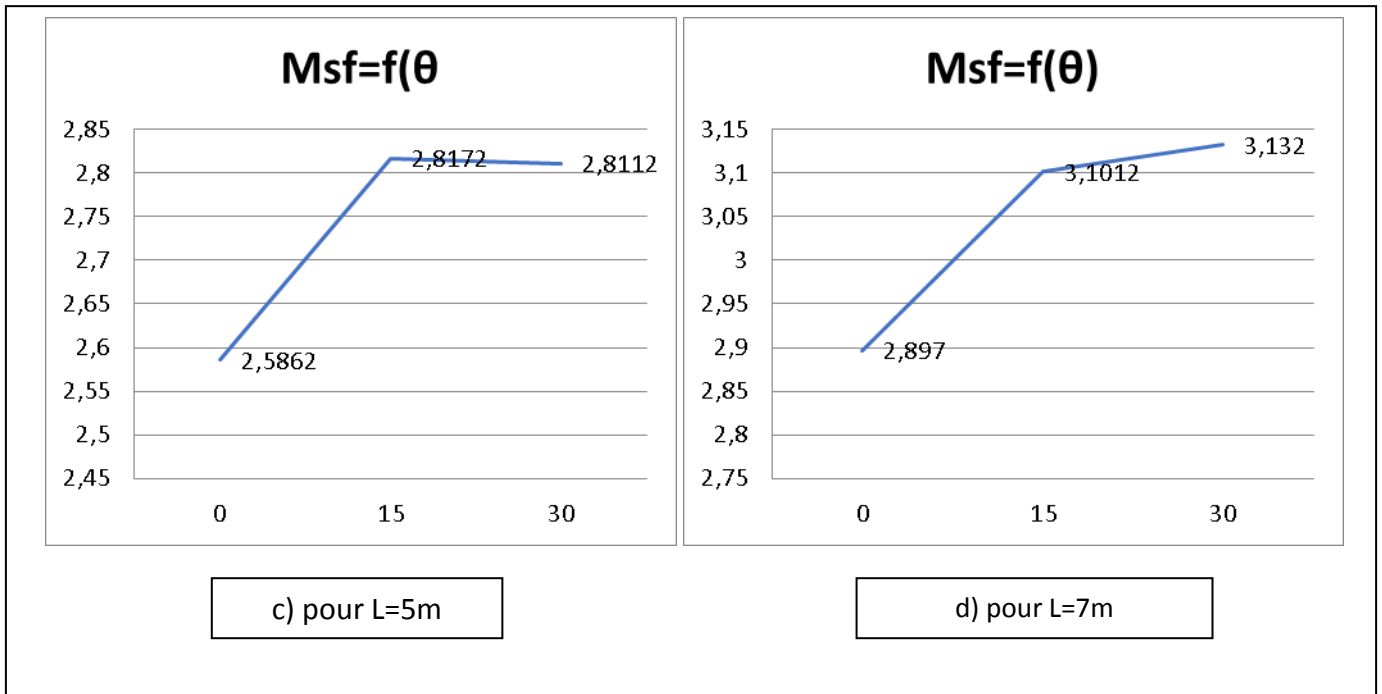
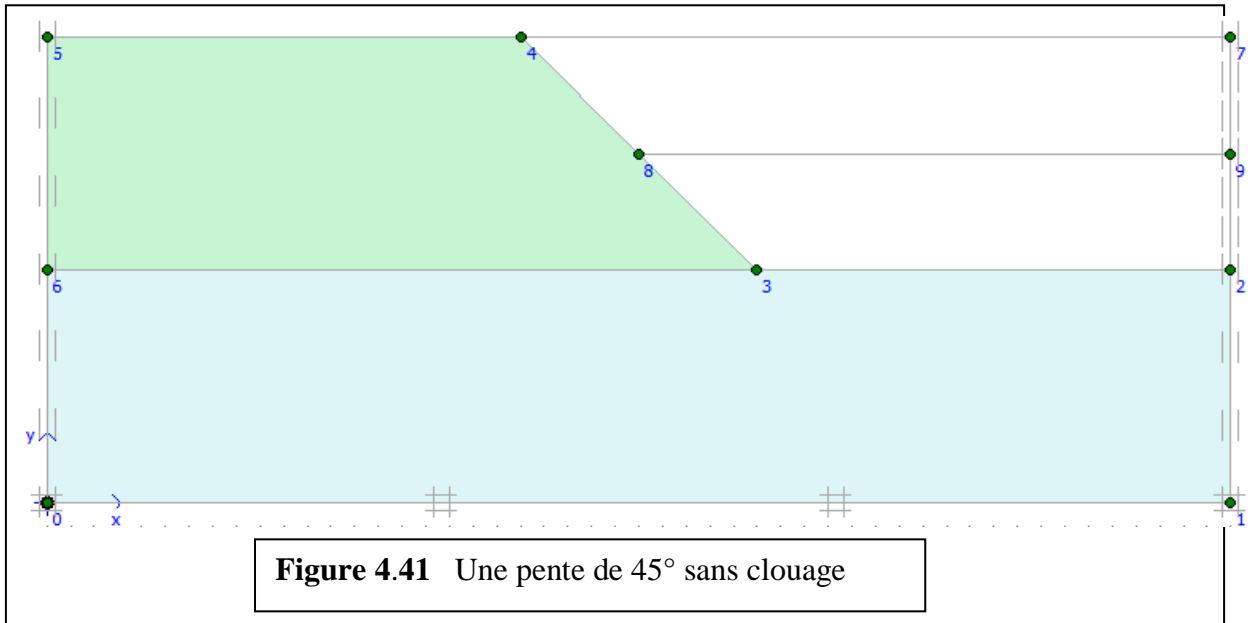


Figure 4.40 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que :

- dans le graphe (a) en remarque que l'inclinaison 15° seule qui na pas donné un coefficient de sécurité supérieure a FOS (sans clouage), c'est une inclinaison défavorable pour L=2m.
- le graphe (b) montre que toute inclinaison 0° 15° 30° donne un bon résultat et l'optimal c'est 30° .
- le coefficient de sécurité augment avec l'augmentation de L et Θ .

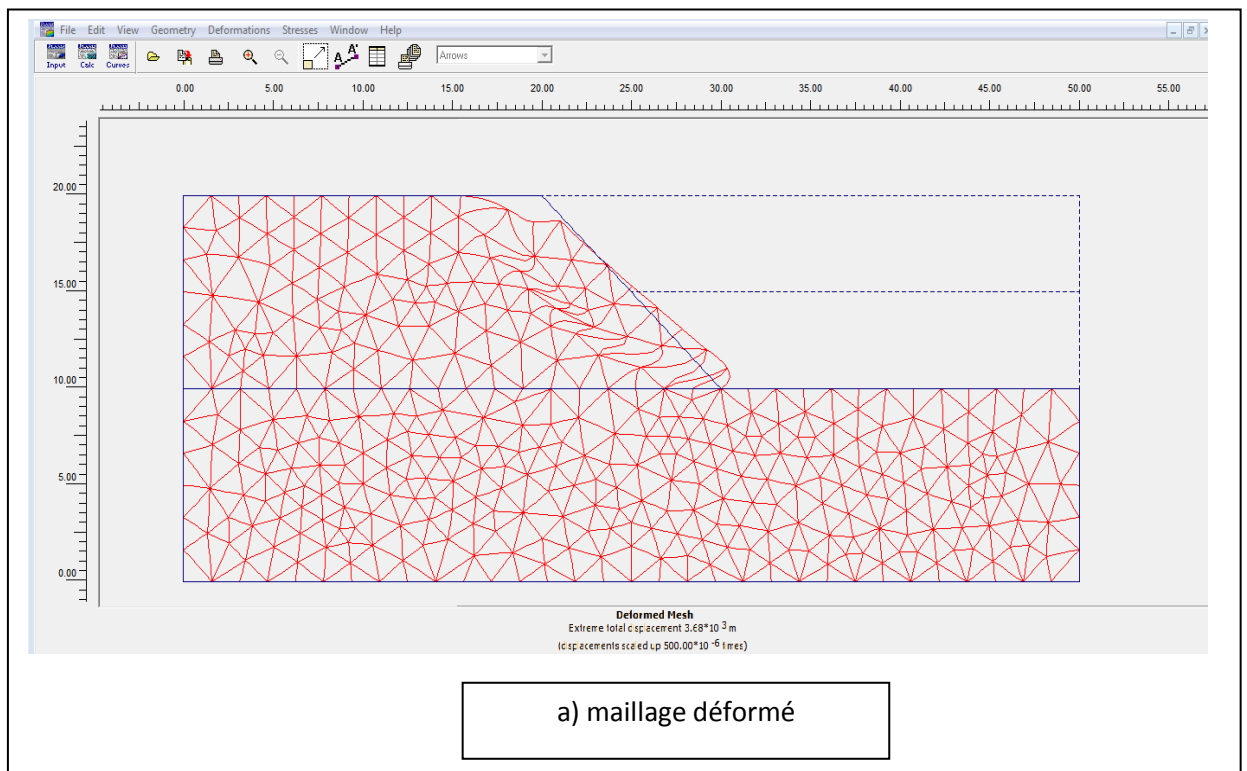
b- excavation 2 :

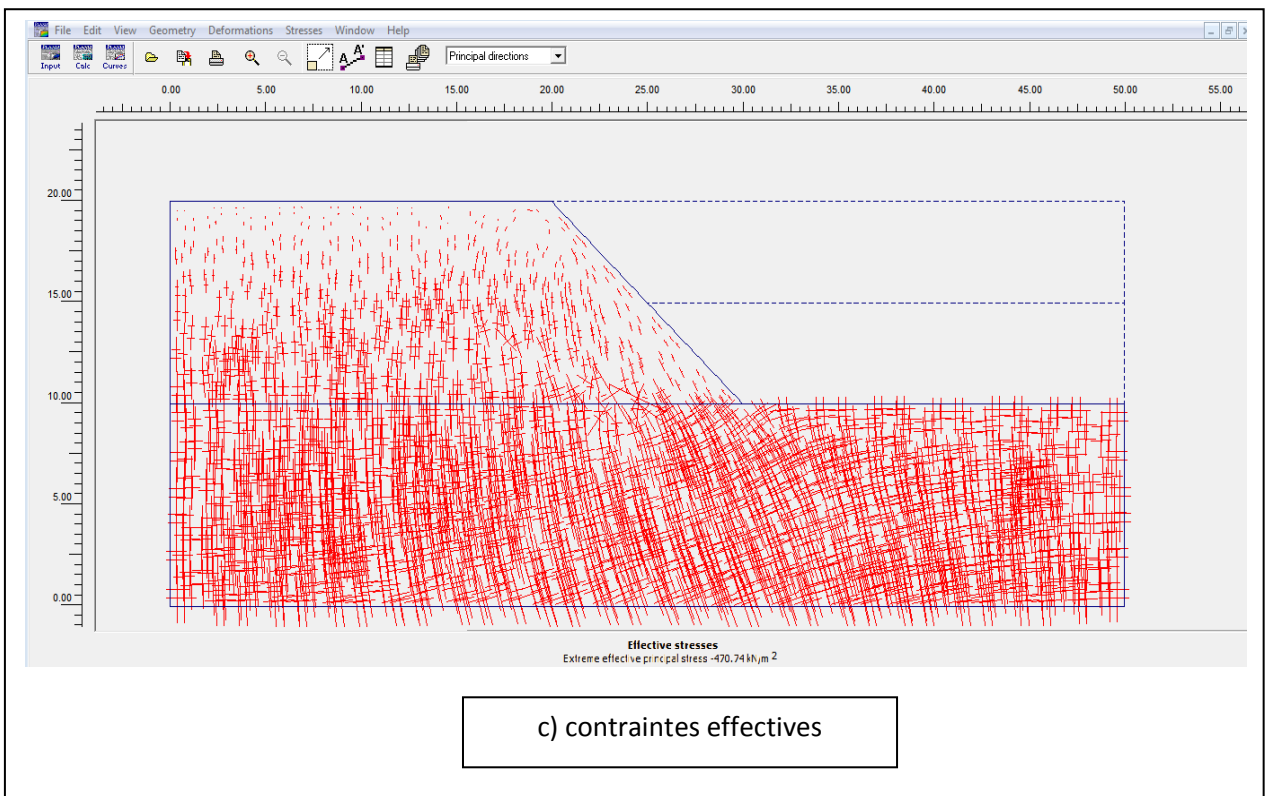
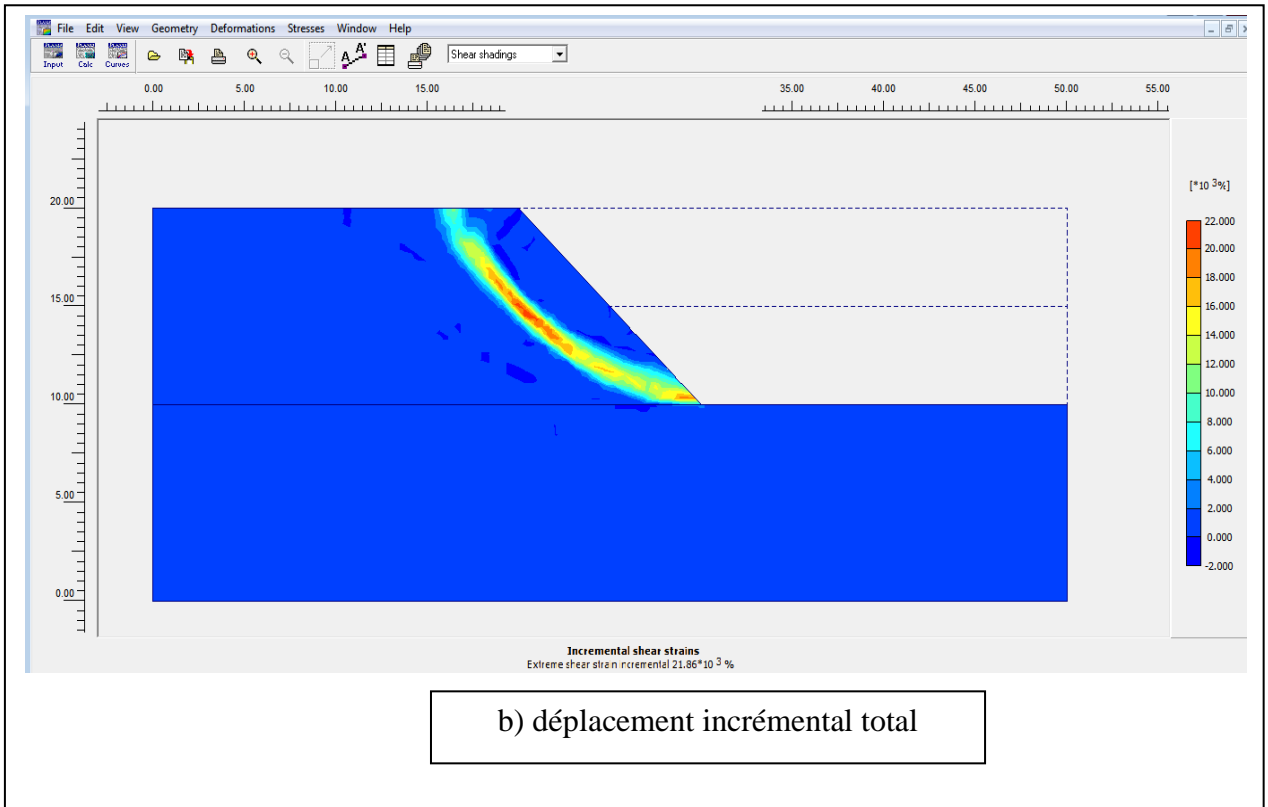


-les résultats de calcul :

-pour une pente de 45° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4. 42) Montre tout les résultats de (a) jusqu'à (e)





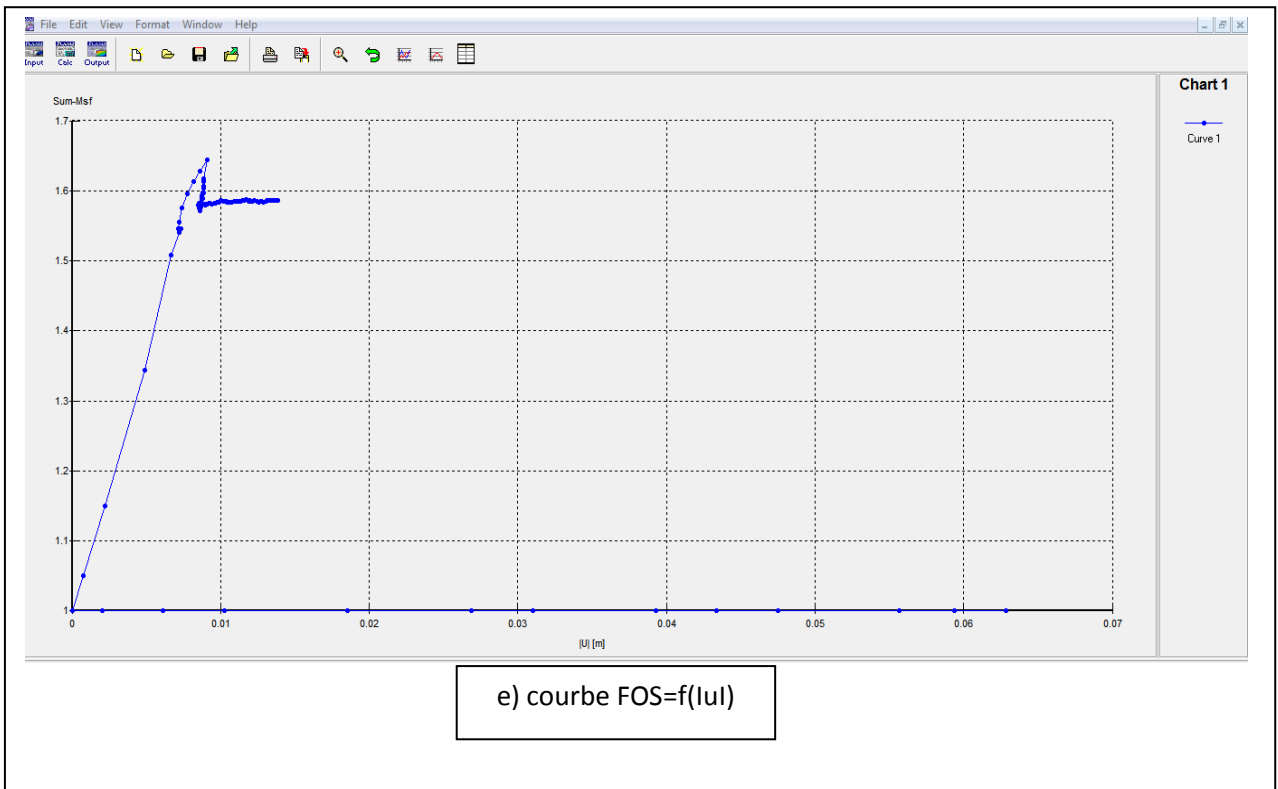
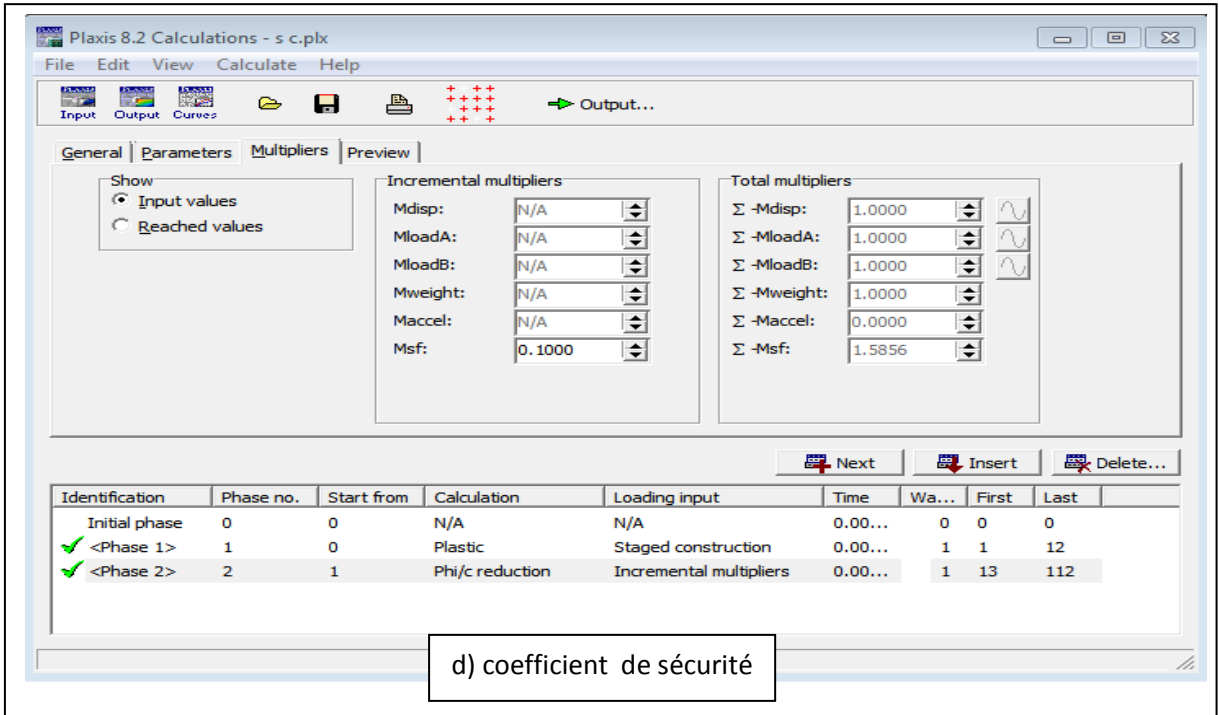
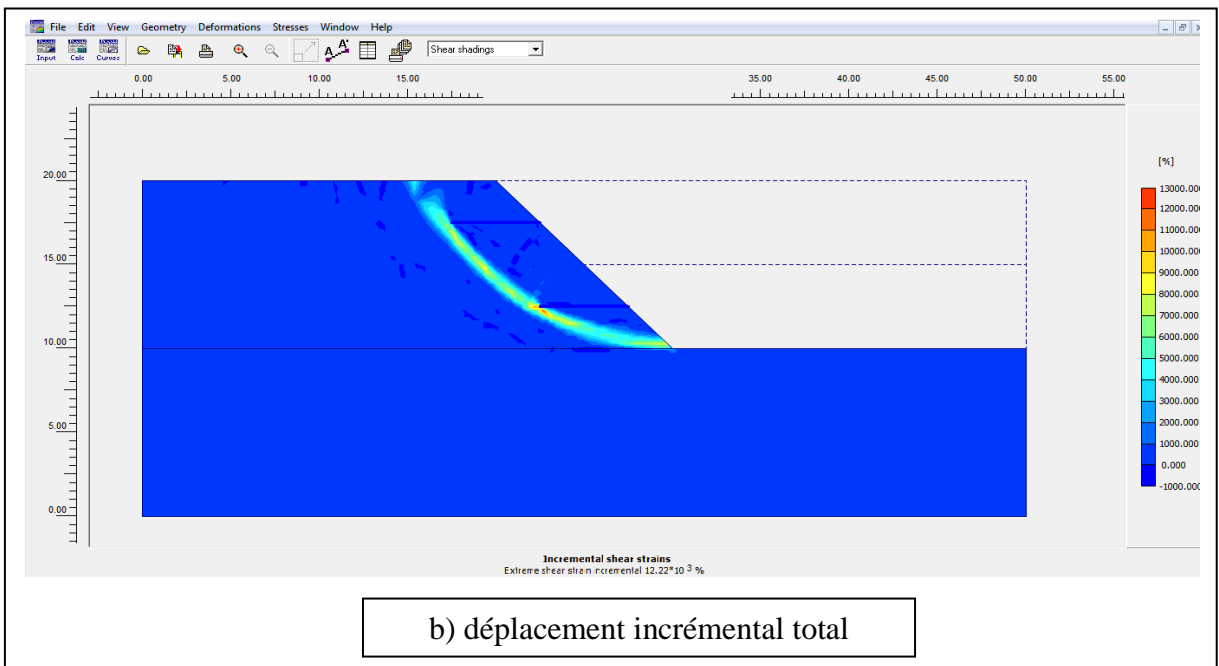
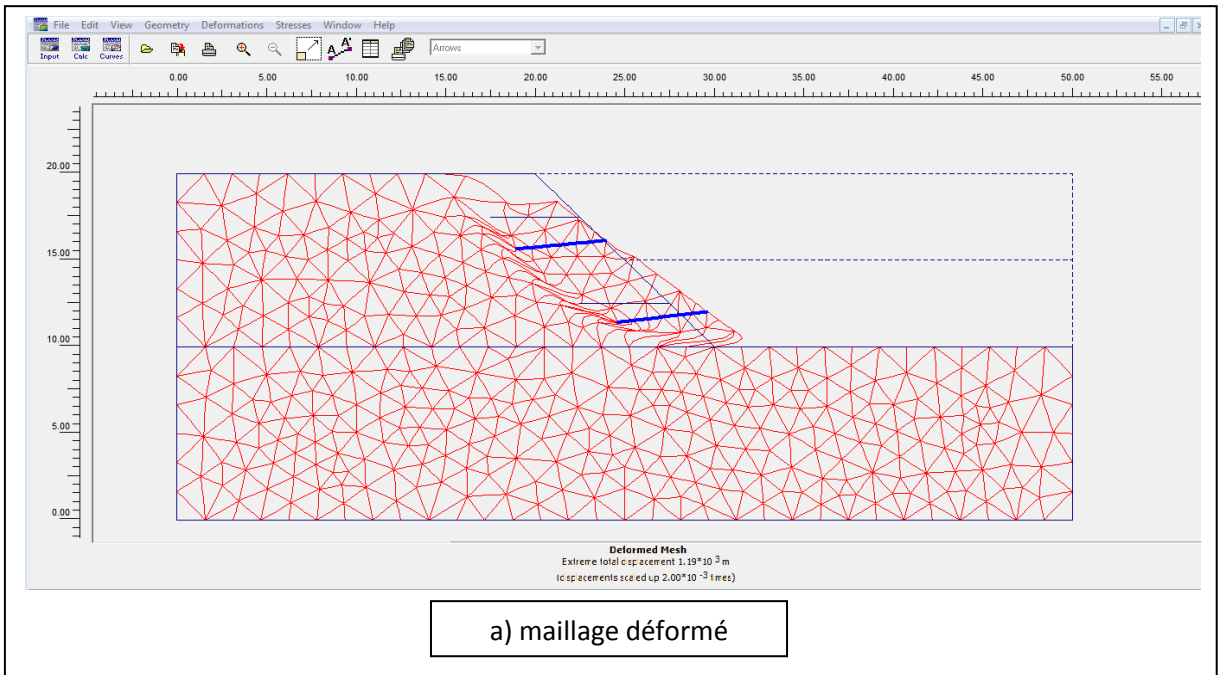


Figure 4.42 – les résultats de calcul (pente de 45° sans clou)

-pour un clou de **5m** horizontale

(FIG4.43) Montre tout les résultats de (a) jusqu'à (e)



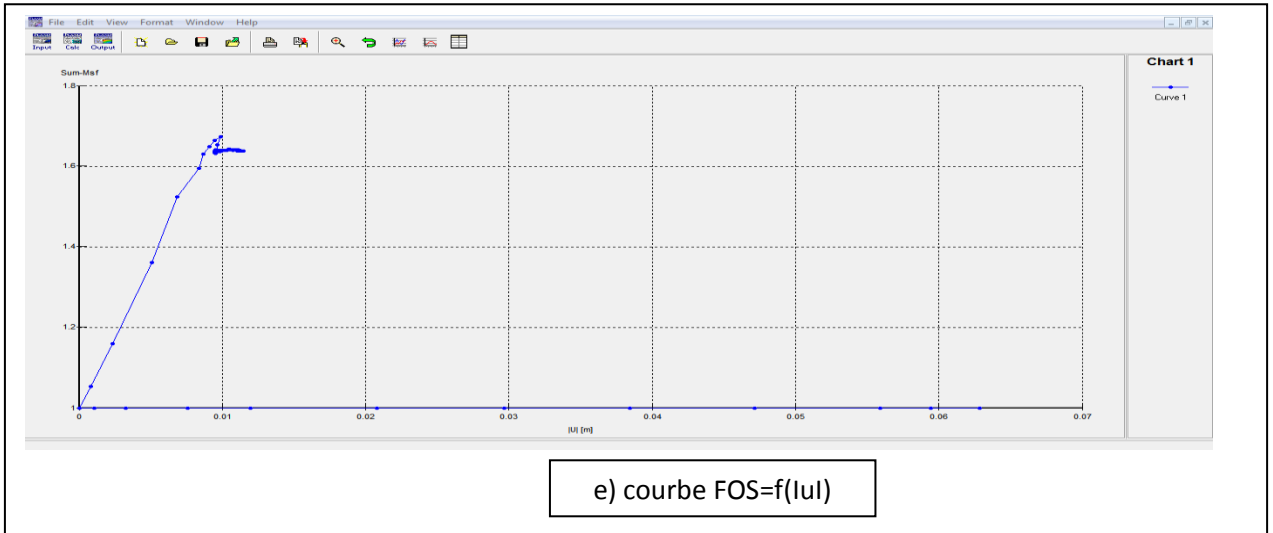
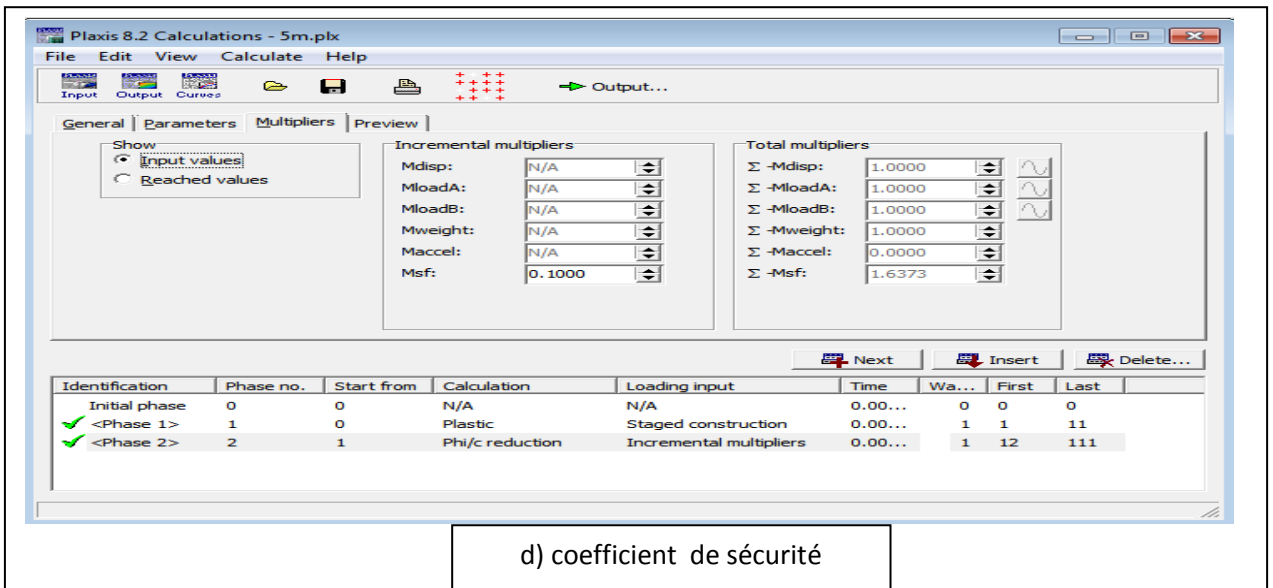
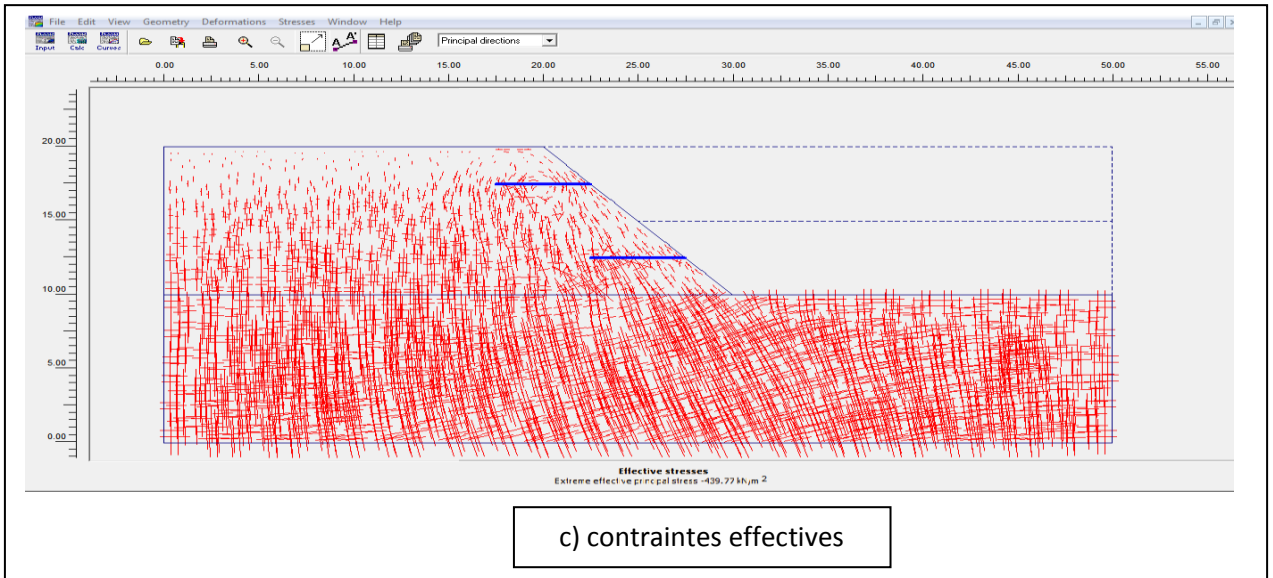


Figure 4.43 –les résultats de calcul (pente de 45° avec un clou de 5m)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **2, 3,5, 7m** avec les même inclinaisons **0° ; 15° et 30°**

-pour la pente de 45° sans amélioration (**sans clouage**) et pour une seule excavation de **5m** le coefficient de sécurité globale est de

FOS=1.8556

Les résultats résumés dans le tableau suivant

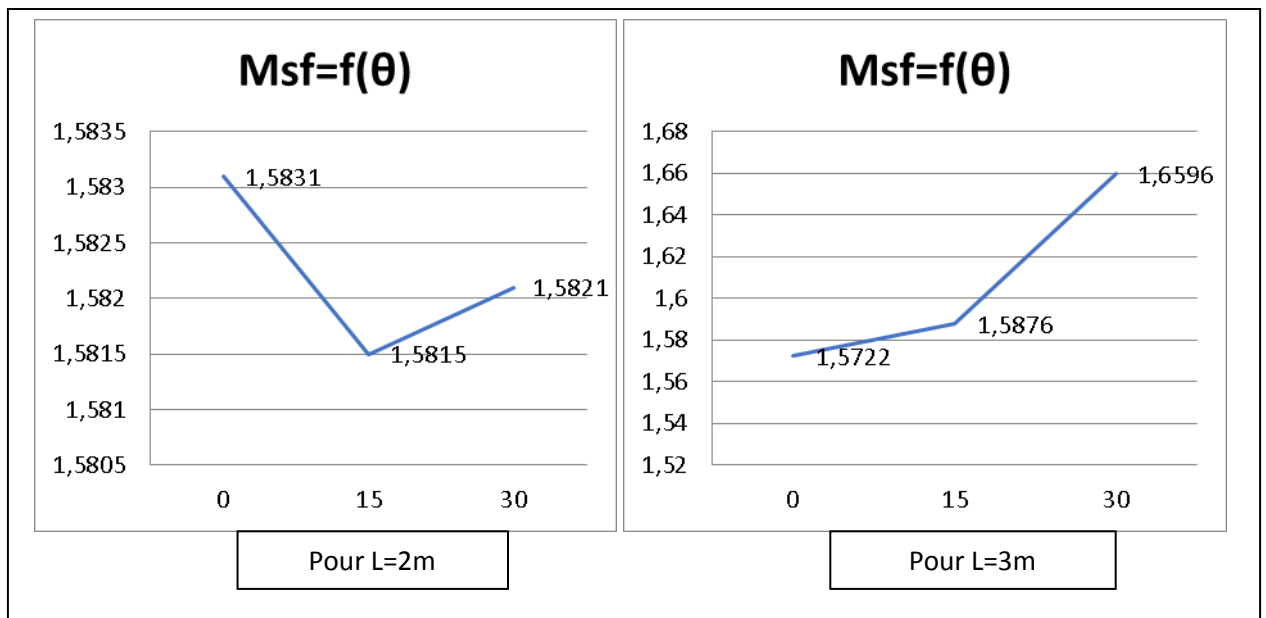
Pente de 45°(excavation 2)												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	1.5831	1.5722	1.6573	1.85	1.5815	1.5876	1.8137	1.1859	1.5821	1.6596	2.0734	2.2736

Tableau. 4.8 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

-discutions de résultats :

- Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.44) montre tout les résultats de (a) jusqu'à (d)



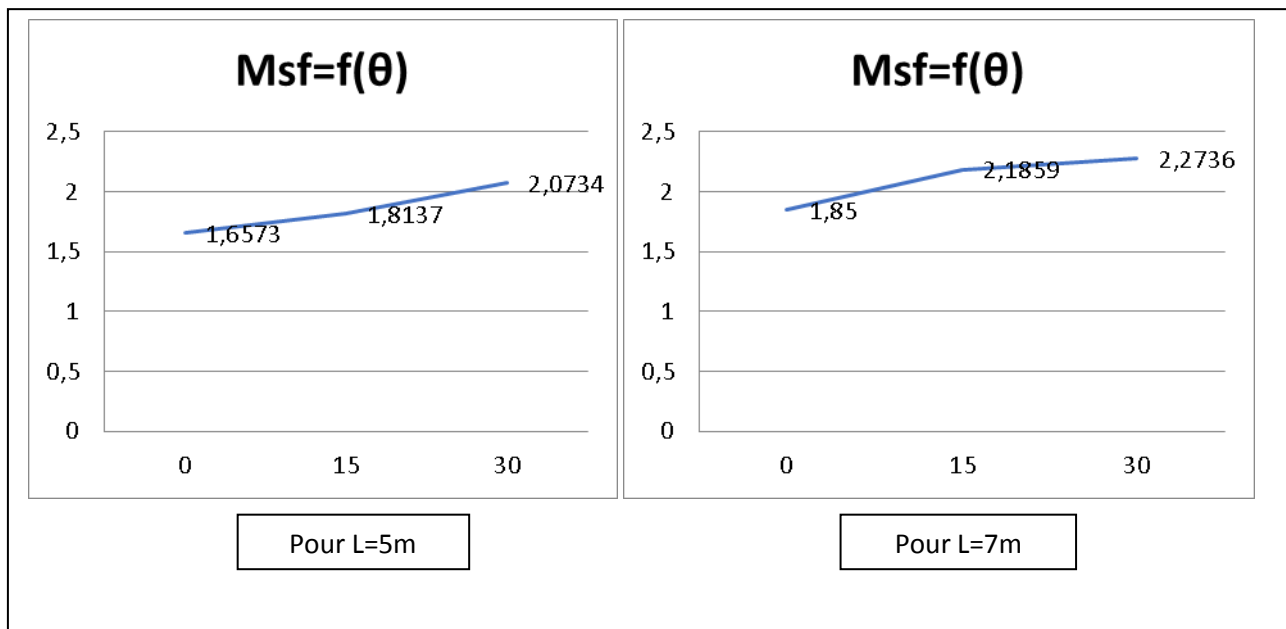


Figure 4.44 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que :

- les clous de 2et 3m sont pas suffisant pour améliorer la sole parce que le résultat de f_s est inférieure à FOS (sans clouage).
- a partir de 5 et 7 m les clous fond leur travaille.
- la meilleure inclinaison qui donne une valeur de FOS optimale c'est 30° .

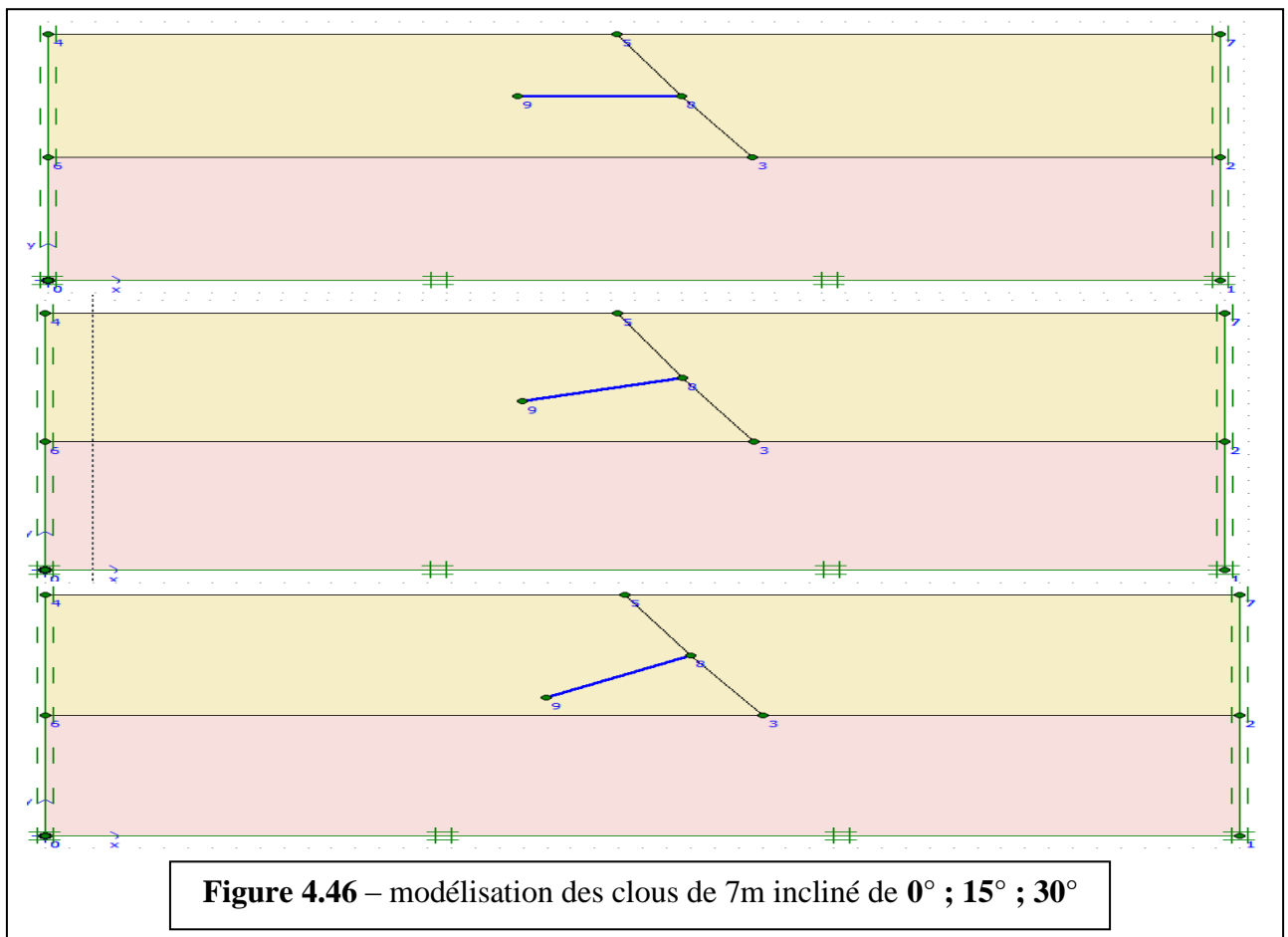
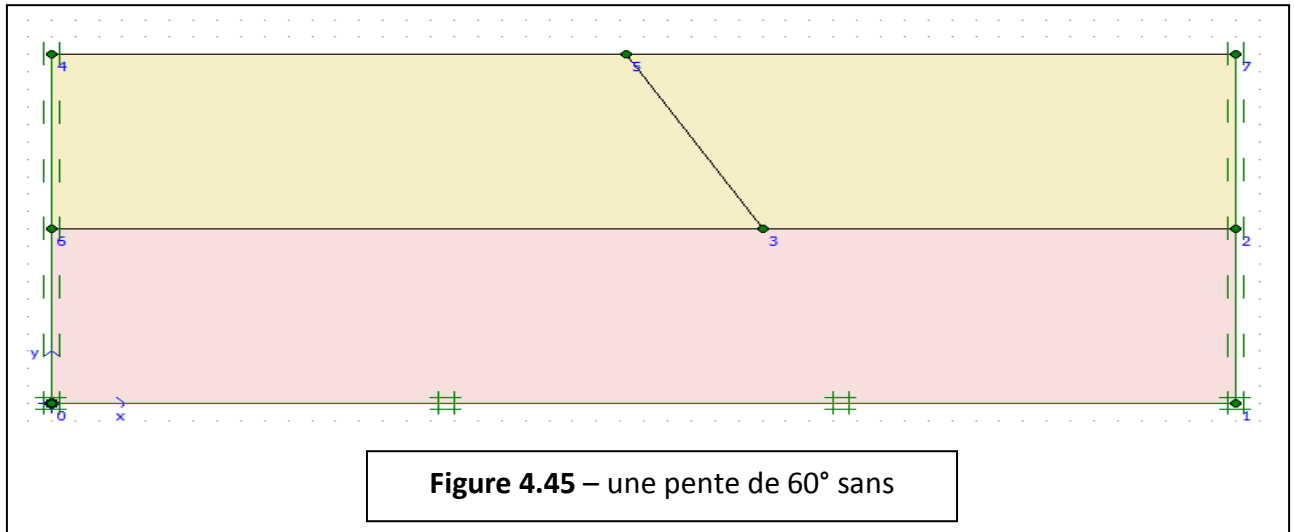
4.4.3) Pente de 60°

4.4.3.1) excavation de 10 m directement

- avec des clous de 2.3.5.7m de longueur

- inclinaison 0°,15°,30°.

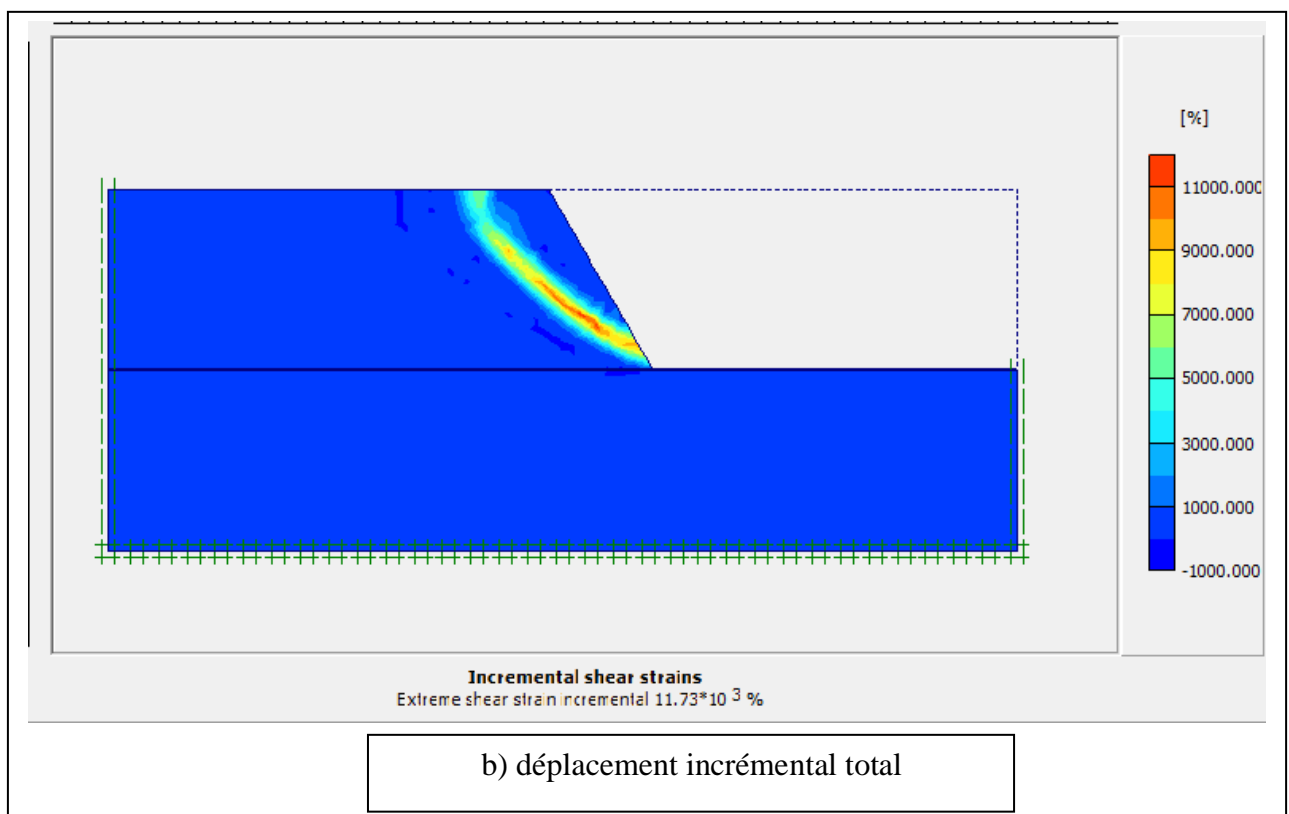
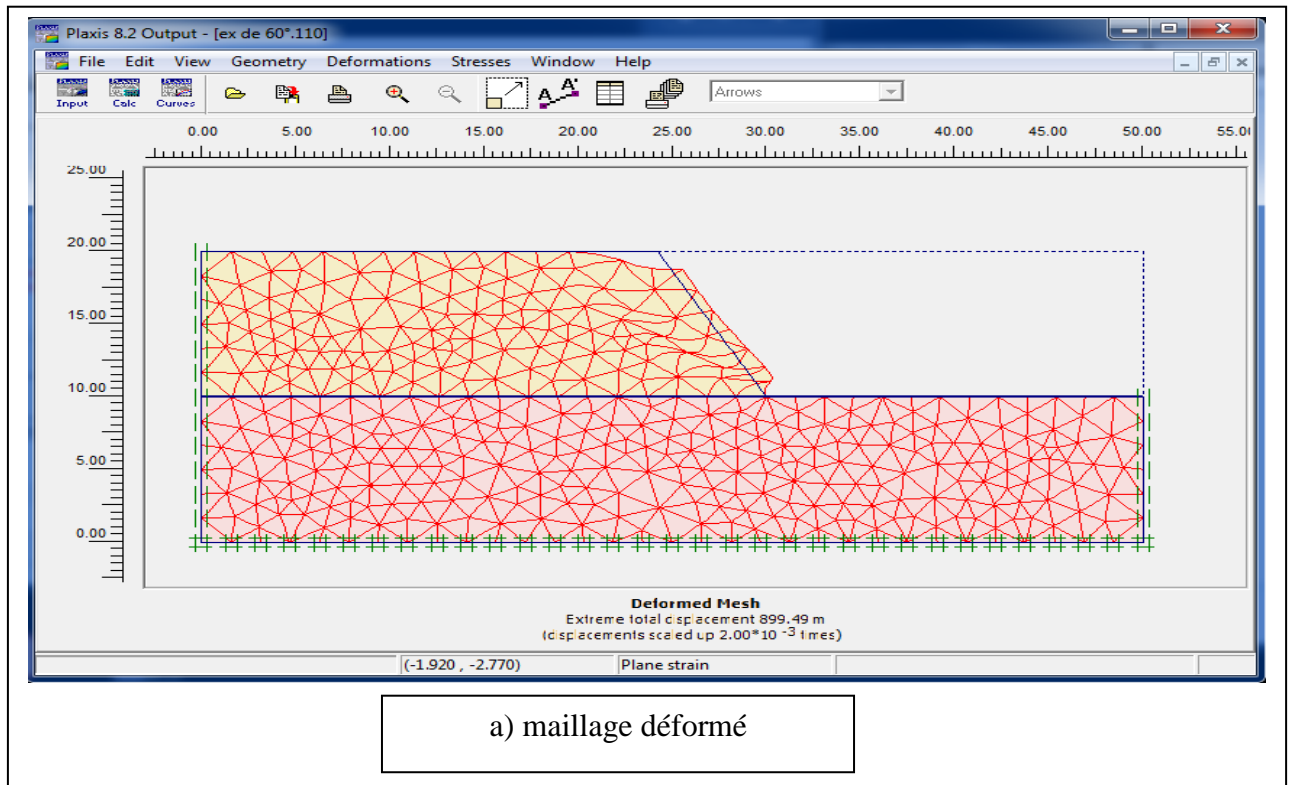
Les figures suivantes représentent les ça étudier ;



a) les résultats de calcul :

-pour une pente de 60° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4.47) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;



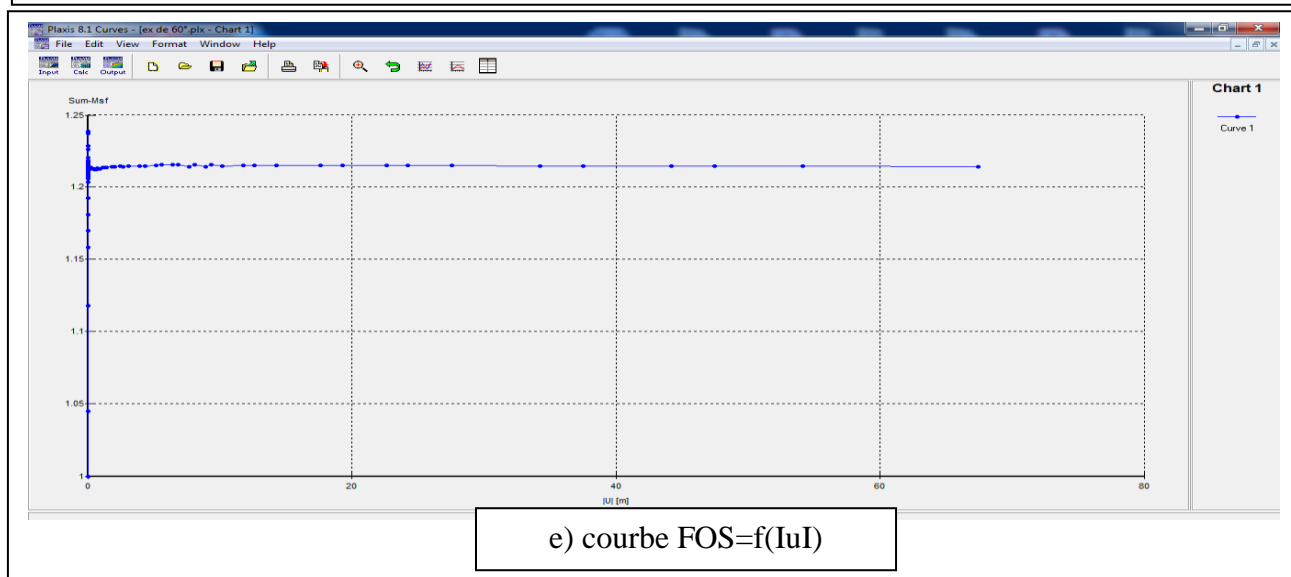
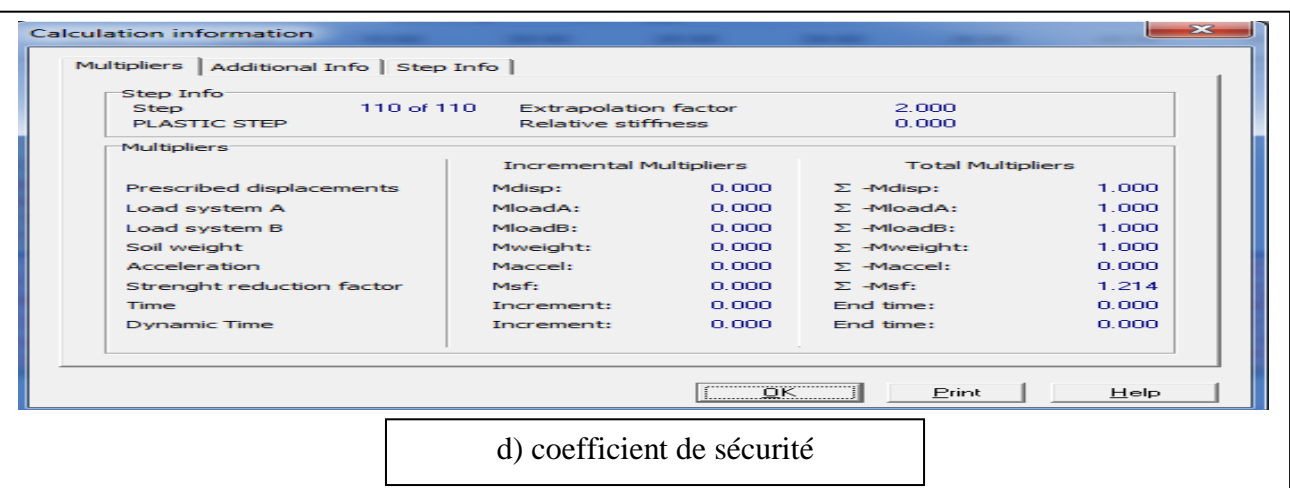
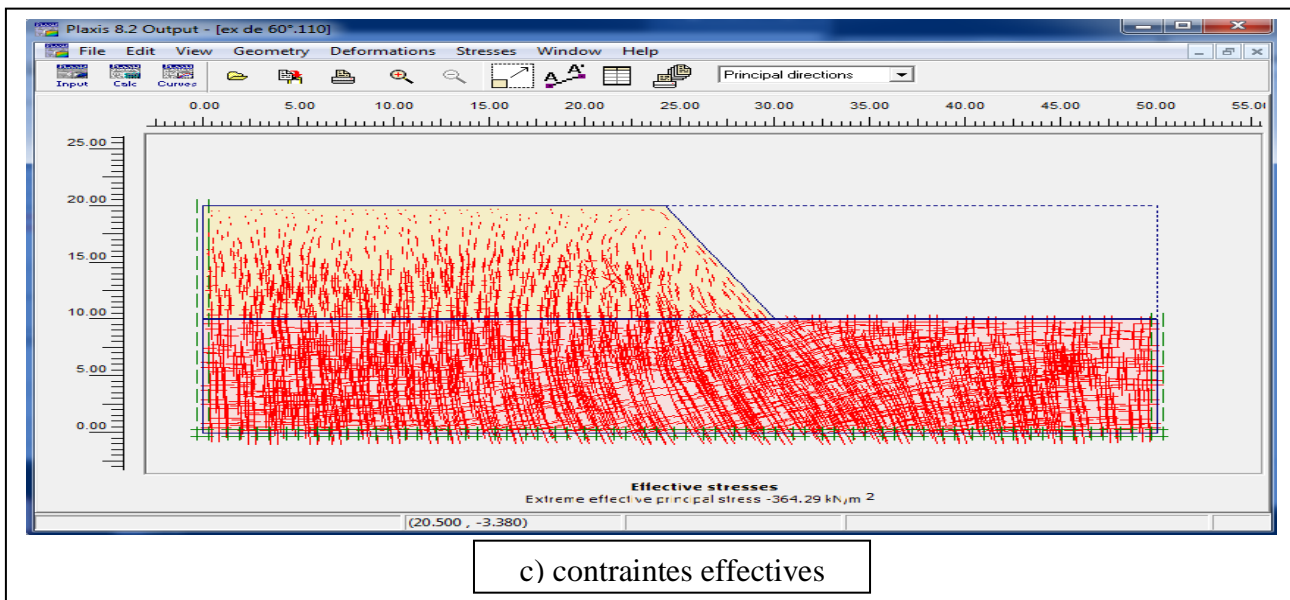
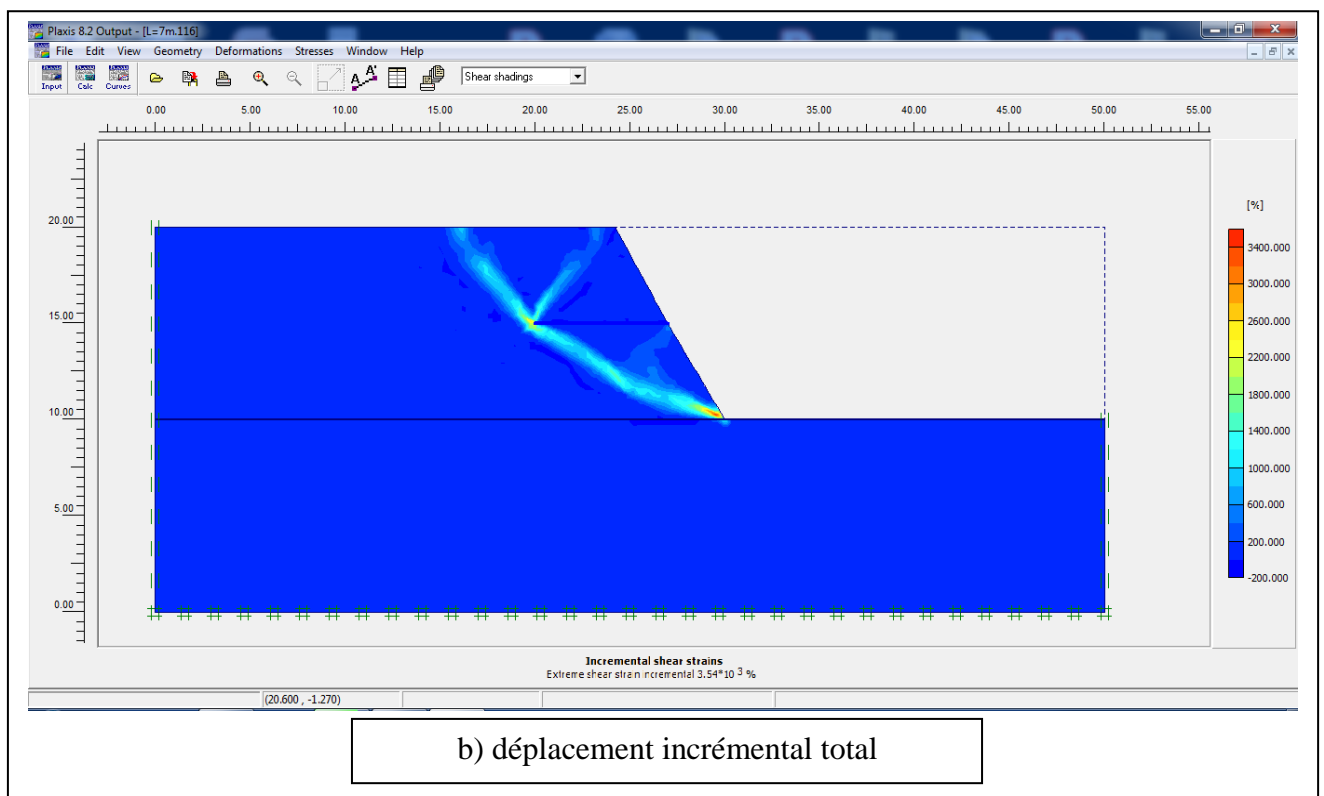
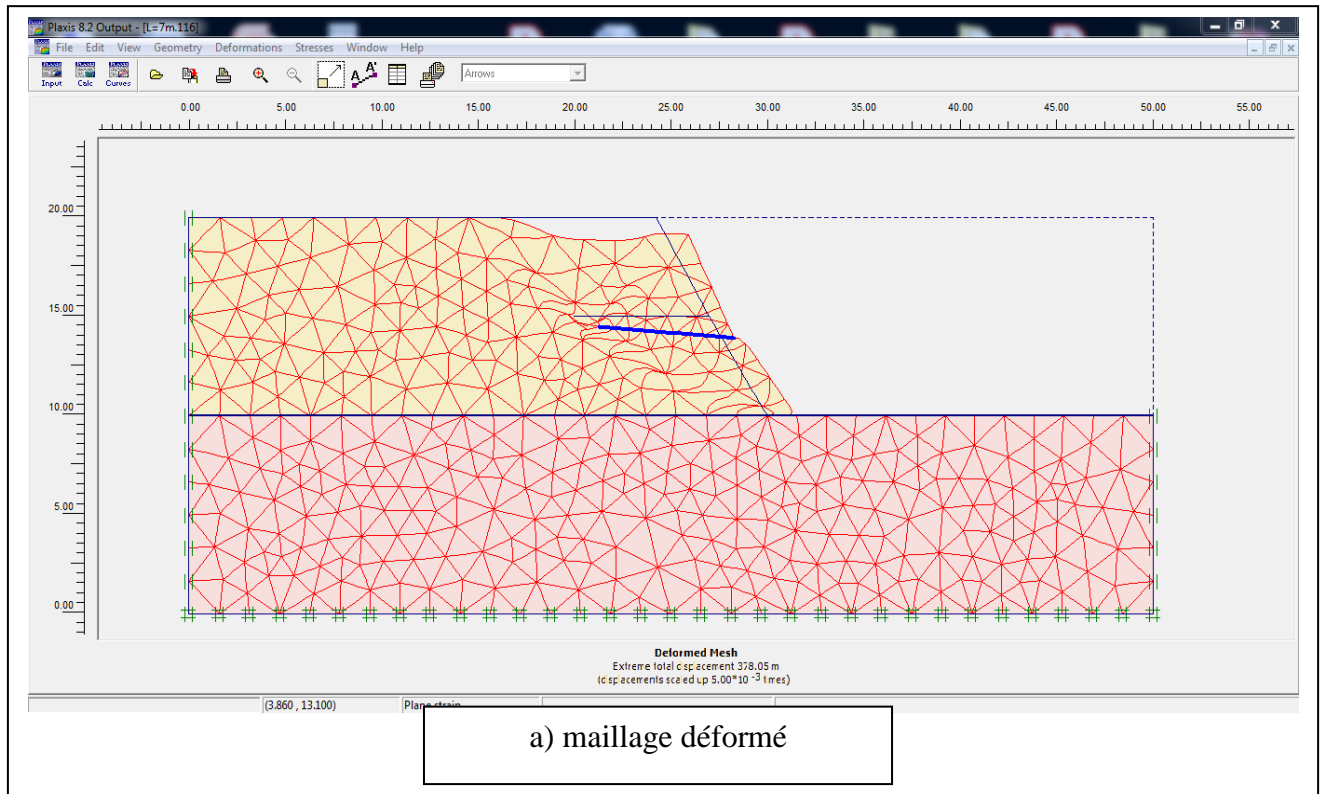
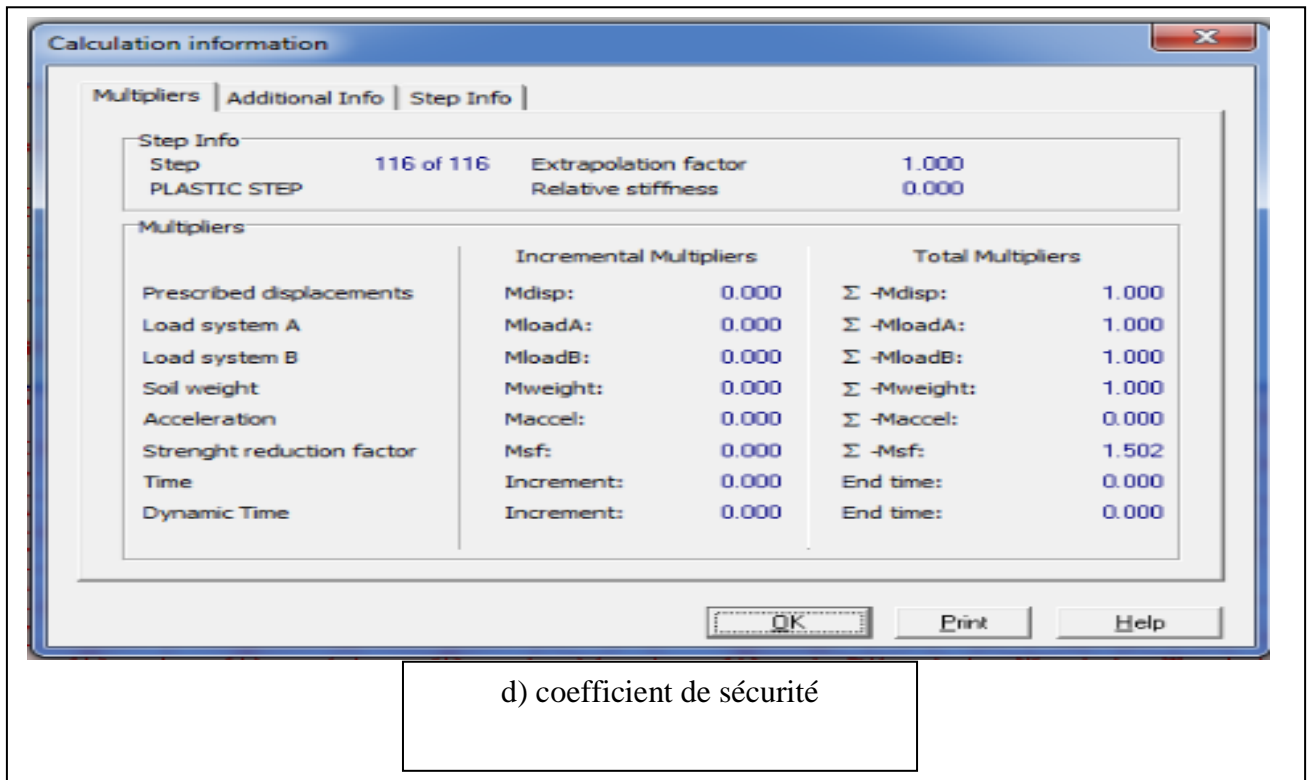


Figure 4.47 – les résultats de calcule (pente de 60° sans clouage)

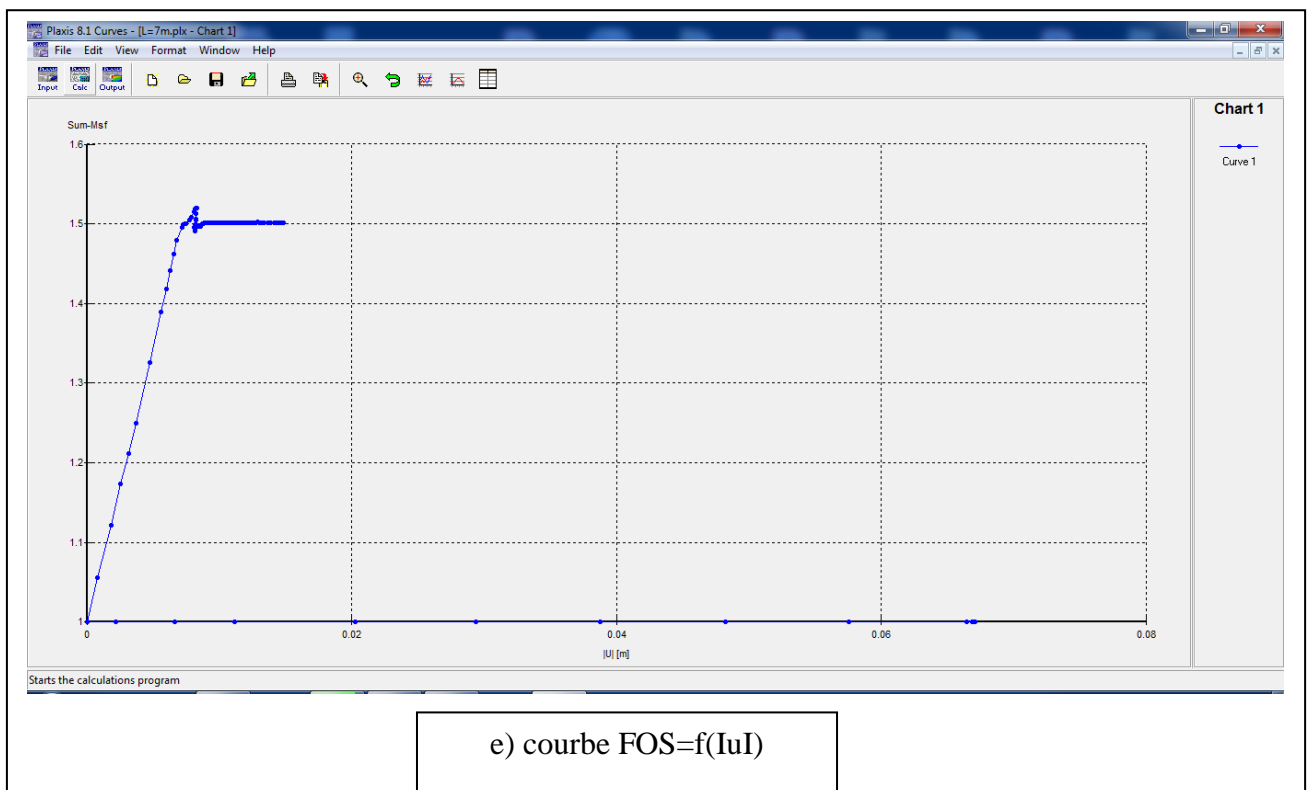
-pour $L=7$ m incliné 0° :

(FIG 4.48) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





d) coefficient de sécurité

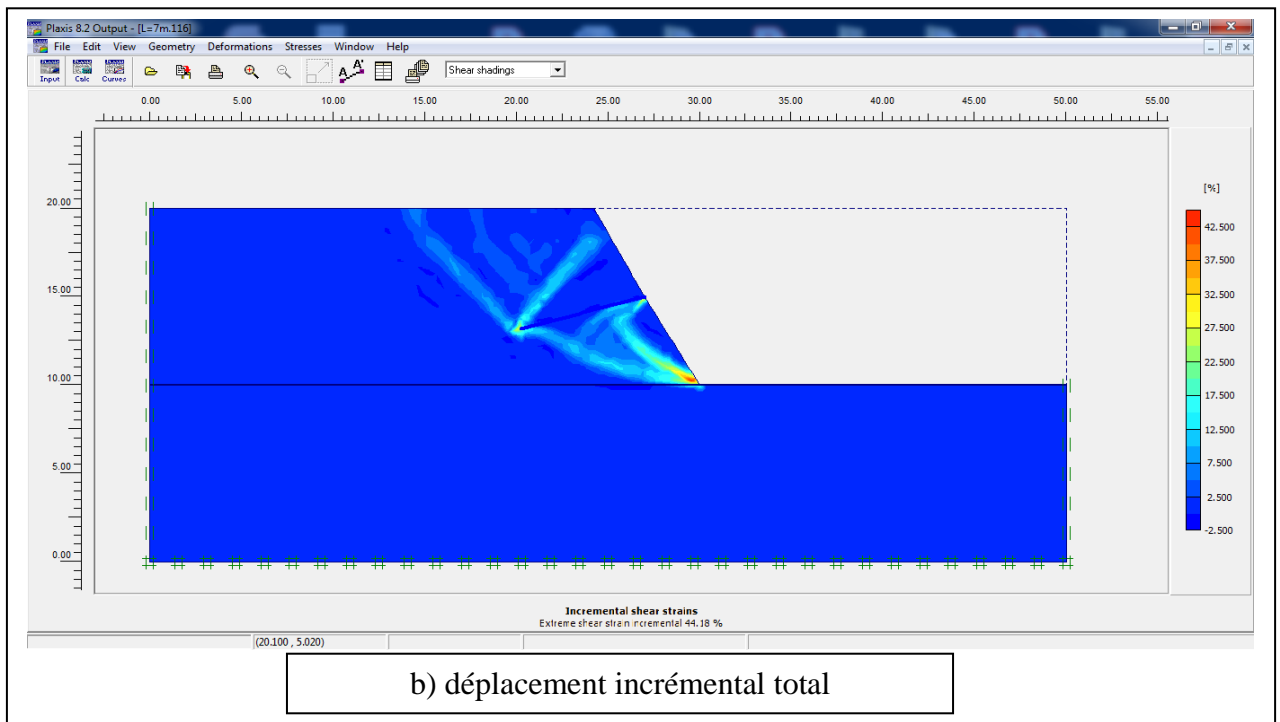
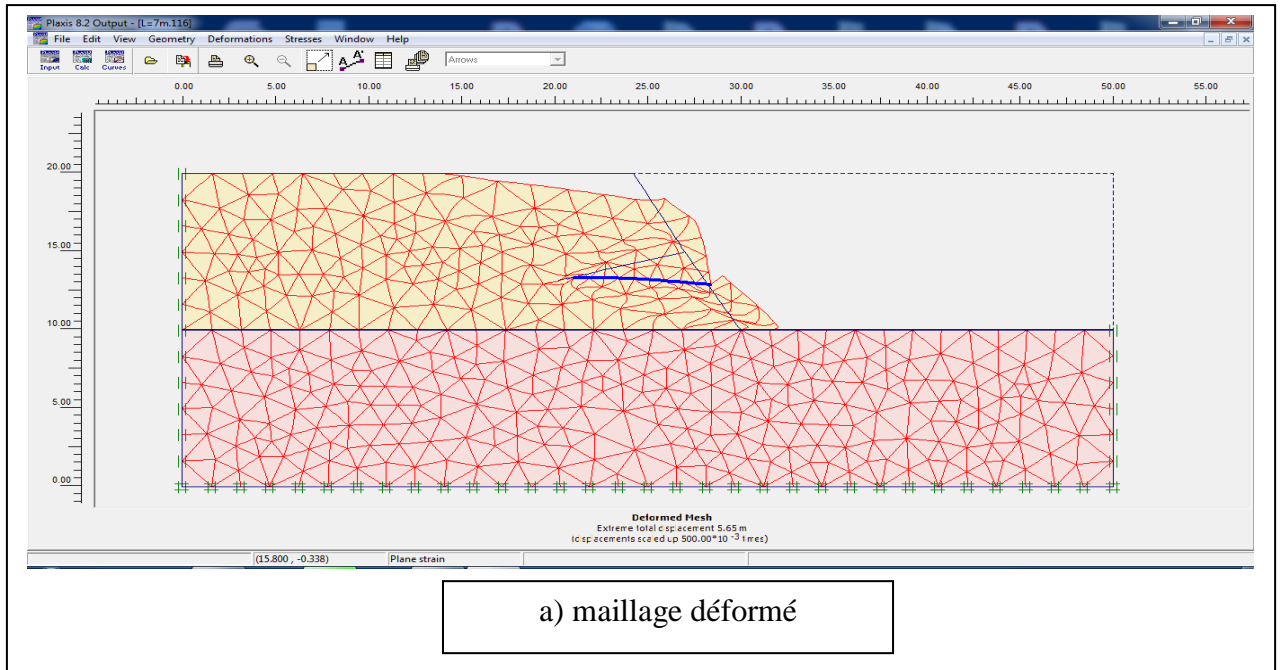


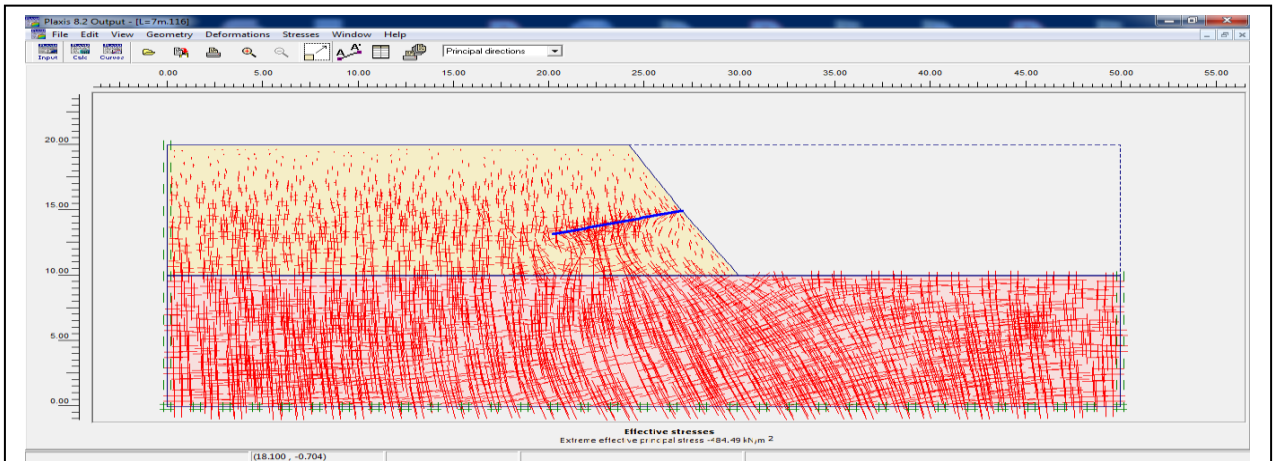
e) courbe FOS=f(IuI)

Figure 4.49 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 7m incliné 0°)

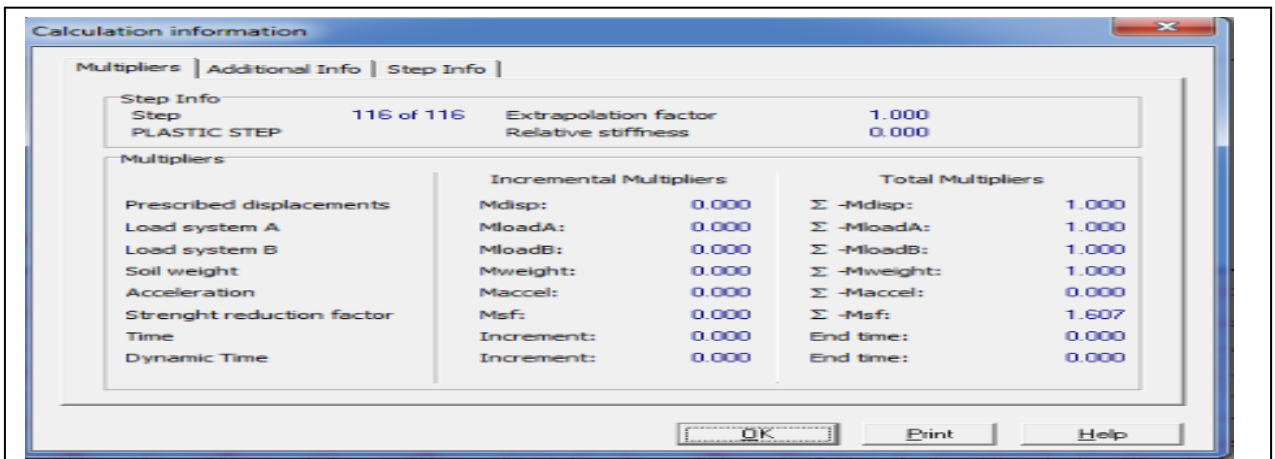
-pour $L=7$ m incliné 15° :

(FIG 4.49) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;

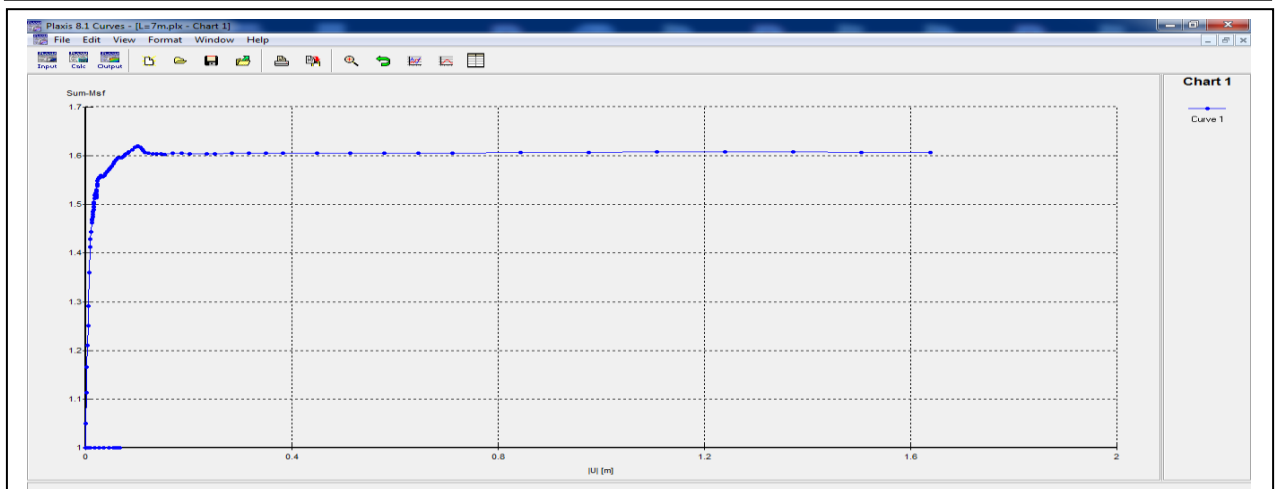




c) contraintes effectives



d) coefficient de sécurité

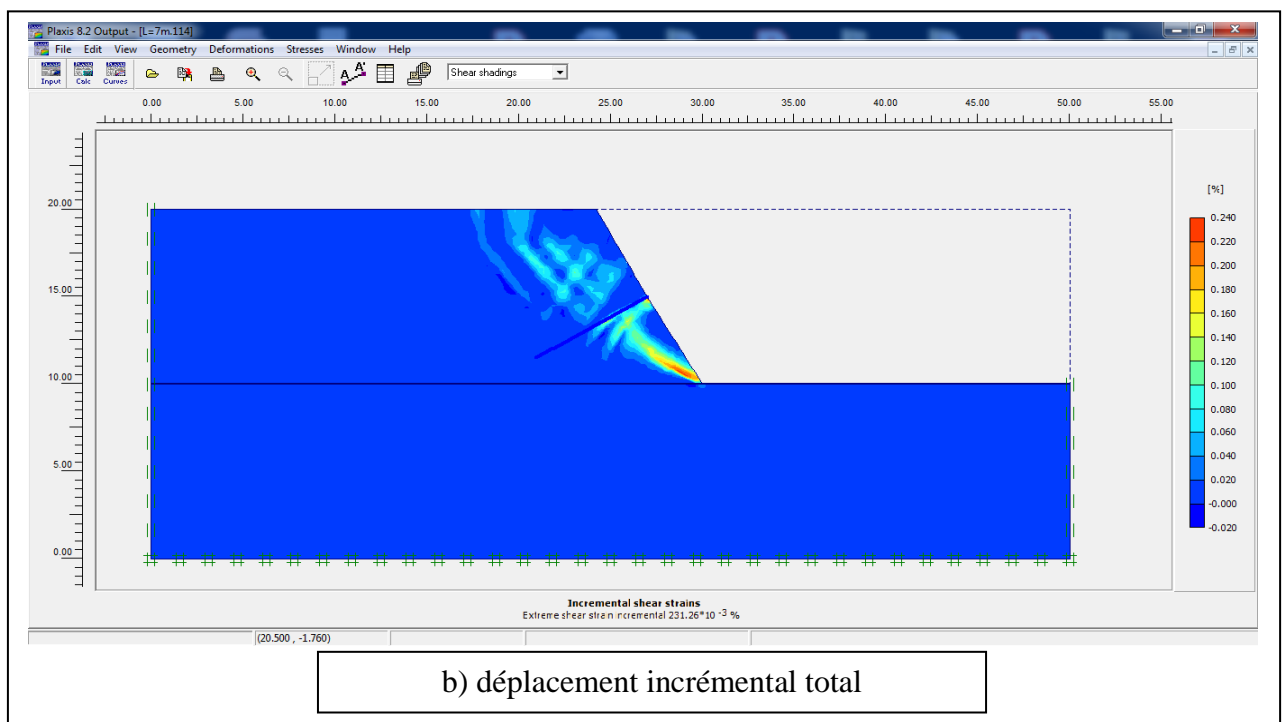
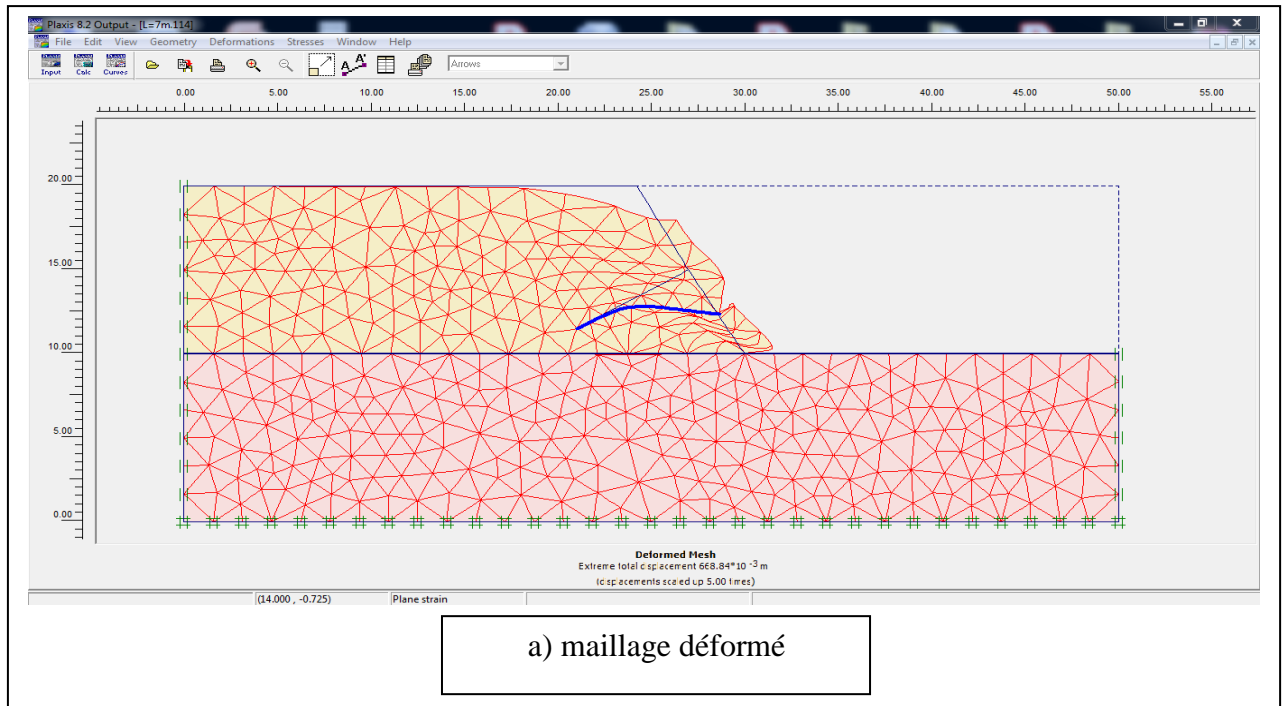


e) courbe FOS=f(|u|)

Figure 4.49 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 7m incliné 15°)

-pour $L=7\text{m}$ incliné 30° :

(FIG 4.50) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;



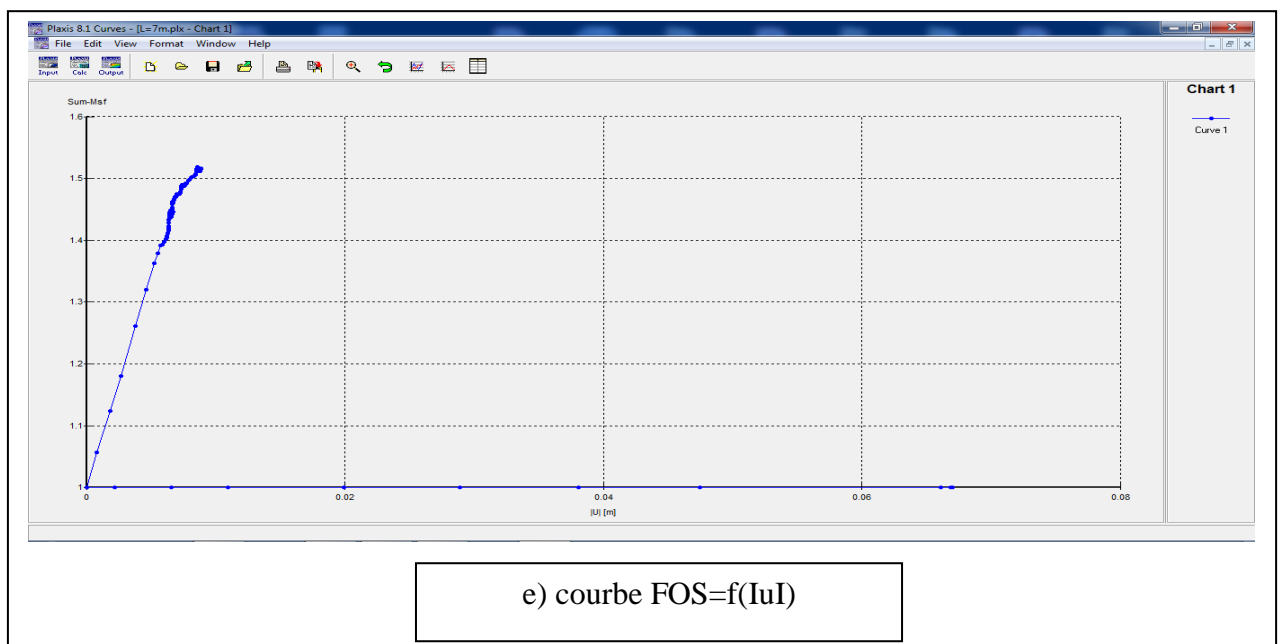
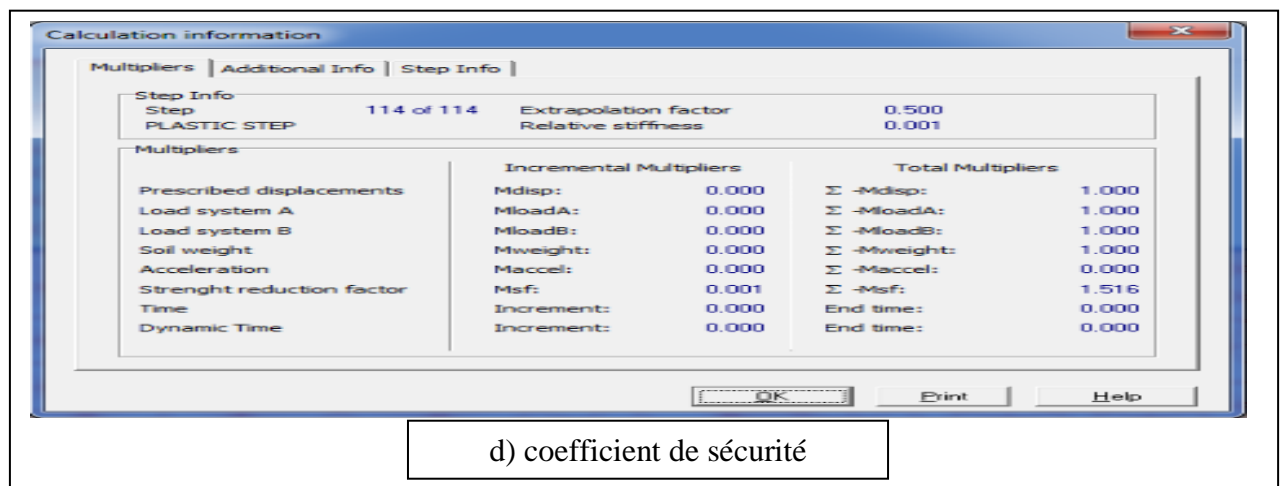
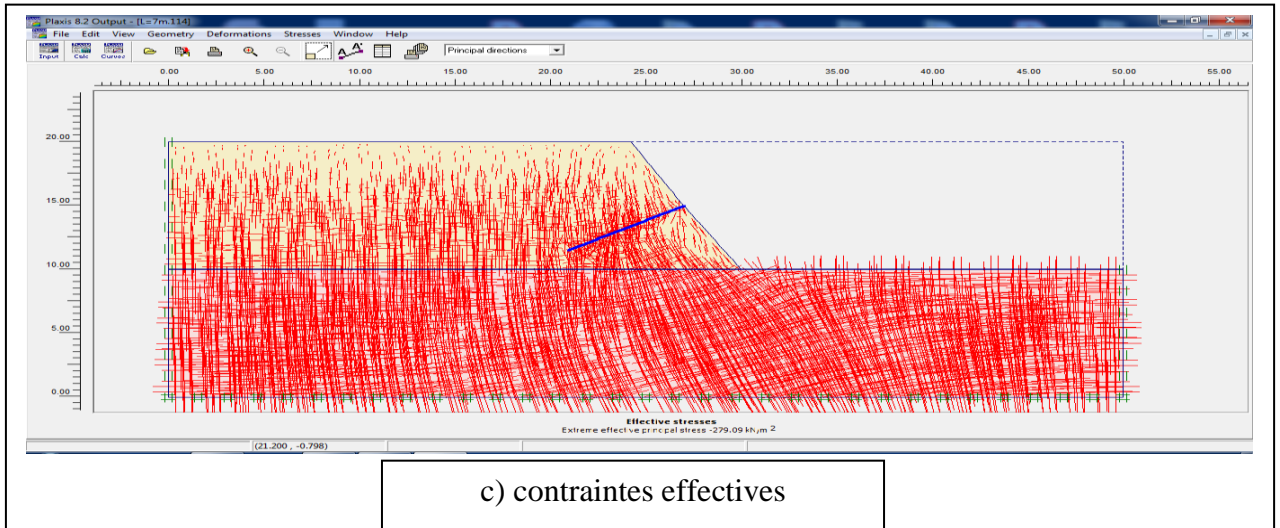


Figure 4.50 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 7m incliné 30°)

-Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **2 ; 3 ; 5 m** pour les mêmes inclinaisons **0° ; 15° ; 30°**.

-Pour la pente de 60° sans amélioration (sans clouage) le coefficient de sécurité globale est de :

FOS = 1.214

Les résultats résumés dans le tableau suivant :

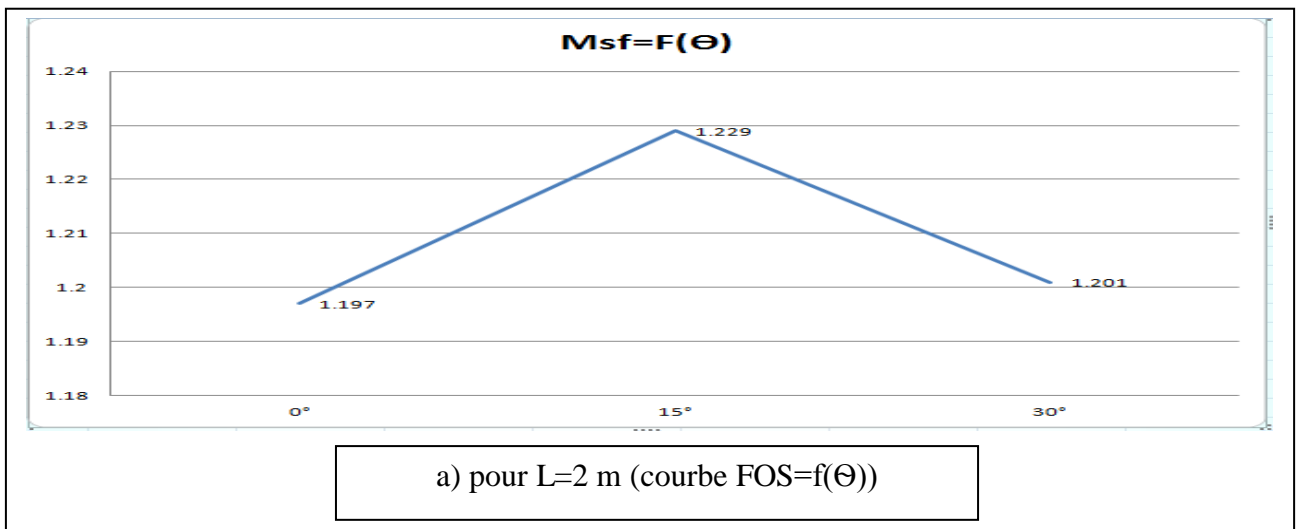
Pente de 60°												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	1.19 7	1.189	1.438	1.502	1.229	1.352	1.41 3	1.607	1.201	1.235	1.454	1.516

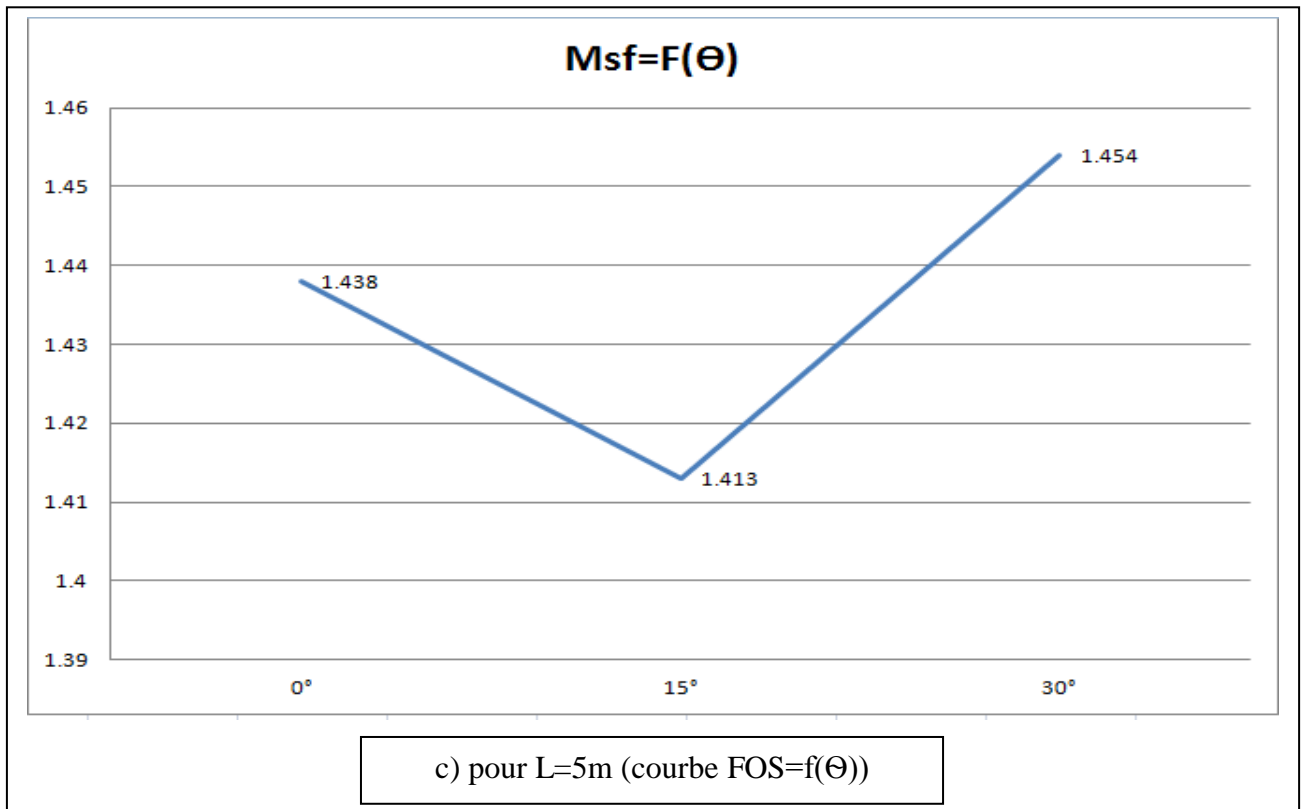
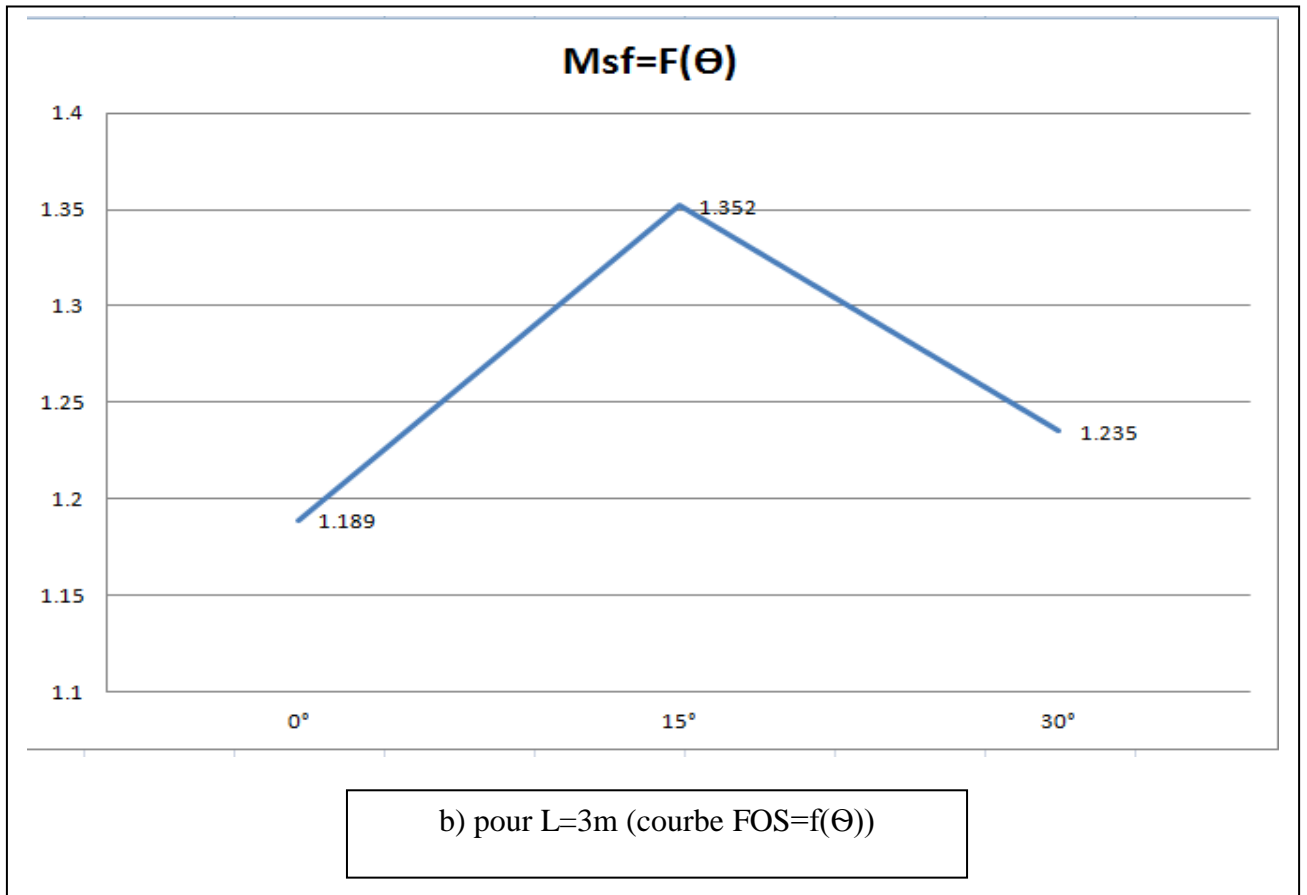
Tableau. 4.9 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

b) discussions de résultats :

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.51) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;





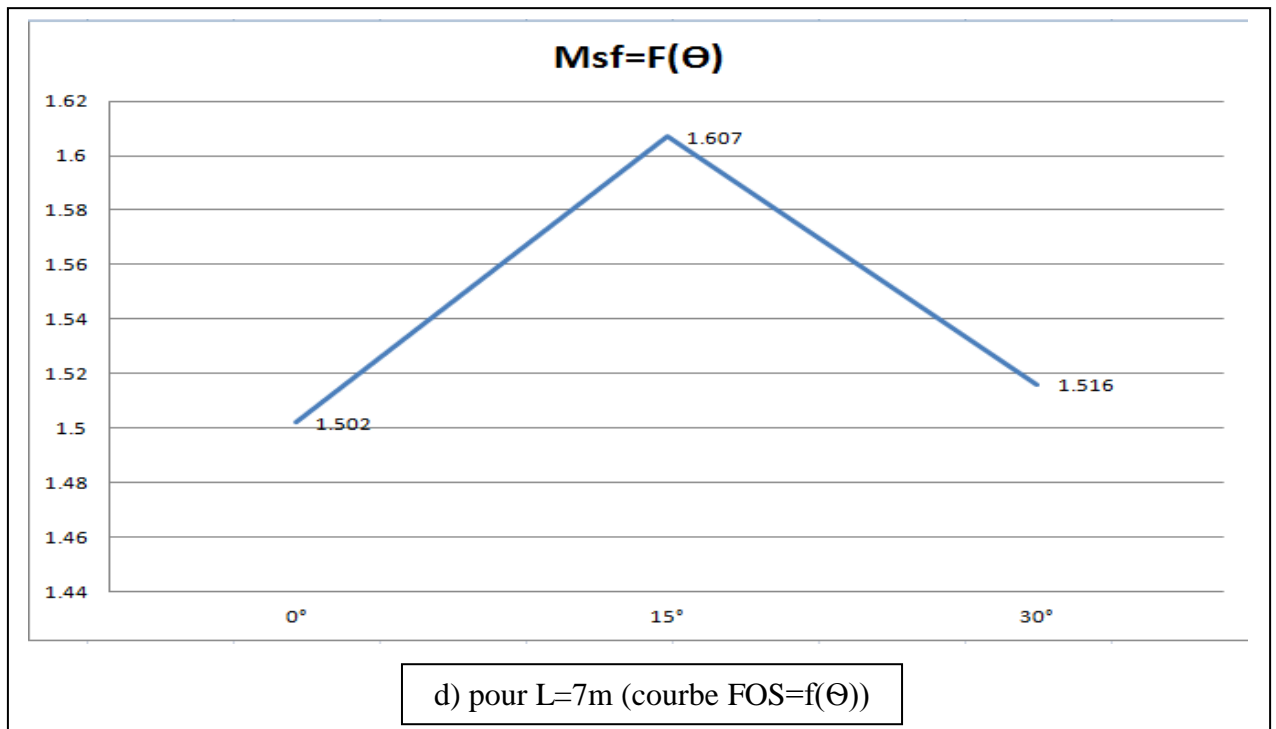


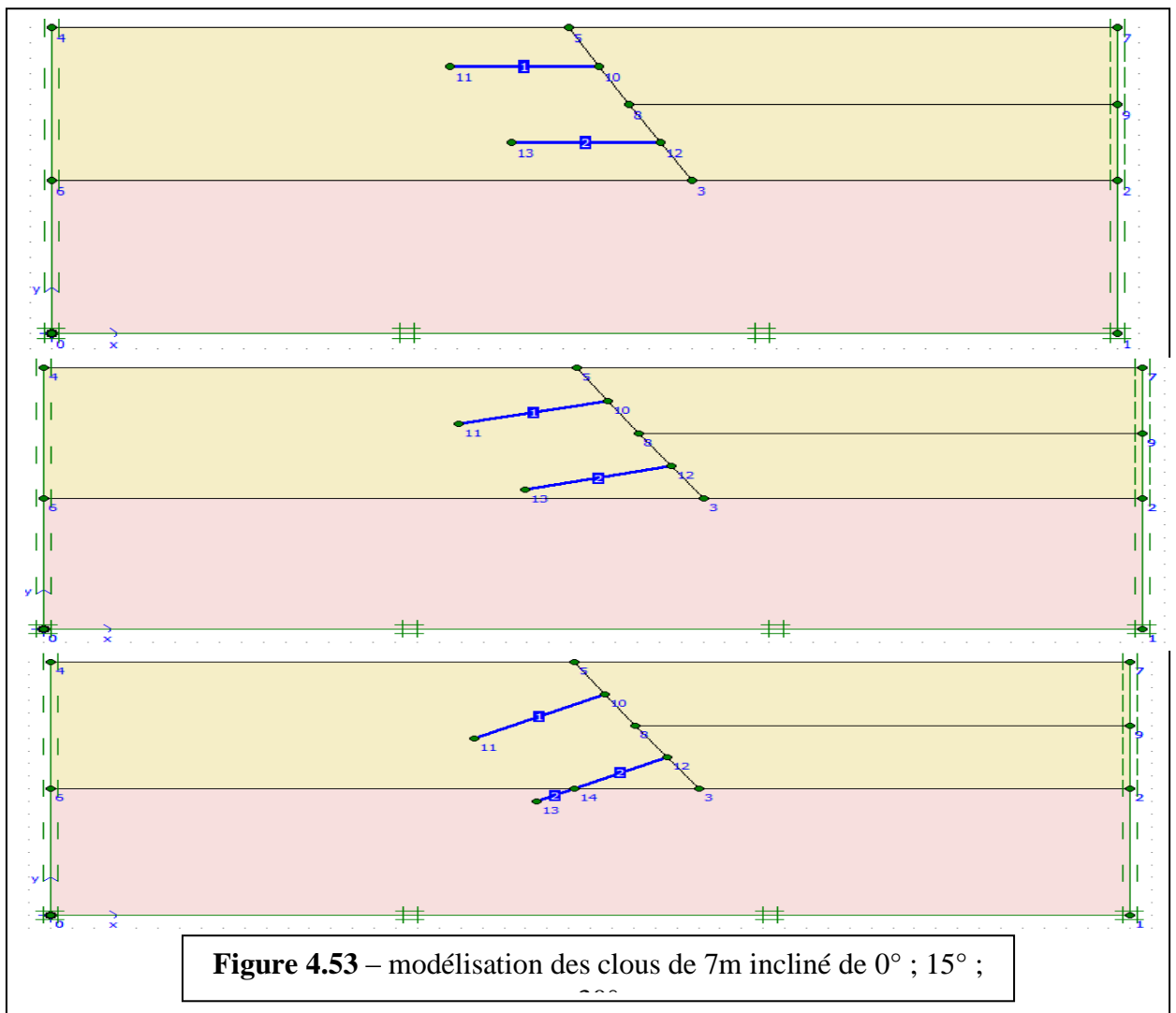
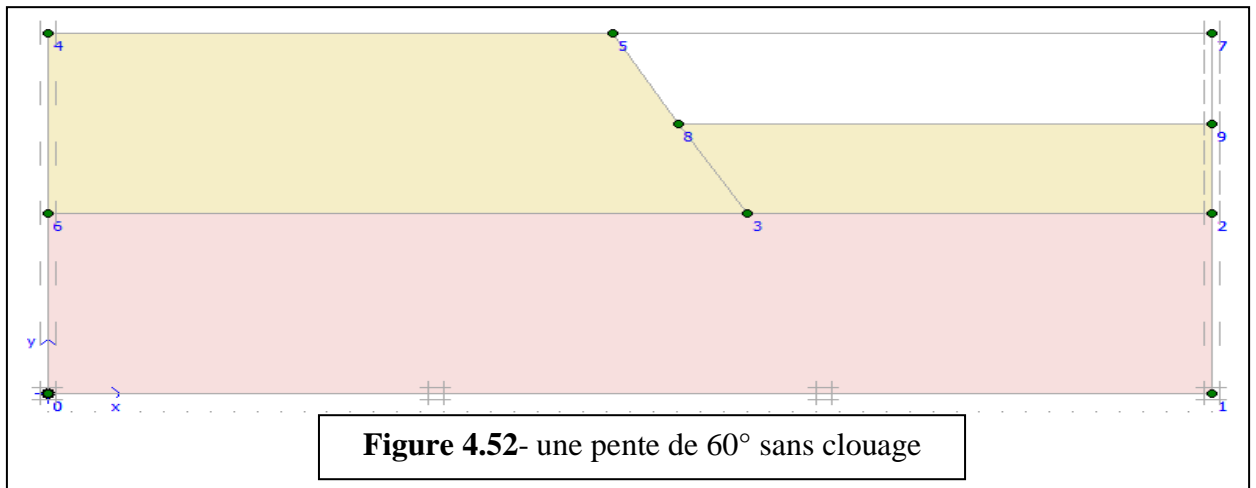
Figure 4.51 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d’inclinaison des clous.

-les résultats obtenus ont montré que :

- avec un clou de 2m et 3m on remarque que l’inclinaison de 15° seule qui donne une valeur optimale de coefficient de sécurité FOS=1.229 et FOS=1.352, ces valeurs dépasse le coefficient de sécurité de sol sans clouage, mais elle reste insuffisante pour assuré la stabilité.
- avec des clous de 5m l’inclinaison 30° a donné une valeur optimal FOS=1.454 mai presque comme celle de 15° FOS=1.413.
- avec des clous de 7m l’inclinaison 15° a donné une valeur optimale avec un coefficient de sécurité FOS=1.607.qui assure bien sur la stabilité du remblai.
- avec des clous de 7m l’inclinaison 30° a donné un coefficient de sécurité FOS=1.516. qui assure bien sur la stabilité du remblai
- avec des clous de 7m l’inclinaison 0° a donné un coefficient de sécurité FOS=1.502 .qui assure bien sur la stabilité du remblai
- tout les résultats de coefficient de sécurité donné avec des clous de 7 m assurent la stabilité du remblai $F_s > 1.5$.

4.4.3.2) Excavation par partie :

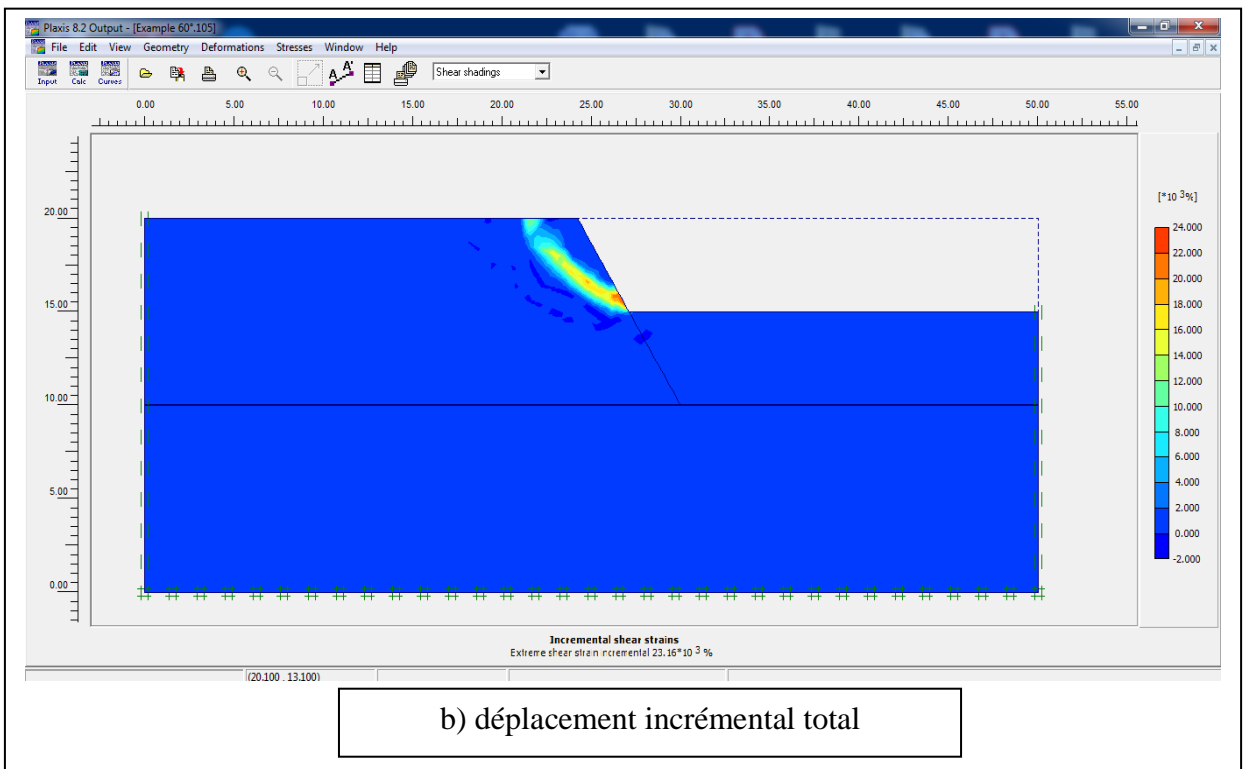
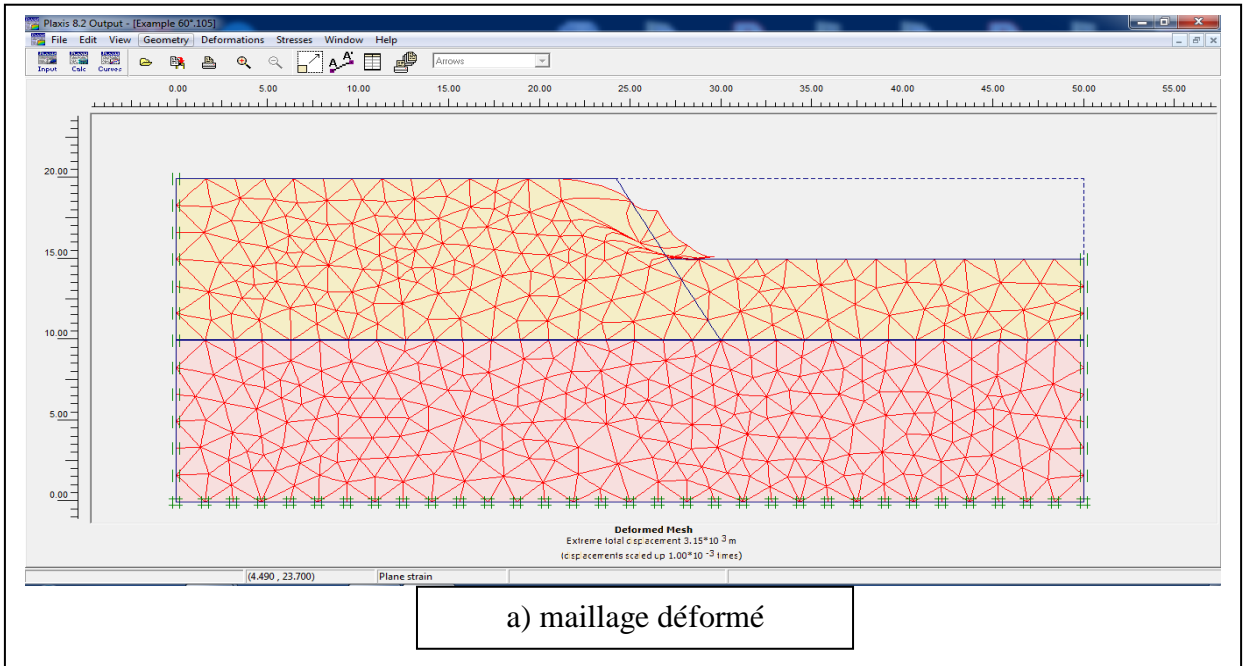
-excavation 1 :



-les résultats de calcul :

-pour une pente de 60° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4.54) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;



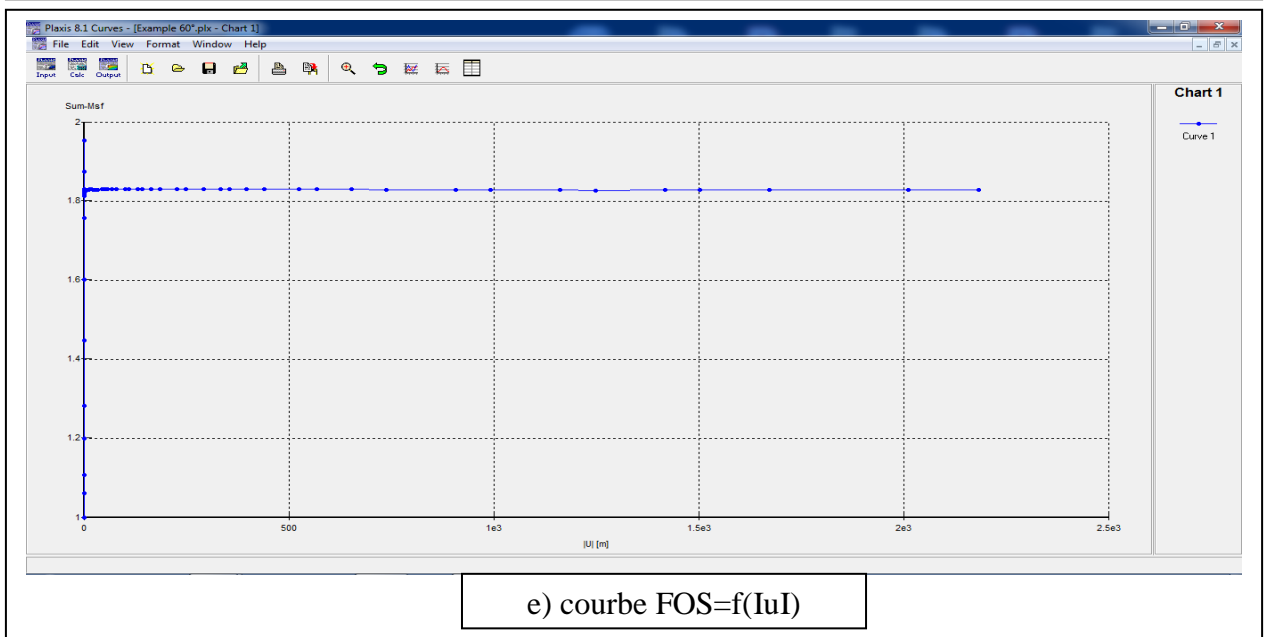
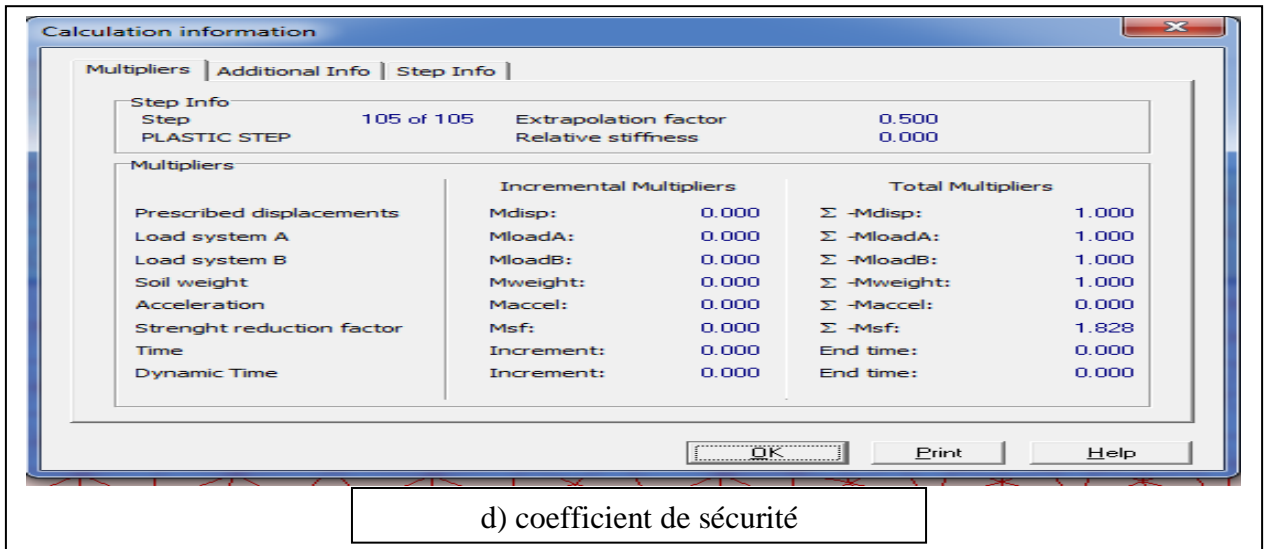
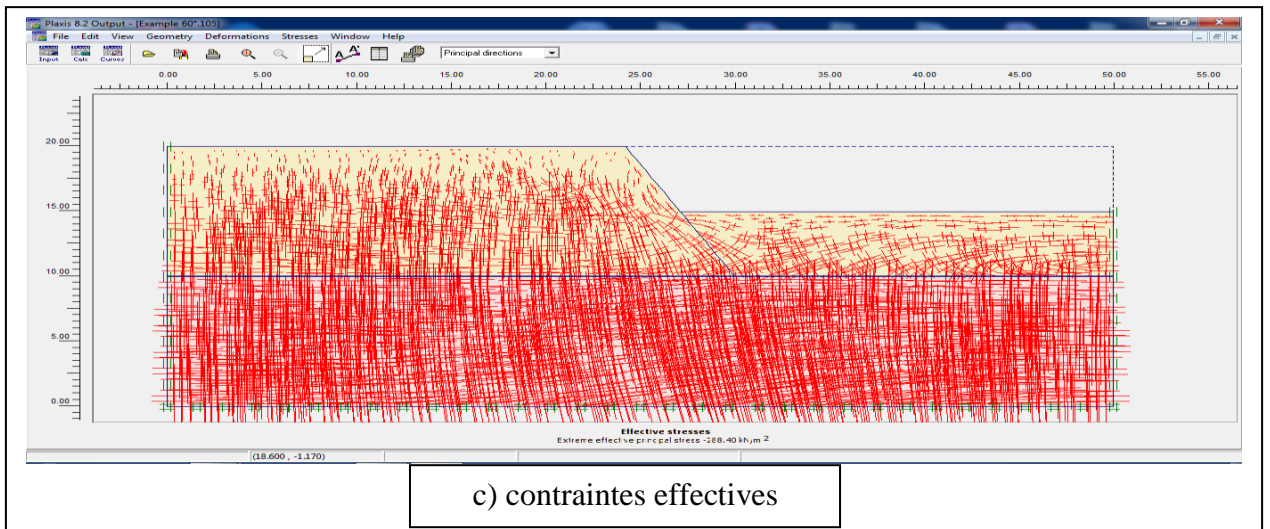
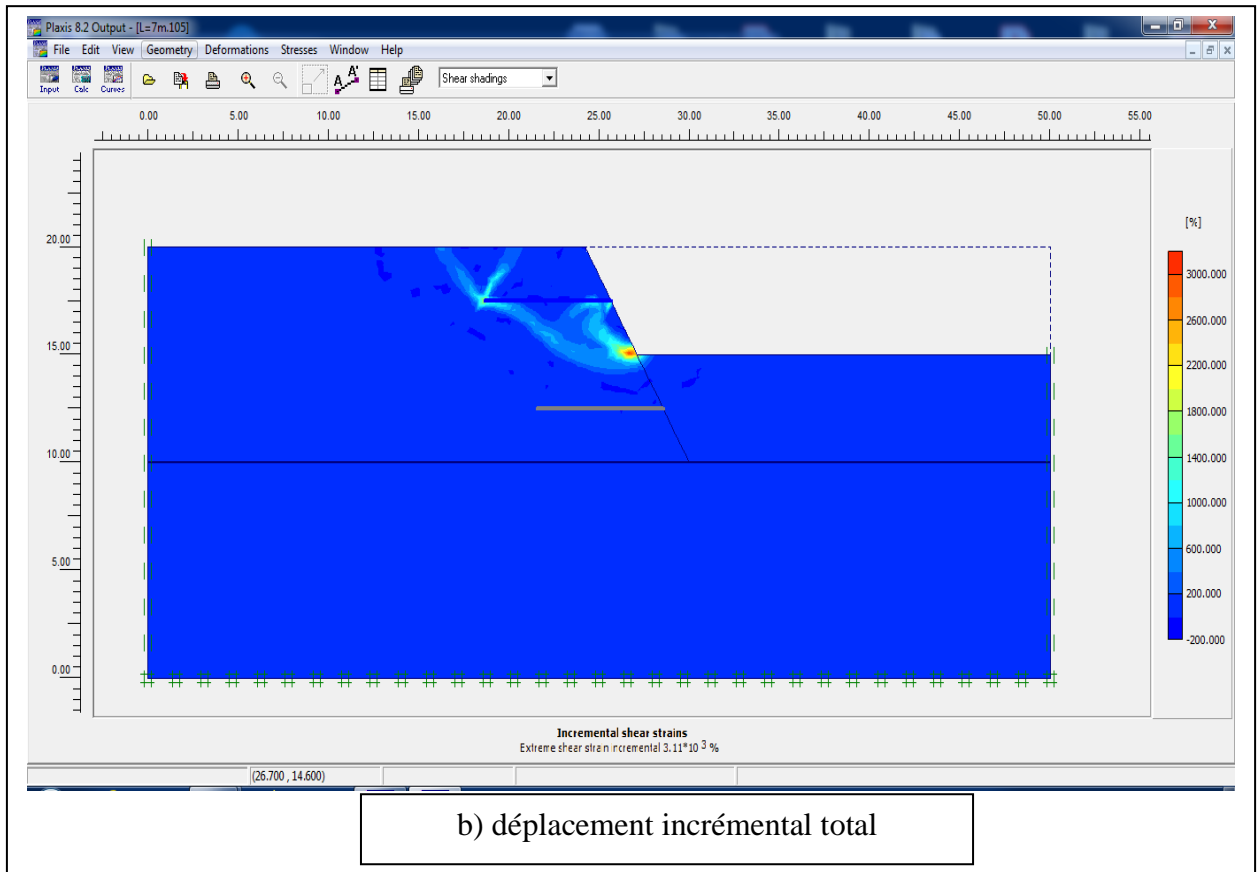
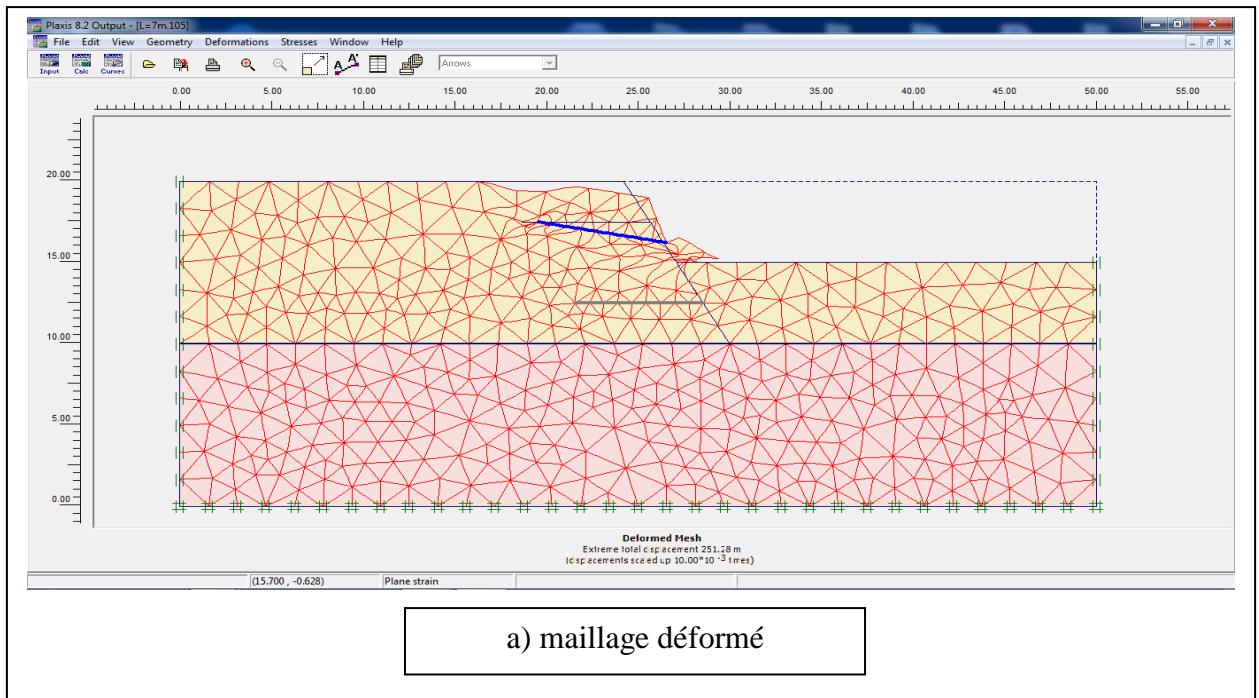
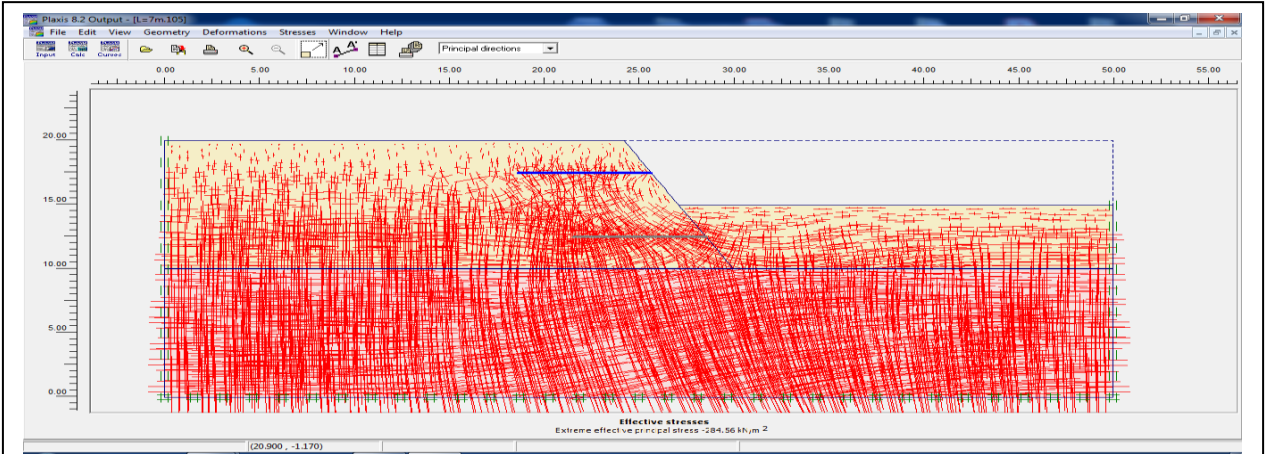


Figure 4.54 – les résultats de calcul (pente de 60° sans clouage)

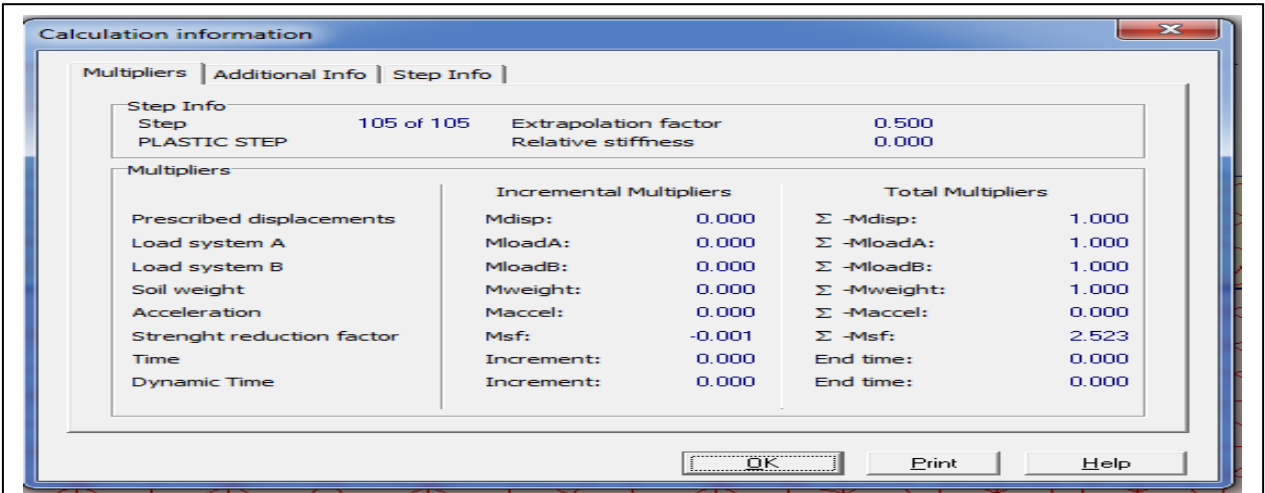
-pour $L=7\text{m}$ incliné 0° :

(FIG 4.55) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;

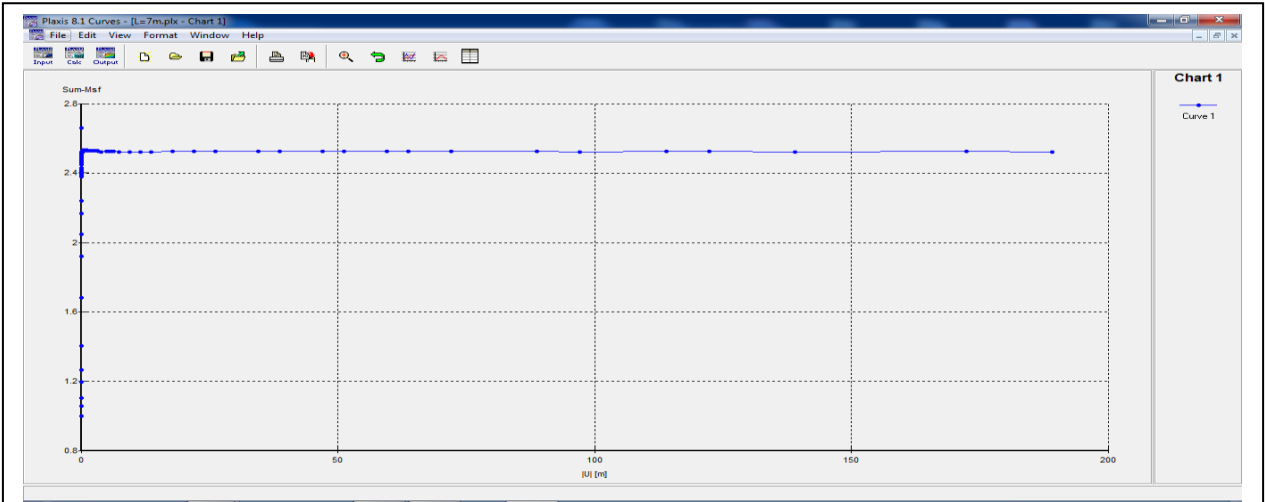




c) contraintes effectives



d) coefficient de sécurité



e) courbe FOS=f(|u|)

Figure 4.55 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 7m incliné 0°)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **2 ; 3 ; 5 ; 7m** pour les mêmes inclinaisons **0° ; 15° ; 30°**.

-Pour la pente de 60° (excavation 1) sans amélioration (**sans clouage**) le coefficient de sécurité globale est de :

FOS = 1.828

Les résultats résumés dans le tableau suivant :

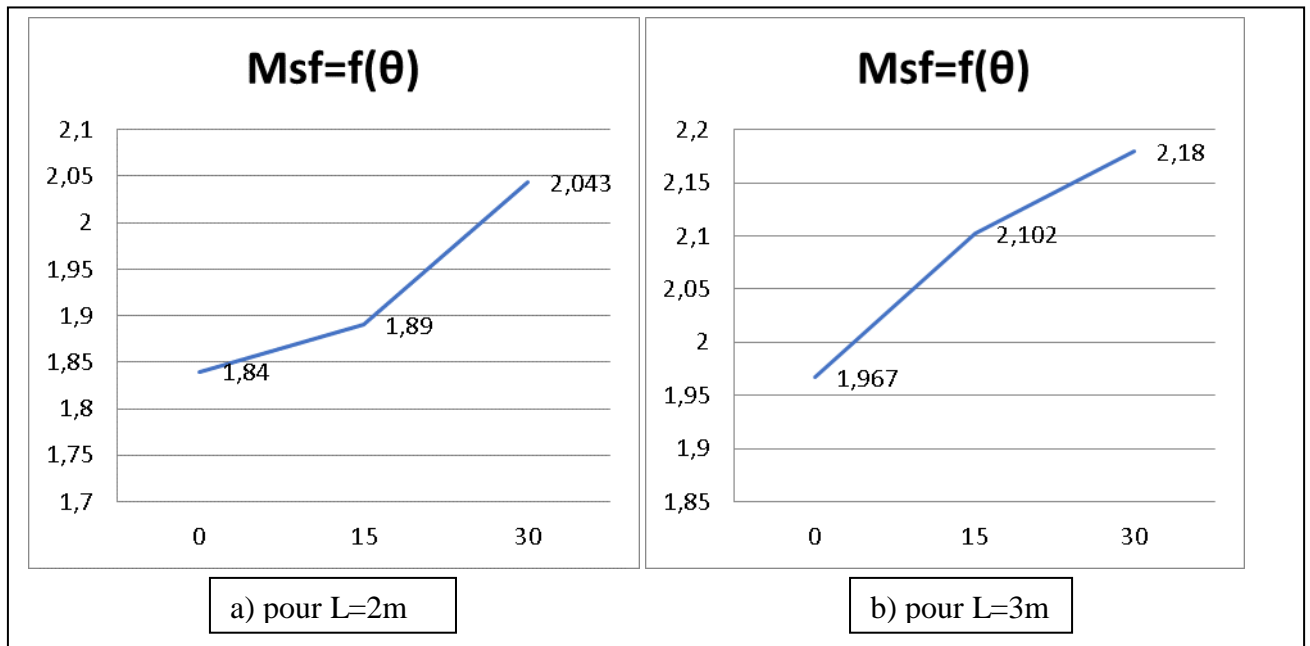
Pente de 60° (excavation 1)												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
FOS	1.84	1.967	2.288	2.523	1.89	2.102	2.419	2.7	2.043	2.18	2.433	2.806

Tableau. 4.10 - Résumé des résultats de FOS pour tous les longueurs

- discussions de résultats :

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.56) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;



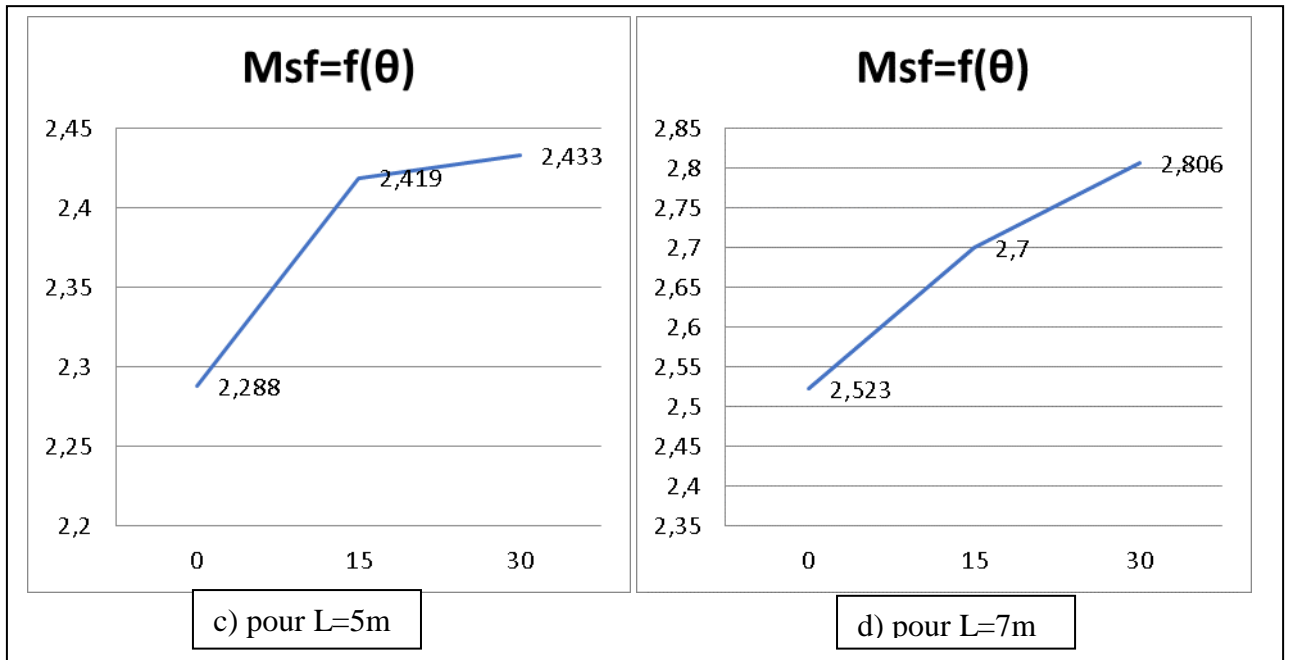


Figure 4.56 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

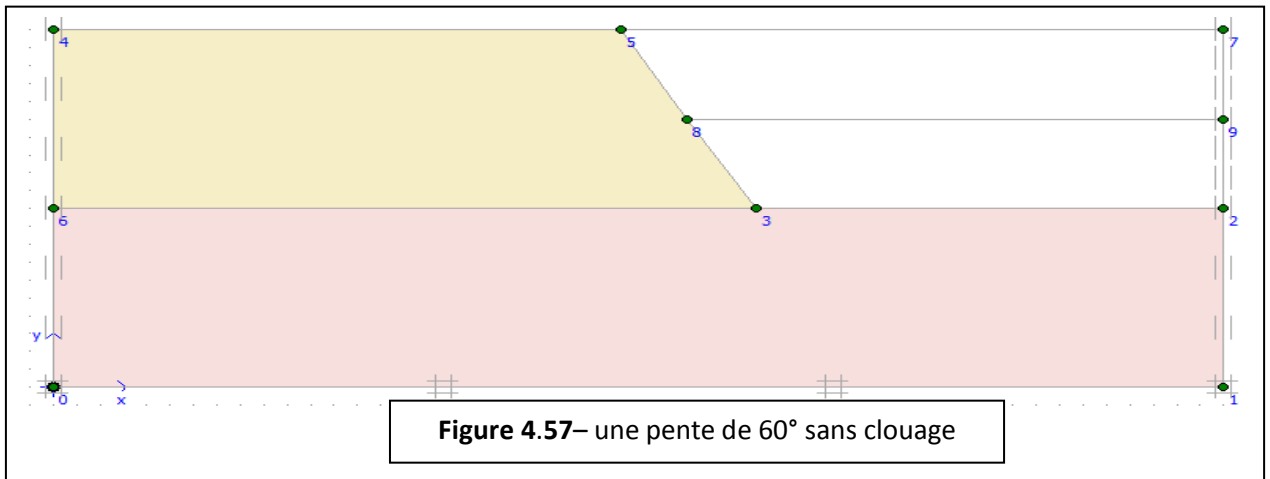
-Les résultats obtenus ont montré que :

-avec des clous de **2 3 5 7 m** incliné de 0° 15° 30° , le coefficient de sécurité est supérieur à FOS (sans clouage).

- les 3 inclinaisons donnent des bons résultats

-le coefficient de sécurité augment avec la longueur des clous et l'augmentation d'inclinaison.

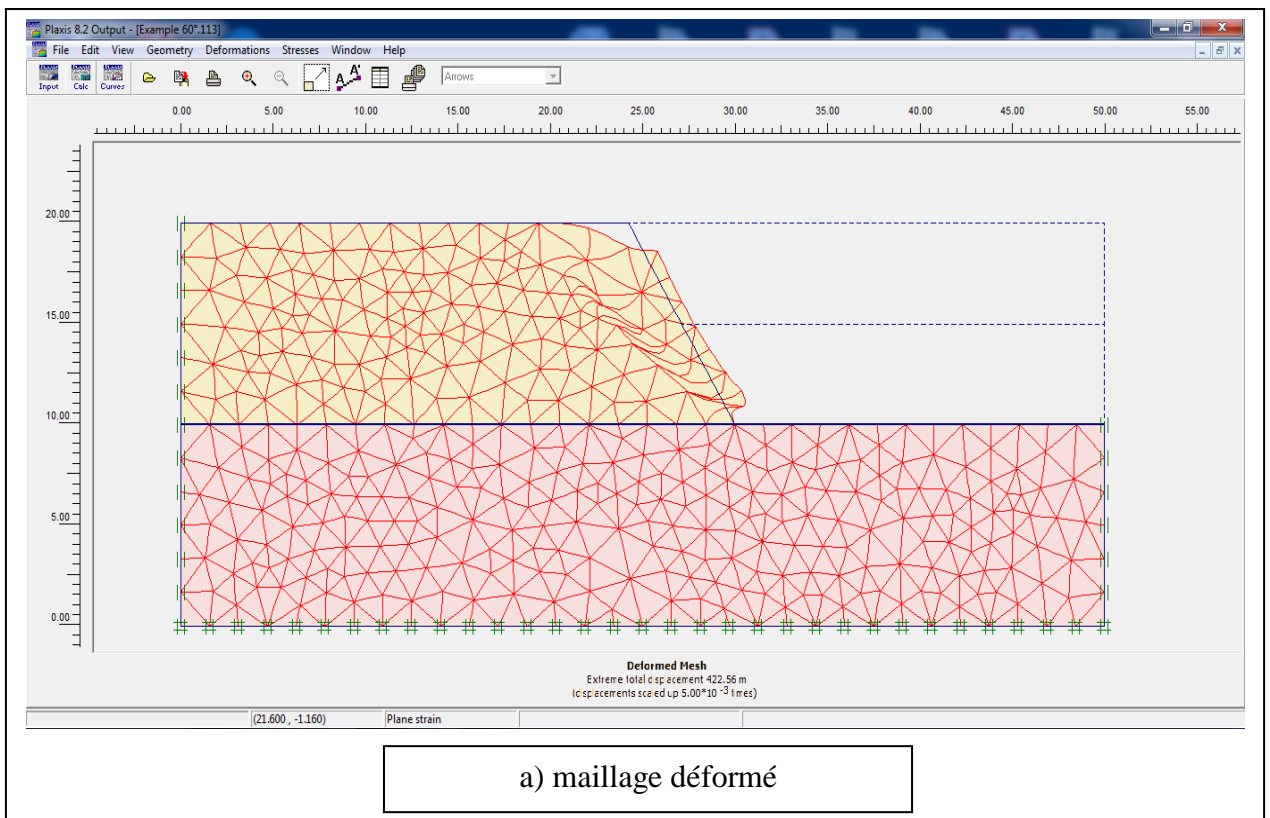
2) excavation 2

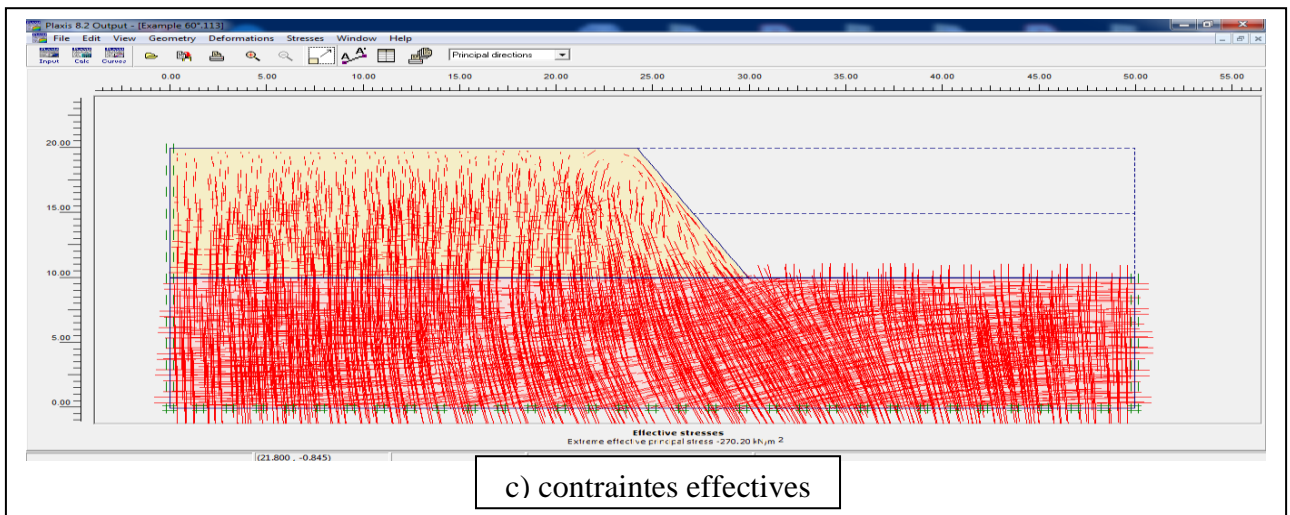
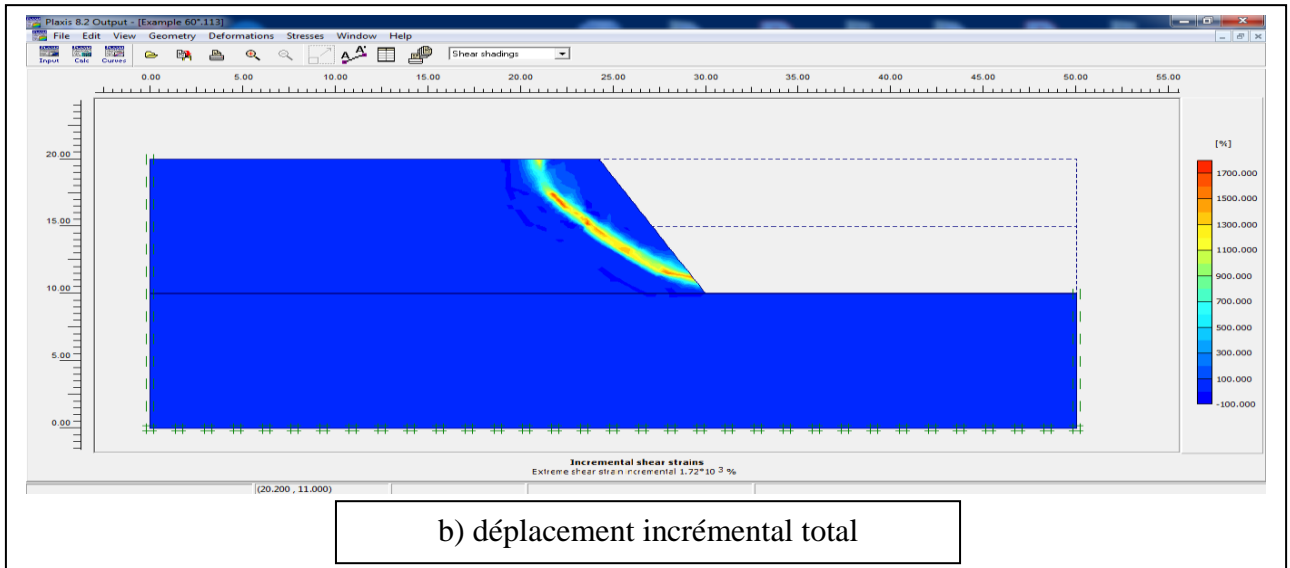


-les résultats de calcul

-pour une pente de 60° sans amélioration (sans clouage)

(FIG 4.58) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	113 of 113	Extrapolation factor	0.500
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:	1.198
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000

OK Print Help

d) coefficient de sécurité

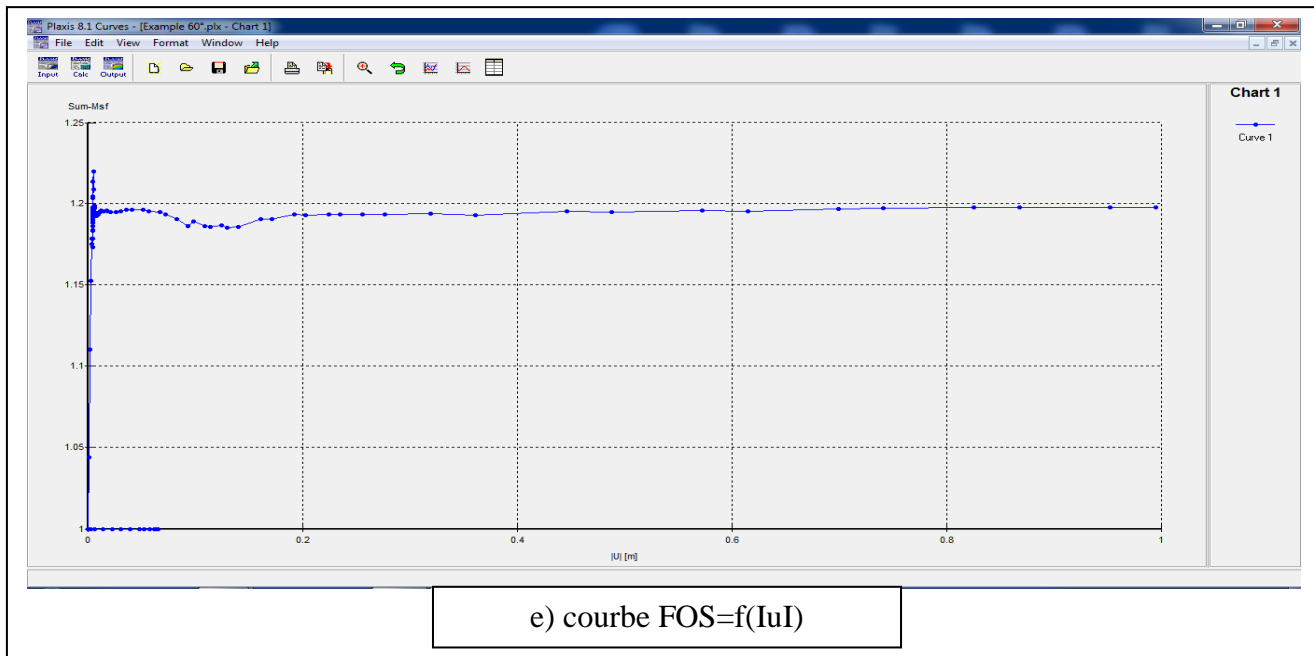
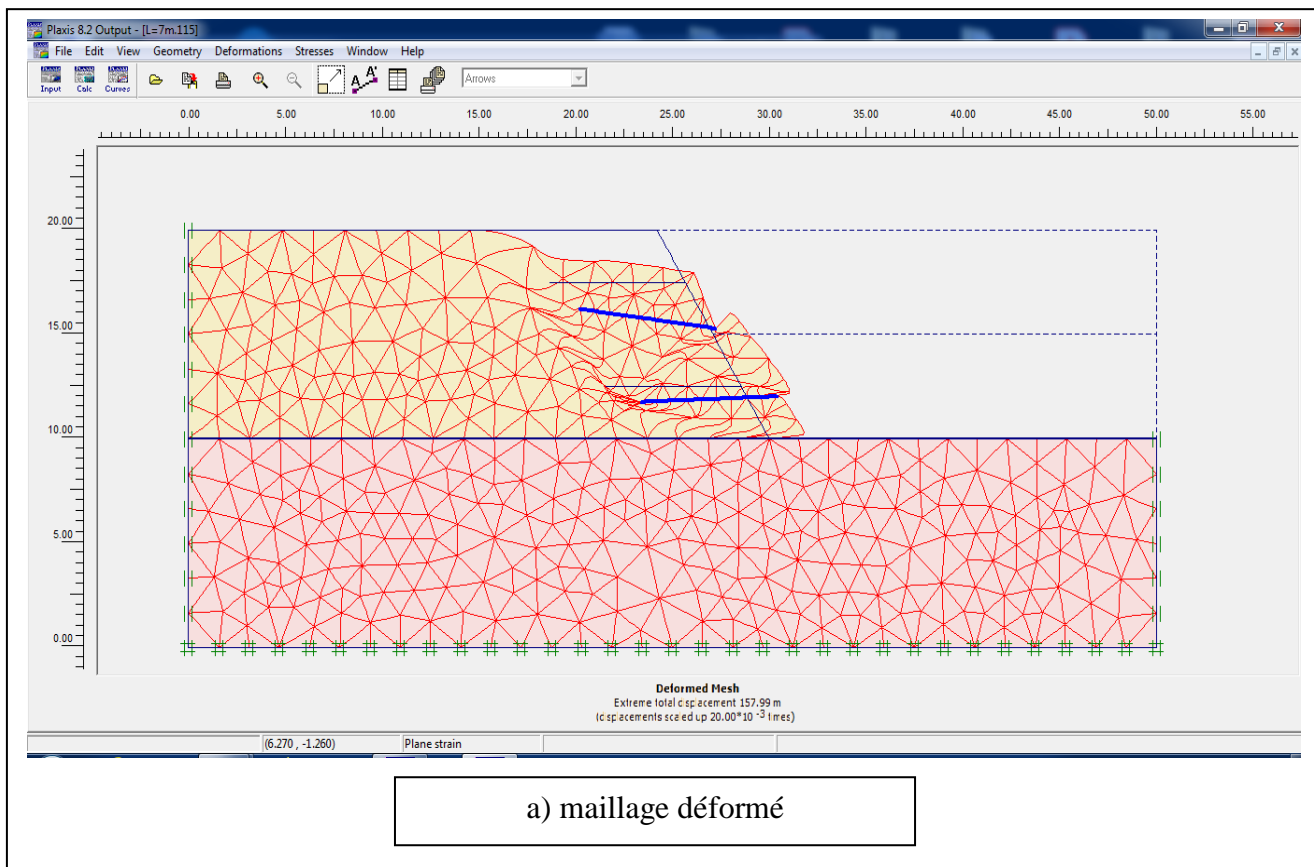
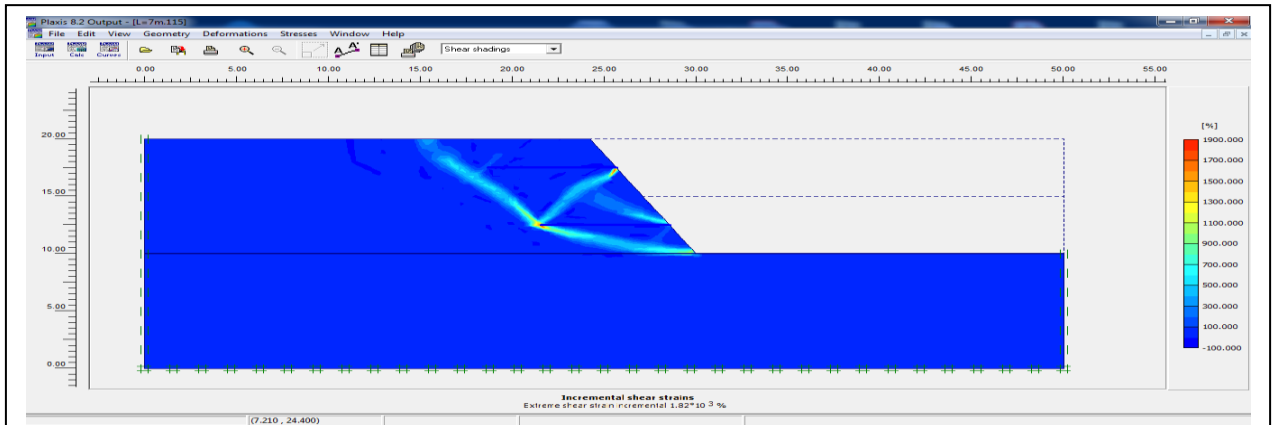


Figure 4.58 – les résultats de calcul (pente de 60° sans clouage)

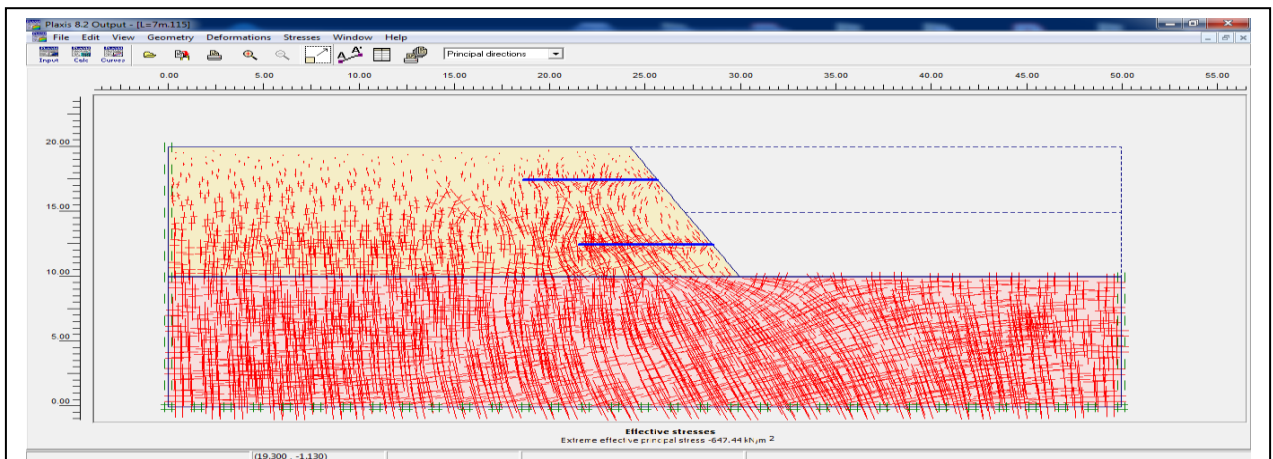
-pour **L=7m** incliné 0° :

(FIG 4.59) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (e) ;





b) déplacement incrémental total



c) contraintes effectives

Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info		Step		115 of 115	
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	
Strength reduction factor	Msf:	0.000	Σ -Msf:	1.676	
Time	Increment:	0.000	End time:	0.000	
Dynamic Time	Increment:	0.000	End time:	0.000	

d) coefficient de sécurité

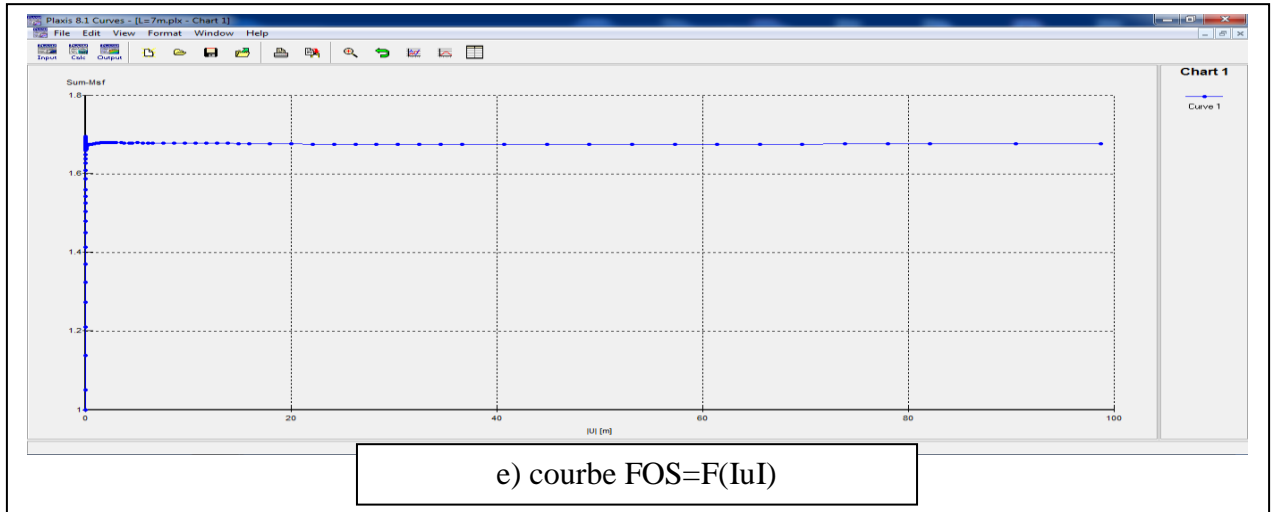


Figure 4.59 – les résultats de calcul (sol cloué par des clous de 7m incliné 0°)

Remarque : le même travail est calculé pour les clous de **2 ; 3 ; 5 ; 7m** pour les mêmes inclinaisons **0° ; 15° ; 30°**.

-Pour la pente de 60° (excavation 2) sans amélioration (**sans clouage**) le coefficient de sécurité globale est de :

$$\mathbf{FOS = 1.198}$$

Les résultats résumés dans le tableau suivant :

Pente de 60° (excavation 2)												
Inclinaison	0°				15°				30°			
L(m)	2	3	5	7	2	3	5	7	2	3	5	7
M _{sf}	1.195	1.249	1.429	1.676	1.202	1.322	1.658	1.857	1.328	1.461	1.689	1.908

Tableau. 4.11 - Résumé des résultats les de FOS pour tous longueurs

- discussions de résultats

-Les graphes suivant représentent le développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

(FIG 4.60) montre tout les résultats de (a) jusqu'a (d) ;

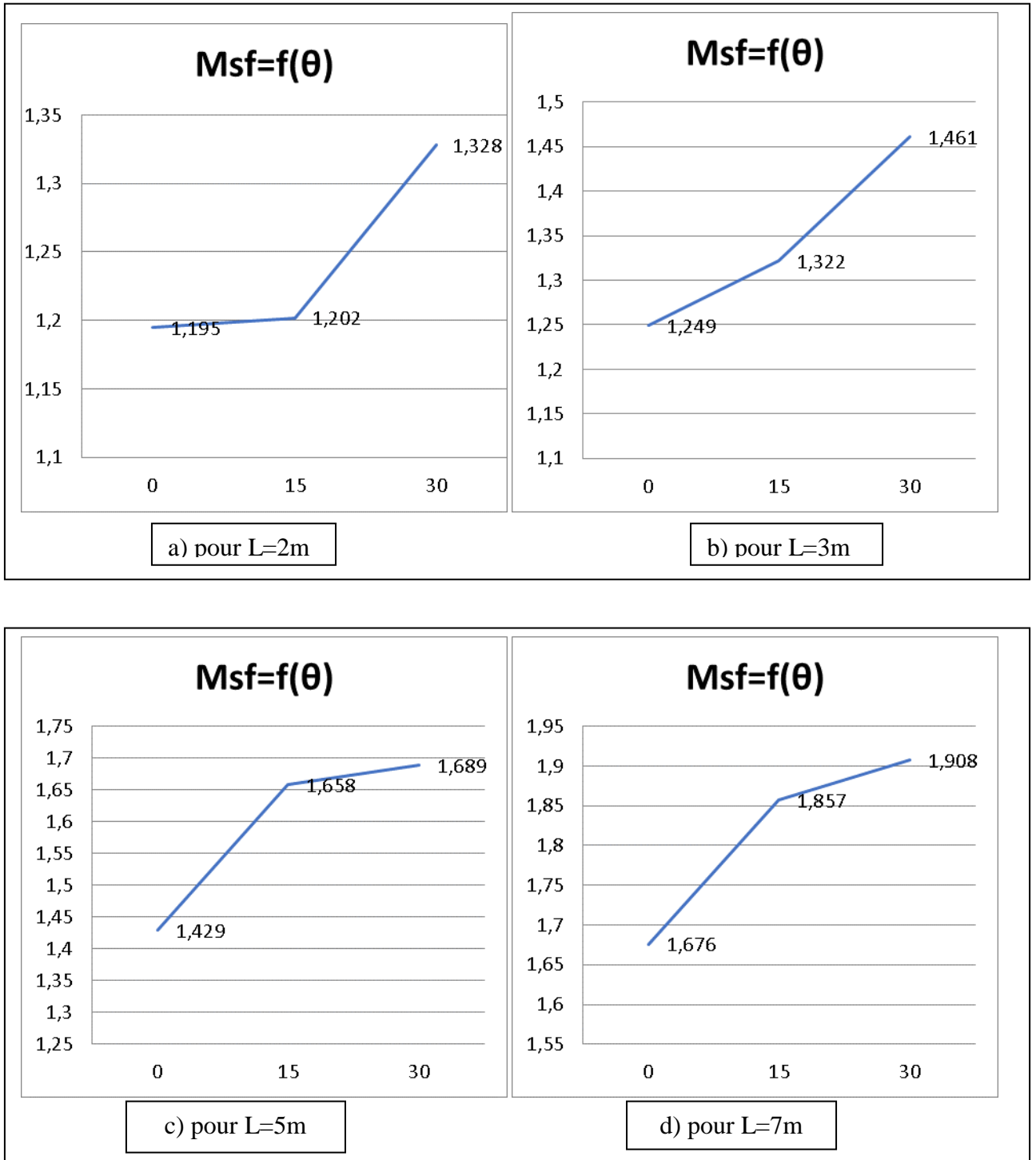


Figure 4.60 – les courbes de développement de coefficient de sécurité en fonction d'inclinaison des clous.

-Les résultats obtenus ont montré que :

-pour le graphe (a), l'inclinaison 0° est défavorable, les clous de 2m sont considérés comme une surcharge parce que le F_s obtenu est inférieure a FOS (sans clouage), et pour l'inclinaison 15° ; 30° les clous commence a travaillé est dépassé le FOS (sans clouage).

-pour le graphe (b) le coefficient de sécurité augment avec des clous de 3m et l'inclinaison aussi

- pour le graphe (c), les clous de 5m donne des bons résultats avec $FOS=1.658$ a partir de l'inclinaison 15°

-Pour le graphe (d) les clous de 7m donne un résultat élevé de FOS avec un rythme croissant avec l'inclinaison 0° 15° 30° .

4.5) conclusion

- On peut remarquer que le clouage à 15° , est le plus favorable, aussi bien, à la stabilité.
- La déformation dans les clous augmente avec l'augmentation de la longueur des clous.
- La déformation dans les clous augmente avec la profondeur d'excavation.
- Les clous doivent traverser la surface de glissement et posséder un ancrage suffisant.
- l'excavation par partie a donné des bons résultats que l'excavation de 10 m directement.
- l'inclinaison des clous de sol et la longueur ont un effet significatif sur la stabilité du sol pente.
- L'effet de l'inclinaison des clous de sol sur la stabilité du sol cloué sont légers lorsque le degré d'inclinaison des clous de sol varie entre 0° et 15° par rapport à l'horizontale.
- pour les inclinaisons les facteurs de sécurité augmentent lorsque la pente diminue, la pente 60° a donné des faibles résultats de facteur de sécurité.

Conclusions générale

Conclusions générale

L'étude présentée dans ce mémoire nous a permis d'apprendre les différentes étapes d'une étude et calcul de stabilité, la technique de confortement, ainsi que la maîtrise de logiciel pour étudier l'étude d'un ouvrage de soutènement par le clouage et le comportement des murs en sol clouée à l'aide des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, éléments linéaires travaillant à la traction et au cisaillement, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol.

Chaque composant ou paramètre d'un ouvrage en sol renforcé a une influence sur son comportement, l'efficacité du renforcement des murs en sols dépend de plusieurs facteurs, on a fait varier individuellement plusieurs paramètres de calcul et plusieurs paramètres géotechniques (l'espacement et longueurs des clous et leurs inclinaisons), et étudié leur influence, comme on vient de le voir précédemment, Les calculs effectués montrent que :

-La profondeur à laquelle le déplacement latéral maximum se produit augmente avec la profondeur de l'excavation et La déformation dans les clous augmente avec la profondeur d'excavation.

-Les performances et les résultats obtenues par des simulations numériques montrent que les déplacements plus importants sont observés lorsque les clous sont trop courts, en peut réduits les déformations lorsque les clous sont plus longue.

-Le clouage doit être exécuté immédiatement après l'excavation avant que le sol ne se décomprime, Plus la déformation est importante, plus les clous sont sollicités.

L'étude paramétrique a mis en évidence l'influence importante des paramètres géotechniques, Cette étude est une approximation raisonnable de la réalité est n'ont pas une solution réelle du problème, l'étude paramétrique où on a fait varier individuellement plusieurs paramètres de calcul et étudié leur influence sur les résultats obtenus a mis en évidence l'influence importante non seulement des paramètres géotechniques, mais également des paramètres de modélisation.

Quelques remarques :

-Les clous doivent traverser la surface de glissement et posséder un ancrage suffisant.

- On a remarqué que le clouage à 15° , est le plus favorable, aussi bien, à la stabilité.

- La déformation dans les clous augmente avec l'augmentation de la longueur des clous.

- l'excavation par partie a donné des bons résultats que l'excavation de 10 m directement.

-pour les inclinaisons les facteurs de sécurité augment lorsque la pente diminue, la pente 60° a donné des faibles résultats de facteur de sécurité.

Références bibliographiques

REFERENCE BEBLIOGRAPHIQUES

- [1] **LEVASSEUR, S** (2007) Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble
- [2] **Brinkgreve, R., & et al.** (2015). PLAXIS 2D 2015 - User Manual. Delft, the Netherlands: Plaxis bv.
- [3] **Cheng, Y., Lansivaara, T., & Wei, W.** (2006). Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. Hong Kong: Computers and Geotechnics 34 (2007) 137–150.
- [4] **Schweiger, H. F.** (2014). Steifigkeit von Böden. Graz University of Technology: Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- [5] **Ortigão & Sayão** (2004). Handbook of Slope Stabilisation, Springer, New York, 478 p.
- [6] **Frey F. et Jaroslav Jirousek : (2001)** Analyse des structures et milieux continus, volume 6 : Méthode des éléments finis, Presses Polytechniques et Univ Romandes.
- [7] **Didier Fau. (1987)** Le clouage des sols. Application au soutènement de fouille. Étude expérimentale et dimensionnement. Mécanique [physics.med-ph]. Thèse de Doctorat , Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Français.
- [8] **Lazarte, C. A., Elias, V., Espinoza, D. and Sabatini, P. J., (2003)**, Soil Nail Walls, Office of Technology Application Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Geotechnical Engineering, Circular NO. 7, Report No. FHWA0-IF-03-017, Washington D.C.
- [9] **PLAXIS Ver.8, (2006)**, “Plaxis Reference manual”, Delft University of Technology & Plaxis by The Netherlands.
- [10] **Prashant Amit, Mukherjee Mousumi (august, 2010)** " SOIL NAILING FOR STABILIZATION OF STEEP SLOPES NEAR RAILWAY TRACKS", Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, Research Designs and Standards Organization (RDSO), Lucknow p 3-10
- [11] **Recommandations CLOUTERRE, (1991)** pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 272 pages.

[12] **Cartier G, GIGAN J-P, (1983)** expérimentas and observation on soli nailing structures. C.R.8 congre Europe, MEC. Sols trav. FOND, Helsinki,2, p ,473-476

[13] **Rawat et Gupta, (2016)**, Analysis of a Nailed Soil Slope Using Limit Equilibrium and Finite Element Methods. *Int. J. de Geosynth. et Ing.*