

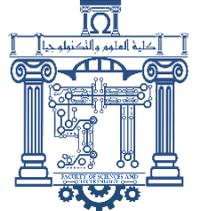


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie civil

Spécialité : Géotechnique

Par : GHENAIET Mohamed Anouar et BASSET Hadjer

Sujet

**Analyse numérique de la stabilité des talus sous
l'action des pluies en conditions saturées (S) et non
saturées (U)**

Présenté et soutenu, le 13 / 06 / 2021 , devant le jury composé de :

Mr. BOUFARH Rafik

Mr. ROULI Ahmed

Mr. FERNANE Ali

Maitre de Conférences A

Professeur

Maitre Assistant A

Président

Rapporteur

Examineur

Promotion : 2020/2021

Remerciements

En présentant ce travail, il m'est agréablement d'exprimer, en premier lieu, ALLAH de nous avoir donné toute chose ; le courage et la force pour faire ce travail et nous le prions toujours qu'il soit à nos côtés.

Nous adressons tous nos sincères et respectueux remerciements à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce Projet de Fin d'Etudes, particulièrement au :

***Professeur. ROUILI Ahmed** ; Nous vous présentons de tout cœur, nos remerciements les plus distingués pour votre gentillesse, pour votre aide durant notre travail et d'avoir mis à notre disposition tous les directives nécessaires à la réalisation de ce projet.*

Tous les enseignants qui ont assuré notre formation durant tout notre cursus universitaire, en particulier les enseignants de la spécialité GEOTECHNIQUE (Génie Civil) par les conseils et orientations qu'ils n'ont cessés de nous prodiguer dans le cadre de nos recherches.

Notre respect aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'apprécier et d'accepter de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette étude, qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Anouar et Hadjer

Je dédie ce précieux travail en signe de respect et de reconnaissance à

Mes très chers parents qui m'ont donné le courage, et m'ont guidé durant toute ma vie pour que je réussisse, je prie Dieu de les honorer et les rendre fiers de moi et de mon travail.

Que Dieu les protège.

À mes chères sœurs

À tous les membres de ma famille

À tous ceux qui me sont chers

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Anouar

En guise de reconnaissance, je dédie ce travail :

- *A ma chère Maman pour son soutien sans faille tout au long de ma vie,
L'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager
et de prier pour moi.*
- *A mon cher Père aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour,
pour toi*
- *A mes Sœurs et mes Frères.*
- *A toute ma Famille.*
- *A tous mes Amis d'études surtout ceux de
Génie Civil promotion*

Hadjer

Résumé

Les glissements de terrain se produisent généralement en situation de forte saturation des sols en eau. Ils peuvent mobiliser des volumes considérables de terrain, qui se déplacent le long d'une surface de rupture. Si ces mouvements restent ponctuels, ils constituent un risque majeur en raison des conséquences lourdes, matérielles et humaines, qu'ils peuvent entraîner. Au plan mondial, les mouvements de terrain causent chaque année la mort de 800 à 1 000 personnes.

La variation des conditions hydrauliques liées à la saturation des sols reste la cause majeure de l'instabilité des talus. Dans le cas des bassins versants de moyenne à forte pente et en conditions météorologiques défavorables (forte pluviométrie et averses), le déplacement des eaux en surface mélangée au débris naturels et matériaux de surface des talus, constitue une surcharge supplémentaire accélérant le processus de glissement.

Dans ce mémoire, une approche par modélisation numérique est proposée pour la simulation du phénomène d'instabilité d'un talus en conditions de saturation variables. Le modèle numérique proposé est développé en tenant compte de la géométrie, des matériaux, des conditions de chargement, des conditions aux limites et des conditions hydrauliques d'un modèle de référence.

Après validation du modèle numérique proposé, et confrontation des résultats, une étude paramétrique est réalisée où plusieurs paramètres hydrauliques sont étudiés afin d'évaluer leurs impacts sur la stabilité du talus. Les résultats montrent de manière évidente l'influence prépondérante de la variation du niveau de saturation sur la stabilité globale des talus, et exige des concepteurs à prévoir des moyens de contrôle permanents des niveaux de saturation des sols constituant les talus importants pour éviter les catastrophes liées aux glissements de terrains.

Mots clés : Glissement de terrain, Stabilité, Niveau de saturation, Logiciel Plaxis, Coefficient de sécurité.

Abstract

Landslides generally occur when the soil is highly saturated with water. They can mobilize considerable volumes of land, which move along a fracture surface. While these movements remain punctual, they constitute a major risk because of the serious consequences, material and human, that they can entail. Globally, land movements cause the deaths of 800 to 1,000 people every year.

The variation in hydraulic conditions linked to soil saturation remains the major cause of slope instability. In the case of medium to steeply sloping watersheds and in unfavorable meteorological conditions (heavy rainfall and downpour), the displacement of surface water mixed with natural debris and surface materials of the slopes constitutes an additional overload accelerating the sliding process.

In this thesis, a numerical modeling approach is proposed for the simulation of the phenomenon of instability of a slope under variable saturation conditions. The proposed digital model is developed taking into account the geometry, materials, loading conditions, boundary conditions and hydraulic conditions of a reference model.

After validation of the proposed numerical model, and comparison of the results, a parametric study is realized in which a several hydraulic parameters was studied in order to evaluate their impacts on the stability of the slope. The results clearly show the preponderant influence of the variation in the saturation level on the overall stability of the slopes, and requires designers to provide permanent ways of controlling the saturation levels of the soils constituting the major slopes to avoid disasters linked to landslides

Keywords: Landslide, Stability, Saturation Level, Plaxis Software , Safety Factor.

ملخص

تحدث الانزلاقات الأرضية بشكل عام حينما تكون التربة شديدة الإشباع بالمياه. بإمكان هذه الأخيرة تحريك مساحات كبيرة من الأرض على طول سطح الانكسار. في حالة ما إذا كانت هذه الحركات منتظمة فإنها تشكل خطرًا كبيرًا بسبب العواقب الوخيمة التي يمكن أن تترتب عليها ماديًا وبشريًا على الصعيد العالمي ، تتسبب تحركات الأرض في وفاة 800 إلى 1000 شخص سنويًا.

يظل التباين في الظروف الهيدروليكية المرتبطة بتشبع التربة هو السبب الرئيسي لعدم استقرار المنحدرات. في حالة مستجمعات المياه ذات الانحدار المتوسط إلى الحاد وفي ظروف الأرصاد الجوية غير المواتية (هطول الأمطار الغزير) ، فإن حركة المياه السطحية بالإضافة إلى الحطام الطبيعي والمواد السطحية للمنحدرات تشكل حمولة زائدة إضافية والتي تؤثر بدورها على تسريع عملية الانزلاق.

في هذه الأطروحة ، تم اقتراح نهج النمذجة العددية لمحاكاة ظاهرة عدم استقرار المنحدرات تحت ظروف التشبع المتغيرة. تم تطوير النموذج الرقمي المقترح مع الأخذ في الاعتبار الهندسة والمواد وظروف التحميل وظروف الحدود والظروف الهيدروليكية لنموذج مرجعي.

بعد التحقق من صحة النموذج العددي المقترح ومقارنة النتائج ، يتم إجراء دراسة اختبارية أين تمت دراسة العديد من العوامل الهيدروليكية من أجل تقييم تأثيرها على ثبات المنحدر. تظهر النتائج بوضوح التأثير الغالب للتباين في مستوى التشبع على الاستقرار العام للمنحدرات، وهذا يتطلب من المصممين توفير وسائل دائمة للتحكم في مستويات تشبع تربة المنحدرات لتجنب الكوارث ذات الصلة بانزلاقات التربة.

الكلمات المفتاحية: انزلاق التربة، الاستقرار، مستوى التشبع، برنامج بلاكسيس ، معامل السلامة.

Liste des symboles

F_s	<i>Le coefficient de sécurité</i>
Φ	<i>Angle de frottement interne effectif ($^{\circ}$)</i>
C	Cohésion
Γ	Masse volumique sec
Γ_{sat}	Masse volumique saturé
E	Module d'Young
N	Coefficient de poisson
Ψ	Angle de dilatance
$K (m/s)$	<i>La perméabilité de sol</i>
K_0	<i>coefficient de poussée de terre au repos.</i>
M_{sf}	<i>coefficient total de sécurité</i>
τ_{max}	<i>résistance au cisaillement</i>
σ	<i>contrainte</i>

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Propriétés du sol.....	20
Tableau 3.1: Caractéristiques géotechniques du sol.	25
Tableau 3.2: Valeurs facteur de sécurité par les méthodes MEL, MEF et code plaxis en fonction de variation de niveau de saturation.	53
Tableau 4.1: Valeurs du facteur de sécurité en fonction de niveau de saturation.....	56

Liste des figures

Figure 1.1: Mouvement de terrain à Baños de Agua Santa en Ecuador.	4
Figure 1.2: Un effondrement du toit d'une cavité souterraine.	5
Figure 1.3 : Les chutes de pierres ou de blocs.	6
Figure 1.4 : Un éboulement.	6
Figure 1.5 : Coulées boueuses.	7
Figure 1.6: Les affaissements.	7
Figure 1.7 : Phénomène de retrait gonflement.	8
Figure 1.8 : Les types de glissement de terrain.	9
Figure 1.9 : Glissement rotationnel.	9
Figure 1.10: Glissement plan.	10
Figure 1.11: Inondation de Tébessa 2018.	11
Figure 1.12 : Modèle de Mohr coulomb.	14
Figure 1.13: Organigramme du code plaxis.	10
Figure 2.1 : Modèle de référence.	19
Figure 2.2: Position de la nappe phréatique.	20
Figure 2.3: Géométrie du maillage de la pente sans considération du l'eau.	21
Figure 2.4: Géométrie du maillage de la pente sans considération du l'eau.	21
Figure 2.5: Effet de la variation du niveau d'eau sur le coefficient de sécurité par LEM et FEM.	22
Figure 3.1: Géométrie et propriétés des matériaux.	24
Figure 3.2: Modèle de référence.	24
Figure 3.3: Génération du maillage.	26
Figure 3.4: Modèle en éléments finis.	26
Figure 3.5: Conditions hydrauliques pour des niveaux de saturation (a. 0 m, b. 1 m , c. 0.5 m, d. 1.5 m).	28
Figure 3.6: Conditions hydrauliques pour des niveaux de saturation (a. 2 m, b. 3 m , c. 2.5 m, d. 3.5 m).	29
Figure 3.7: Conditions hydrauliques pour des niveaux de saturation (a. 4 m, b. 4,5 m).	30
Figure 3.8: Définition du multiplicateur pour la procédure K0.	31
Figure 3.9: Champ de contraintes effective.	31
Figure 3.10: Champ des phases de calcul.	32
Figure 3.11: Phase 1 avec le niveau de saturation 0 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	33
Figure 3.12: Phase 2 avec le niveau de saturation 0 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	34
Figure 3.13: Phase 1 avec le niveau de saturation 0,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	35
Figure 3.14: Phase 2 avec le niveau de saturation 0,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	36
Figure 3.15: Phase 1 avec le niveau de saturation 1 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	37
Figure 3.16: Phase 2 avec le niveau de saturation 1 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	38

Figure 3.17: Phase 1 avec le niveau de saturation 1,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	39
Figure 3.18: Phase 2 avec le niveau de saturation 1,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	40
Figure 3.19: Phase 1 avec le niveau de saturation 2 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	41
Figure 3.20: Phase 2 avec le niveau de saturation 2 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	42
Figure 3.21: Phase 1 avec le niveau de saturation 2,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	43
Figure 3.22: Phase 2 avec le niveau de saturation 2,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	44
Figure 3.23: Phase 1 avec le niveau de saturation 3 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	45
Figure 3.24: Phase 2 avec le niveau de saturation 3 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	46
Figure 3.25: Phase 1 avec le niveau de saturation 3,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	47
Figure 3.26: Phase 2 avec le niveau de saturation 3,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	48
Figure 3.27: Phase 1 avec le niveau de saturation 4 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	49
Figure 3.28: Phase 2 avec le niveau de saturation 4 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	50
Figure 3.29: Phase 1 avec le niveau de saturation 4,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	51
Figure 3.30: Phase 2 avec le niveau de saturation 4,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).	52
Figure 3.31: Courbes du facteur de sécurité par les méthodes MEL , MEF et code plaxis en fonction de variation de niveau de saturation.....	53
Figure 4.1: Courbe du facteur de sécurité en fonction de niveau de saturation.....	57
Figure 4.2: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 0 m, b. 1 m , c. 0.5 m, d. 1.5 m). ...	58
Figure 4.3: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 2 m, b. 2,5 m , c. 3 m, d. 3,5 m). ...	59
Figure 4.4: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 0 m, b. 1 m , c. 0.5 m, d. 1.5 m). ...	60
Figure 4.5: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 2 m, b. 2,5 m , c. 3 m, d. 3,5 m). ...	61
Figure 4.6: Courbes de la variation des factures de la sécurité en fonction du niveau de la saturation sans et avec un chargement.....	62
Figure 4.7: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 0 m, b. 0,5 m , c. 1 m, d. 1,5 m). ...	63
Figure 4.8: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 2 m, b. 2,5 m , c. 3 m, d. 3,5 m). ...	64
Figure 4.9: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 4 m, b. 4,5 m).	65
Figure 4.10: Courbes de la variation des facteurs du sécurité en fonction du niveau du saturation avec et sans écoulement.	66

Tables des matières

<i>Résumé</i>	i
<i>Abstract</i>	ii
<i>ملخص</i>	iii
<i>Liste des symboles</i>	iv
<i>Liste des tableaux</i>	v
<i>Liste des figures</i>	vi
<i>Tables des matières</i>	viii

Introduction	1
--------------------	---

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction :	4
2. Différents types d'instabilité d'un talus :	4
2.1 Les mouvements rapides et discontinus :	5
2.1.1 Les effondrements :	5
2.1.2 Les chutes de pierres ou de blocs :	6
2.1.3 Les éboulements ou écroulements :	6
2.1.4 Les laves torrentielles :	6
2.1.5 Les coulées boueuses :	6
2.2 Les mouvements lents et continus :	7
2.2.1 Les affaissements :	7
2.2.2 Les tassements :	8
2.2.3 Le fluage du terrain :	8
2.2.4 Les phénomènes de retrait gonflement :	8
2.2.5 Les glissements de terrain :	8
2.3 Autres mouvement du terrain :	11
2.3.1 L'inondation :	11
3. Relation du l'eau et l'instabilité du talus :	11
4. Méthodes de calcul de la stabilité des pentes :	12
4.1 Introduction :	12
4.2 La méthode d'équilibre limite :	12
4.2.1 Méthode de Fellunius :	12
4.2.2 Méthode de Bishop :	13
4.2.3 Méthode de Junbu:	13

4.2.4	Méthode de Morgenstern et Price :	13
4.2.5	Méthode de Spencer :	13
4.3	La méthode d'éléments finis :	13
4.3.1	Mohr-Coulomb model :	14
5.	Le code plaxis :	14
5.1	Les points forts du code PLAXIS :	15
5.2	Types de calcul dans PLAXIS :	16
5.2.1	Calcul en plastique :	16
5.2.2	Analyse de consolidation :	16
5.2.3	Analyse de la réduction ϕ/C :	16

CHAPITRE II : MODELE DE REFERENCE

1.	Introduction :	19
2.	Géométrie du modèle de référence :	19
3.	Génération de maillage :	20
4.	Résultats :	21

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

1.	Introduction :	24
2.	Géométrie et propriétés des matériaux :	24
2.1	Géométrie du modèle :	24
2.2	Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux :	25
2.3	Génération de maillage :	25
3.	Le calcul numérique :	31
4.	Comparaison et interprétation des résultats :	53
5.	Conclusion :	54

CHAPITRE IV : ETUDE PARAMETRIQUE

1.	Introduction :	56
2.	Etude de niveau de saturation critique :	56
3.	Influence de la variation de surcharge :	57
4.	Influence de l'effet d'écoulement :	62
	Conclusion :	68
	Références bibliographiques :	70

INTRODUCTION

Introduction

La stabilité des pentes naturelles est un problème qui préoccupe les géotechniciens tant praticiens que chercheurs. Les désordres engendrés par la rupture des pentes sont généralement spectaculaires, souvent destructifs et parfois meurtriers [1]. Les problèmes de stabilité de pente, en relation avec les variations de teneur en eau (liées assez souvent à une pluviométrie très irrégulière), provoquent d'importants dégâts : ils affectent les versants naturels ainsi que des talus créés de façon artificielle, et constituent une menace pour les infrastructures ou les zones habitées [2].

L'étude d'une pente comporte, outre la reconnaissance du site et le choix des caractéristiques mécaniques des sols. Un calcul de stabilité pour déterminer d'une part, la courbe de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé d'autre part, la valeur correspondante du coefficient de sécurité [3].

La sécurité d'un talus dépend de nombreux facteurs, notamment :

- de l'inclinaison de la pente
- de la hauteur du talus
- de la position de la nappe aquifère
- des surcharges statiques et dynamiques
- des propriétés du terrain etc.

C'est seulement lorsque l'ensemble de ces éléments sont connus, qu'il est possible de réaliser un calcul de stabilité par différentes méthodes [2].

Objectifs du travail

Les buts de ce travail consistent à :

- La validation des résultats obtenus relatifs aux facteurs de sécurité de la simulation numérique (Plaxis V8.2) par rapport aux résultats du modèle de référence.
- Une étude numérique établie englobant l'influence de quelques paramètres tels que : influence de la variation de surcharge et influence de l'effet d'écoulement.

Plan du travail

Le travail réalisé dans le cadre de présent mémoire est découpé en quatre chapitres, y compris une introduction générale et une conclusion générale :

- Une introduction générale concernant le travail effectué

- La première partie comprend une étude bibliographique
 - Dans cette partie nous rappelons un certain nombre de connaissances sur les glissements de terrain et quelque pathologie en relation au glissement du terrain, ensuite une présentation des différentes méthodes d'estimation du facteur de sécurité au glissement des massifs de sol et pente.
- La deuxième partie comportant également deux chapitres :
 - Le deuxième chapitre présente le modèle de référence et ses résultats obtenus
 - Le troisième chapitre traitera la modélisation numérique du pente avec (Plaxis V8.2). Ensuite les calculs du facteur de sécurité sous l'effet de la variation de niveau de saturation et finalement la validation des résultats obtenus par rapport aux résultats obtenus en modèle de référence.
 - Le quatrième chapitre consiste à établir des études paramétriques sur le modèle choisi en étudiant l'influence de la variation de surcharge et l'influence de l'effet d'écoulement sur les facteurs de sécurité
- Une conclusion relative aux observations obtenus sur la base des calculs numériques réalisés.

CHAPITRE I :
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction :

Le talus est un terrain en pente très inclinée construit lors de travaux de terrassement qui s'emploie dans le cas d'une pente assez forte ; se dit spécialement de la surface inclinée d'un terrain. La stabilité des talus est un problème qui préoccupe les géotechniciens tant praticiens que chercheurs. Les désordres engendrés par la rupture des pentes sont généralement spectaculaires, souvent destructifs et parfois meurtriers. [4]

Préalablement à l'étude des mécanismes, il convient tout d'abord de procéder à une classification des mouvements de terrain qui peuvent avoir des origines différentes et prendre des formes variées.



Figure 1.1: Mouvement de terrain à Baños de Agua Santa en Ecuador [5].

2. Différents types d'instabilité d'un talus :

On peut classer la rupture d'un talus en cinq grandes types suivantes :

- La chute : c'est le détachement de sol et/ou de fragments de roche qui tombent sur une pente montrant une chute dans laquelle une grande quantité de masse de sol a glissé sur une pente
- Le renversement : c'est une rotation vers l'avant du sol et/ou une masse rocheuse autour d'un axe sous le centre de gravité de la masse déplacée
- Le glissement : c'est un mouvement descendant de la masse du sol qui se produit sur une surface de rupture.
- La propagation est une forme de glissement qui se produit par un mouvement brusque de couches de sable ou de limon contenant de l'eau recouvertes d'argiles ou chargées par des remblais
- Les coulées : est un mouvement vers le bas de la masse de sol, avec un comportement similaire à un fluide [6].

On peut grouper ces types en 2 grandes catégories selon les processus des mouvements :

Les mouvements rapides et discontinus :

- Les effondrements.
- Les chutes de pierres ou de blocs.
- Les éboulements ou écroulements.
- Les laves torrentielles.
- Les coulées boueuses.

Les mouvements lents et continus :

- Les affaissements.
- Les tassements.
- Le fluage du terrain.
- Les glissements de terrain.
- Les phénomènes de retrait gonflement.

2.1 Les mouvements rapides et discontinus :

Les mouvements rapides peuvent être scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse, ou à l'état remanié.

2.1.1 Les effondrements :

Les effondrements, se produisent de façon brutale. Ils résultent de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine, rupture qui se propage jusqu'en surface de manière plus ou moins brutale, et qui détermine l'ouverture d'une excavation grossièrement cylindrique [7].

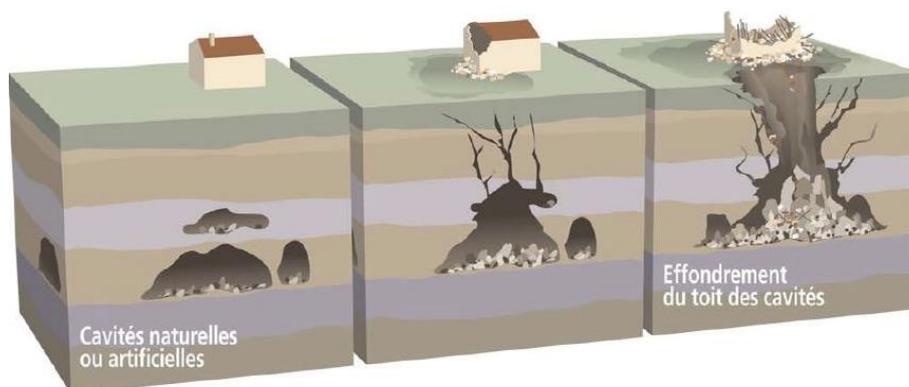


Figure1.2: Un effondrement du toit d'une cavité souterraine [8].

2.1.2 Les chutes de pierres ou de blocs :

Provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés.



Figure 1.3 : Les chutes de pierres ou de blocs [9] [10].

2.1.3 Les éboulements ou écroulements :

Les écroulements sont des mouvements de terrain qui concernent des masses rocheuses. Ils sont engendrés par le détachement rapide, en général le long de discontinuités préexistantes, d'une masse de rocher qui se disloque lors de sa propagation vers pied du versant [11].



Figure 1.4 : Un éboulement [12].

2.1.4 Les laves torrentielles :

Qui résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrents de montagne.

2.1.5 Les coulées boueuses :

Les coulées apparaissent dans des matériaux meubles (sols argileux ou marneux) lorsque leur teneur en eau augmente de manière importante (la masse en mouvement a franchi sa limite de liquidité). Ces coulées peuvent se produire à la suite d'une solifluxion ou d'un glissement de terrain. Elles consistent en la propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu brutalement leur cohésion dès la mise en mouvement [4]

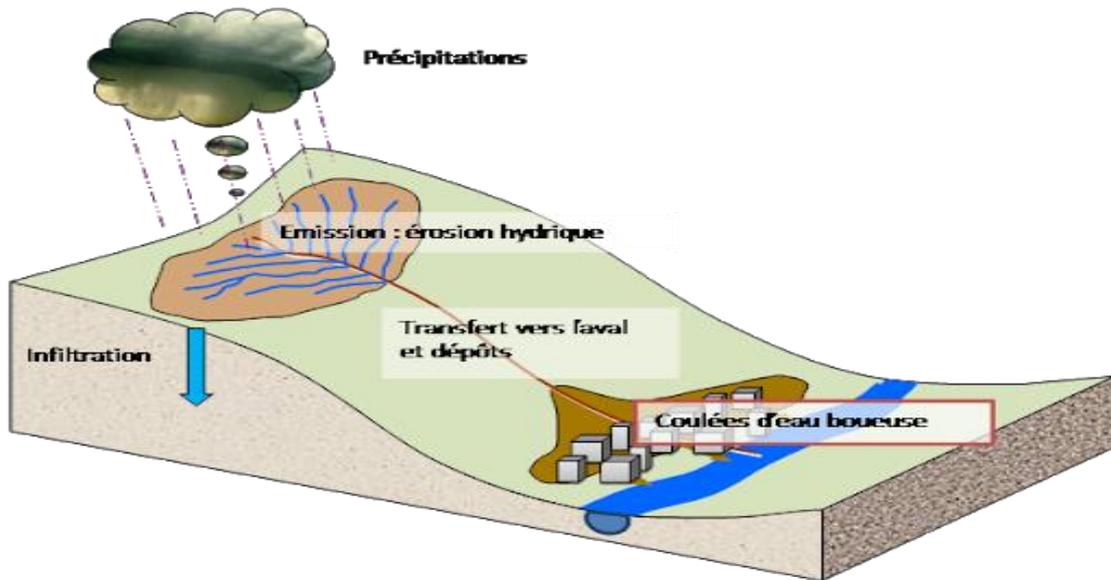


Figure 1.5 : Coulées boueuses [13].

2.2 Les mouvements lents et continus :

Ce sont de mouvements pour lesquels la déformation est progressive et peut être accompagnée de rupture mais en principe d'aucune accélération brutale :

2.2.1 Les affaissements :

Les affaissements, sont des dépressions topographiques en forme de cuvette plus ou moins profonde dues au fléchissement lent et progressif des terrains de couverture, avec ou sans fractures ouvertes, consécutif à l'évolution d'une cavité souterraine [14].

Ces cavités peuvent être :

- Des vides naturels par dissolution de roches solubles, calcaires, gypses...
- Des ouvrages souterrains exécutés sans précaution.
- Des carrières souterraines (calcaire, craie, mines de sel, de charbon...).

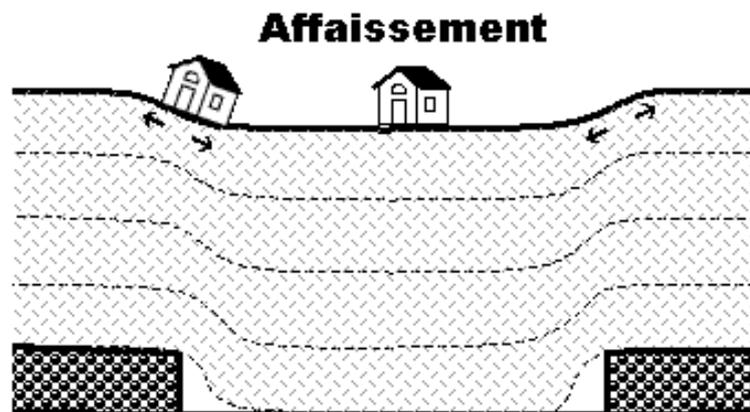


Figure 1.6: Les affaissements [15].

2.2.2 Les tassements :

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Il ne faut pas le confondre avec la compaction du sol (appelée aussi tassement du sol) qui peut apparaître à l'occasion de phénomènes naturels (pluies intenses en sols battants), ou être d'origine anthropique (surpiétinement, passages d'engins agricoles) [16].

2.2.3 Le fluage du terrain :

Le fluage est un mouvement lent de matériaux plastiques sur faible pente qui résulte d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée, mais par une zone de transition avec le massif stable [17].

2.2.4 Les phénomènes de retrait gonflement :

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène [18].

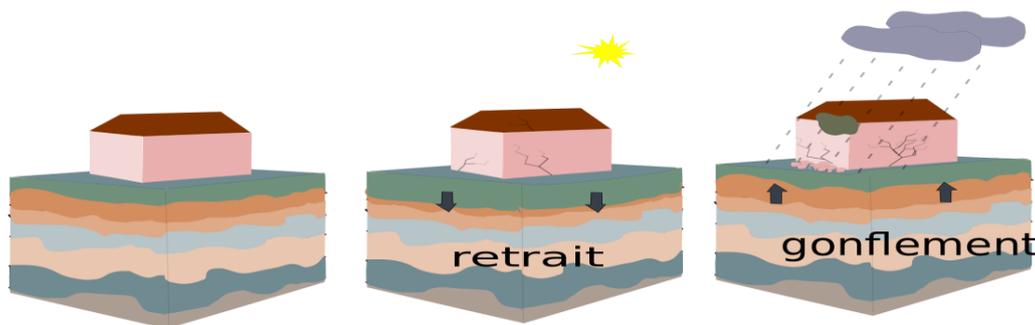


Figure 1.7 :Phénomène de retrait gonflement [19].

2.2.5 Les glissements de terrain :

Les glissements de terrain représentent une menace majeure pour la population, les bâtiments et les différentes infrastructures dans la plupart des régions montagneuse

L'augmentation de l'impact des glissements de terrain, surtout observé dans les pays en voie de développement, et en grand partie liée à l'augmentation démographique, à la densité grandissante des infrastructure et aux diverses activités humaines dans les zones propices aux glissements de terrain [20].

2.2.5.1 Définition :

Un glissement de terrain est un déplacement généralement lent d'une masse de terrain cohérente le long d'une surface de rupture. Cette surface à une profondeur qui varie de l'ordre du mètre a quelques dizaines de mètres voire quelques centaines de mètres dans des cas exceptionnels. Les vitesses de glissement du terrain restent variables mais peuvent atteindre décimètre par an. Lorsqu'il y a une rupture, les terrains peuvent glisser rapidement, surtout lorsqu'ils sont saturés en eau [21].



Figure 1.8 : Les types de glissement de terrain [22] [23].

2.2.5.2 Types de glissement :

Les glissements de terrain surviennent à la suite d'un événement naturel – forte pluie, érosion de berge, séisme, par exemple – ou sont la conséquence plus ou moins directe d'actions de l'homme, Selon la forme de la surface de rupture, on distingue deux types de glissements :

a. Glissement rotationnel :

Ils sont caractérisés par un basculement de la masse glissée, le long d'une surface de rupture dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire. Habituellement les glissements de ce type sont de faible volume et le déplacement des matériaux est limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux [24].

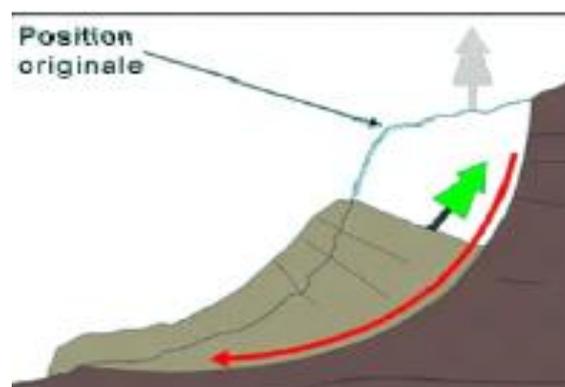


Figure 1.9 : Glissement rotationnel [25].

b. Glissement plan :

Ce type de glissement se produit lorsque, le massif en pente est constitué de sols par exemple meubles reposant sur un substratum, ou encore lorsque la longueur de la surface de rupture potentiel est très grande par rapport à l'épaisseur du terrain. La taille de tels glissements est très variable et peut comprendre des surfaces allant de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés.

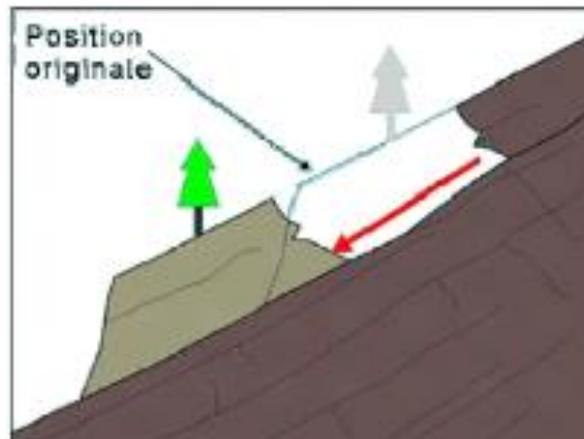


Figure 1.10: Glissement plan [25].

2.2.5.3 Les facteurs déclenchant un glissement de terrain :

La nature du sol : Un sol meuble et donc présentant peu de cohésion sera par nature instable. De même un sol présentant des couches discontinues de nature différente aura tendance à glisser. Un sol argileux ou marneux saturé d'eau sera susceptible de glisser vers le bas de la pente (diminution de la résistance du sol).

- **L'eau** : Lors de fortes pluies ou à la fonte des neiges, l'eau en pénétrant dans le sol exerce une poussée verticale qui peut déstabiliser le terrain. La situation est d'autant plus dangereuse si la quantité d'eau qui pénètre dans la terre est supérieure à celle qui s'en écoule.

- **La sécheresse** : Une terre trop sèche peut perdre de sa cohésion, s'effriter et glisser.

- **L'érosion** : Un sol érodé ou mise à nu sans végétation (déboisement, incendie, tempête) sera plus vulnérable aux infiltrations et donc sera plus susceptible de glisser.

- **Les activités humaines** : La construction d'infrastructures ou de bâtiments en haut de la pente augmente la charge qui pèse sur celle-ci et peut entraîner un glissement. De même des constructions en bas de la pente peuvent déstabiliser le pied du versant.

- **La déforestation**, l'irrigation qui modifie la teneur en eau du sol, l'urbanisation qui entraîne une imperméabilisation du sol et donc un changement dans l'écoulement des eaux ou dans le profil de la pente sont autant de facteurs pouvant entraîner un glissement de terrain.

- **L'activité sismique** : En zone sismique, une secousse même minime peut faire bouger une pente déjà sensibilisée par d'autres facteurs de fragilisation [26].

2.3 Autres mouvement du terrain :

2.3.1 L'inondation :

Une inondation désigne un recouvrement d'eau qui déborde du lit mineur ou qui afflue dans les talwegs ou les dépressions. Quelques cas d'inondations en Algérie

- Alger (Bâb-El-Oued), le 10 novembre 2001, et qui ont fait 710 décès, 800 morts et 30 milliards de DA de pertes
- Azazga (Tizi Ouzou), le 12 octobre 1971 et qui ont occasionné 40 morts et des centaines d'habitations détruites.
- Tizi Ouzou, du 28 au 31 mars 1974 et qui ont provoqué 52 décès dans la Wilaya, 18000 sinistrés et des dégâts évalués à l'époque à 27 millions de DA.
- El Eulma (Sétif), le 1er septembre 1980 qui ont fait 44 décès,
- Annaba, le 11 novembre 1982, au niveau du centre-ville et qui ont fait 26 morts et 9500 sinistrés.
- Jijel, le 29 décembre 1984 et qui ont occasionné 29 morts et 11000 sinistrés.
- Bordj Bou Arreridj, le 23 septembre 1994 et qui ont provoqué 16 décès et des dégâts évalués à 10.000.000 DA.
- Oued Rhiou , 22 décès.
- Ghardaïa 1 octobre 2008 [27].



Figure 1.11: Inondation de Tébessa 2018 [28].

3. Relation du l'eau et l'instabilité du talus :

L'infiltration d'eau dans un sol non saturé influence la stabilité des pentes. L'infiltration d'eau a deux effets : d'une part, elle augmente le poids du sol humide et d'autre part elle réduit la succion dans le sol, ce qui entraîne une réduction de la résistance au cisaillement du sol [29].

Généralement l'infiltration de l'eau est causée suite à la chute des pluies ou les averses.

La pluie se différencie de l'averse de par son origine, son intensité, sa durée et la taille des gouttes d'eau.

Les averses sont en général soudaines, intenses parfois très fortes et éphémères.

La compréhension du régime hydraulique du site est un élément essentiel pour l'analyse d'une instabilité et dans la recherche des solutions.

La connaissance des conditions hydrauliques les plus défavorables nécessite une longue durée d'observations sur le terrain. Par exemple, on peut choisir de prendre en compte les régimes hydrauliques mesurés durant une année dont la pluviométrie est décennale [30].

4. Méthodes de calcul de la stabilité des pentes :

4.1 Introduction :

L'analyse de la stabilité des talus est l'une des importants problèmes en géotechnique. L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est une question complexe surtout dans le domaine des données limitées ou peu connues.

Les chercheurs géotechniciens proposent plusieurs méthodes d'évaluation et de prédiction des catastrophes naturelles engendrés par les glissements de terrain. Parmi ces méthodes on distingue :

- La méthode d'équilibre limite
- La méthode d'éléments finis.

4.2 La méthode d'équilibre limite :

Plusieurs méthodes d'équilibre limite ont été développées pour l'analyse de la stabilité des pentes.

Toutes les méthodes d'équilibre limite sont basées sur certaines hypothèses pour les forces normales et de cisaillement entre les coupes. La différence fondamentale entre les méthodes d'équilibre limite réside dans la façon dont ces forces sont déterminées ou assumées. De plus, la forme de la surface de glissement supposée et les conditions d'équilibre pour le calcul du coefficient de sécurité sont également des points de différence dans différentes méthodes d'équilibre limite [31].

4.2.1 Méthode de Fellunius :

Cette méthode a été proposée par Fellenius en 1927, dans le cas d'un sol purement cohérent, elle est basée sur les hypothèses suivantes :

- La surface de glissement est de forme circulaire et divise le talus en tranches.
- Elle néglige totalement les efforts inter-tranches (efforts verticaux et horizontaux).

La méthode de Fellenius vérifié l'équilibre globale des moments tout en négligeant les forces entre-tranches. Seuls les efforts de cisaillement le long de la courbe de rupture circulaire sont pris en compte. Le coefficient de sécurité est donné par la formule suivante [32] :

$$F_s = \frac{\sum C_i * \frac{b}{\cos\alpha_i} + \left(w \cdot \cos\alpha_i - \frac{U \cdot b}{\cos\alpha_i} \right) \cdot \tan\phi_i}{\sum W \cdot \sin\alpha_i}$$

4.2.2 Méthode de Bishop :

Méthode des tranches basée comme la précédente sur une rupture circulaire. Dans sa version simplifiée Elle ne satisfait que l'équilibre des moments, la composante verticale des forces inter-tranche est négligée. La version modifiée ne tient compte que des forces intertranches horizontales [30].

Le facteur de sécurité est donné par la formule suivante :

$$F_s = \frac{\sum_1^n (c_i b_i + W_n \operatorname{tg} \phi_i)}{m\alpha \sum_1^n W_n \sin \alpha_n}$$

4.2.3 Méthode de Junbu:

Cette méthode elle a comme hypothèse, les forces inter-tranches sont horizontales, ce qui sous-estime le coefficient de sécurité. Dans cette méthode les forces verticales inter-tranches sont supposées nulles. Le facteur de sécurité est calculé à partir d'équilibre des forces horizontales puis un facteur de correction empirique est multiplié par ce coefficient de sécurité pour pallier au manque de l'effet des forces verticales inter-tranches. L'équilibre des moments n'est pas satisfait [4].

4.2.4 Méthode de Morgenstern et Price :

C'est typiquement une méthode de post-analyse. Elle permet à un expert d'expliquer pourquoi une rupture de talus s'est produite. Elle est basée sur l'hypothèse que la direction des forces intertranches peut être décrite par une fonction mathématique arbitraire [33].

4.2.5 Méthode de Spencer :

Cette méthode au même principe de calcul que la méthode de Morgenstern and Price, la différence réside dans la fonction de variation qui est constante (le rapport constant entre les comptes verticaux et horizontaux des forces inter tranches [34].

4.3 La méthode d'éléments finis :

La méthode des éléments finis est une technique numérique pour trouver des solutions approximatives aux problèmes de valeurs aux limites. Dans la méthode des éléments finis, le corps de la matière est divisé en des petits éléments régulière connue sous le nom d'éléments finis. Ces éléments sont

interconnectés avec des liaisons appelées les nœuds. Les nœuds se trouvent sur les limites des éléments où les éléments adjacents sont considérés comme connectés. Le modèle le plus utilisé en éléments finis c'est Mohr-Coulomb.

4.3.1 Mohr-Coulomb model :

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écoulement. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

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

Où : σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et tangentielles de cisaillement, et c et ϕ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau.

Ce modèle comporte cinq paramètres : Le module d'Young E , le coefficient de Poisson ν (paramètres d'élasticité) et la cohésion c , l'angle de frottement ϕ .

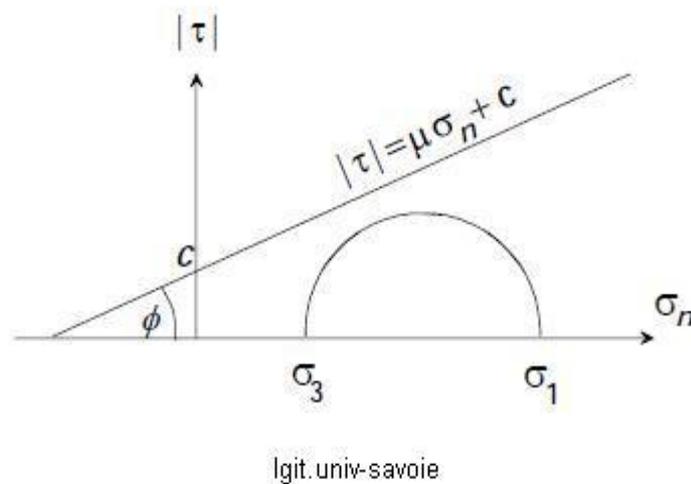


Figure 1.12: Modèle de Mohr coulomb.

La méthode des éléments finis nécessite un grand nombre de calculs, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

De nombreux logiciels existent sur le marché, nous citons ci-dessous quelques logiciels de calcul de stabilité des pentes : Talren – Plaxis – Geo5 - Geostudio – Geoslope – Slide – Clara – Flac – Petal ...

5. Le code plaxis :

Le code PLAXIS a été développé en premier lieu à l'Université Technologique de Delft (Les Pays Bas), le code initialement réalisé pour analyser les digues en terre, a vu son champ d'application se développer

largement afin de pouvoir traiter différents types de problèmes géotechniques (fondations, tunnels, ouvrages de soutènement,...). PLAXIS permet de réaliser des analyses de déformation et de stabilité des ouvrages géotechniques. L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculation, Output et Curves).

- PLAXIS-Input: le sous-programme Input appelé aussi le pré-processing programme contient les toutes facilités nécessaires à la création et modifications des modèles géométriques, à l'engendrement des maillages des éléments finis et aux définitions des conditions initiales.
- PLAXIS-Calculations: le processing programme ou le sou programme de calculs contient les facilités utiles à la définition des phases et au commencement de la procédure de calcul des éléments finis.
- PLAXIS-Output: ou le programme post-processing contient les facilités pour la visualisation des résultats de la phase de calculs, comme les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes les forces au des éléments structuraux ...etc.
- PLAXIS-Curves: le sou programme curve sert à la construction des courbes de chargement – déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes.

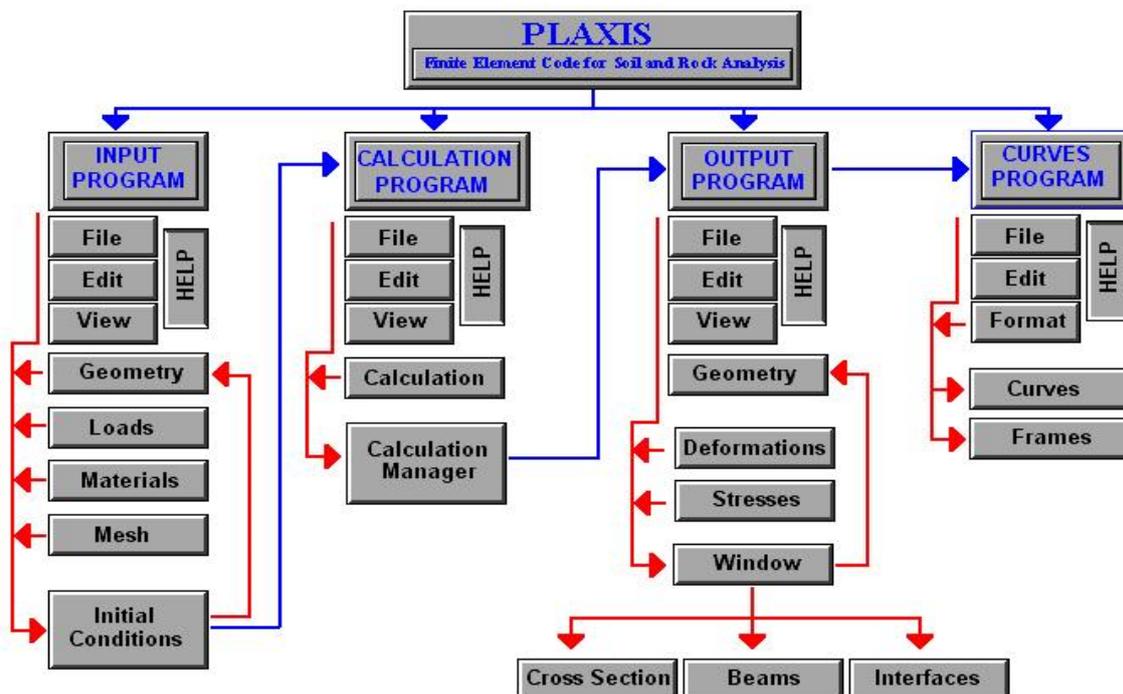


Figure 1.13: Organigramme du code plaxis [35].

5.1 Les points forts du code PLAXIS :

Les points forts de PLAXIS sont :

- Fournir une masse imposante de résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement
- Des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit

- L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect
- C'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées
- Générateur automatique de maillage
- Couplage avec les calculs d'écoulement et de consolidation
- Prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure
- Calculs de coefficient de la sécurité
- Calcul en grandes déformations
- Calcul dynamique (pour la simulation des vibrations et séismes)
- Jeu complet de lois de comportement de sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportement.

5.2 Types de calcul dans PLAXIS :

Il existe, comme mentionné précédemment, trois types de calcul à choisir entre PLAXIS, Calcul en plastique, analyse de consolidation et la réduction (ϕ/C).

5.2.1 Calcul en plastique :

Un calcul en plastique peut être sélectionné lorsque l'utilisateur s'intéresse à une analyse de déformation élasto-plastique dans laquelle il n'est pas essentiel de prendre en compte l'ampleur des surpressions excédentaires avec le temps. Un calcul en plastique ne prend pas compte des effets de temps. Un calcul en plastique peut également être utilisé avec des sols doux, mais l'historique de chargement et la consolidation ne peuvent pas être suivis.

5.2.2 Analyse de consolidation :

L'analyse de consolidation devrait être utilisée lorsqu'il est intéressant de suivre le développement de pression excessive des pores avec le temps dans les sols doux.

5.2.3 Analyse de la réduction ϕ/C :

La réduction, ϕ/C , est une analyse de sécurité dans PLAXIS qui est souhaitée lorsque la situation dans le problème nécessite un calcul du facteur de sécurité. Une analyse de sécurité peut être effectuée après chaque phase de calcul individuelle, mais il est recommandé d'utiliser une analyse de sécurité à la fin, lorsque toutes les phases de calcul ont été définies. En particulier, il n'est pas conseillé de commencer le calcul avec une analyse de sécurité comme condition de départ pour une autre phase de calcul, car cela se terminera en cas d'échec

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. En conclusion le code PLAXIS est un logiciel facile à utiliser. Il permet l'analyse des problèmes géotechniques en 2D et 3D. PLAXIS nous permet aussi de lire les résultats numériques (soit sous forme de tableaux soit sous formes graphiques) nécessaires pour savoir les zones à risques du talus et proposer la meilleure solution.

CHAPITRE II :
MODELE DE REFERENCE

1. Introduction :

Dans le cadre des études de stabilité d'une pente sous l'effet de la variation du niveau d'eau, nous avons adopté un modèle de référence dont les résultats de ses analyses ont été présentés lors de la 3^{ème} conférence Internationale de l'ingénierie civile pour le développement durable (ICCESD 2016) en Bangladesh présenté par Md. M Sazzad, Faysal I Rahman et Md A A Mamun [31].

2. Géométrie du modèle de référence :

Le modèle étudié a été réalisé par le logiciel GEO5 2015, et la géométrie est présentée comme ci-dessous :

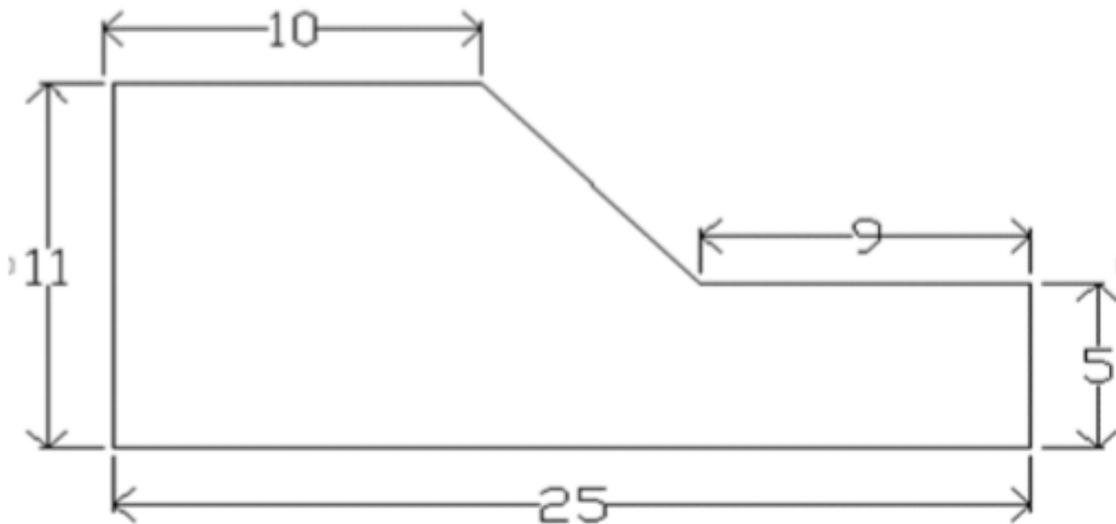


Figure 2.1 : Modèle de référence [31].

Puisque l'objectif est d'étudier l'effet de la variation du niveau d'eau sur la stabilité de la pente, donc la stabilité de la pente sans présence d'eau est d'abord étudiée, puis l'eau est considérée. Une ligne phréatique constante de l'eau avec une inclinaison vers le bas de 5 degrés est considérée avec l'eau niveau dans tous les cas d'analyse.

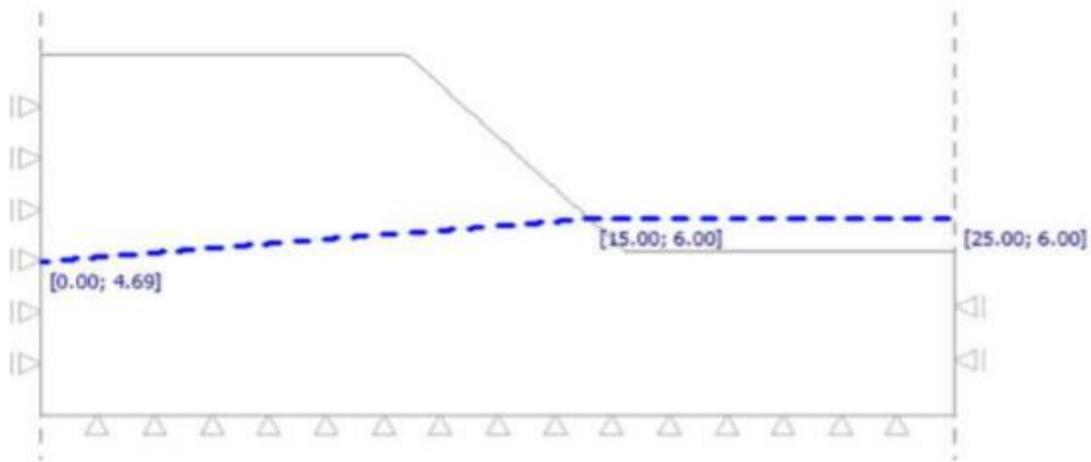


Figure 2.2: Position de la nappe phréatique [31].

Les propriétés du sol sont présentées dans le Tableau :

Tableau 2.1: Propriétés du sol.

Cohésion, c (kN / m ²)	10
Ange de frottement, ϕ (°)	20
Masse volumique sec γ [kN/m ³]	18
Module d'Young E [kN/m ²]	8000
Coefficient de poisson ν	0.3
Angle de dilatance ψ (°)	0.0

3. Génération de maillage :

Ce modèle se fait par des éléments triangulaires à 6 nœuds avec une taille du 0,4 m.

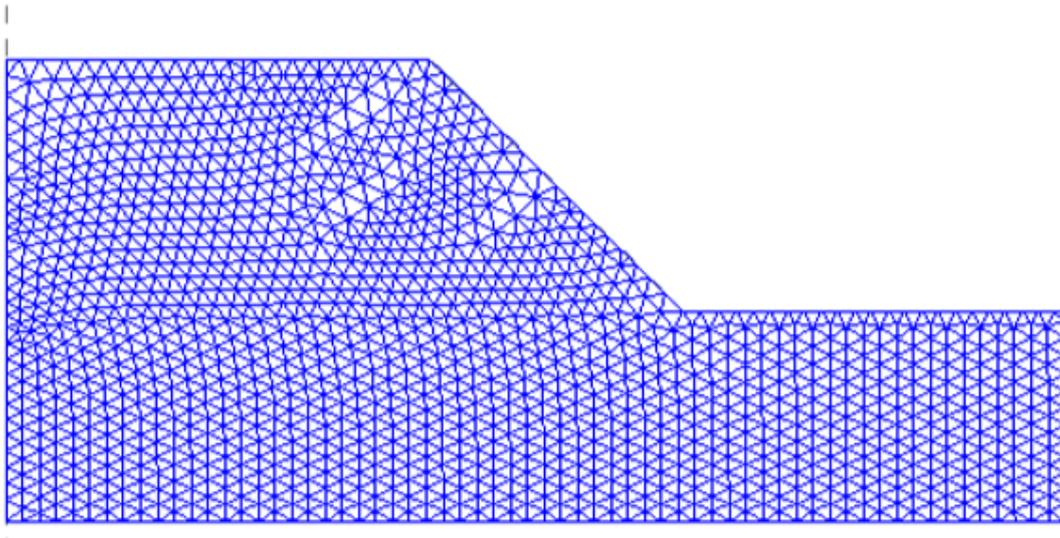


Figure 2.3: Géométrie du maillage de la pente sans considération de l'eau [31].

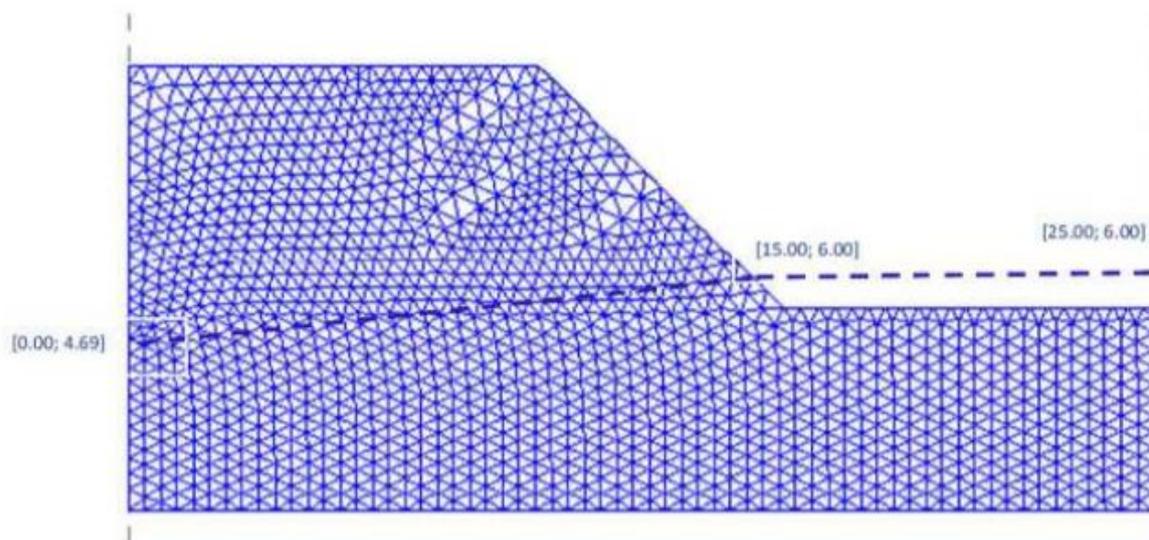


Figure 2.4: Géométrie du maillage de la pente sans considération de l'eau [31].

4. Résultats

L'effet de la variation du niveau d'eau sur la stabilité de la pente en termes de facteur de sécurité est représenté dans la figure 5. Il convient de noter que le facteur de sécurité, en général, diminue avec l'augmentation de la hauteur de niveau d'eau à partir du bas de la pente quelles que soient les méthodes utilisées. La diminution du facteur de sécurité est dominante en cas de FEM comme indiqué sur la figure 5 pour la méthode de Mohr-Coulomb. Le facteur de sécurité en utilisant La méthode Fellenius donne la valeur la plus basse parmi les LEM. Une réduction de la pression effective due à l'augmentation du niveau d'eau contribue à la réduction de la résistance au cisaillement entraînant la réduction du facteur de sécurité [31].

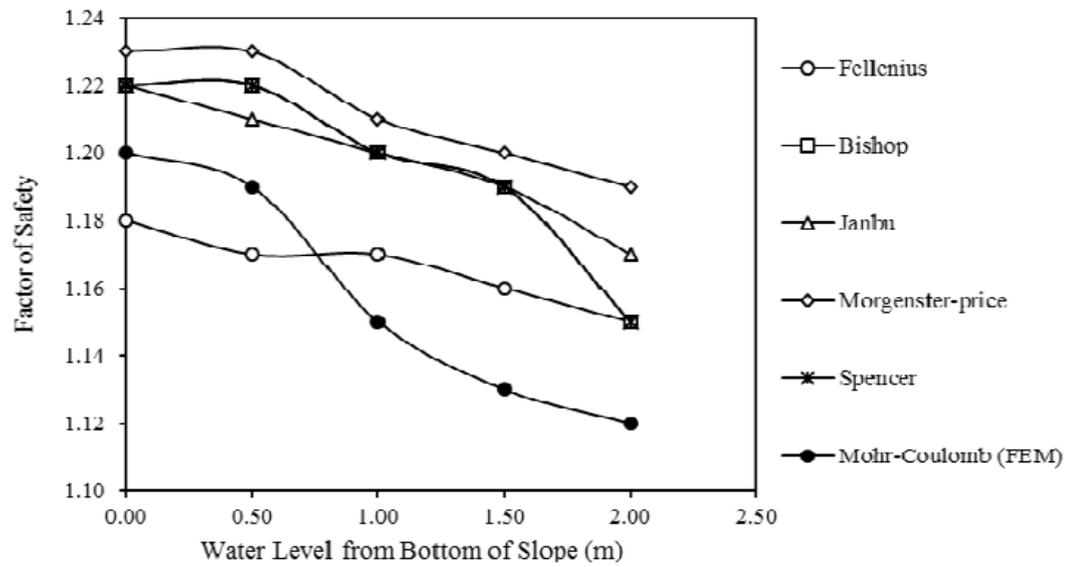


Figure 2.5: Effet de la variation du niveau d'eau sur le coefficient de sécurité par LEM et FEM.

CHAPITRE III :
MODELISATION NUMERIQUE

1. Introduction :

La modélisation numérique permet d'analyser la stabilité, la déformation et l'influence de plusieurs paramètres en tout point du modèle dans un temps raisonnable.

Dans ce chapitre nous allons utiliser le code Plaxis (version 8.2) et présenter les plus importants résultats obtenus à partir d'une simulation numérique par éléments finis bidimensionnel d'un talus sous la variation du niveau de la saturation.

2. Géométrie et propriétés des matériaux :

Le choix s'est porté sur :

Eléments à 15 nœuds le sol

Modèle 2D plane strain

Unités : m, KN, jour

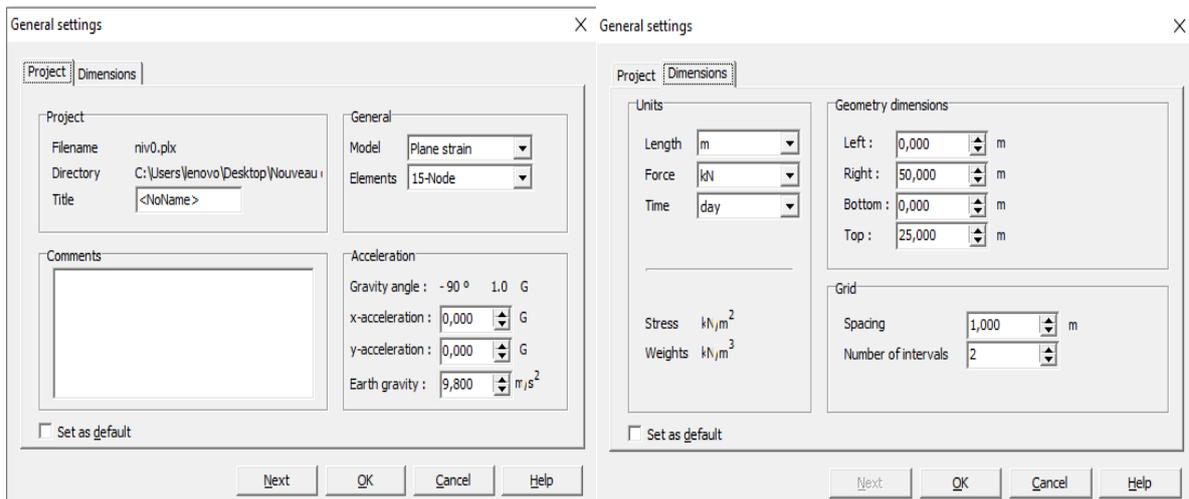


Figure 3.1: Géométrie et propriétés des matériaux.

2.1 Géométrie du modèle :

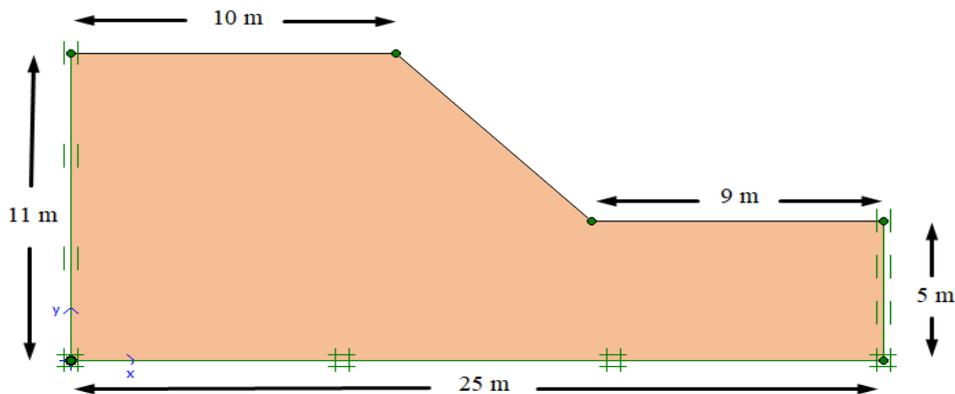


Figure 3.2: Modèle de référence.

2.2 Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux :

Le modèle de comportement de sol est le modèle élastique de Mohr-Coulomb. C'est un modèle largement adopté pour la simulation des sols. La modélisation numérique par le code de calcul PLAXIS, exige la définition de quelques paramètres. Les valeurs de ces derniers sont regroupées dans les tableaux suivants :

Tableau 3.1: Caractéristiques géotechniques du sol.

Paramètre Du Sol	Valeur
Cohésion C[kN/m ²]	10
Angle de frottement φ (°)	20
Masse volumique sec γ [kN/m ³]	18
Masse volumique saturé γ_{sat} [kN/m ³]	20
Module d'Young E [kN/m ²]	8000
Coefficient de poisson ν	0.8
Angle de dilatance ψ (°)	0.0

Remarque : La valeur de la masse volumique saturé n'ai été pas mentionner dans le modèle de la référence, donc on a adopté une valeur du 20 kN/m³.

2.3 Génération de maillage :

Lorsqu'un model géotechnique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en élément finis afin de réaliser le calcul par éléments finis, une composition d'éléments finis d'appelle un maillage d'éléments finis.

Ce modèle se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 78 et le nombre des nœuds est de 685.

General info

Project File name : Directory : C:\Users\lenovo\AppData\Local Title :	General Model : Plane strain Elements : 15-Noded
Comments : <div style="border: 1px solid black; height: 40px;"></div>	Mesh Number of elements : 78 Number of nodes : 685 Number of stress points : 936 Average element size: $1,88 \cdot 10^0$ m

Figure 3.3: Génération du maillage.

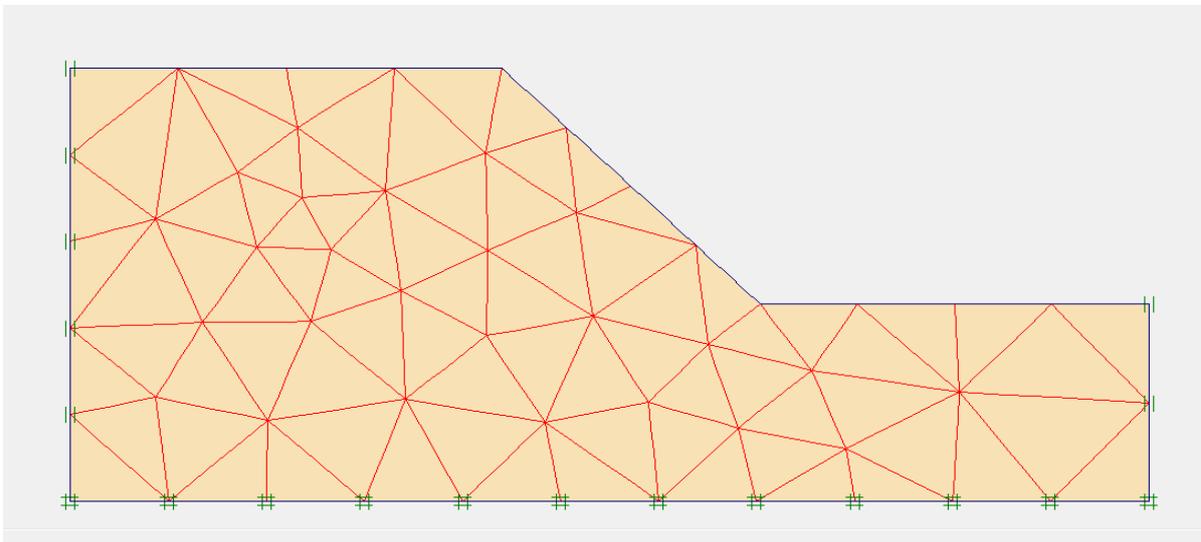


Figure 3.4: Modèle en éléments finis.

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage des éléments finis généré l'état des contraintes initial et les configurations initial doivent être spécifié.

La fonction initiale conditions est utilisé pour définir le poids volumique de l'eau et une ligne phréatique général.

Les conditions initiales sans constituées en deux modes différent, l'un pour générer les pressions interstitielles initial (mode de condition hydraulique) et l'autre pour spécifier les configurations géométriques initial et générer les champs des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique)

PLAXIS et généralement utilisé pour des analyses en contrainte effective dans lesquelles une distinction claire est faite entre les pressions interstitiel et les contraintes effectives les pressions interstitielles sont-

elles même décompose en deux parties les pressions interstitielles permanente et de surpression interstitiel.

Afin de savoir le changement de facteur de sécurité en fonction de variation de niveau de saturation, nous avons affecter la nappe pour 5 différentes niveau de nappe phréatique :

- Niveau de saturation 0 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 0,5 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 1 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 1,5 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 2 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 2.5 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 3 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 3.5 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 4 m à partir du bas de la pente.
- Niveau de saturation 4.5 m à partir du bas de la pente.

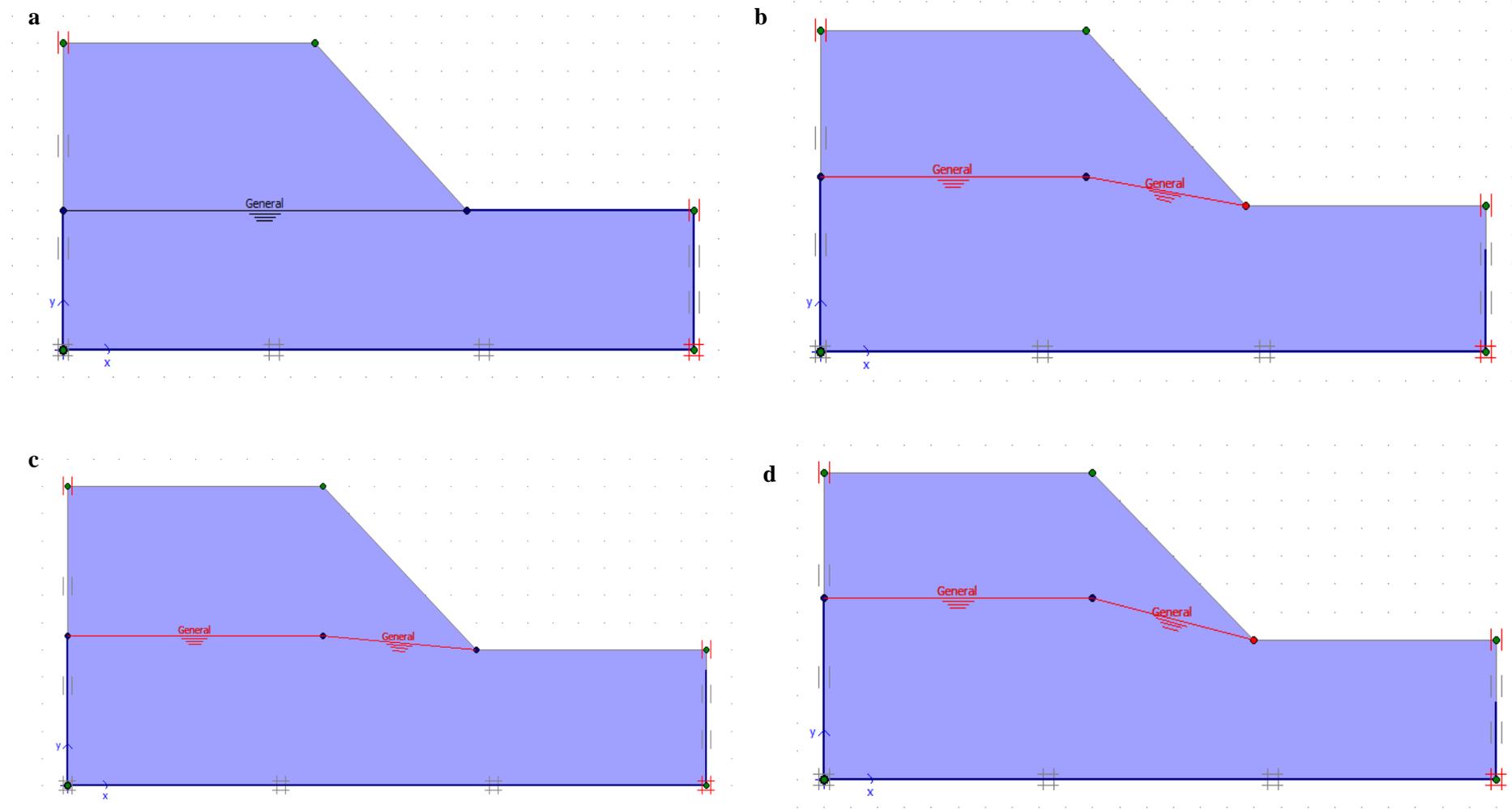


Figure 3.5: Conditions hydrauliques pour des niveaux de saturation (a. 0 m, b. 1 m , c. 0.5 m, d. 1.5 m).

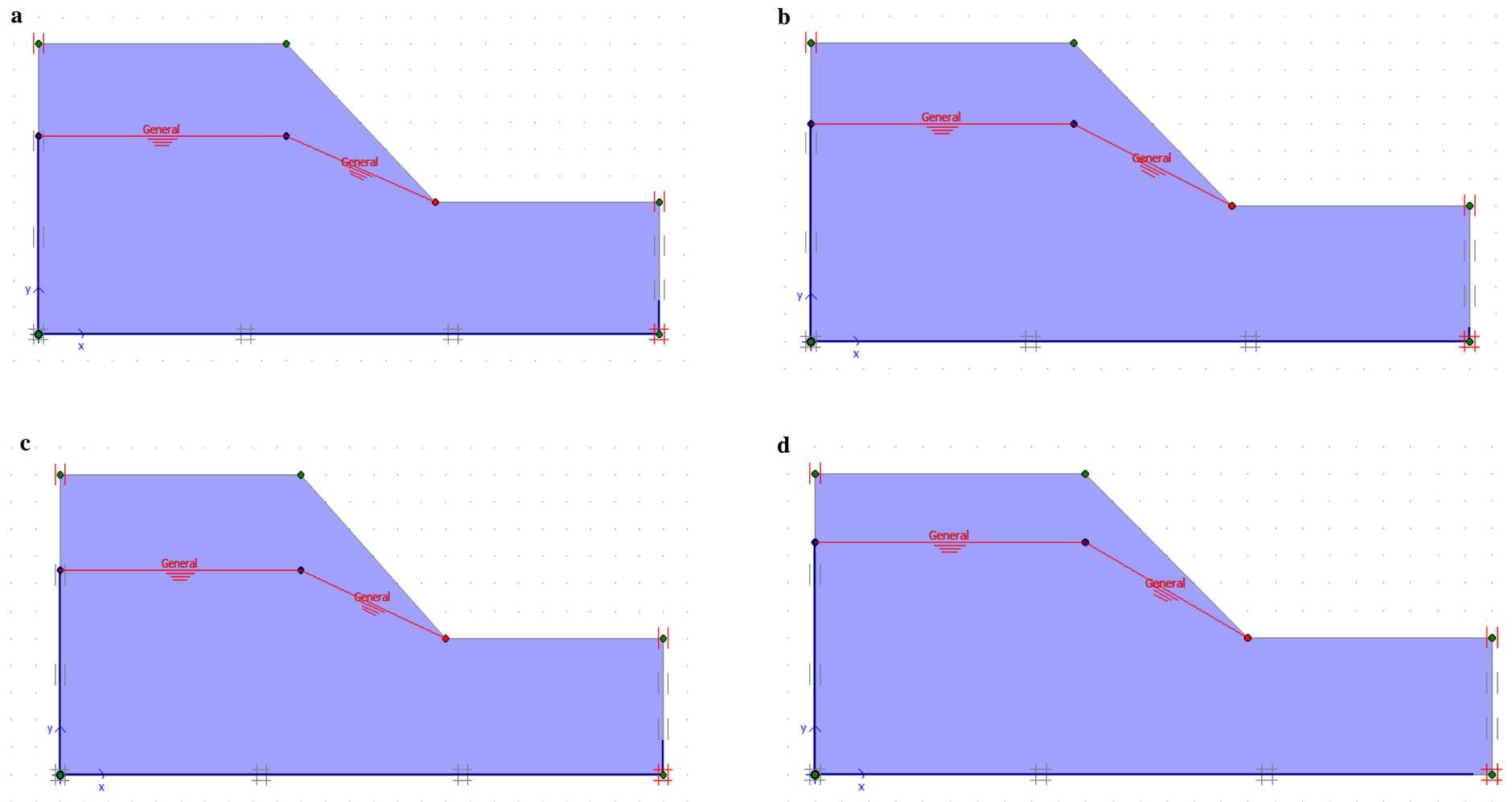


Figure 3.6: Conditions hydrauliques pour des niveaux de saturation (a. 2 m, b. 3 m , c. 2.5 m, d. 3.5 m).

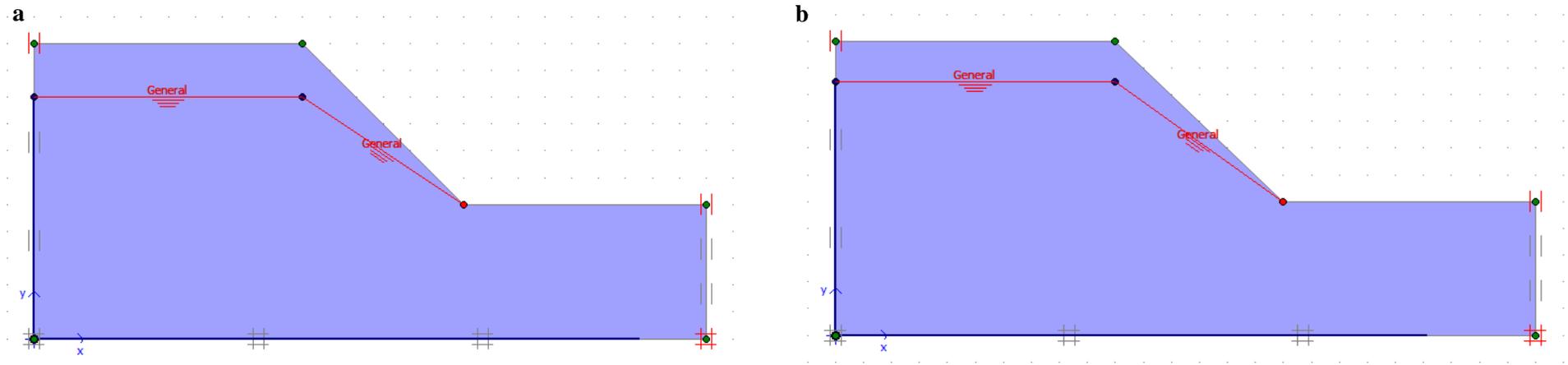


Figure 3.7: Conditions hydrauliques pour des niveaux de saturation (a. 4 m, b. 4,5 m).

Valeur de K_0 est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky $K_0 = 1 - \sin \Phi$ et Φ est l'angle de frottement. Le calcul de procédure K_0 est effectué en définissant un **facture** : ΣM -weight = 1.000

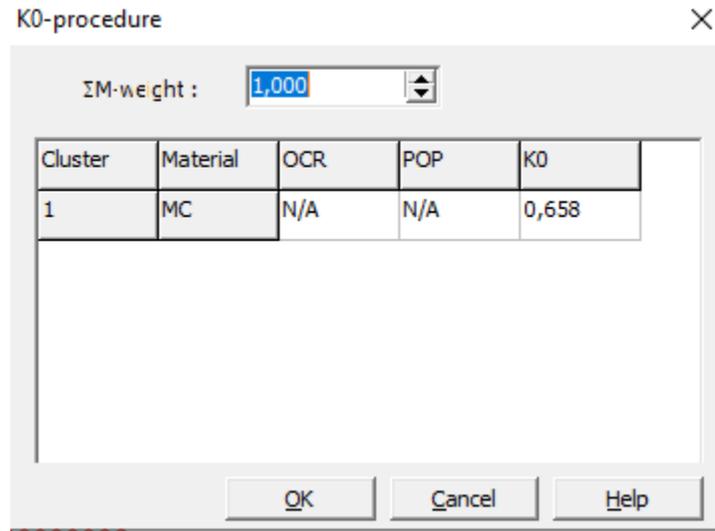


Figure 3.8: Définition du multiplicateur pour la procédure K_0 .

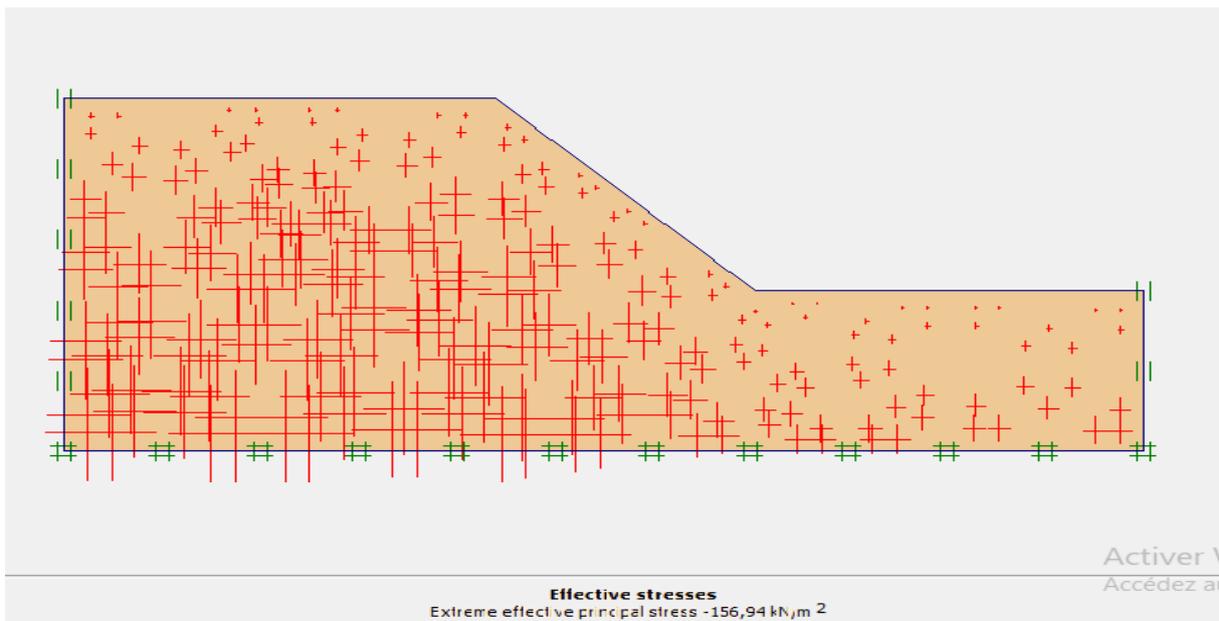


Figure 3.9: Champ de contraintes effective.

3. Le calcul numérique

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode d'équilibre limite et méthode des éléments finies) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols.

Le calcul du modèle de référence se fait en trois (02) phases et répété 5 fois pour chaque niveau de nappe phréatique.

Phase 0 :

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

Phase 1 :

Application de la gravité (mise en place de remblai) : cette phase est caractérisée par :

- Calcul plastique on utilise la construction par étape.
- Entrer total multiplier ΣM -weight = 1.000.

Phase 2 :

Calcul du coefficient de sécurité dans les conditions initiales :

- Calcule Phi-c réduction.
- Activer l'option reset déplacement to zéro0
- Accepter le choix de l'incrément standard = 0,1.

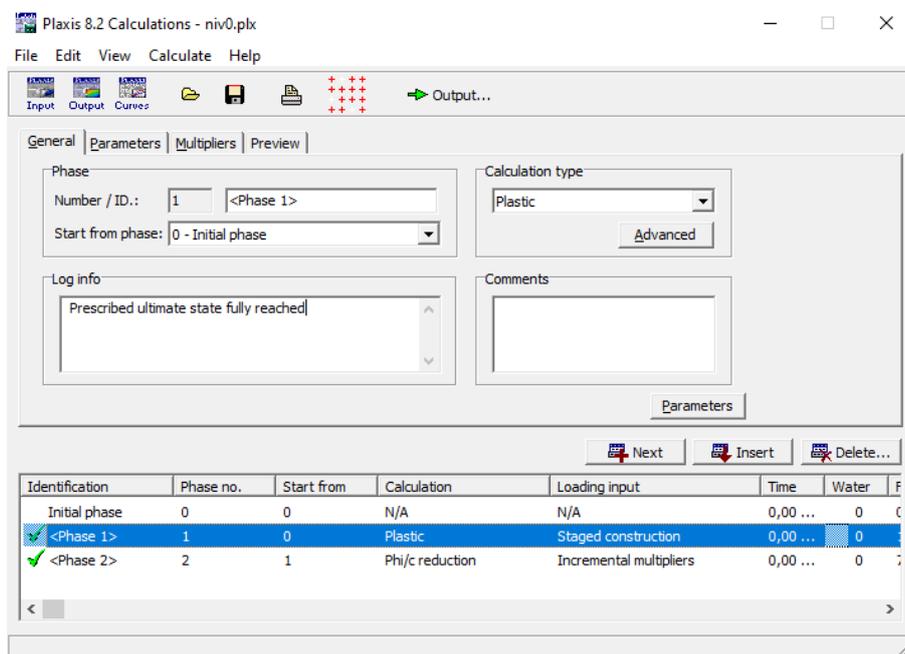


Figure 3.10: Champ des phases de calcul.

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 0 m à partir de la bas de la pente :

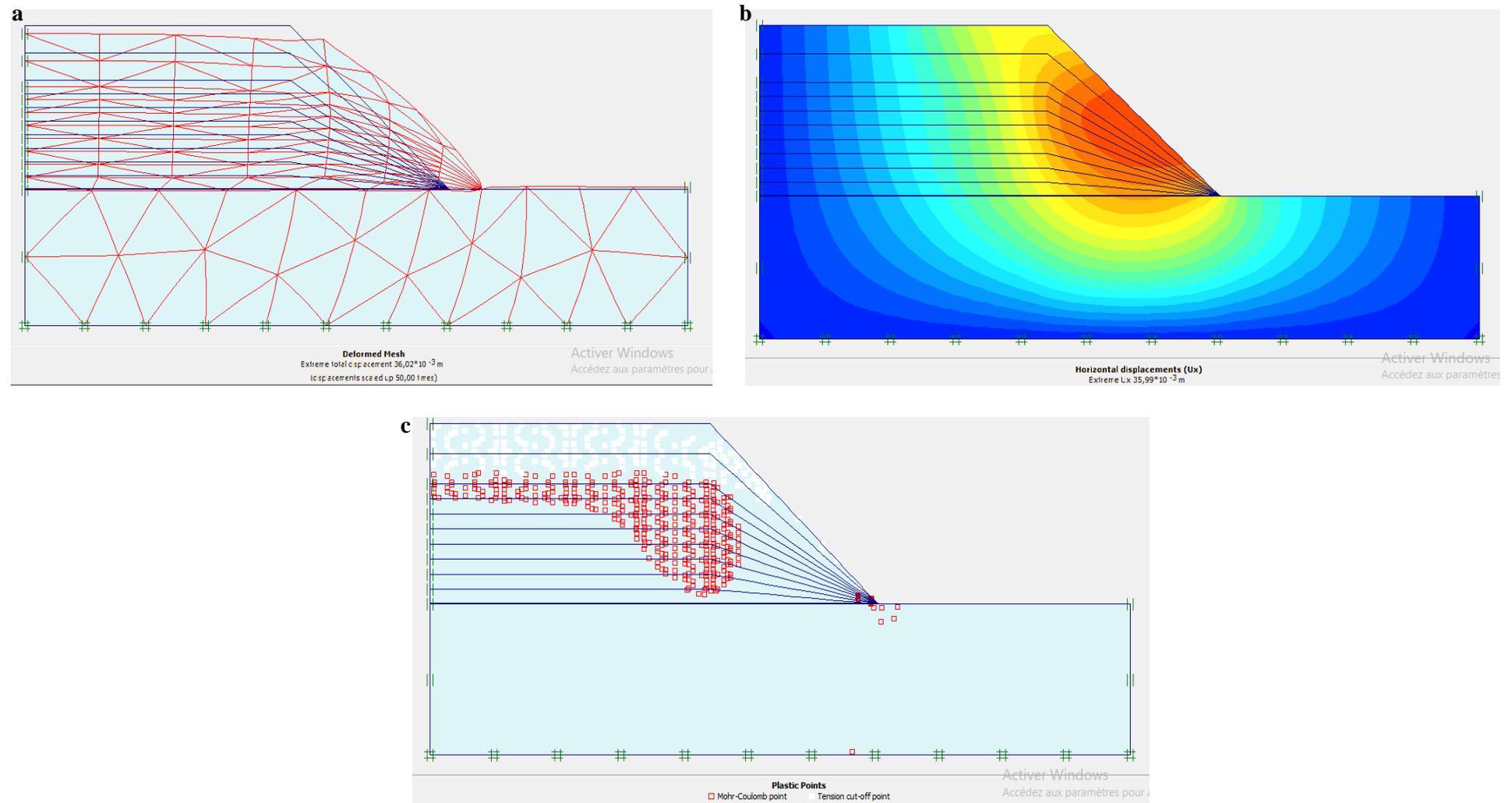


Figure 3.11: Phase 1 avec le niveau de saturation 0 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 0 m à partir de la bas de la pente :

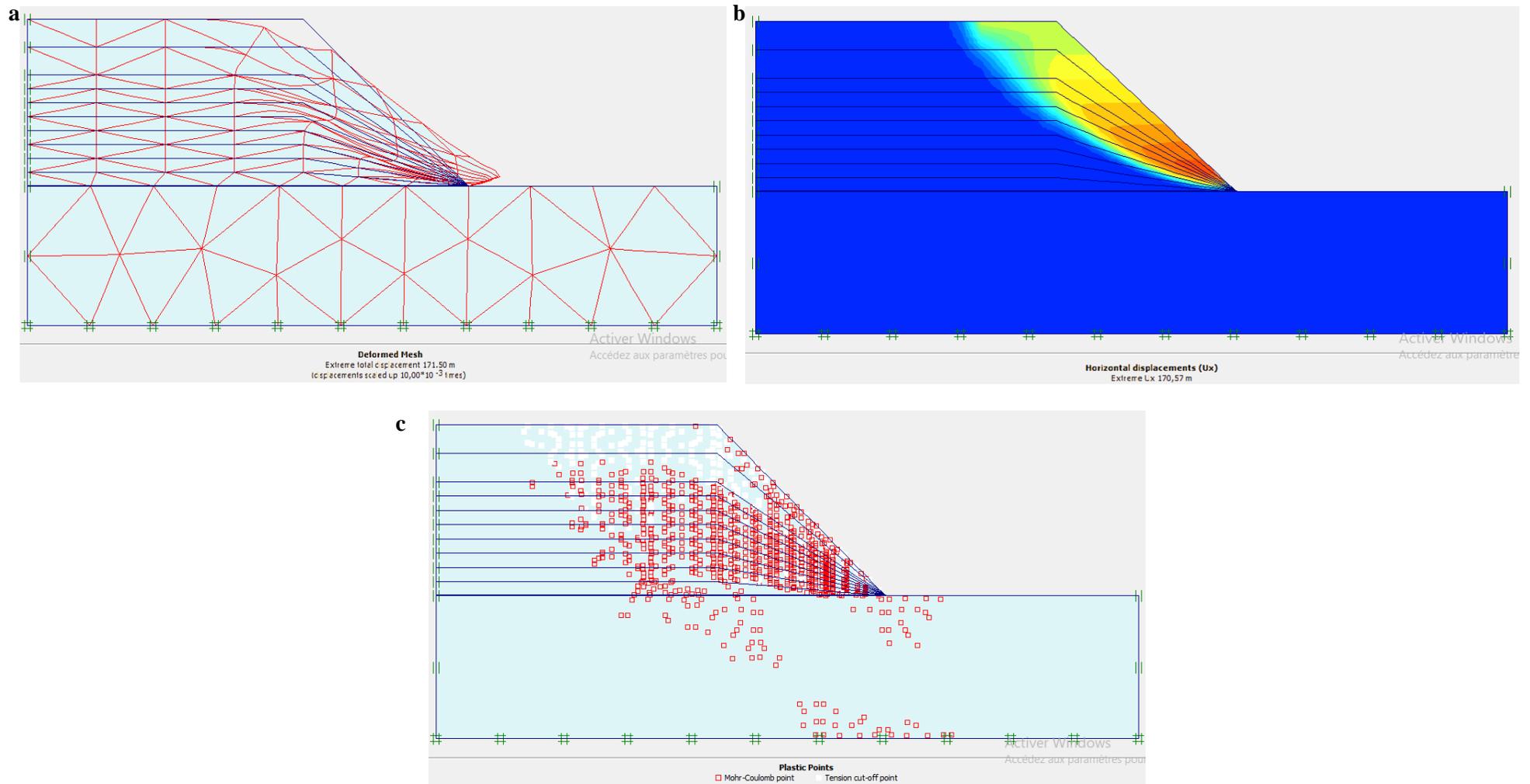


Figure 3.12: Phase 2 avec le niveau de saturation 0 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 0.5 m à partir de la bas de la pente :

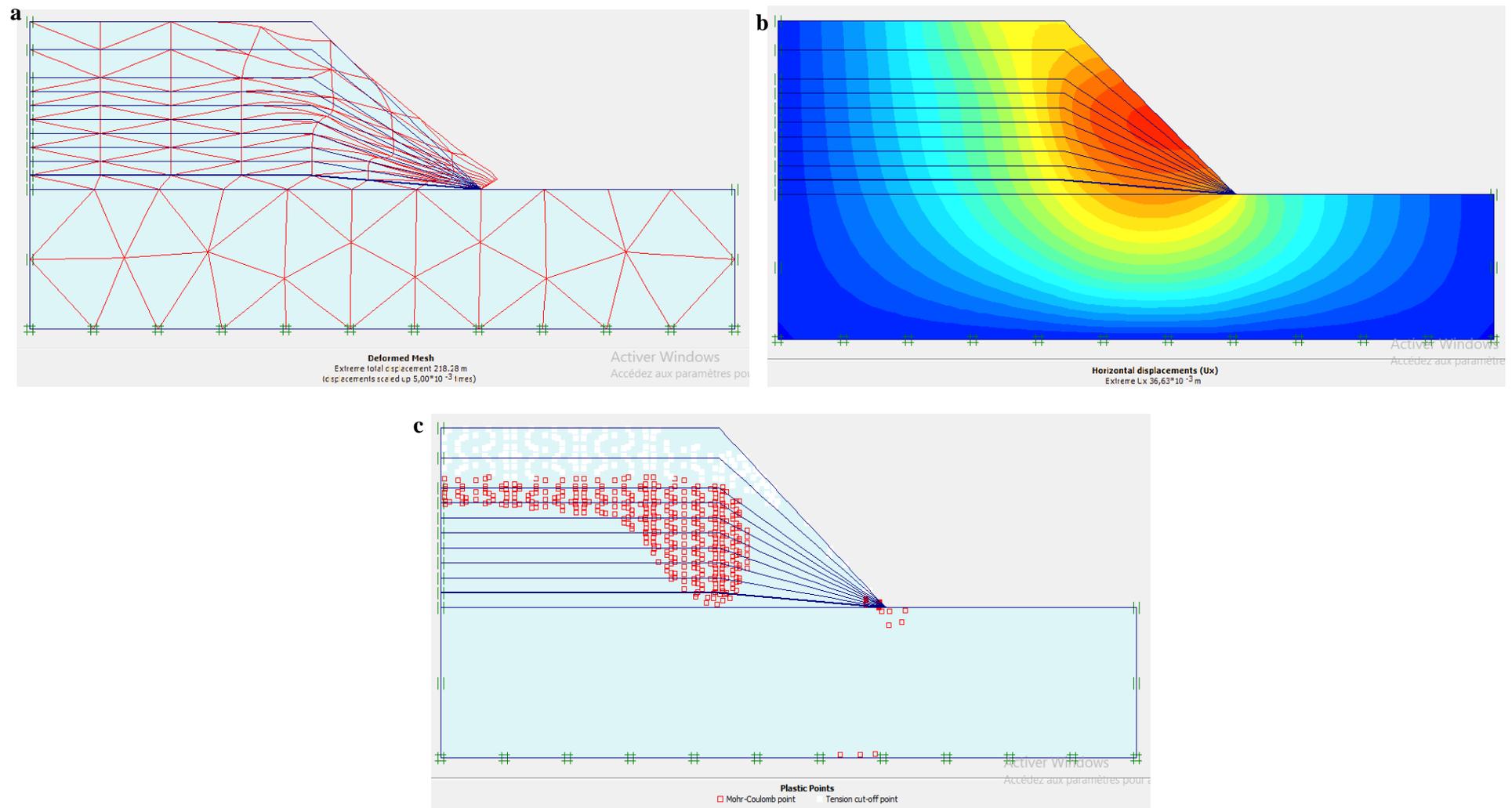


Figure 3.13: Phase 1 avec le niveau de saturation 0,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 0.5 m à partir de la bas de la pente :

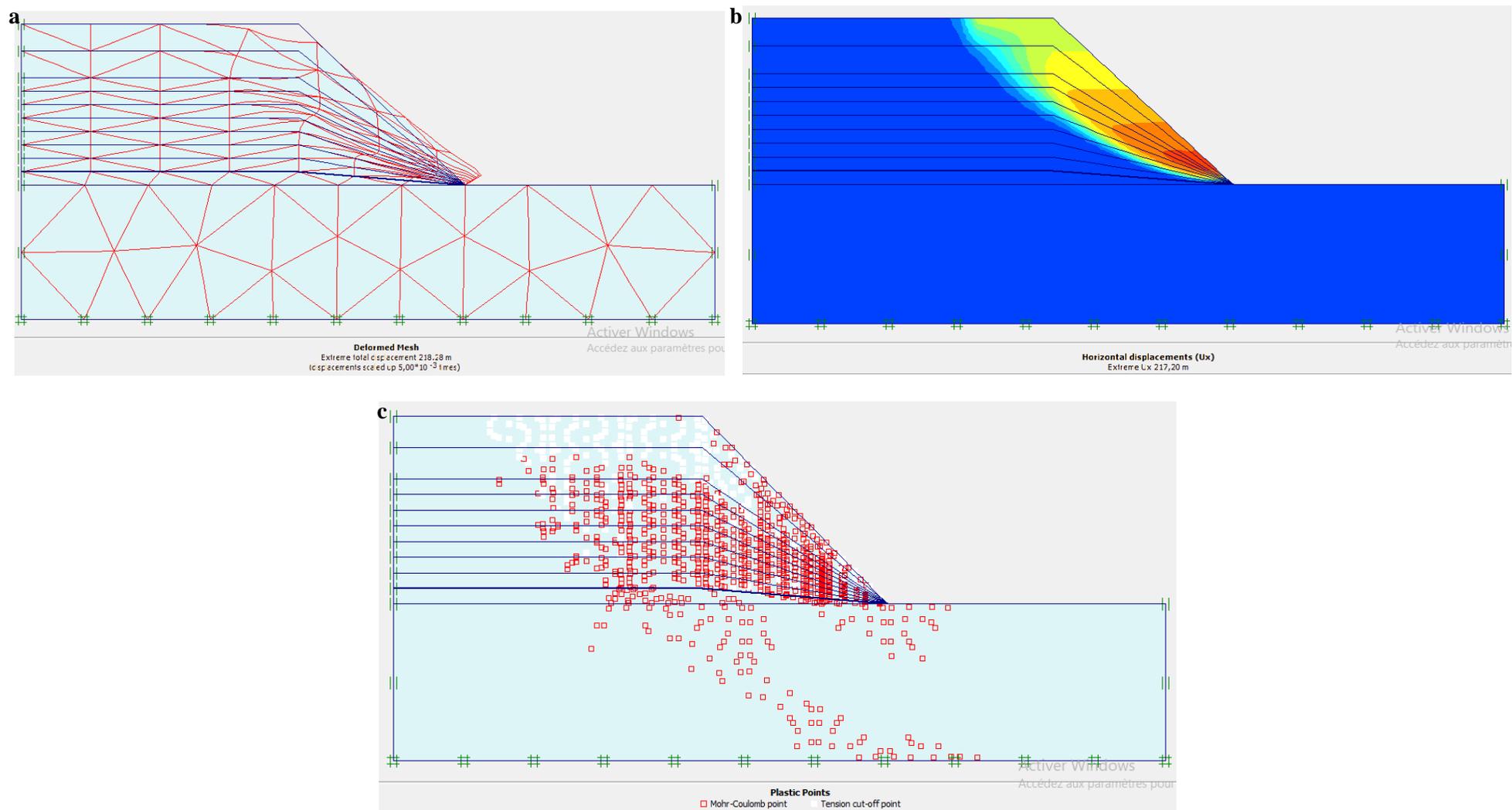


Figure 3.14: Phase 2 avec le niveau de saturation 0,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 1 m a partir de la bas de la pente :

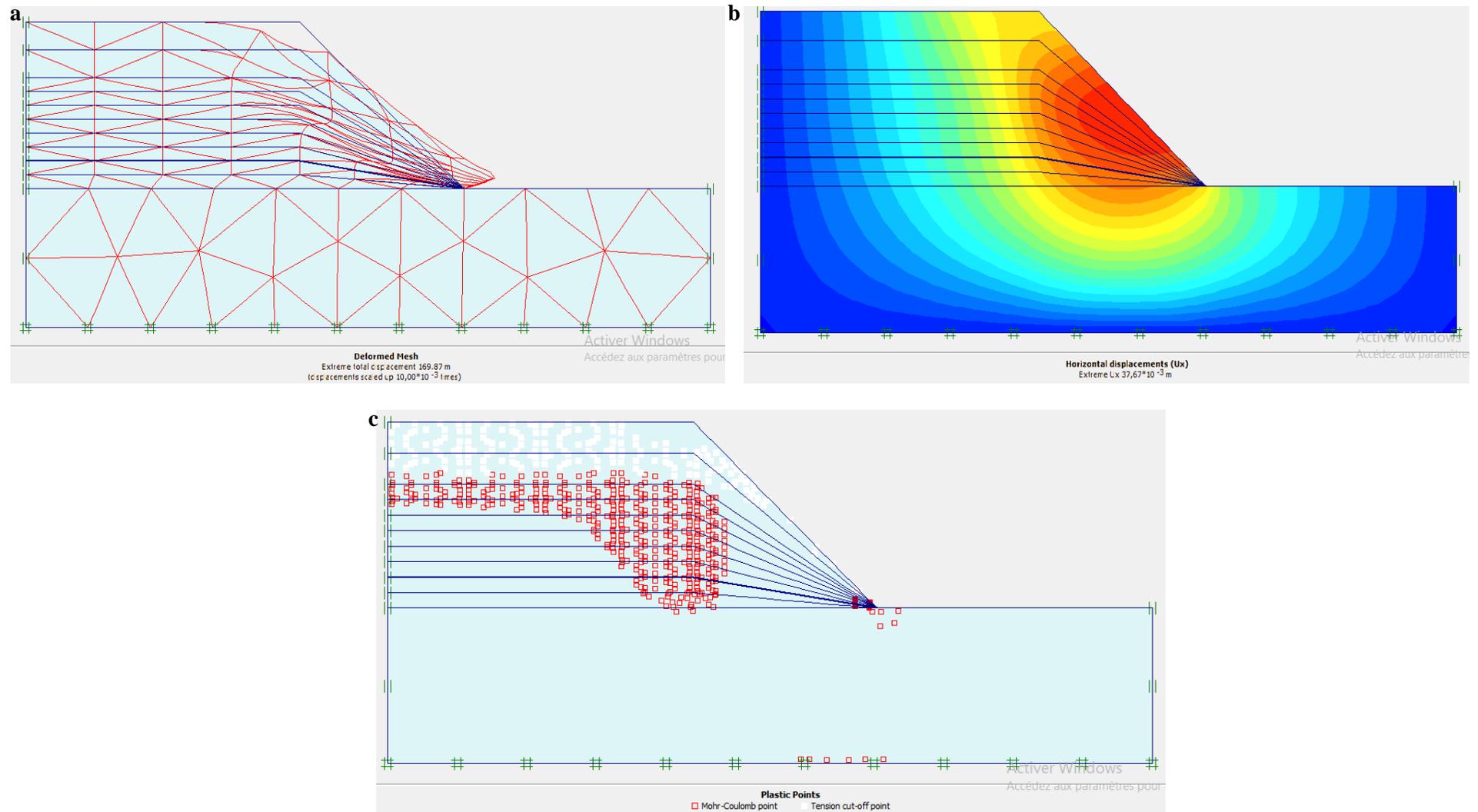


Figure 3.15: Phase 1 avec le niveau de saturation 1 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 1 m à partir de la bas de la pente :

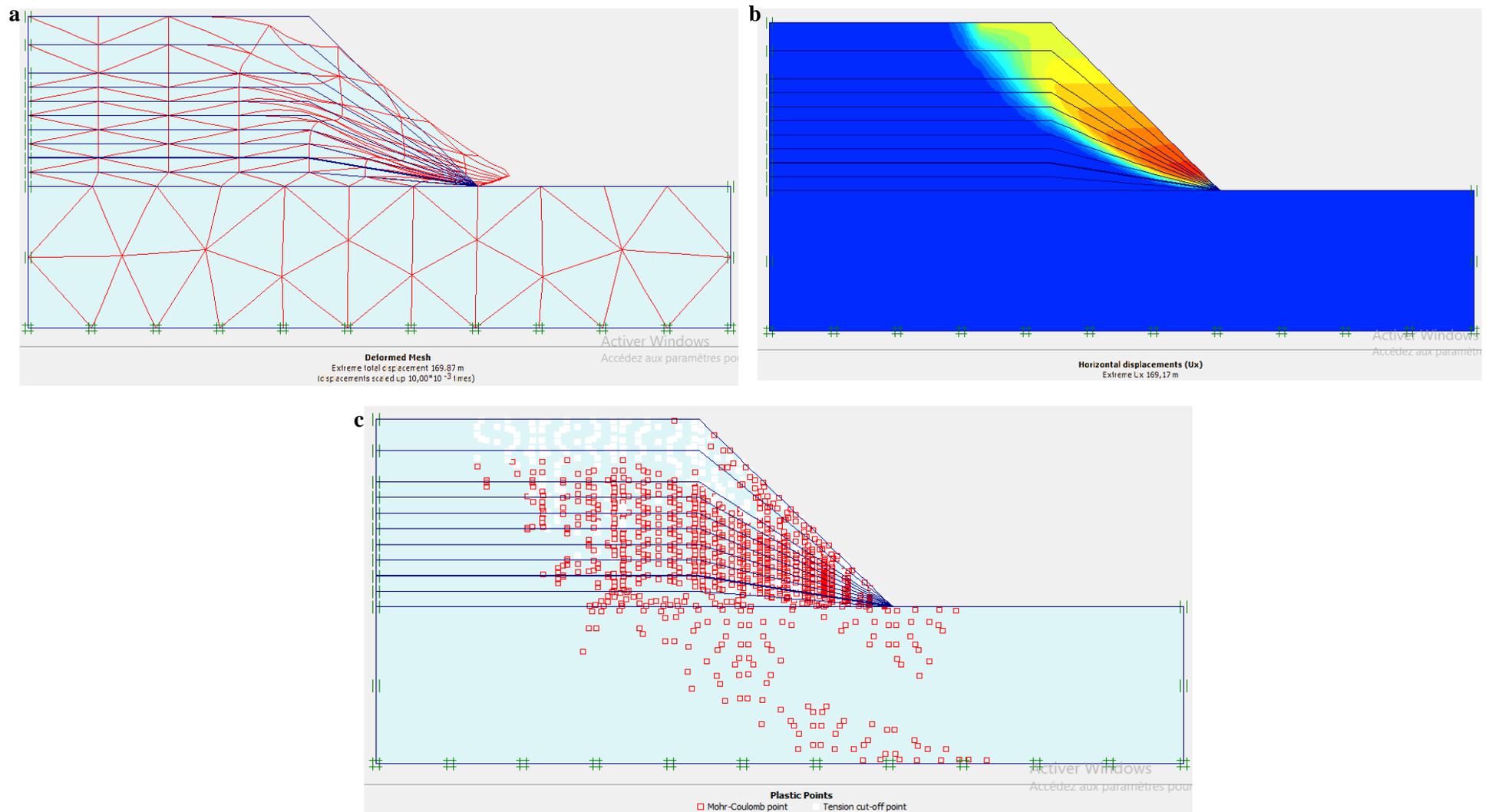


Figure 3.16: Phase 2 avec le niveau de saturation 1 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 1.5 m à partir de la bas de la pente :

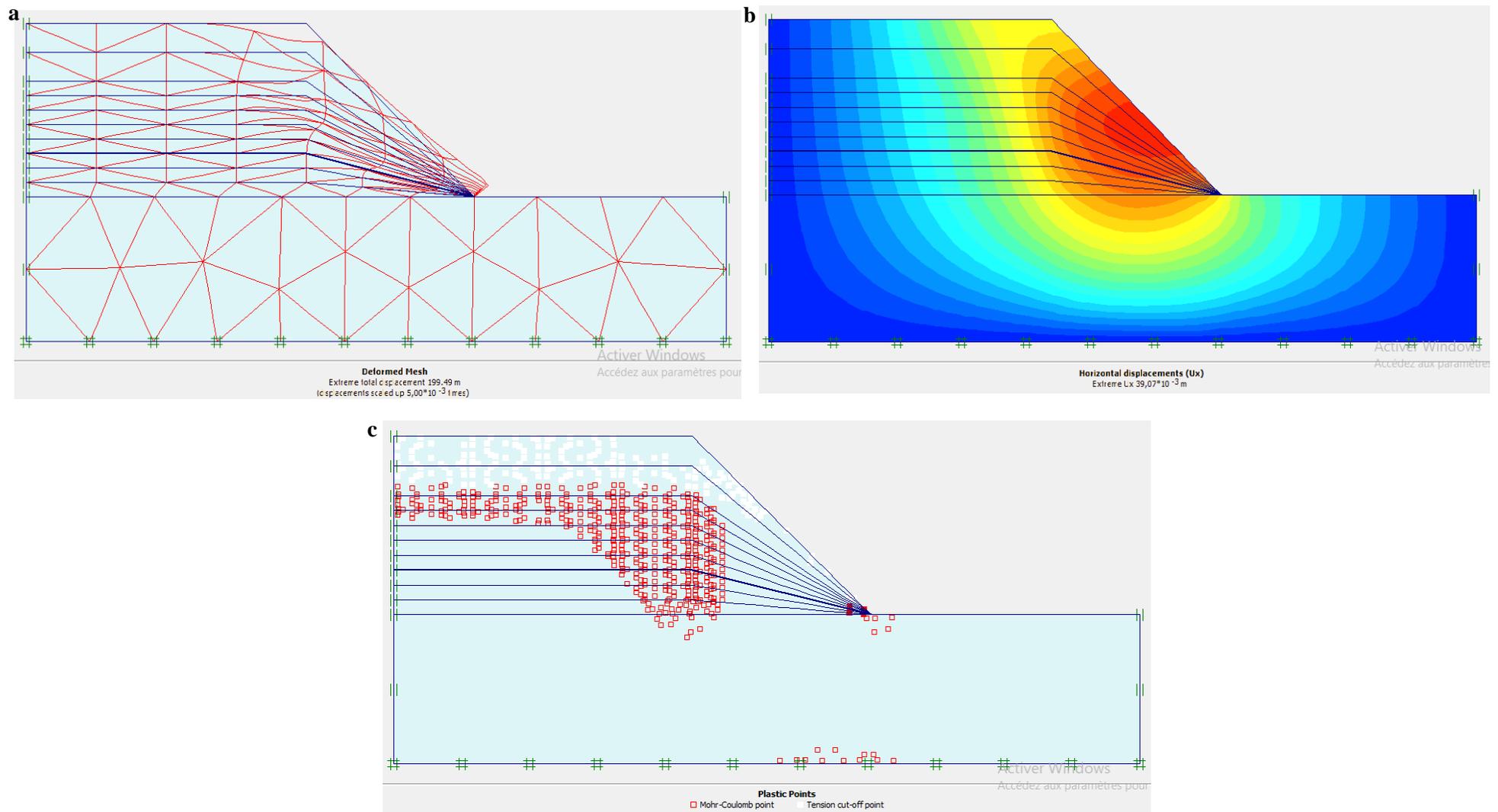


Figure 3.17: Phase 1 avec le niveau de saturation 1,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 1.5 m à partir de la bas de la pente :

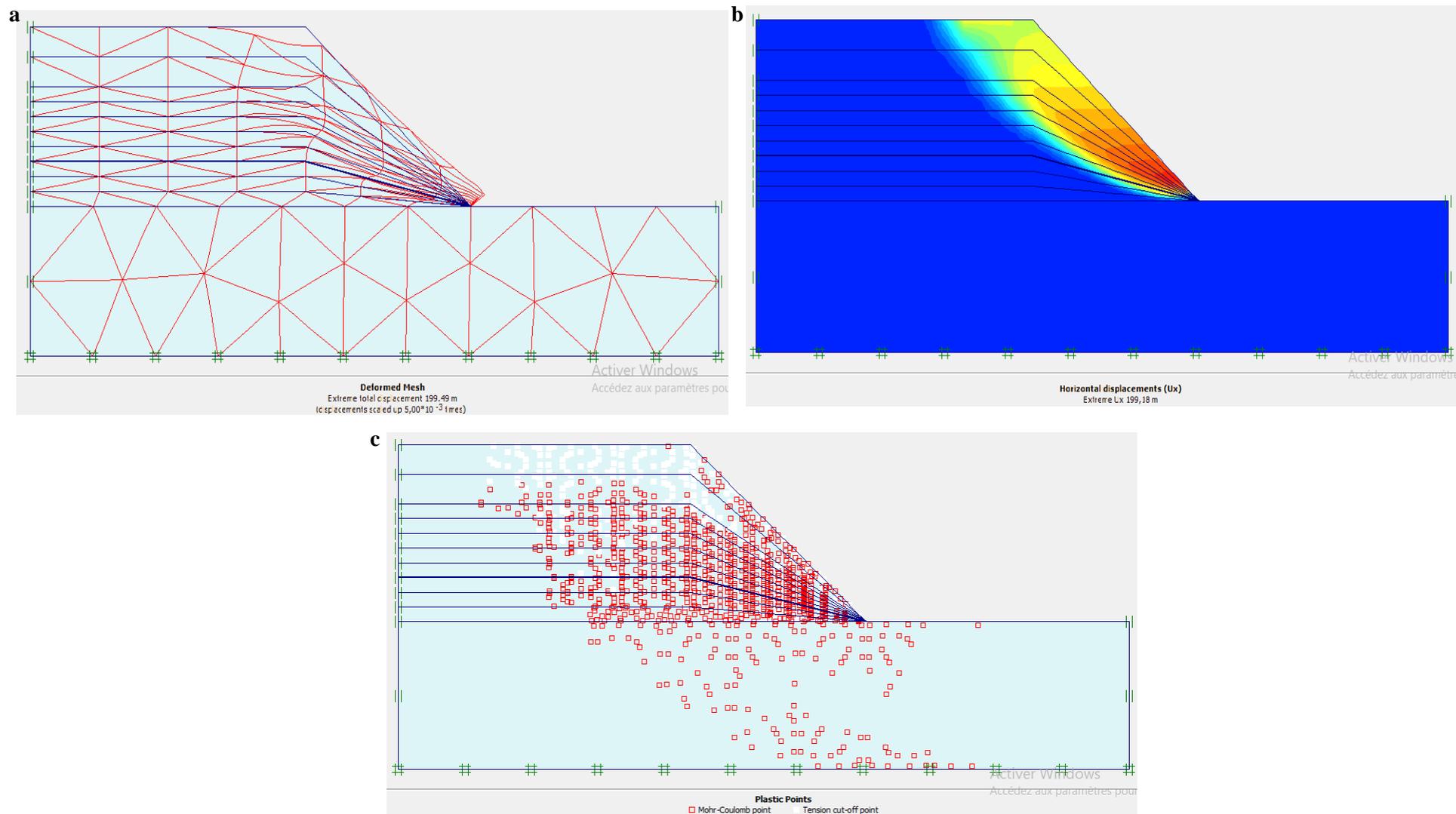


Figure 3.18: Phase 2 avec le niveau de saturation 1,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 2 m à partir de la bas de la pente :

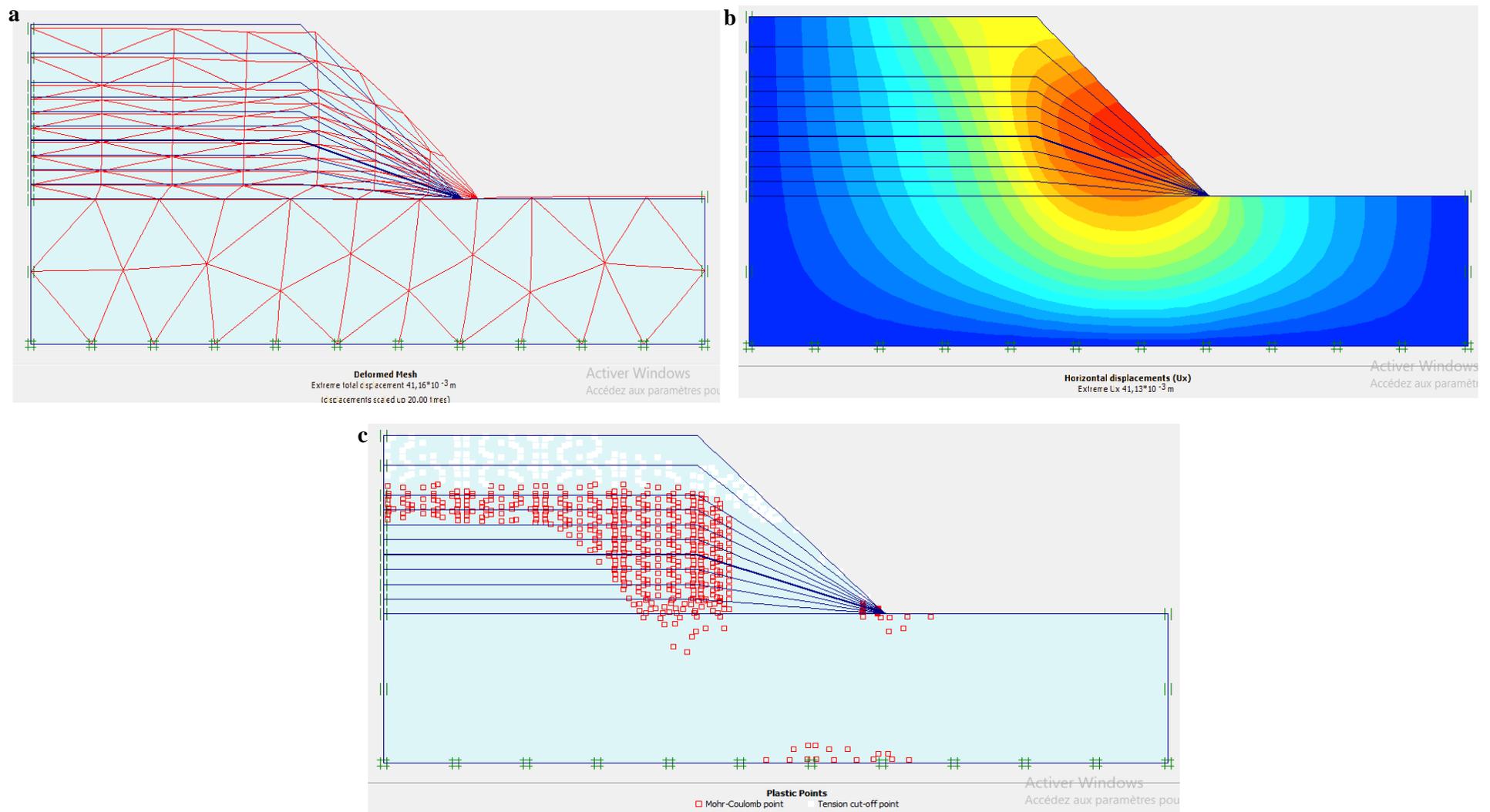


Figure 3.19: Phase 1 avec le niveau de saturation 2 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 2 m à partir de la bas de la pente :

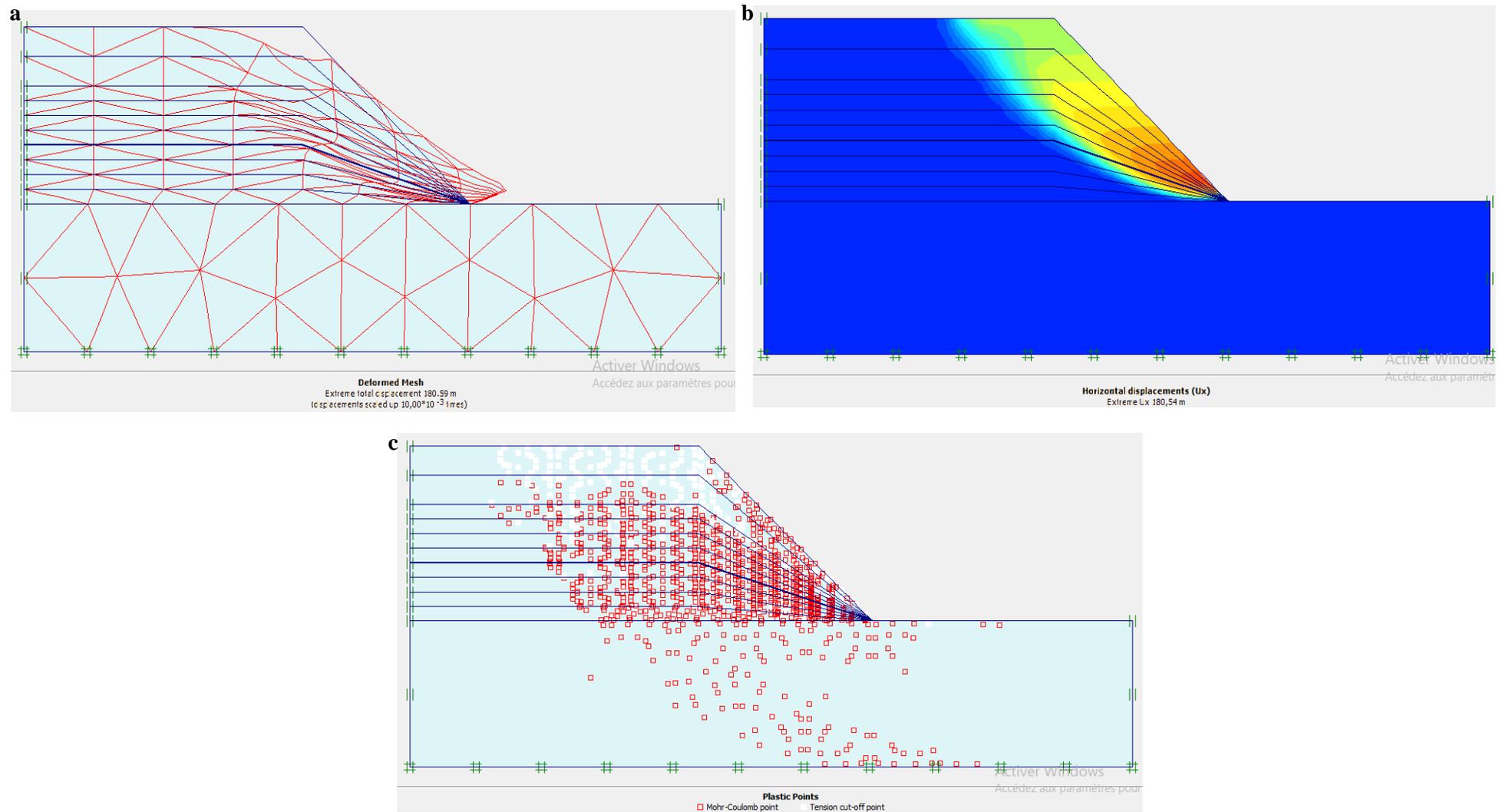


Figure 3.20: Phase 2 avec le niveau de saturation 2 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 2.5 m à partir de la bas de la pente :

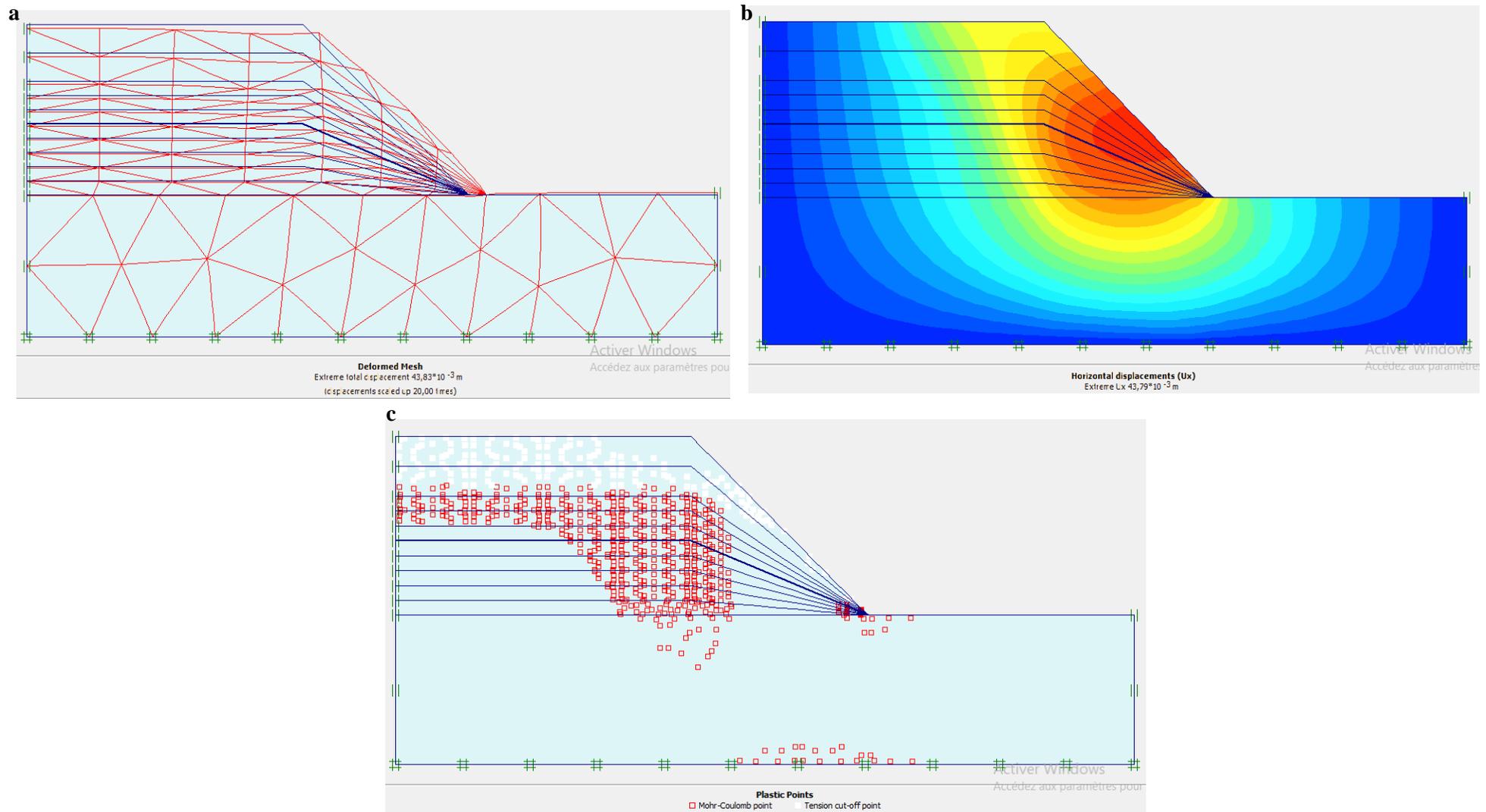


Figure 3.21: Phase 1 avec le niveau de saturation 2,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 2.5 m à partir de la bas de la pente :

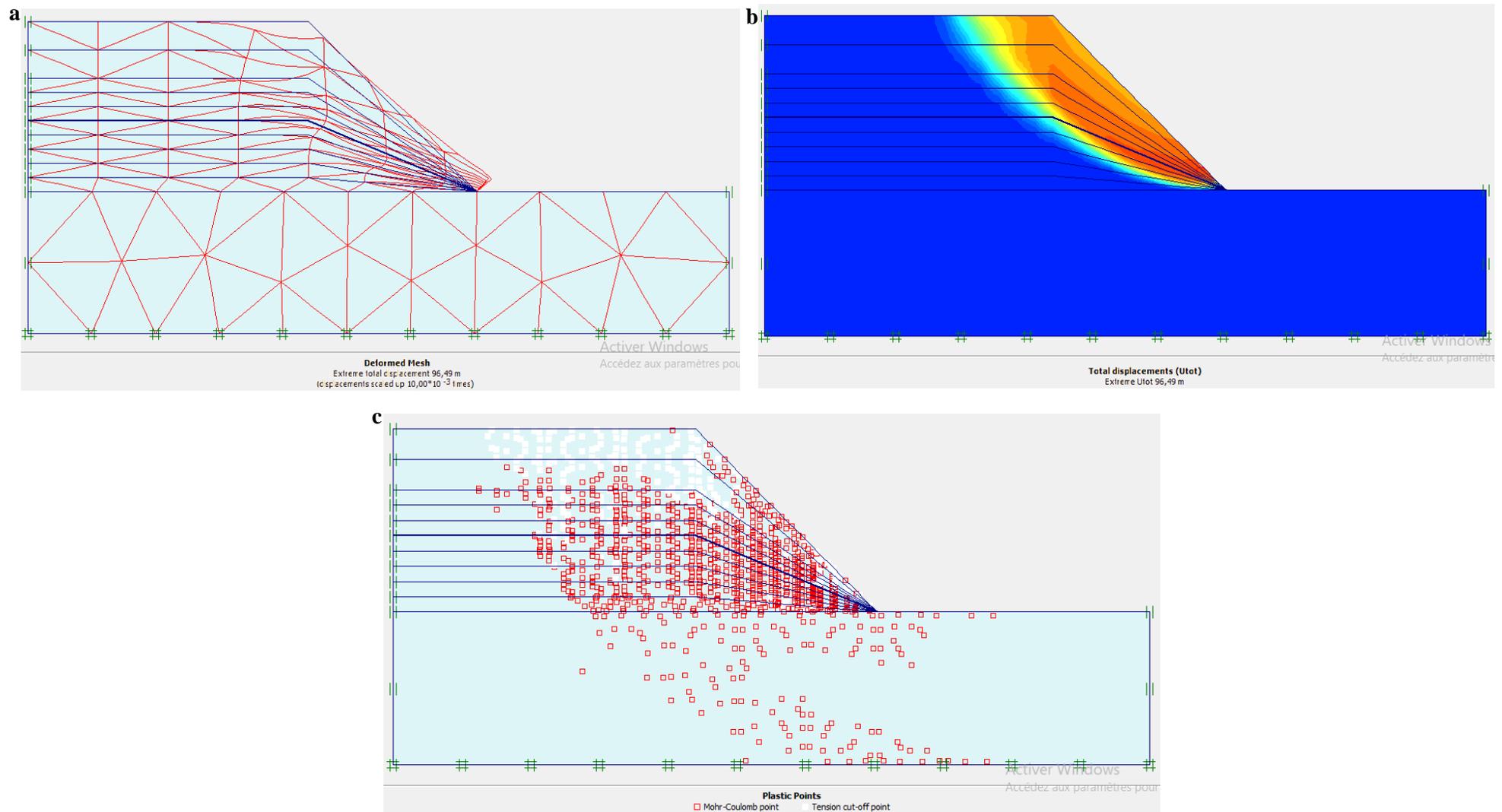


Figure 3.22: Phase 2 avec le niveau de saturation 2,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 3 m à partir de la bas de la pente :

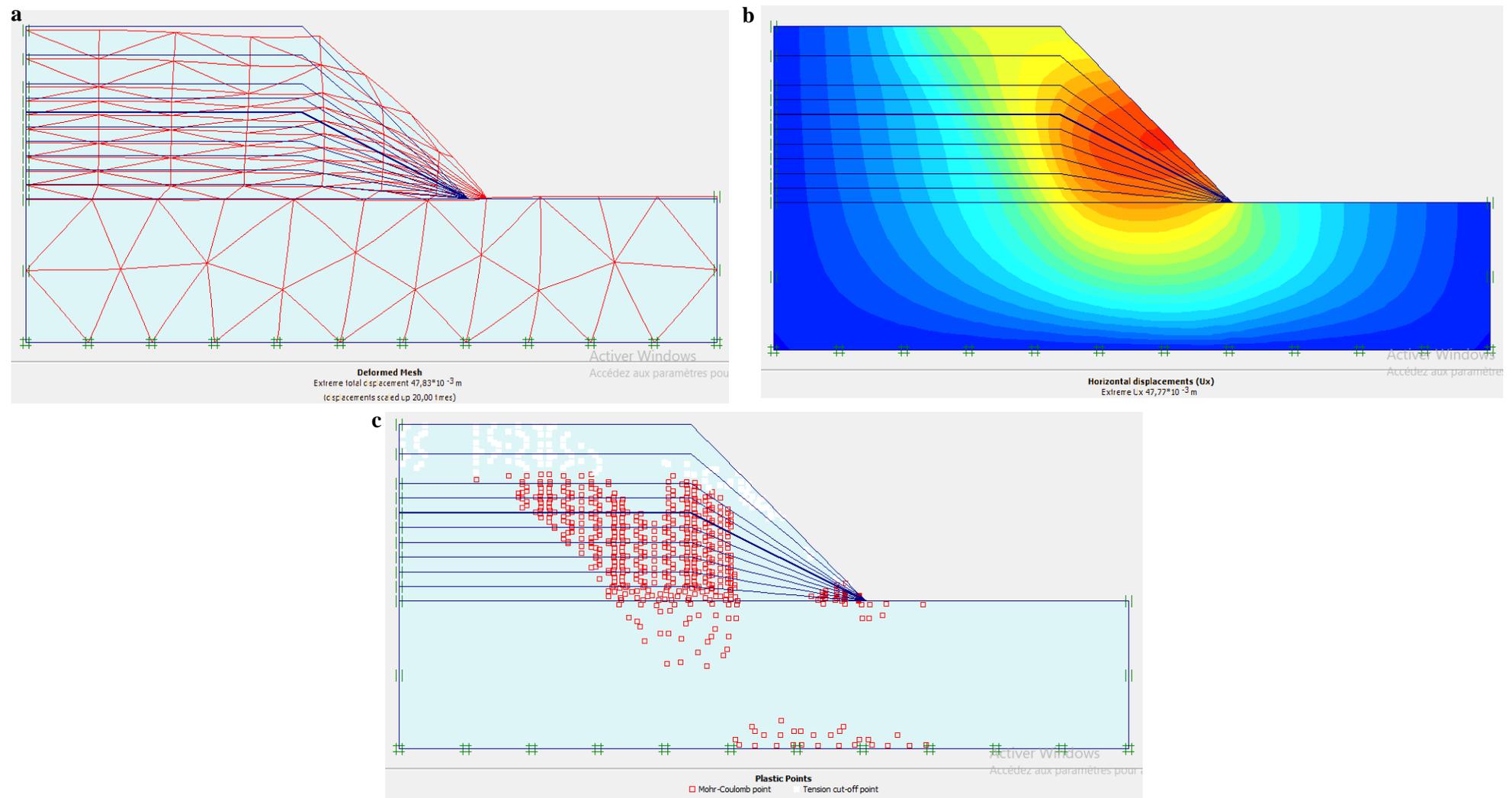


Figure 3.23: Phase 1 avec le niveau de saturation 3 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 3 m à partir de la bas de la pente :

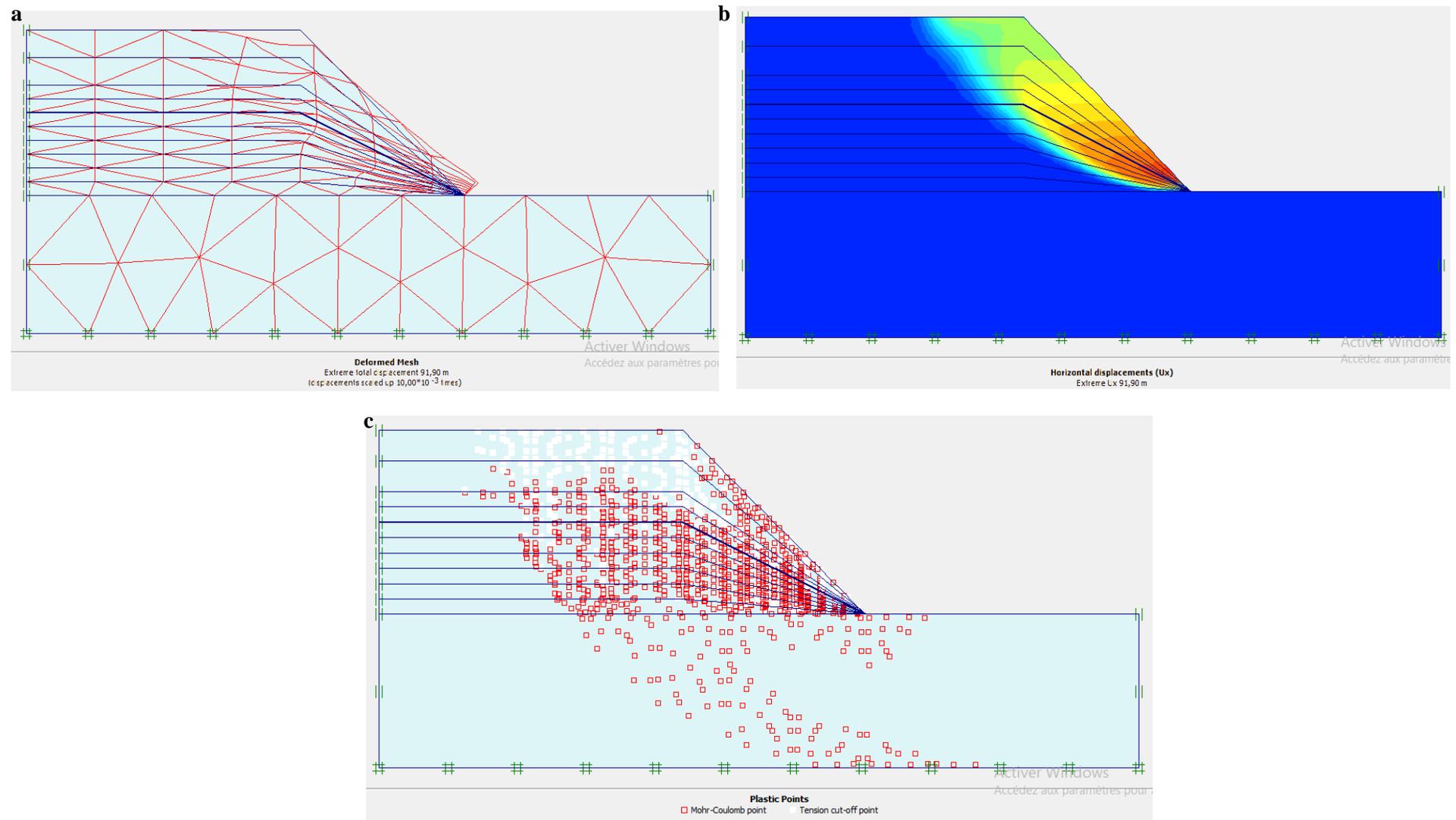


Figure 3.24: Phase 2 avec le niveau de saturation 3 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 3.5 m à partir de la bas de la pente :

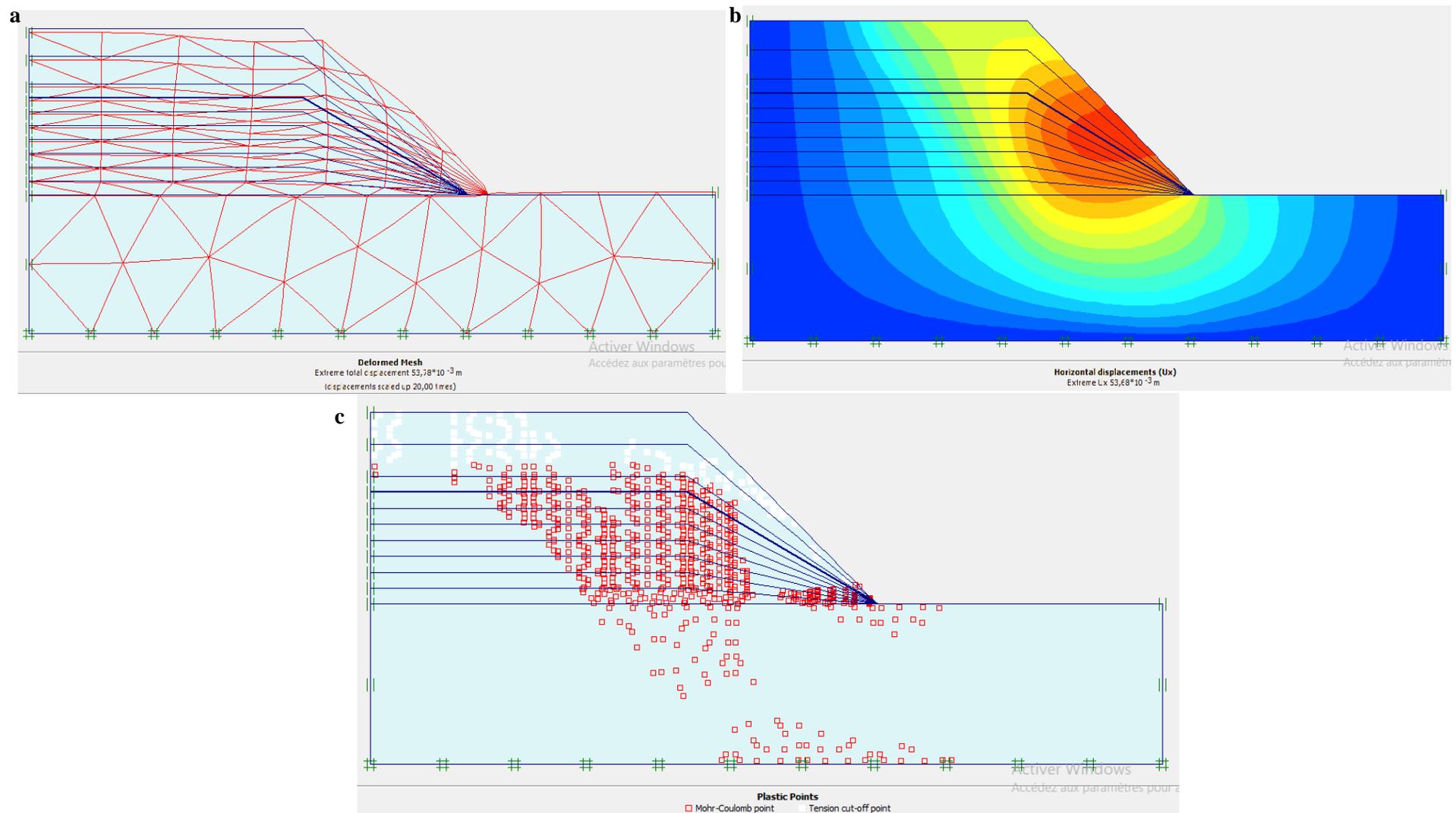


Figure 3.25: Phase 1 avec le niveau de saturation 3,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 3.5 m à partir de la bas de la pente :

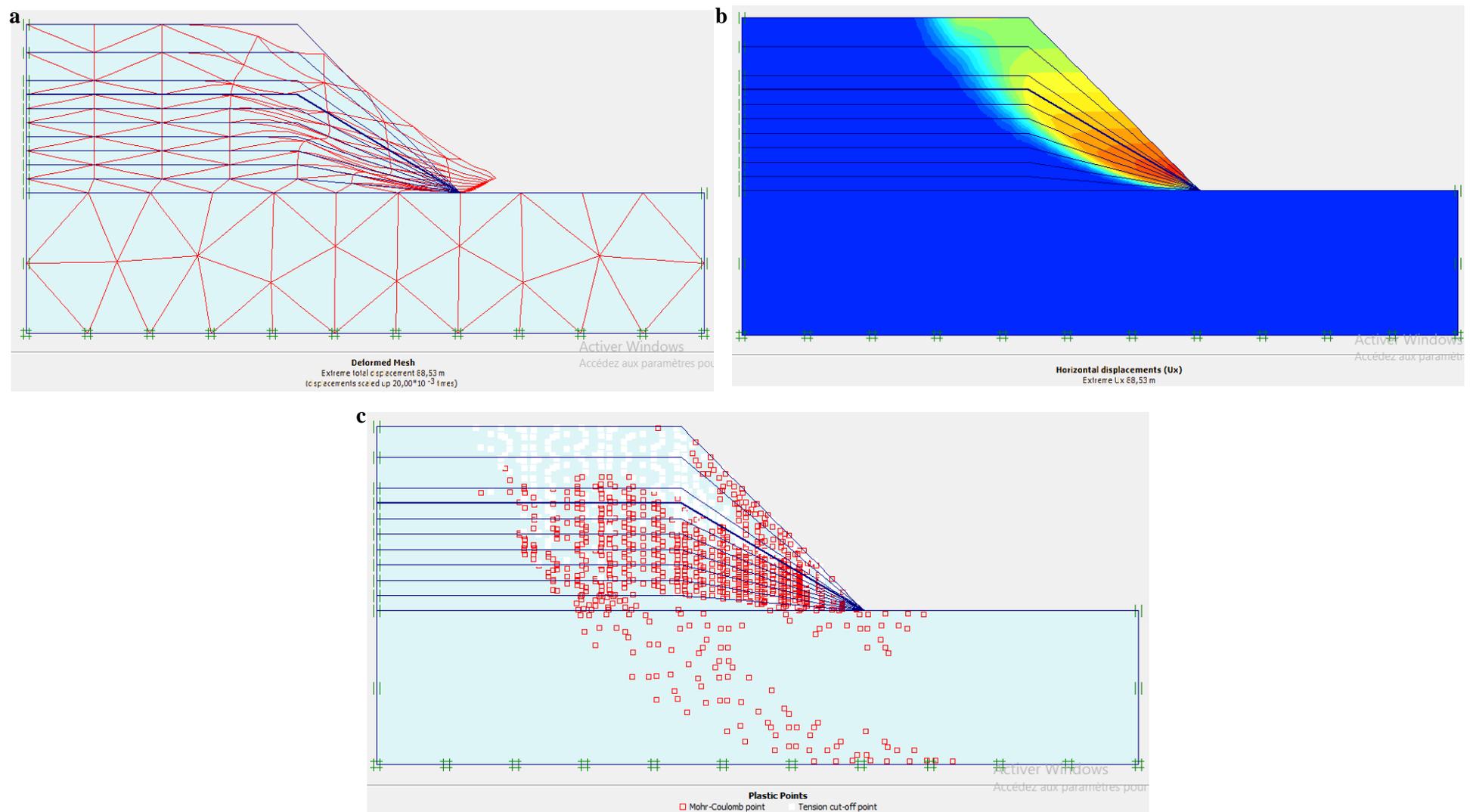


Figure 3.26: Phase 2 avec le niveau de saturation 3,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 4 m à partir de la bas de la pente :

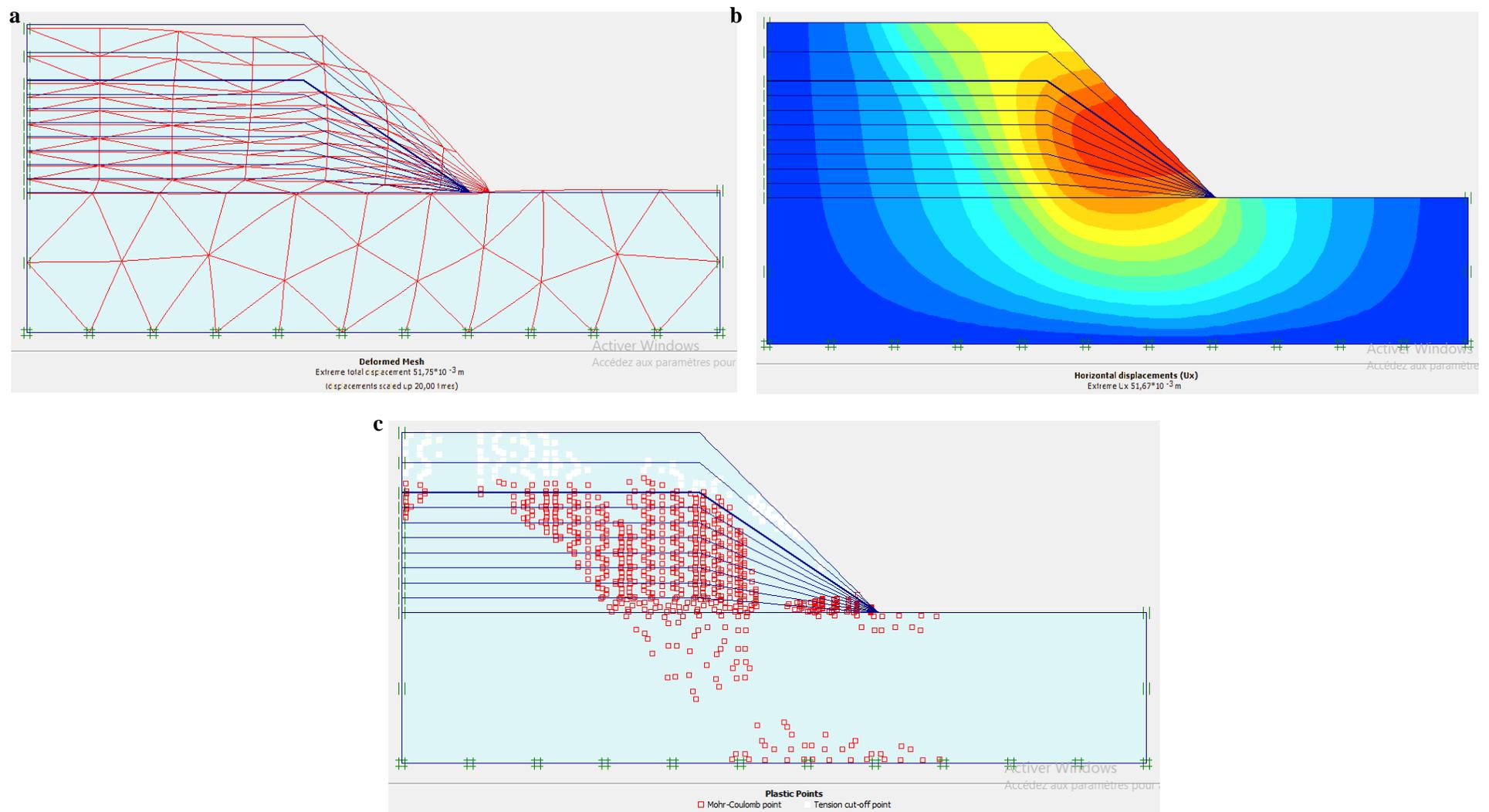


Figure 3.27: Phase 1 avec le niveau de saturation 4 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 4 m à partir de la bas de la pente :

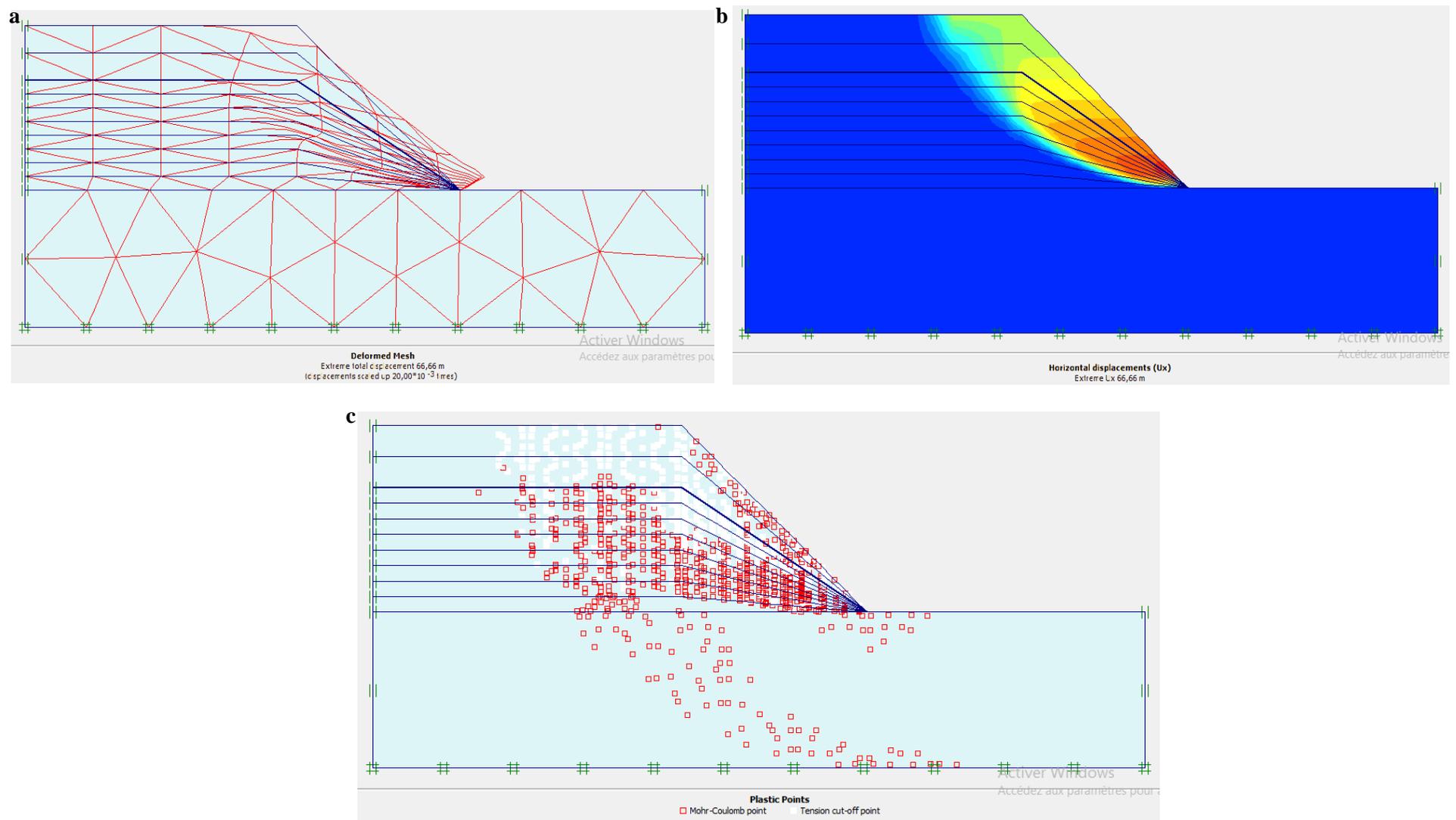


Figure 3.28: Phase 2 avec le niveau de saturation 4 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 1 avec le niveau de saturation 4.5 m à partir de la bas de la pente :

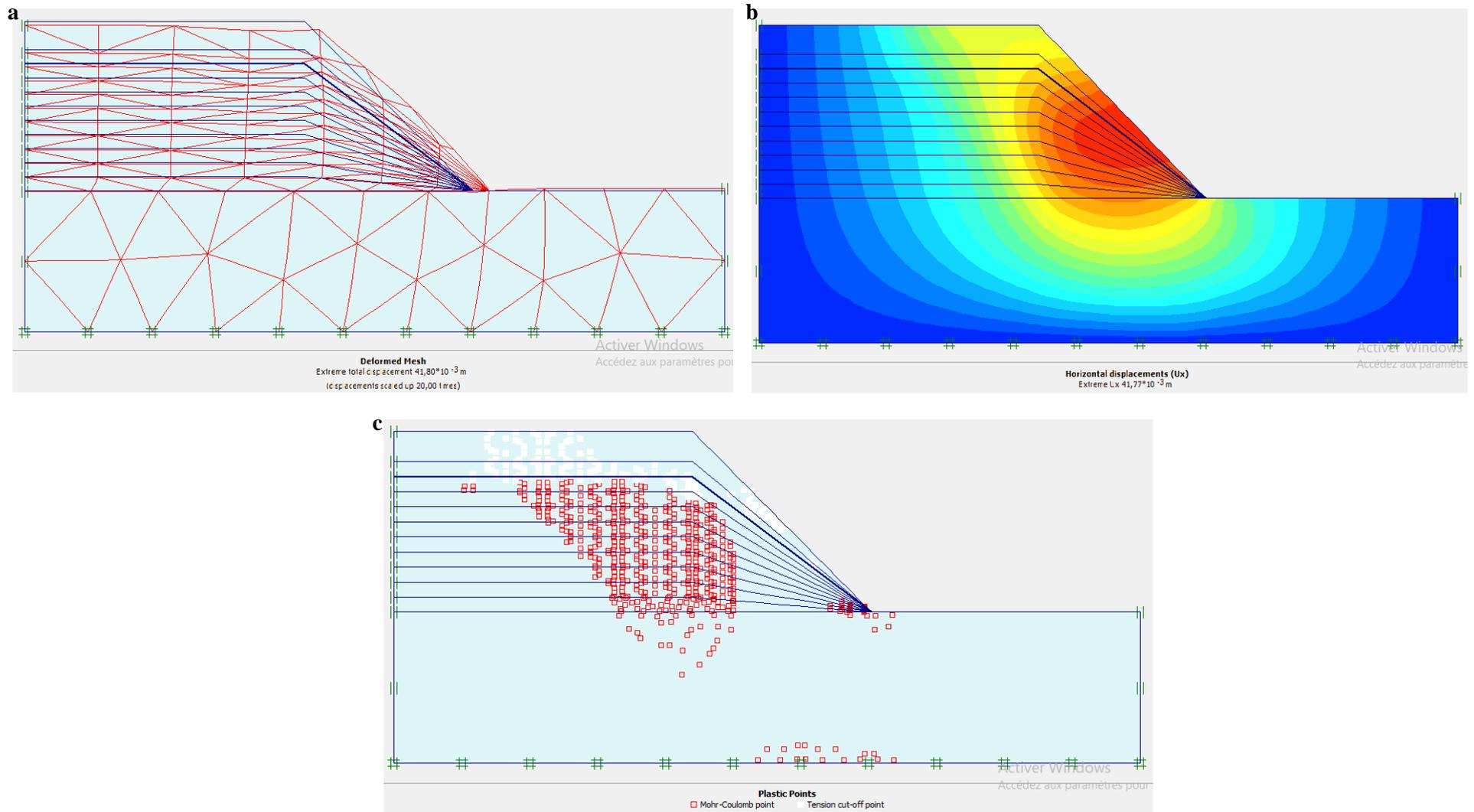


Figure 3.29: Phase 1 avec le niveau de saturation 4,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

Application du phase 2 avec le niveau de saturation 4.5 m à partir de la bas de la pente :

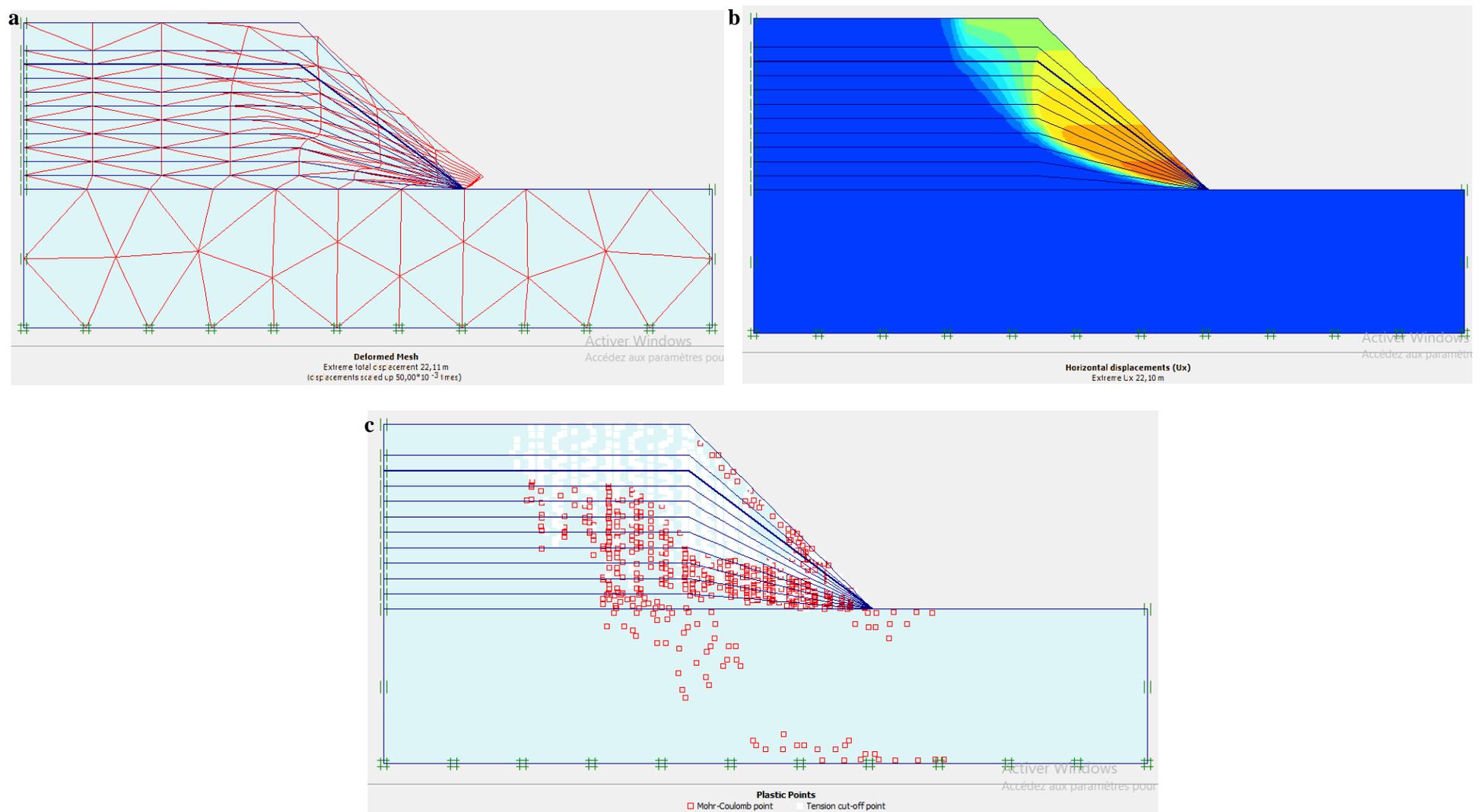


Figure 3.30: Phase 2 avec le niveau de saturation 4,5 m (a. Déformation de maillage, b. Déplacement horizontal, c. Points plastiques).

4. Comparaison et interprétation des résultats :

La comparaison entre le résultat de la méthode numérique en élément fini à l'aide de logiciel PLAXIS et les méthodes classiques en équilibre limite, est représentée par le tableau suivant :

Tableau 3.2: Valeurs facteur de sécurité par les méthodes MEL, MEF et code plaxis en fonction de variation de niveau de saturation.

Hauteur	M E L					M E F	
	Fellinus	Bishop	Jambu	Morgenster	Spencer	Mohr	Plaxis
0	1,18	1,22	1,22	1,23	1,22	1,2	1,171
0,5	1,17	1,22	1,21	1,23	1,22	1,19	1,17
1	1,17	1,2	1,2	1,21	1,2	1,15	1,17
1,5	1,16	1,19	1,19	1,203	1,19	1,13	1,166
2	1,15	1,15	1,17	1,198	1,15	1,12	1,146

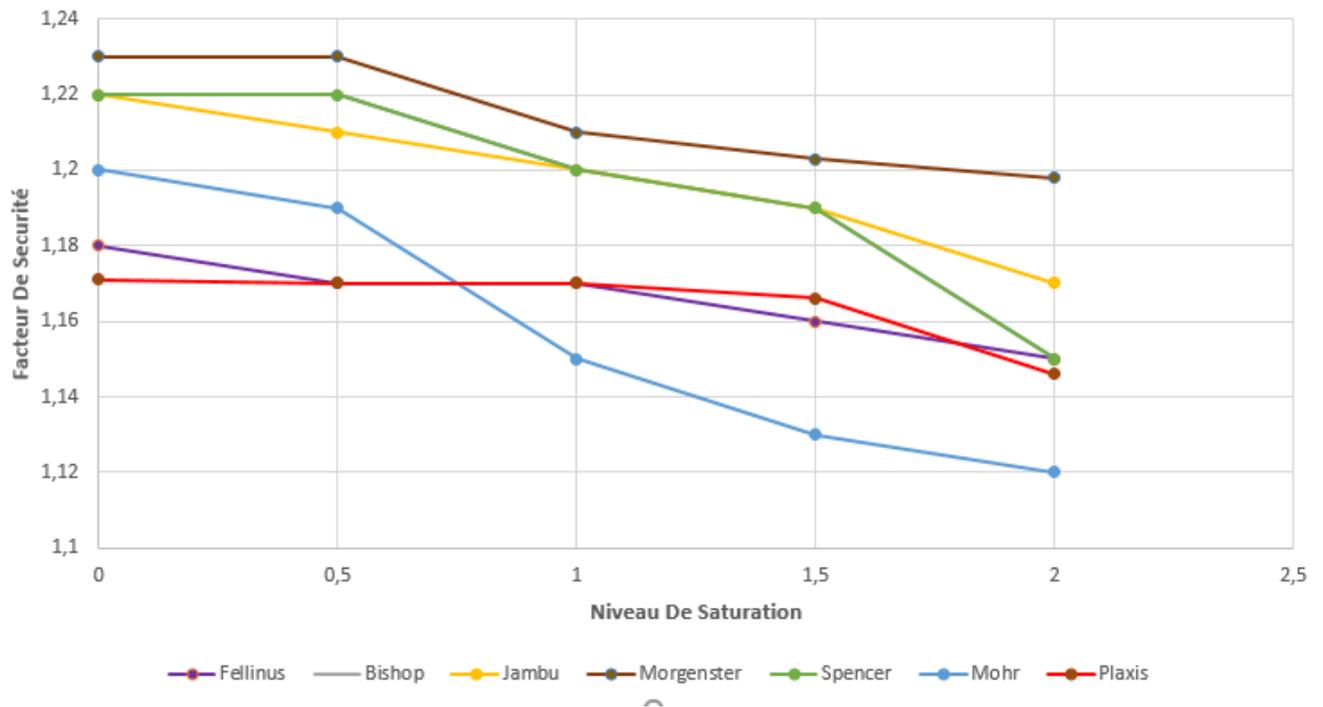


Figure 3.31: Courbes du facteur de sécurité par les méthodes MEL , MEF et code plaxis en fonction de variation de niveau de saturation.

Commentaire : Les résultats des facteurs de sécurités obtenus par la méthode dite Phi-c réduction en élément fini dans le code PLAXIS sont proche aux résultats calculés par la méthode de Fellinus.

5. Conclusion :

L'analyse de la stabilité d'un terrain au glissement est une opération complexe dans la mesure où une multitude d'aspect s'interfèrent, notamment l'incertitude sur les paramètres géotechniques.

Le mécanisme de glissement est en outre complexe et n'est décrit par les méthodes de calcul de stabilité des talus que d'une manière simpliste.

Dans ce mémoire, nous avons effectué une modélisation numérique par le code des éléments finis Plaxis d'un talus sous la variation de niveau de saturation.

Les méthodes d'équilibre limite sont les plus classiques en mécanique des sols mais elles nécessitent une prédétermination des lignes de rupture. Quant aux méthodes par éléments finis dans laquelle la courbe de glissement la plus probable se déduit naturellement de l'analyse de l'état des contraintes et de déformation, elles nécessitent la connaissance des caractéristiques du massif en plus de celles de résistance.

Le calcul par la méthode dite "phi-c reduction" implémenté dans le code PLAXIS en éléments finis donne des valeurs en termes de coefficient de sécurité très proches de ceux calculés par la méthode de Fellinus.

Cette étude nous a permis de mettre en évidence que les résultats obtenus par l'analyse de deux approches, malgré que leurs principes soient totalement différents sont plus au moins comparables.

CHAPITRE IV :
ETUDE PARAMETRIQUE

1. Introduction :

Après la modélisation numérique et l'obtention des résultats, qui étaient l'objectif principale de notre étude on envisagera l'étude paramétrique pour savoir l'influence de quelques paramètres sur la variation de nos résultats.

On se propose dans l'étude paramétrique une étude de la stabilité.

- 1- Etude du niveau de saturation critique.
- 2- Influence de la variation de surcharge.
- 3- Influence de l'effet d'écoulement.

Dans cette étude la comparaison sera faite sur 2 types de résultats :

- 1- Les déplacements dans le déplacement horizontal du sol.
- 2- Le Facteur de sécurité.

2. Etude de niveau de saturation critique :

Nous avons étudié la variation du facteur de sécurité en fonction de la variation du niveau de saturation.

Nous avons pris dix niveaux de saturation comme indique sur le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1: Valeurs du facteur de sécurité en fonction de niveau de saturation.

Niveau de saturation	Facteur de sécurité
0	1,171
0,5	1,17
1	1,17
1,5	1,166
2	1,146
2,5	1,108
3	1,059
3,5	1
4	0,937
4,5	0,867

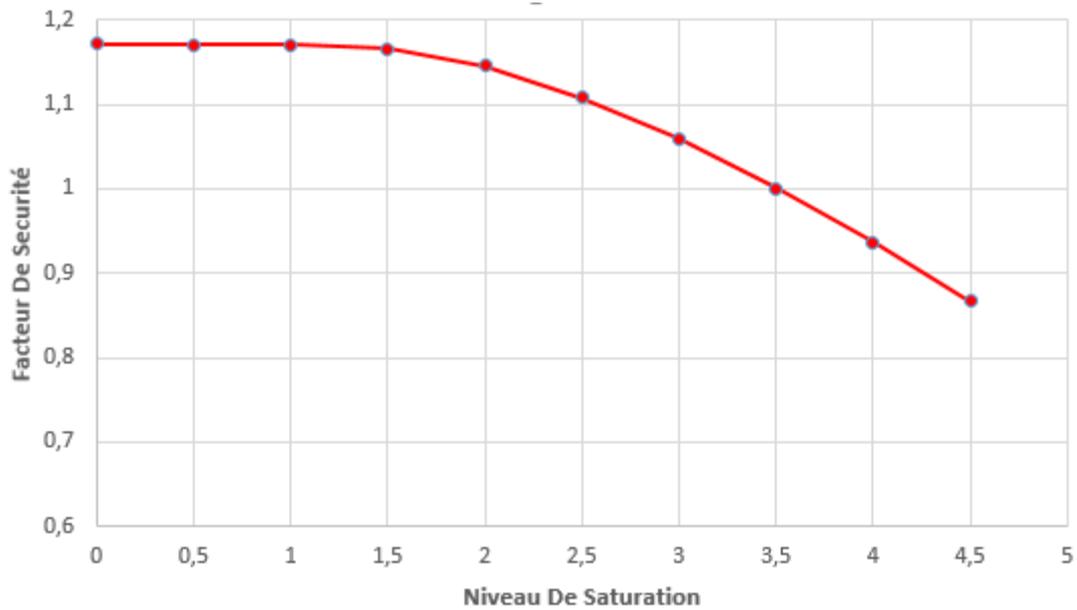


Figure 4.1: Courbe du facteur de sécurité en fonction de niveau de saturation.

Les résultats obtenus sont présentés par la courbe sur la figure, montre qu'il y'a une diminution des valeurs du facteur de sécurité en fonction de l'augmentation de niveau de saturation.

Le niveau critique de la saturation c'est environ 4 mètres.

3. Influence de la variation de surcharge :

Nous avons étudié la variation du facteur de sécurité lors du chargement du 5 KN/m^2 et 10 KN/m^2 .

- **Chargement du 5 KN/m² :**

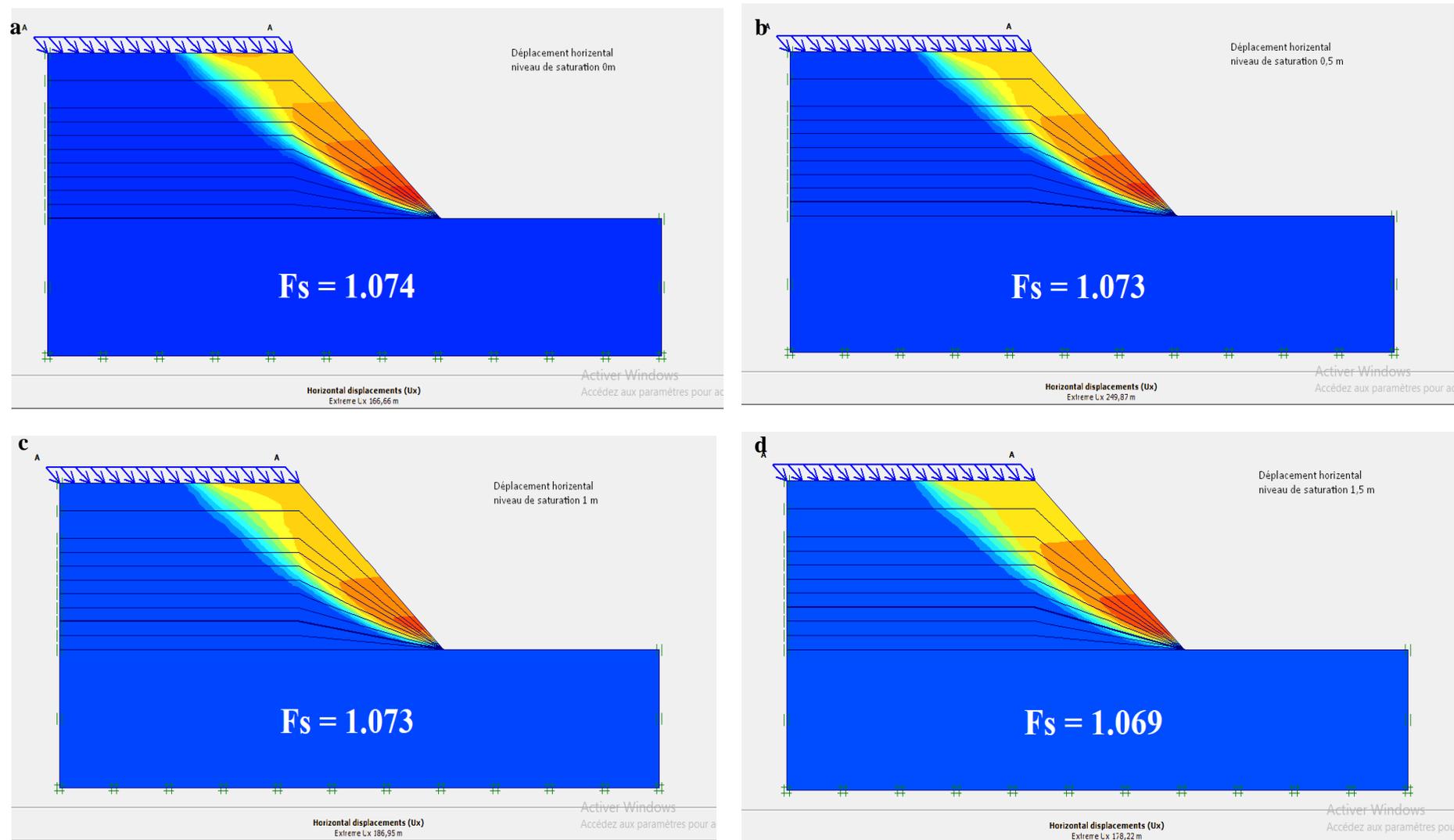


Figure 4.2: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 0 m, b. 1 m , c. 0.5 m, d. 1.5 m).

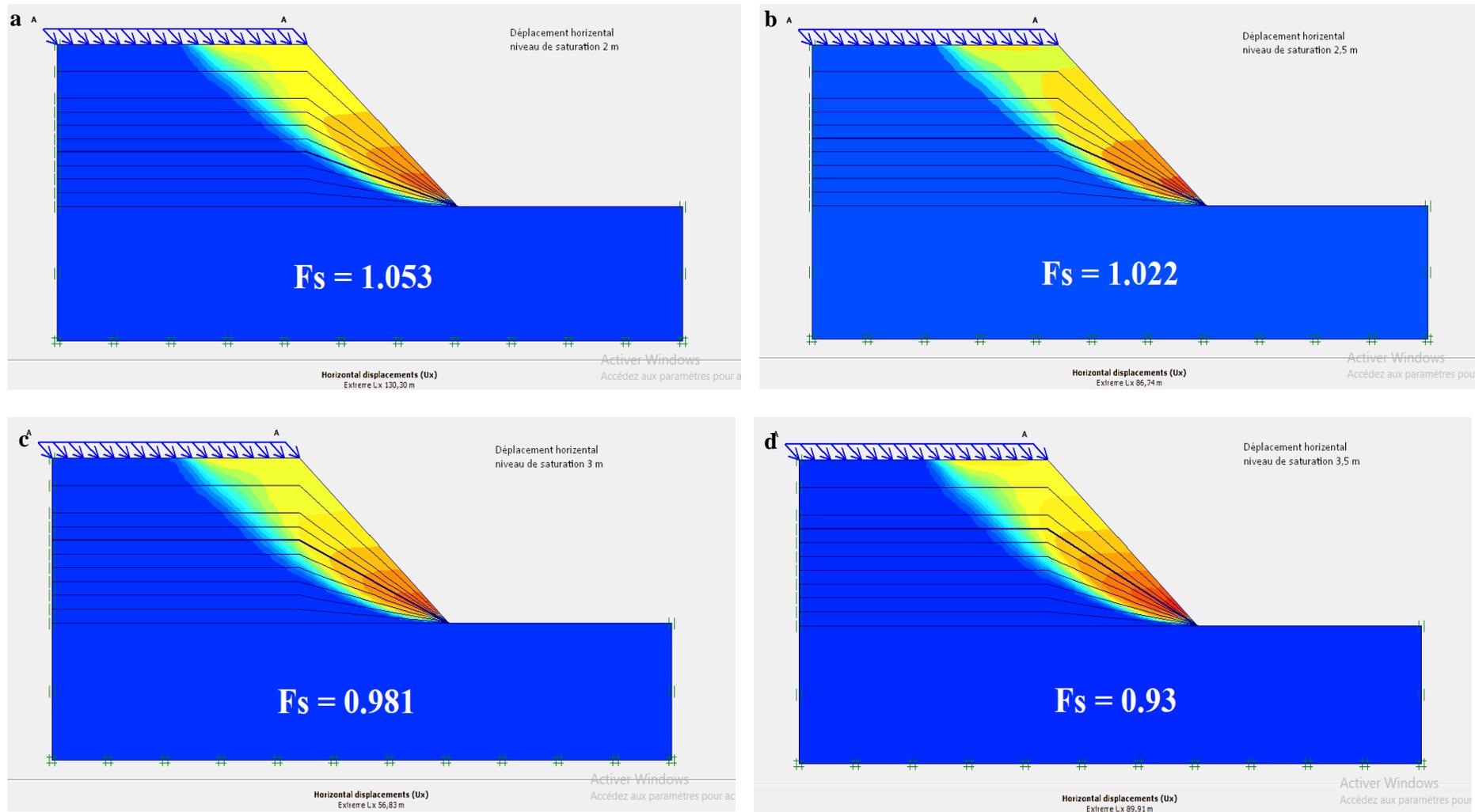


Figure 4.3: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 2 m, b. 2,5 m , c. 3 m, d. 3,5 m).

- Chargement du 10 KN/m^2 :

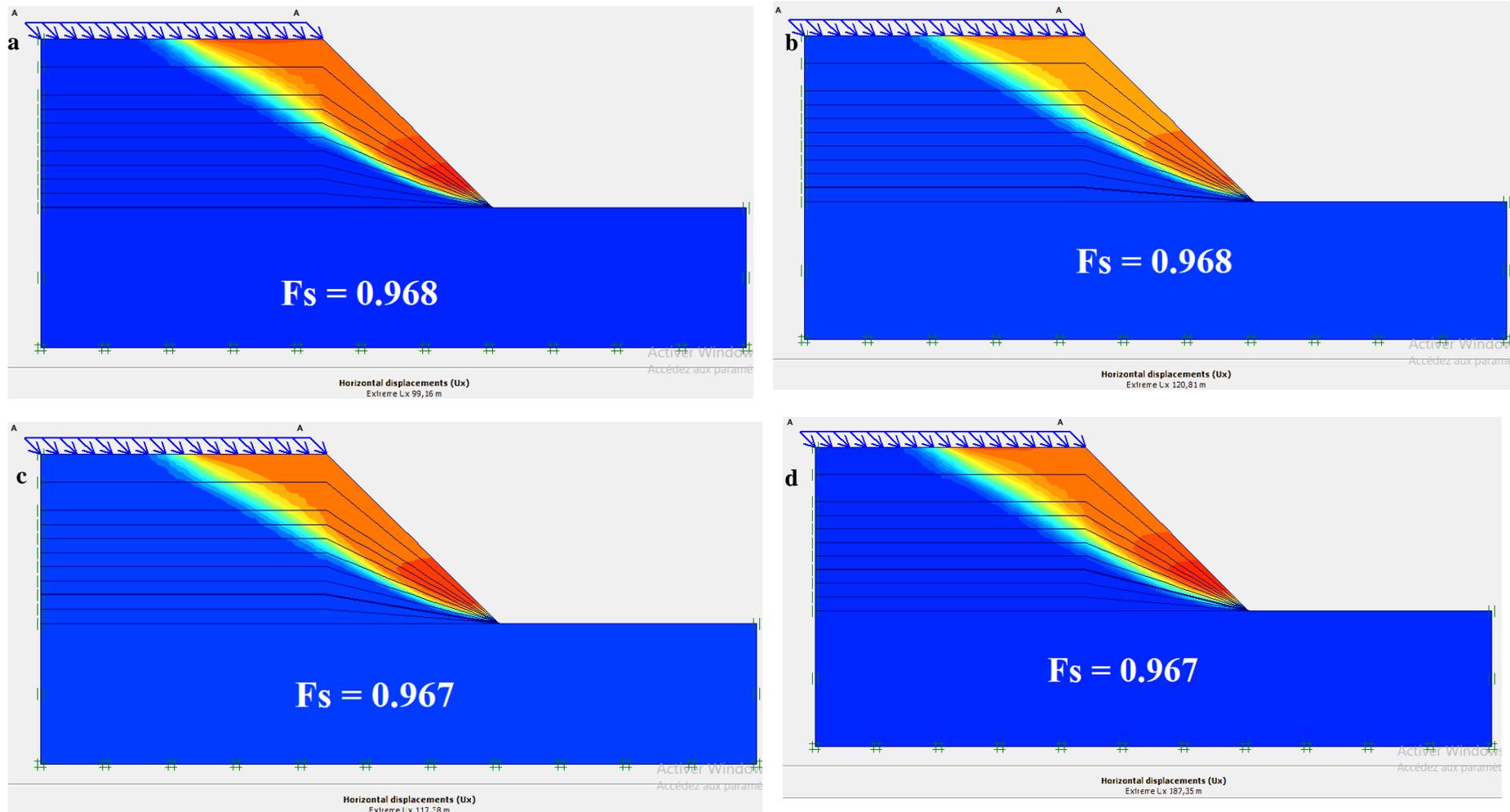


Figure 4.4: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 0 m, b. 1 m , c. 0.5 m, d. 1.5 m).

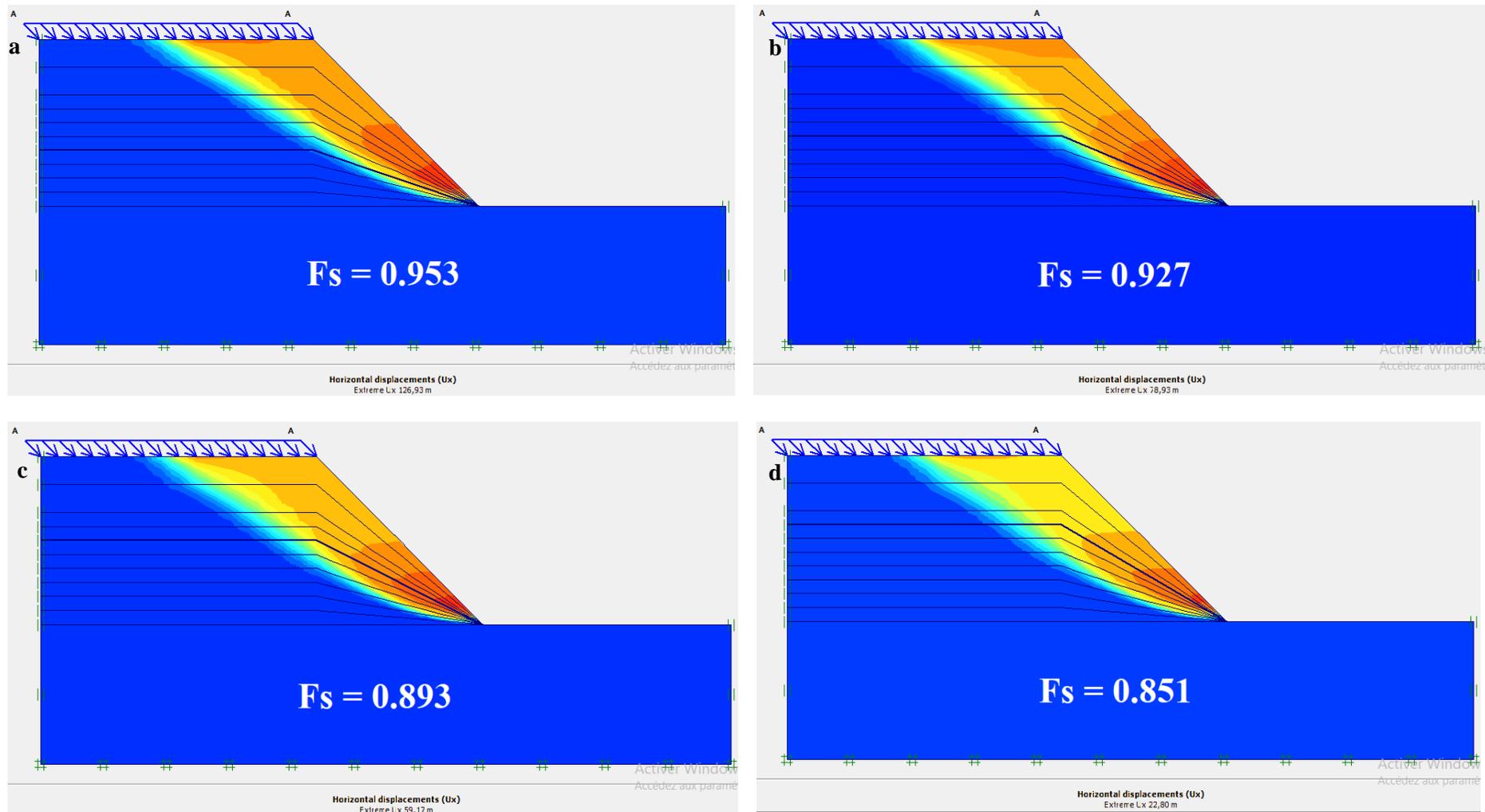


Figure 4.5: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 2 m , b. 2,5 m , c. 3 m , d. 3,5 m).

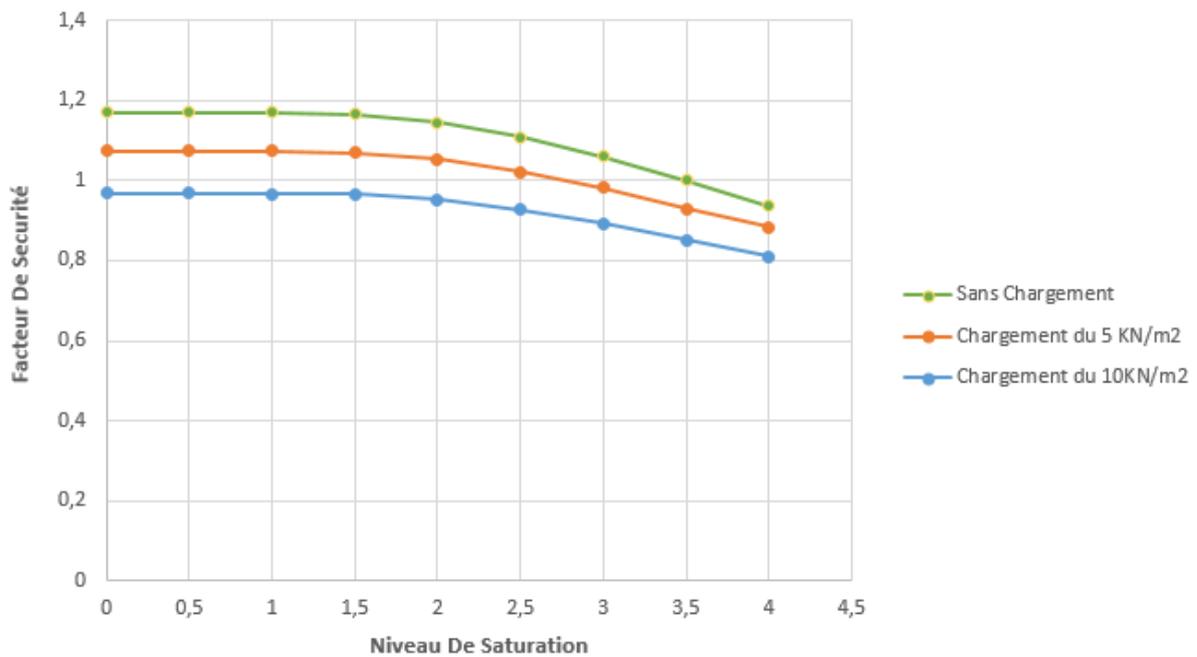


Figure 4.6: Courbes de la variation des facteurs de la sécurité en fonction du niveau de la saturation sans et avec un chargement.

Les résultats obtenus sont présentés par les courbes sur la figure montre qu'il y'a un ajustement inverse entre la charge et le facteur de sécurité, c'est-à-dire plus la charge est élevé le facteur de sécurité diminue.

4. Influence de l'effet d'écoulement :

Dans cette partie, nous avons étudié la variation du facteur de sécurité en fonction de la variation du niveau de saturation dans le cas où il y'a un écoulement d'eau.

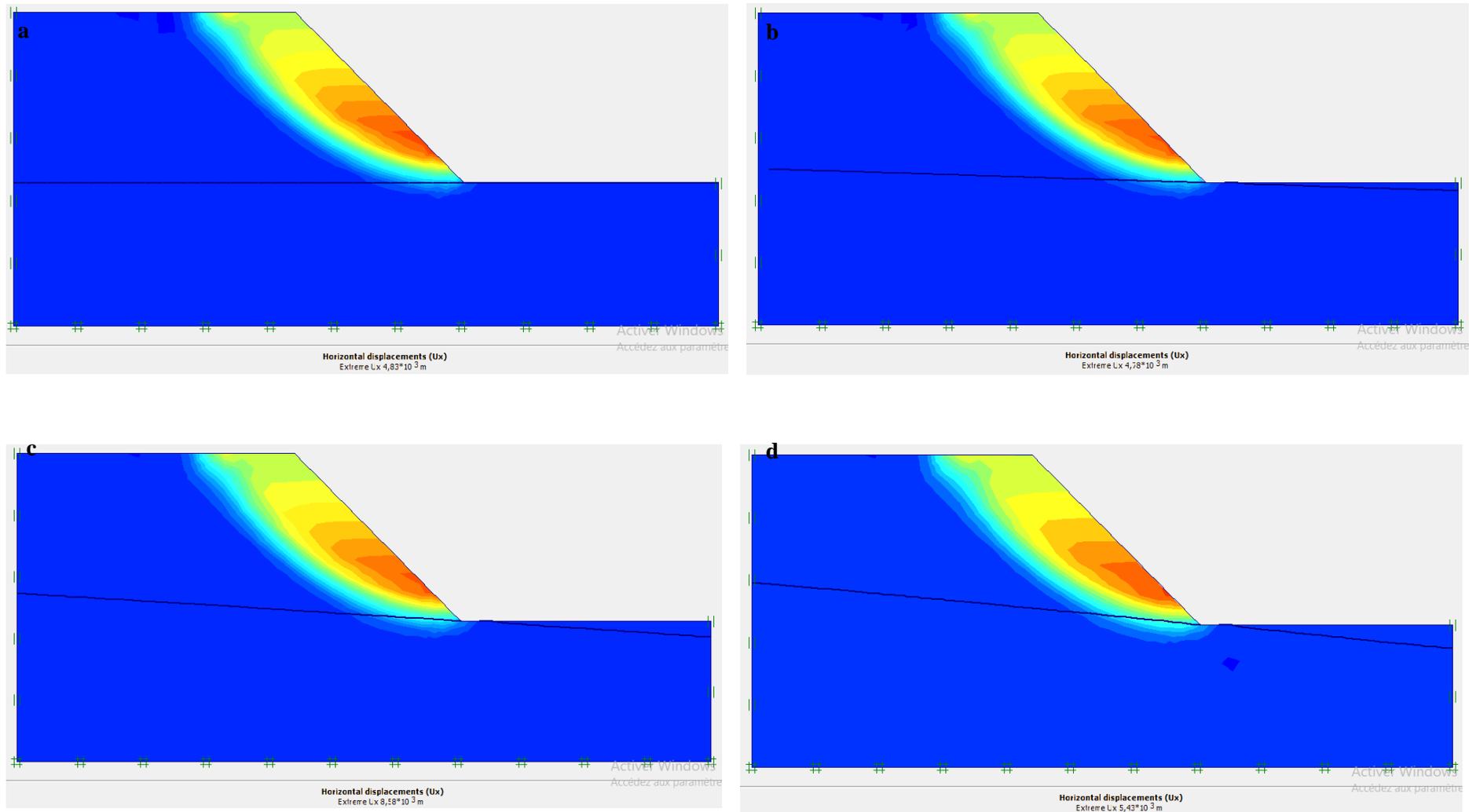


Figure 4.7: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 0 m, b. 0,5 m , c. 1 m, d. 1,5 m).

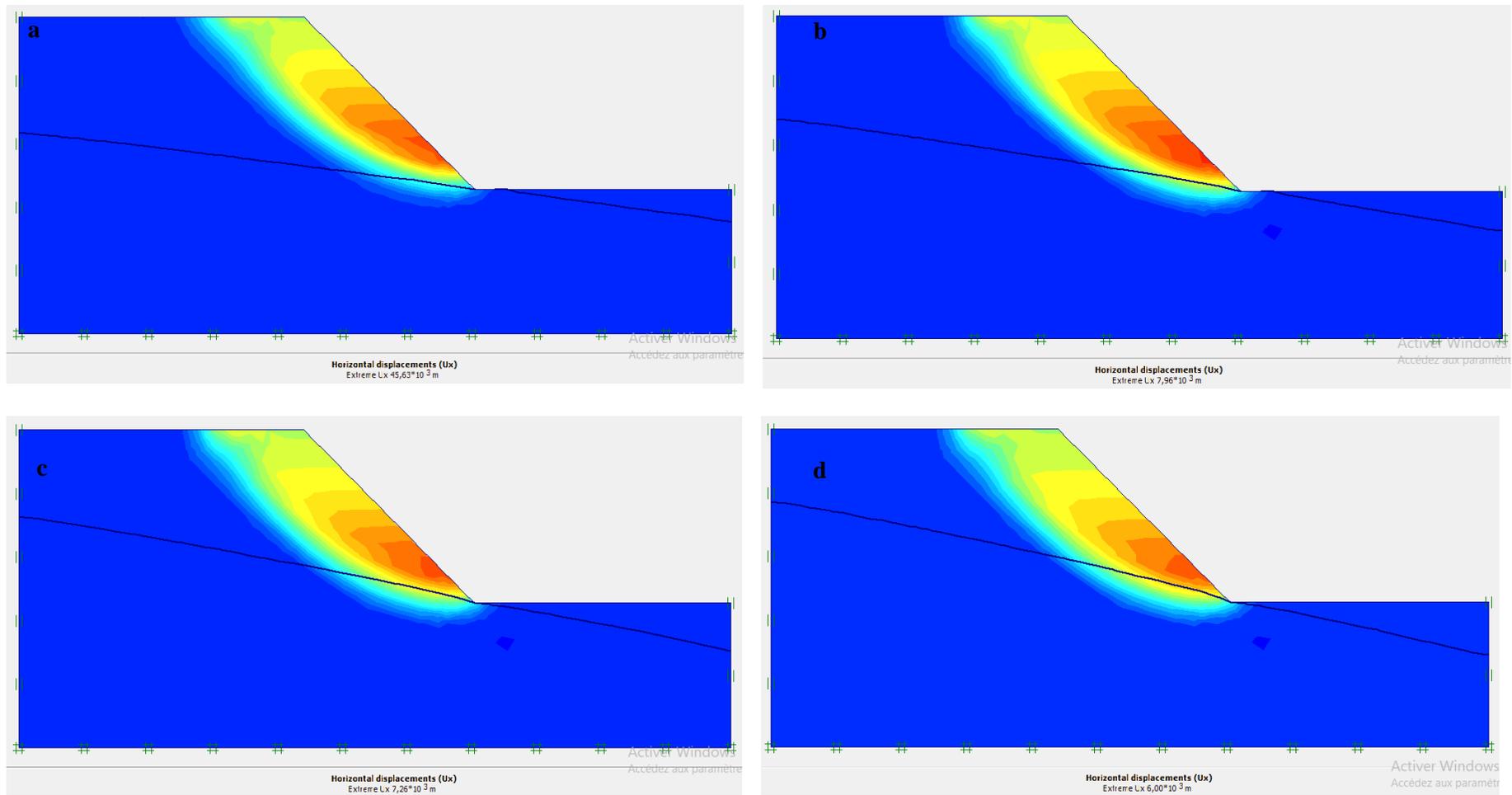


Figure 4.8: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 2 m, b. 2,5 m , c. 3 m, d. 3,5 m).

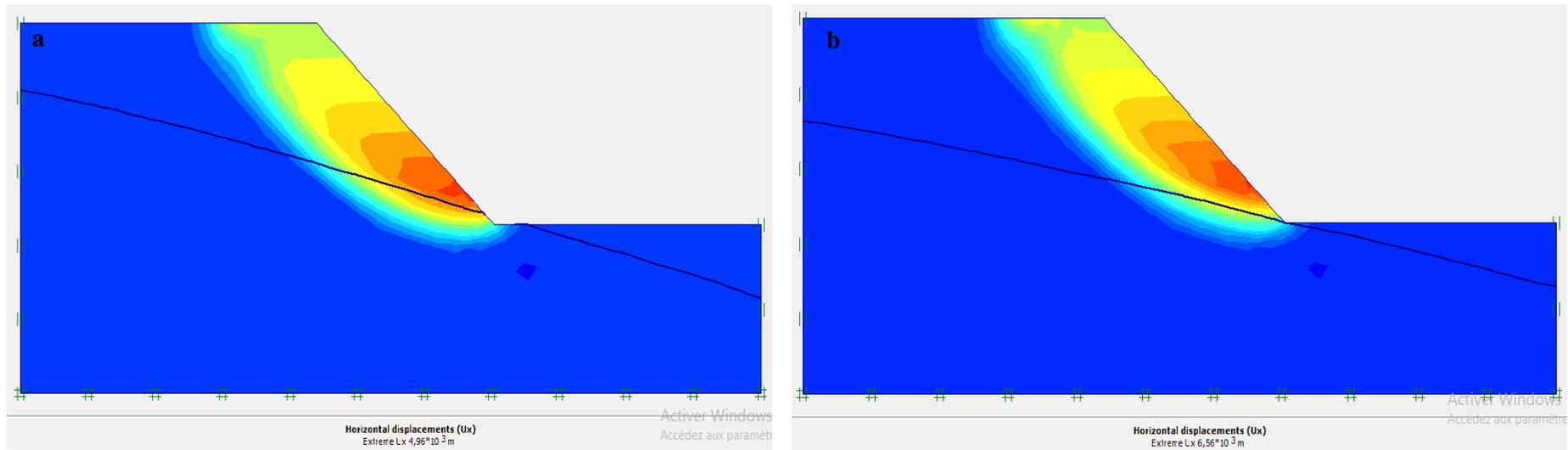


Figure 4.9: Déplacement horizontal avec niveau du saturation (a. 4 m, b. 4,5 m).

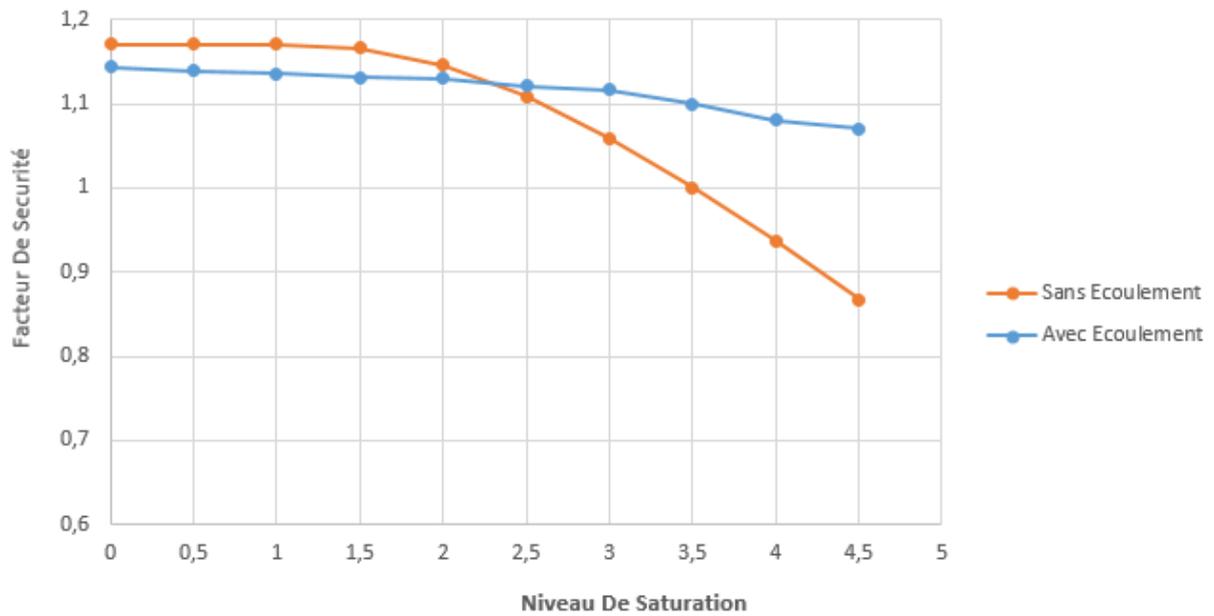


Figure 4.10: Courbes de la variation des facteurs de sécurité en fonction du niveau de saturation avec et sans écoulement.

Les résultats obtenus sont présentés par les courbes sur la figure montrant que la valeur du facteur de sécurité diminue dans le cas d'écoulement mais d'une manière moins sévère par rapport aux valeurs du facteur de sécurité obtenus dans le cas sans écoulement.

Conclusion

Conclusion

Les problèmes de stabilité des pentes intéressent aussi bien les pentes naturelles que les talus artificiels. L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est indispensable. Pour cela, toute étude de stabilité doit être précédée d'une reconnaissance géologique et géotechnique qui permettra de mettre en évidence les hétérogénéités locales ainsi que d'autres facteurs à la fois mécaniques et hydrauliques servant à connaître les principales causes d'instabilité de ces talus.

L'étude présentée dans ce mémoire analyse la stabilité du talus sous l'effet de la variation du niveau de saturation et son influence directe sur la valeur du coefficient de sécurité. Se basant sur les paramètres d'un modèle de référence choisis, et se limitant aux matériaux, aux conditions de chargement, aux conditions aux limites, aux conditions hydrauliques variables, un modèle numérique est développé. Les résultats obtenus montrent la bonne qualité de prédiction du modèle numérique proposé.

Le procédé de calcul par la méthode dite "phi-c réduction" implémenté dans le code PLAXIS en éléments finis donne des valeurs en termes de coefficient de sécurité très proches de ceux calculés par la méthode Fellinus. Nous avons observé une baisse des valeurs du facteur de sécurité en cas de l'insertion du chargement sur le talus simulant les débits et surcharge apportés par les torrents.

La valeur du facteur de sécurité diminue dans le cas d'écoulement mais d'une manière moins sévère par rapport à les valeurs du facteur de sécurité obtenus dans le cas sans écoulement.

Cette étude nous a permis de mettre en évidence que les résultats obtenus par l'analyse de deux approches (équilibre limite et éléments finis) et aussi par deux différents logiciels (Plaxis et Geo5) malgré que leurs principes soient totalement différents sont plus au moins comparables. Et montrent de manière appréciable la qualité de modélisation et analyse numérique proposée.

Aussi cette étude montre de manière évidente l'influence prépondérante de la variation du niveau de saturation sur la stabilité globale des talus, et encourage les concepteurs à prévoir des moyens de contrôle permanents des niveaux de saturation des sols constituant les talus importants pour éviter les catastrophes liées aux glissements de terrains.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Khemissa, M. (2006). Méthodes d'analyse de la stabilité et techniques de stabilisation des pentes. Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur : "Risques géotechniques et environnementaux liés à l'aménagement". INSA de Lyon, France, Ed. Kastner et al., p. III.9-III.16.
- [2] Masekanya, J.P. (2007). Stabilité des pentes et saturation partielle Etude expérimentale et modélisation numérique. Thèse de Docteur en Sciences de l'Ingénieur. Université de Liège, p. 283.
- [3] Ouzaid, I. (2014). Stabilisation des Pentes par Inclusions Rigides. Mémoire de Master en Conception et Calcul des structures. Université de Mohamed Khider – Biskra, p. 70.
- [4] Chettir., F. Z. (2015). « Etude bibliographique sur la stabilité des pentes et leurs méthodes de renforcement » ; Mémoire de master en Conception et Calcul des Structures. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [5] <https://www.catnat.net/veille-catastrophes/veille-des-catastrophes-naturelles/veille-catastrophes-monde/218-inondations-monde/26375-inondations-et-glissements-de-terrain-font-4-morts-dans-le-centre-de-l-equateur>
- [6] Das, B.M (2010) Principles of geotechnical engineering” CENGAGE Learning. Seventh Edition, USA
- [7]<http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/effondrements-affaissements>
- [8] <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/effondrements-affaissements>
- [9] <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/eboulements-chutes-pierres-blocs>
- [10] <https://www.depechedekabylie.com/kabylie/bgayet/chute-de-pierres-dans-lancien-tunnel/>
- [11] Hadbi., Z. Djelti., M. (2019). Analyse et confortement d'un glissement de talus. Mémoire de Master en Génie Civil. Université de Tlemcen, p. 115.
- [12] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/3825>
- [13] http://gerihco.engees.unistra.fr/coulee_eau_boueuse
- [14] <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/effondrements-affaissements>
- [15]https://fr.wikipedia.org/wiki/Affaissement_et_effondrement_miniers
- [16]https://fr.wikipedia.org/wiki/Tassement_du_sol#:~:text=Le%20tassement%20du%20sol%20est,fo ndations%20ou%20son%20propre%20poids.

- [17]http://www.irma-grenoble.com/04risques_rhone_alpes/risques-naturels_afficher.php?id_RSD=13#:~:text=Le%20fluage%20est%20un%20mouvement,transition%20avec%20le%20massif%20stable.
- [18]<http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/retrait-gonflement-sols-argileux#:~:text=Le%20retrait-gonflement%20des%20argiles,et%201%27ampleur%20du%20phénomène>.
- [19]https://fr.wikipedia.org/wiki/Retrait-gonflement_des_argiles
- [20] Eichenberger., J. Ferrari., A. Laloui., L. (2013). Analyses géo-mécaniques des glissements de terrain superficiels. Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles **25**, p. 279.
- [21] Chevallier., F. (2011). « Collection Prévention des risques naturels ».
- [22] http://www.aveyron.gouv.fr/IMG/pdf/2-2_risque_mvt.pdf
- [23] <https://www.anco.pro/blog/glislements-de-terrain-comment-cela-fonctionne/>
- [24] Martins-Campina., B. (2005). Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe). Thèse Doctorat, Université Bordeaux 1. p. 271.
- [25]<http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/glislements>
- [26] https://www.m-habitat.fr/preparer-son-projet/preparation-du-terrain/les-glislements-de-terrain-3206_A
- [27] Rue H Ibn Naamane. (2003). Rapport sur L'urbanisation et les risques naturels ; et industriels en Algérie Les Vergers – Bir-Mourad-Rais Wilaya d'Alger.
- [28] <https://www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20180915/150079.html>
- [29] Hemmati., S. Modaressi., A. (2013). Étude de la stabilité des pentes non saturées sous les effets de l'infiltration prenant en compte la végétation. In Proceedings of the 18 th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, p. 1117-1121.
- [30] Domi., H. (2016). Étude comparative des méthodes analytiques et numériques en stabilité des pentes (application au cas du talus aménagé de sidi Ahmed à Bejaia. Mémoire de Master en Génie Civil. Université Mohamed Boudiaf, Msila, p. 52.
- [31] Sazzad, M.M. Rahman, F.I. Moni, M.A.A. (2016). Effects of water-level variation on the stability of slope by LEM and FEM. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD),p. 953-959.

- [32] Amarouche., T, Badoud., A. (2015). Etude géotechnique de la stabilité des talus cas de la carrière de Meftah w Blida. Mémoire de Master en Mines et Géologie. Université de Abderrahmane mira - Bejaia, p. 118.
- [33] <http://users.skynet.be/fa279479/transfert/pentes/html/pentes.htm>
- [34] Spencer. A. (1967). Méthode of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, (17)1, p. 11–26.
- [35] <https://docplayer.fr/54348735-Analyse-de-la-stabilite-et-modelisation-numerique-d-un-glissement-de-terrain.html>