

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Magister

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de : Génie Civil et d'hydraulique

Option : Géotechnique

Présenté par : DJAHMI Khroufa

**Thème : MODELISATION PAR CODE DE CALCUL CASTEM DES
GLISSEMENTS DE TERRAIN : CAS DU GLISSEMENT DE AIN SENOUR**

Sous la direction de : Dr. NAFA Zahreddine

JURY

Dr CHERAIT Yacine	Université de Guelma	Président
Dr NAFA Zahreddine	Université de Guelma	Rapporteur
Pr BELABED Lazhar	Université de Guelma	Examineur
Pr NOUAOURIA M. Salah	Université de Guelma	Examineur

2012

Dédicace

A mon père et ma mère. qui ont voué leurs vie pour ma réussite de leurs enfants : et à qui je dois tout que dieu leurs donne une longue vie et les protèges.

A mes sœurs : GHANIA ; HADA ; RACHIDA ; NADIA ; HAMIDA ; LAMIS ; IMEN NAZIHA ; S

ALTANA ; HOURIA ; HOUDA ; RABIHA et ASMA.

A mes frères : MOHAMED ; FARHET ; MOULOUD ; AMAR ; FOUAD ; ATEF et BELGESSEM.

A mon neveu : HAYTEM et à ma nièce : BOUTHEYNA.

A mes amis(es) proches et intimes : ZOËRA ; KARIMA ; SAMI ; ADRA ; RAZIKA ; SABRINA ; SALIM ; AHMED ; NAZIHA ; FAYSAL (D).

A toute la famille.

DJAHMI KHROUFA

SOMMAIRE

SOMMAIRE

REMARCIEMENT

Dédicace

Liste des Figure

Liste des tableaux

Liste des photos

RESUME

ABSTRACT

المخلص

INTRODUCTION GENERALE.....1

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : Glissement de terrain

I-1) Définition.....4

I-2) Types de glissements.....4

I-2.1) Glissement plan.....4

I-2.2) Glissement rotationnel.....5

I-2.2.1) Glissement superficie.....5

I-2.2.2) Glissement profond.....6

I-2.3) Glissement complexe.....6

I-2.4) Autres types de glissement.....7

I-3) Causes de glissements.....7

I-4) Méthode de calcul des glissements de terrain8

I-4-1) Introduction.....8

I-4.2) Méthode de calcul	9
I-4-2-1) .Méthodes à l'équilibre limite	9
I-4-2-2). Méthode des perturbations	9

CHAPITRE II : Reconnaissance des sols

II-1) Objectifs	11
II-2) Reconnaissance géologique	11
II-3) Reconnaissance géophysique	11
II-4) Reconnaissance géotechnique	12
II-4.1) Investigation géotechnique in situ.....	12
II-4.1.1) Le pénétromètre	12
II-4.1.2) Les Sondage	12
II-4.2) Investigation géotechnique au laboratoire.....	12
II-4.2.1) Paramètres physiques.....	12
II-4.2.2) Paramètres mécaniques.....	14
II-4.2.2.1) Essai triaxial.....	14
II-4.2.2.)Essai de cisaillement rectiligne.....	17

PARTIE II : MODELISATION ET CALCUL DE L'OUVRAGE PAR LE CODE CASTEM

CHAPITRE I : LE CODE DE CALCUL CASTEM

I-1) Introduction	19
I-2) Historique	19
I-3) Organisation d'un calcul	20
I-3.1) Choix de la géométrie et du maillage.....	20

I-3.2) Définition du modèle mathématique.....	20
I-3.3) Résolution du problème discrétisé.....	21
I-3.4) Analyse et post-traitement des résultats.....	21
I-4) Principes De Développement De Castem 2000.....	22
I-4.1) La simplicité	23
I-4.2) L'orthogonalité des processus.....	23
I-4.3) La visibilité et la localité des processus.....	23
I-4.4) La régularité des processus	23
I-4.5) La documentation des processus.....	24
I-5) Mise En Œuvre.....	24
I-5. 1) Notion de processus élémentaire.....	24
I-5.2) Langage GIBIANE.....	24
I-6) Possibilités de CASTEM 2000.....	25
I-6.1) Traitement de nouveaux problèmes.....	25
I-6.2) Exécutions répétitives et alternatives	25
I-6.3) Utilisation de procédures.....	25
I-7) Les modèles proposés par le code CASTEM pour la géotechnique.....	26
I-7.1) Le modèle de rupture de Cam Clay (modèle de Cambridge).....	26
I-7.2) Critère de rupture de Drucker-Prager.....	29
I-7.3) Le critère de rupture de Moha-Coulomb.....	30
 CHAPITRE II : Application au glissement de terrain de Ain Senour	
II-1) APERSU GEOLOGIQUE.....	33
II-2) Observation des désordres	34

II-3) Résultats de la reconnaissance géotechnique	35
II-3.1) Reconnaissance in situ	35
II-3.2) Essais au laboratoire	35
II-4) Modèle géométrique et numérique	36
II-4.1) objet de la modélisation	37
II-5) Les calculs	42
II-6) Résultats	53
II-7) Etude paramétrique	54
II-7.1) Paramètres de modélisation.....	55
II-7.1) Eléments finis.....	55
II-7.1.2) Densité du maillage.....	56
II-7.2) Paramètres géotechniques.....	57
II-7.2.1) La cohésion.....	57
II-7.2.2) L'angle de frottement.....	58
II-7.2.3) Le module d'élasticité.....	59
II-8) Méthode de confortements préconisés	61
II-8.1) terrassement.....	61
II-8.2) masque drainant avec renforcement en géotextile.....	61
II-8.3) mu en palplanche.....	62
CONCLUSION GENERALE	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	66

Liste des tableaux

Tableau (1) : d'autre type d'essais (P-16)

Tableau (2) : Caractéristiques géotechniques des couches de sol (P-39)

Tableau(3) : Caractéristiques eudiométriques des couches de sol (P-39)

Tableau(4) : présenté les valeurs de diminution de Cohésion (P-58)

Tableau(5) : présenté les valeurs de diminution Angle de frottement (P-59)

Tableau(6) : présenté les valeurs de diminution de module d'élasticité (P-60)

Liste des Figure

Figure (1) : *Glissement plan (P-5)*

Figure (2) : *Glissement rationnel (P-5)*

Figure (3) : *Glissement circulaire superficiel (P-6)*

Figure (4) : *Glissement circulaire profond (P-6)*

Figure(5) : Glissement complexe (P-7)

Figure (6) : L'enveloppe du cercle de MHOR (P-28)

Figure(7) : Les lois de plastification du modèle de Cam-Clay dans l'espace p-q' (P-28)

Figure(8) : Diagramme œnométrique des modèles de Cam-Clay (P-29)

Figure(9) : Domaine d'élasticité du critère de Drucker-Page (P-30)

Figure (10) : Domaine d'élasticité de Moha-Coulomb dans l'espace des contraintes principale.(P-31)

Figure(11) : Représentation du critère de Moha-Coulomb dans le plan de Mohr. (P-31)

Figure (12) : Modèle géométrique (P-37)

Figure (13) : Modèle géotechnique (P-38)

Figure (14) Résultats essais eudiométriques des trois couches (P-40)

Figure (15) : conditions aux limites (P-41)

Figure (16) : maillage du modèle (P-53)

Figure (17) : maillage déformé du modèle (P-53)

Figure (18) : Déplacement UY (P-54)

Figure (19) : Déplacement horizontal U_x (P-54)

Figure (20) : Déplacement Uy élément triangulai (P-55)

Figure (21) : Déplacement Uy élément quadrilatère (P-55)

Figure (22) : Déplacement Uy 6 éléments quadrilatère par ligne (P-56)

Figure (23) : Déplacement Uy 10 éléments quadrilatères par ligne (P-56)

Figure (24) : Déplacement Uy cohésion d'origine (P-57)

Figure (25) : Déplacement Uy cohésion diminuée de 20% (P-57)

Figure (26) : Déplacement Uy angle de frottement d'origine (P-58)

Figure (27) : Déplacement Uy angle de frottement diminué de 20%(P-58)

Figure (28) : Déplacement Uy module d'élasticité d'origine (P-59)

Figure (29) : Déplacement Uy module d'élasticité diminué de 20% (P-60)

Liste des photos

Figure (1) : Vue en plan du site de glissement (P-33)

Figure (2) : Affaissement et glissement du remblai routier, barrière de sécurité inclinée par le mouvement (P-34)

Figure (3) : écoulement des eaux a' travers le talus (P-35)

RESUME

Ce travail d'initiation à la recherche présente les résultats d'une étude d'un glissement de terrain survenu sur la route nationale RN16 au niveau de la commune d'Ain Senour dans la wilaya de Souk Ahras. L'approche préconisée est le calcul de déplacements critiques par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul CASTEM. Le modèle de la loi de comportement adopté pour les différentes couches est le modèle de Cam-Clay. Les paramètres du modèle sont issus des résultats des reconnaissances géotechniques effectuées in-situ et au laboratoire. L'étude a révélé l'influence importante du module de Young des différentes couches sur la stabilité du talus. Cette caractéristique mécanique étant fortement corrélée à la teneur en eau du terrain, nous avons adopté des méthodes de confortement basées sur l'abaissement du niveau de la nappe phréatique.

Mots clés

Glissement de terrain ; Code CASTEM, Modèle de Cam-Clay ; Déplacement critiques, Module élastique, Teneur en eau.

Abstract

This work of initiation to research presents results of an investigation of a landslide occurred on the national road NR16 of the district of Ain Senour in the wilaya of Souk Ahras. The recommended approach is the critical displacement calculation by the finite elements method using the code of calculation **CASTEM**. The constitutive law model adopted for the different layers is the **Cam-Clay** model. Parameters of the model are obtained from results of laboratory and in- situ soil testing. The study revealed considerable influence of the **Young** modulus of the different layers on the stability of the slope. This mechanical characteristic being strongly correlated to the water content of the soil, we adopted methods of strengthening based on the lowering of the water table level.

Keywords

Landslide; CASTEM code; Cam-Clay model; critical Displacements, elastic Modulus, Water content.

الملخص

يمثل هذا العمل مدخل إلى البحث عرض نتائج الخاصة بدراسة انزلاق التربة على الطريق الوطني رقم 16 الواقع بلدية

عين سنور ولاية سوق أهراس

المقاربة المعتمدة في هذه الدراسة هي حساب الحركات الحرجة بواسطة طريقة العناصر المنتهية و ذلك باستعمال برنامج

.CASTEM

إن نوع نموذج السلوك المعتمد لمختلف الطبقات الأرضية هو **Cam-Clay**.

أخذت خواص النموذج من نتائج مختلف القياسات الجيوتقنية المنجزة في الموقع و في المختبر .

بيئة هذه الدراسة مدى تأثير معامل **Young** لمختلف الطبقات على توازن الأرضية . هذه الخاصية متناسبة جدا مع كمية

الماء الموجودة في التربة ; و قد خلصنا إلى مجموعة طرق تدعيم مرتكزة على خفض منسوب المياه الجوفية في التربة.

الكلمات المفتاحية

انزلاق التربة – برنامج **CASTEM** - نموذج **Cam-Clay** - الحركات الحرجة - معامل المرونة – منسوب المياه الجوفية

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les glissements de terrains constituent les désordres les plus répandus affectant le réseau routier national et occasionnent à ce titre des désagréments pour les usagers mais aussi des charges d'entretien très pénibles pour les collectivités locales. Cette pathologie géotechnique n'est pas une fatalité et peut être évitée à l'amont par une étude poussée et par le choix des solutions techniques les plus appropriées. Une fois survenue on peut tout de même y remédier par une analyse pointue des causes et par la proposition des solutions technico-économiques.

Dans ce mémoire on s'intéresse à un glissement de terrain, parmi plusieurs, affectant la route nationale RN 16 AU PK 81+700 au niveau de la commune de Ain Senour dans la wilaya de Souk Ahras. On se propose d'étudier numériquement la stabilité du terrain et de proposer la solution adéquate pour ce glissement. Notre première ambition est l'exploration du code de calcul par éléments finis CASTEM et son introduction dans les études géotechniques au niveau de notre laboratoire de recherche. (L G CHA).

Le mémoire est subdivisé en deux parties :

Partie 1 : Etude bibliographique et Partie 2 : Modélisation et calcul de stabilité par le code de calcul CASTEM.

- La partie 1 est composée de deux chapitres. Le premier chapitre est un résumé de cours des glissements de terrains. Sont présentés : Une définition du glissement de terrain, les différents types de glissements ainsi que les principales causes de ces désordres le chapitre est clos par la liste des principales méthodes théoriques de calcul des glissements de terrain. Les différentes techniques de reconnaissance des sols font l'objet du deuxième chapitre. On y trouve un aperçu sur les reconnaissances géologiques, géophysiques et géotechniques mais aussi sur les techniques in situ et au laboratoire ainsi que les différents paramètres caractéristiques des sols.
- La partie 2 est composée de deux chapitres. Le premier chapitre concerne une présentation du code de calcul par éléments finis CASTEM. On y présente un historique du code et l'organisation d'un calcul et enfin on détaille quelques modèles de loi de comportement pris en charge par le code et utilisés dans la géotechnique. Dans le deuxième chapitre on développe l'application pour le site de Ain Senour. Dans un premier

temps, on donne un aperçu géologique de la région puis des observations sur les désordres et les résultats des reconnaissances géotechniques effectuées sur le terrain et au laboratoire. Dans un deuxième temps, on expose les modèles géométrique et numérique adoptés pour le calcul par éléments finis. Enfin on développe les étapes de calcul et on termine par les résultats obtenus par l'étude paramétrique. Avant de conclure, des mesures de confortements sont données à titre d'exemple.

PARTIE : I

CHAPITRE : I

Glissement de terrain

I.1). Définition :

Le glissement de terrain est défini comme le déplacement d'une masse de terrains meubles, ou rocheux le long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, des forces extérieures (hydraulique, ou sismique), ou d'une modification des conditions aux limites.

Il peut affecter seulement les couches les plus superficielles (solifluxion), ou être profond.

Le déplacement reste plus ou moins lent (quelques mm à quelques dm par an) et peut aussi s'accélérer, jusqu' à la rupture.

I.2).Types de glissements :

Les glissements de terrain apparaissent préférentiellement le long de surfaces planes et dans tous types de matériaux.

Ils correspondent au déplacement d'une masse de terrains meubles ou rocheux au long d'une surface de rupture (plane, circulaire ou quelconque).

Selon la géométrie de cette surface, on peut distinguer trois types principaux de glissement :

I.2-1). Glissement plan :

Le mouvement est une translation sur un plan incliné plus ou moins régulier.

Il peut être :

- Glissement d'une couche mince de caractéristique médiocre sur un substratum, une telle couche est appelée : couche savon.
- Glissement par extension d'une couche peu résistante.
- Glissement d'un matériau d'altération ou sur un niveau "lubrification" (limons sur argile par exemple).

Dans ce cas la limite entre le fluage peut être mal définie.

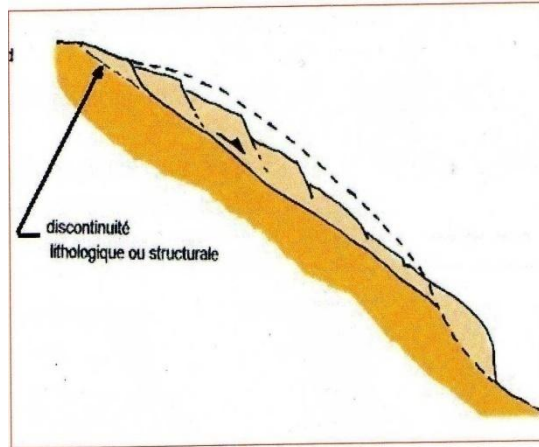


Figure (I.1) : *Glissement plan*

I.2-2). Glissement rotationnel :

Les matériaux en mouvement basculent le long d'une surface qui peut être rapprochée d'une surface cylindrique. Ce glissement se produit dans les sols homogènes ou les discontinuités géologiques sont absentes, ou insuffisantes pour influencer notablement la forme et la position de la surface de glissement, celle-ci est concave, à pente forte vers le haut du versant et aplatie vers le bas d'où des appellations comme 'fauteuil' ou 'cuillère' faisant référence au profil et à la forme générale.

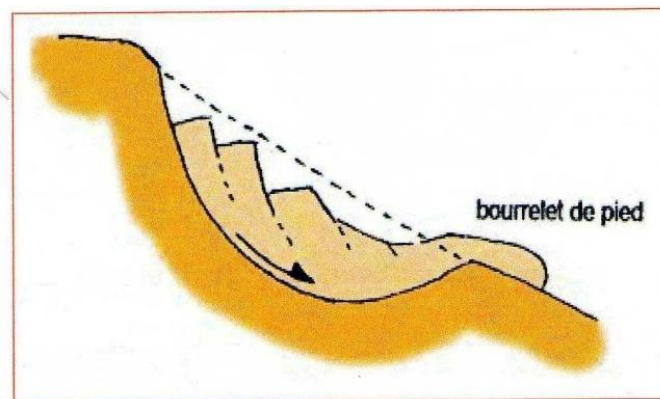


Figure (I.2) : *Glissement rotationnel*

Le glissement rotationnel peut être superficiel ou profond.

I.2-2.1). Glissement superficiel :

Les deux cas les plus fréquents sont :

- a- Glissement circulaire de crête (tête).
- b- Glissement circulaire de pied

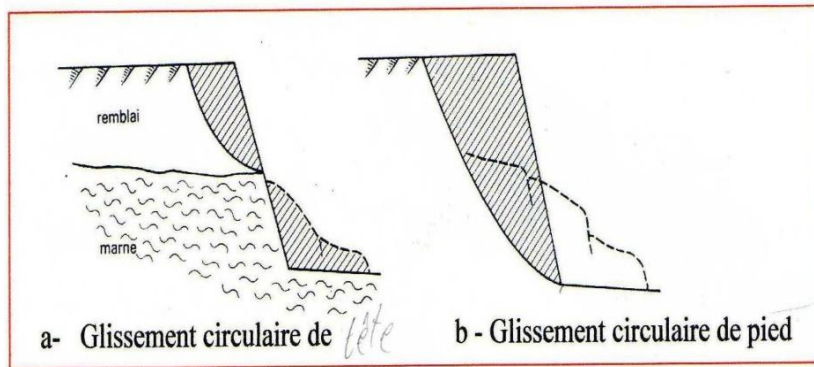


Figure (I.3) : *Glissement circulaire superficiel*

I.2.2.2). Glissement profond :

Il apparait dans les remblais sur sol mou .ou quand le cercle de rupture est tangent au substratum lorsque ce dernier n'est pas profond.

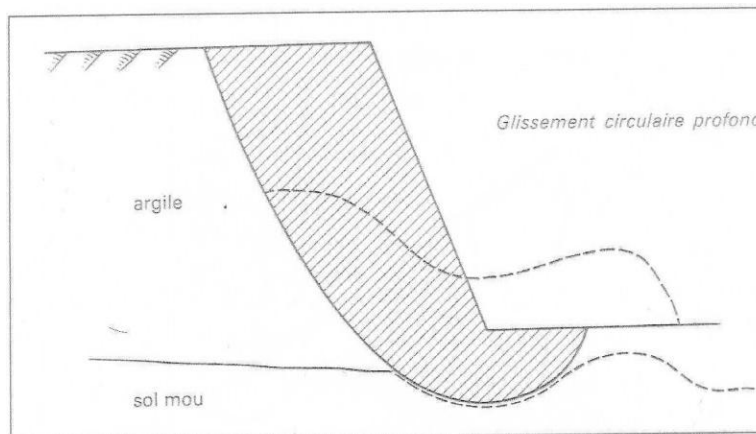


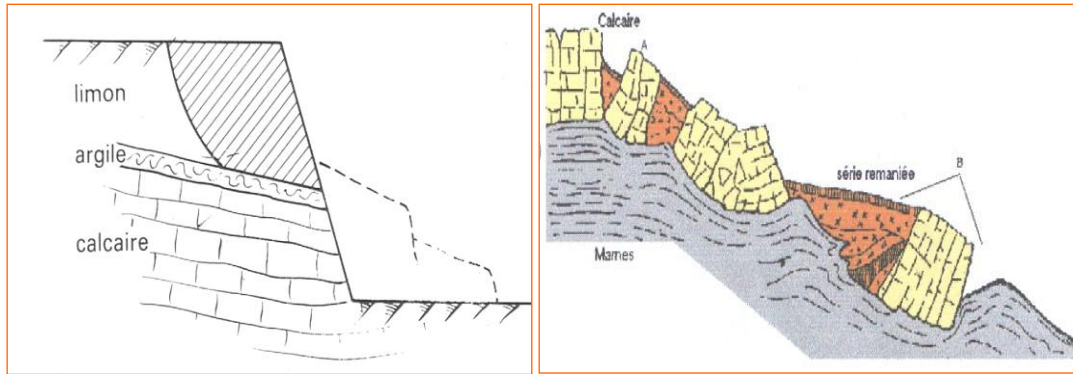
Figure (I.4) : *Glissement circulaire profond*

I.2.2.3). Glissement complexe :

Les glissements complexes, ont souvent une surface de rupture non circulaire, et par fois quelconque.

Ces ruptures peuvent avoir différentes causes :

- Anisotropie de structure.
- Anisotropie mécanique.
- Caractéristiques mécaniques variantes en profondeur.
- Suppression d'une butée de pied entraînant une rupture régressive ou effondrant.



Figure(I.5) : Glissement complexe

I. 2.4). Autres types de glissement :

- Glissement en escalier : constitué par un ensemble de glissements peu profonds créant une topographie en escalier.
- Glissement par suppression de la butée et effondrement d'un coin de terrain.
- Glissement composé :

Peut être une combinaison des différents glissements

Précédemment décrits.

- La géométrie des couches peut induire une surface de rupture qui se compose d'une combinaison d'éléments courbes et plans.
- Glissement par fluage : il se produit sans modification des sollicitations extérieures.

I.3). Causes de glissements :

Les glissements de terrain se produisent dans des circonstances très variées, ils affectent des ouvrages construits par l'homme ou des pentes naturelles ; la rupture affecte une forme circulaire soudaine ou bien au contraire ne présente aucune caractéristique particulière.

La rupture se produit sous l'action mécanique d'un écoulement d'eau ou parie que le terrain a été progressivement lessivé par une eau pauvre en cations.

Les ruptures dans les pentes naturelles sont souvent liées à des problèmes d'écoulement d'eau ou d'érosion au pied du massif par une rivière ou par la mer,

On observe aussi des ruptures par glissement dans de nombreux ouvrages artificiels,

Les talus dressés dans un massif existant pour une plate-forme ou pour avoir une tranchée et les talus résultant d'opération de remblai.

Ce genre d'ouvrages se rencontre dans tous les travaux de terrassement qu'il s'agisse de chemine de fer ou d'une autoroute qui ne s'accommodent que de faibles pentes longitudinales Et entraînent donc la réalisation de terrassements importants.

Les grands barrages en terre et les retenues collinaires posent des problèmes tout à fait analogues parmi lesquels il faut citer en premier lieu le comportement des ouvrages lors des variations brutales du niveau des eaux, c'est-à-dire lors des vidanges rapides qui sont souvent à l'origine de sinistres spectaculaires.

Il faut citer aussi le cas des ouvrages de travaux publics, murs de soutènement, murs de quai fondés sur des couches plus ou moins molles et qui peuvent périr par ruptures profondes s'ils sont soumis par exemple à des surcharges dans de mauvaises conditions.

L'étude composée des facteurs d'instabilité et la prise en considération de leur mode d'action à permis de classer les causes en plusieurs types :

- Les causes liées a la nature des terrains (et leurs géologie).
- Les différents modes d'action de l'eau.
- Les causes mécaniques externes.

I.4).Méthode de calcul des glissements de terrain

I.4. 1).Introduction

Le degré d'imprécision qui affecte la formulation des hypothèses simplificatrices ainsi que le choix des paramètres pour les calculs de stabilité, et l'incertitude relative à l'évolution du comportement du sol donne une dimension toute particulière aux problèmes de sécurité.

Par la force des choses cette même incertitude ne permet pas à ce jour, la vulgarisation de méthodes simples et sûres, permettant de déceler sur le terrain les risques immédiats.

Le critère fondamental dans le choix de la méthode de calcul est la forme de la surface de glissement

En pratique, on considère trois types de ruptures :

- La rupture le long d'une surface plane.
- La rupture circulaire.
- La rupture le long d'une surface de forme quelconque.

On va citer les méthodes de calcul correspondant à chaque cas.

I.4.2). Les méthodes de calcul :

I.4.2.1) .Méthodes à l'équilibre limite

- A). Méthode des blocs
- B). Méthode des tranches
- C). Méthode de BISHOP simplifiée
- D). Méthodes de JANBU
- E). Méthode de SPENCER

I.4.2.2). Méthode des perturbations

CHAPITRE:II

Reconnaissance des sols

II.1). objectifs :

La reconnaissance des sols permet d'appréhender les problèmes qui peuvent se poser lors de l'étude d'un projet de construction ou lors de l'expertise de sinistres.

La reconnaissance des propriétés d'un terrain constitue le lien entre la cause d'un sinistre et les remèdes que l'on se propose de mettre en place.

Il y a sommairement, deux catégories de moyens de reconnaissances qui

Complètent les investigations géologiques de surface :

- Les méthodes d'observation du terrain, soit en place, soit à l'aide d'échantillons (prolongement en profondeur de la géologie de surface) : puits, tranchées, sondages...
- Les méthodes de mesure « in situ » basées sur la mesure d'une propriété physique du terrain, dont font parti les essais géophysiques.

II.2). Reconnaissance géologique :

C'est l'identification du sol par observation visuelle des différentes couches, confirmée par l'examen des cartes géologiques. On observe donc pour cela des puits, galeries ou tranchées qui donnent une coupe généralement « friche » de sol il est aussi possible d'utiliser des cavités existantes. L'examen des carrières ou des tranchées, situées à proximité de la zone considérée, donne des précisions immédiates sur les sous_ couches la reconnaissance peut s'effectuer a' l'aide de sondages dont certains exemples sont décrits au paragraphe de la reconnaissance géotechnique. IL sera possible d'établir des coupes prévisionnelles ou même un bloc diagramme qui pourra être confirmé par les sondages.

II.3). Reconnaissance géophysique :

Les méthodes de reconnaissance géophysiques permettent de déterminer la nature des couches profondes en utilisant par exemple leurs caractéristiques :

- Magnétiques
- Prospection électrique
- Prospection sismique
- Prospection gravimétrique

II.4). Reconnaissance géotechnique :

II.4.1). Investigation géotechnique in situ :

II.4.1.1). Le pénétromètre :

Cette technique permet d'évaluer les propriétés mécaniques d'un terrain meuble pour des fondations. On enfonce un outil en mesurant la force nécessaire à exercer pour la pénétration : on distingue les niveaux compacts des niveaux plus mous, ce qui permet de calculer la capacité portante du sol et les caractéristiques des pieux de fondation à utiliser.

- Le pénétromètre dynamique :
- Le pénétromètre statique

II.4.1.2). Les Sondage

- Sondage carotté :
- Sondage électrique :
- Sondage inclinométrique :

II.4.2). Investigation géotechnique au laboratoire :

II.4.2.1). Paramètres physiques :

Pour l'identification des formations on utilise :

- Teneur en eau naturelle (w) :

$$w = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids du sol sec}} \times 100 \quad (1)$$

- Degré de saturation (S_r) :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2)$$

- Poids volumiques :

$$\gamma = \frac{W}{V_t} \quad (3)$$

- Poids volumique du sol sec (γ_d)

$$\gamma_d = \frac{W}{V_t} \quad (4)$$

- Poids volumique des grains du sol (γ_s)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (5)$$

Pour les sols courants (γ_s) est compris entre 26 et 27 KN/m^3 .

- Densité immergée

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (6)$$

- Analyse Granulométrique :

L'analyse granulométrie permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Elle comprend deux opérations :

- Le tamisage, pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension supérieur ou égale à 80 micromètres.
- La sédimentométrie, pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension inférieure à 80 micromètres. La sédimentométrie est basée sur la loi de « Stokes » qui donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux.

L'analyse granulométrique se traduit par une courbe granulométrie. Cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés. Elle est notamment utilisée pour la classification des sols grenus, qui nécessite le calcul de deux coefficients de forme :

- Le coefficient d'uniformité :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

- Le coefficient de courbure :

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (8)$$

On désigne par D_n la dimension à laquelle sont inférieurs $n\%$ des grains, en poids.

D_{10} : représente le diamètre tel que 10% du poids grains ont un diamètre plus petit que lui, il est appelé diamètre efficace.

D_{30} et D_{60} sont définis d'une manière similaire.

II.4.2.2). Paramètres mécaniques :

II.4.2.2.1). Essai triaxial :

➤ But de l'Essai :

Déterminer les paramètres (C, φ) respectivement cohésion et angle de frottement interne d'un sol, afin de calculer la stabilité des ouvrages fondés sur celui-ci.

L'appareil triaxial peut être employé à d'autres fins que la mesure au cisaillement des sols.

Il permet en particulier de soumettre une éprouvette à des sollicitations analogues à celles que subira le sol en place. La mesure des déformations de l'éprouvette, de ses variations de volume, les pressions interstitielles qui y prennent naissance renseignent dans certains cas sur le comportement du sol en place déformation, pression interstitielle, consolidation etc....

On se sert également de l'appareil triaxial pour déterminer le coefficient K_0 de poussée des terres au repos.

➤ Principe de l'essai :

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques d'élancement voisin de deux, prélevées dans un échantillon de sol à étudier.

L'éprouvette est soumise à une pression hydrostatique σ_3 dans une cellule triaxiale, on fait croître la contrainte axiale ou déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) jusqu'à la rupture. (σ_3) Restant constante, la contrainte axiale totale appliquée à l'éprouvette est dans ces conditions : $\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_1$ (9)

L'essai est répété sur 3 ou 4 éprouvettes soumises à des valeurs de σ_3 différentes.

Des pierres poreuses placées aux extrémités de l'éprouvette peuvent être mises en communication avec l'extérieur de la cellule afin d'assurer le drainage du sol en cours d'essais.

L'enveloppe des cercles de MOHR correspondante, tracée dans la figure (II-6), est appelée droite intrinsèque et est caractérisée par les paramètres $(C \text{ et } \varphi)$.

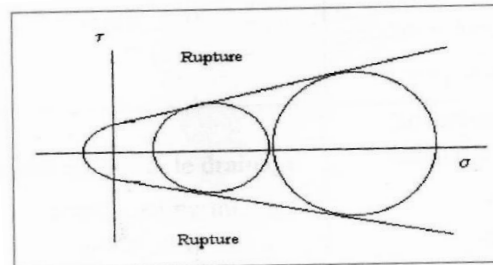


Figure (II.6) : L'enveloppe du cercle de MOHR

➤ **Type des essais réalisés**

Un seul type d'essais à été réalisé, c'est l'essai consolidé non drainé. Le choix porté sur ce type d'essai pour des raisons qu'en évoquera ci après.

➤ **Essai consolidé non drainé**

L'éprouvette est consolidée sous la pression hydrostatique (σ_3) et cisailée à drainage fermé sous cette même pression. Les paramètres ($C_u \text{ et } \varphi_{cu}$) se rapportant aux contraintes totales, la mesure de la pression interstitielle (U) au cours de l'essai permet de connaître les contraintes effectives.

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - U \quad (10)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - U \quad (11)$$

A partir de celles-ci on détermine les paramètres C' et φ'

- L'essai est effectué comme l'essai CD. Pendant la phase de cisaillement, on branche le circuit de la pression interstitielle pour la mesure de U .
- On cherche à adopter pour l'essai la vitesse de déformation correspondant à une distribution uniforme de la pression interstitielle.
- Notons qu'il existe d'autres types d'essais résumés dans le tableau suivants :

Type d'essai	consolidation	Cisaillement à la rupture
Non consolidé Non drainé	σ_3 est appliqué, le drainage N'est pas permis $u = u_a \neq 0$	$\Delta\sigma$ est appliqué le drainage n'est pas permis $u = u_d \neq 0$ à la rupture $\Delta\sigma = \Delta\sigma_f$ $u = u_f = u_a + u_{d(f)}$
Consolidé non drainé	σ_3 est appliqué, le drainage Complet est permis $u = u_a = 0$	$\Delta\sigma$ est appliqué le drainage n'est pas permis $u = u_d \neq 0$ à la rupture $\Delta\sigma = \Delta\sigma_f$ $u = u_f = u_a + u_d = 0 + u_{d(f)}$
Consolidé drainé	σ_3 est appliqué, le drainage Complet est permis $u = u_a = 0$	$\Delta\sigma$ est appliqué lentement le drainage complet est permis $u = u_d = 0$ à la rupture $\Delta\sigma' = \Delta\sigma_f, u = u_f = u_a + u_d = 0$

Tableau : (II-1) type d'essais triaxiaux

II.4.2.2.2). Essai de cisaillement rectiligne :

Principe de l'essai :

Cisailler un échantillon de sol, suivant un plan horizontal imposé. Une contrainte normale " σ " donnée est exercée sur l'échantillon, on mesure la résistance au cisaillement " τ " correspondante.

L'essai est répété 3 à 4 fois avec des contraintes normales différentes, permettant de tracer la droite intrinsèque.

PARTIE : II

CHAPITRE : I

LE CODE DE CALCUL CASTEM

I.1). Introduction

CASTEM2000 est un code de calcul pour l'analyse de structures par la méthode des éléments finis. Ce code a été développé Mécanique et Technologie (DMT) du commissariat français à l'Energie Atomique (CEA).

Le développement de CASTEM 2000 entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique dont le but est de définir un instrument de haut niveau, pouvant servir de support pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants, dans le domaine du nucléaire comme dans le secteur industriel classique.

Dans cette optique, CASTEM 2000 intègre non seulement les processus de calculs proprement dits mais également les fonctions de construction du modèle (préprocesseur) et les fonctions de traitement des résultats (post-traitement). CASTEM 2000 est un programme que l'utilisateur peut adapter à ses besoins pour résoudre ses propres problèmes.

I.2). HISTORIQUE

Le développement des codes de calcul a évolué d'épave avec le matériel informatique. Au départ, les programmes de calcul étaient écrits pour résoudre des problèmes donnés et fonctionnaient généralement en boîte noire.

Trois programmes constituant le noyau du système CASTEM ont été développés au CEA/DMT : il s'agissait d'un programme de maillage, d'un programme de calcul et d'un programme de visualisation des résultats. La multiplicité des problèmes a ensuite conduit à développer des programmes de calcul distincts capables de communiquer entre eux dans le cas échéant.

Les progrès du matériel informatique a alors permis de développer de nombreuses fonctions qui réduisaient le temps de préparation des jeux de données. Ainsi, il fallait remettre à niveau tous les codes en répercutant dans chacun les améliorations et corrections effectuées dans l'un d'entre eux. De plus, les jeux de données devenaient de plus en plus compliqués et le post-traitement devait être capable de relire des fichiers différents selon les codes de calcul utilisés. A ces problèmes se sont ajoutés de nouveaux besoins tels que des structures plus complexes mettant en jeu des phénomènes variés et

couplés (couplage mécanique-thermique) ou bien intégration des fonctions de maillage dans le processus de calcul (optimisation de forme).

Toutes ces considérations ont conduit à la base le problème du calcul numérique de manière à développer un code de calcul de nouvelle génération : CASTEM 2000.

Contrairement aux anciens codes de calcul, écrits pour résoudre des problèmes donnés et auxquels l'utilisateur doit se plier, CASTEM 2000 peut s'adapter aux besoins de l'utilisateur pour résoudre ses problèmes. De plus, CASTEM 2000 donne à l'utilisateur la connaissance du problème effectivement posé et des méthodes employées.

I. 3). Organisation D'un Calcul

Une analyse générale effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut se décomposer en quatre grandes étapes :

- Le choix de la géométrie et du maillage,
- La définition du modèle mathématique,
- La résolution du problème discrétisé,
- L'analyse et le post-traitement des résultats.

Chacune des étapes peut également être décomposée en une série de processus élémentaires.

I.3.1). Choix de la géométrie et du maillage :

- Définition des points, lignes, surfaces et volumes.
- Discrétisation.

I.3.2). Définition du modèle mathématique :

- Définition des données caractérisant le modèle :
 - Type d'analyse : Déformation ou contraintes planes, axisymétrie, séries de Fourier, etc....
 - Formulation : mécanique, thermique, fluide, etc....
 - Comportement du matériau : élastique (isotrope, orthotrope,...), plastique (isotrope, parfait,...), etc....
 - Type d'éléments : poutres, barres, coques, etc....

- Définition des propriétés matérielles (constantes d'élasticité, masse volumique, etc....)
- Définition des propriétés géométriques (section des poutres, inerties, épaisseur des coques, etc....)
- Définition des conditions aux limites.
- Définition des sollicitations.
- Conditions initiales.

I.3.3). Résolution du problème discrétisé :

- Calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini.
- Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- Application des conditions aux limites.
- Application des chargements.
- Résolution du système d'équations.

I.3.4). Analyse et post-traitement des résultats :

- Quantités locales : déplacements, contraintes, déformations, etc....
- Quantités globales : déformation maximale, énergie de déformation, etc....

Les programmes de calcul par éléments finis classiques sont structurés selon cette logique, chaque étape étant associée à un module du code :

- Le préprocesseur pour la définition du maillage et du modèle mathématique,
- Le programme de calcul qui envoie une série de processus selon la procédure de calcul choisi par l'utilisateur, celui-ci ne peut maîtriser l'enchaînement des processus. La procédure agit comme une boîte noire sur laquelle l'utilisateur n'a aucune possibilité d'intervention.
- Le post-processeur qui procède aux traitements nécessaires après avoir reçu les résultats des modules précédents.

Il apparaît clairement qu'un code de calcul classique exclut toute intervention de la part de l'utilisateur qui désirerait apporter des modifications répondant à ses propres besoins. Or, il peut s'avérer très utile de pouvoir définir pas-à-pas la séquence

La mieux adaptée parmi les processus élémentaires disponibles pour chaque étape. Ce ci est d'autant plus valable lorsque l'utilisateur doit résoudre des problèmes variés et localisés en différents points du processus de résolution.

En effet, outre les trois grandes étapes obligatoires, il faut pouvoir disposer de facilités telles que :

- la visualisation des informations à toutes les étapes de manière à contrôler les données introduites et le déroulement du calcul,
- l'archivage et la restauration des informations afin d'être capable d'interrompre un calcul et de le continuer ultérieurement,
- la possibilité d'itérer dans les étapes désirées.

Chaque étape peut être décomposée en une série de processus élémentaires. Chacun de ces processus élémentaires acquiert de l'information existante, la met en forme, la traite et fabrique de nouvelles informations. Faire un calcul revient donc à sélectionner les processus élémentaires adaptés au type du problème et à leur fournir les informations nécessaires existantes ou nouvelles.

C'est dans cette optique que CASTEM 2000 a été développé, afin de dépasser les limites d'adaptabilité offertes par les codes de calcul conventionnels.

I.4.) Principes de développement de CASTEM 2000

CASTEM 2000 est avant tout un outil pour faire des calculs. Il intègre tous les processus utilisés par le passé et doit pouvoir accueillir tous ceux dont on aura besoin dans l'avenir pour traiter de nouveaux problèmes. Il permet à l'utilisateur d'adapter ses calculs selon les problèmes qu'il doit résoudre. Il donne à l'utilisateur la connaissance du problème posé et des méthodes employées.

Ceci a été rendu possible par l'application :

- d'un principe : la SIMPLICITE,
- l'observation de quatre règles : L'ORTHOGONALITE, la VISIBILITE, la REGULARITE et la DOCUMENTATION,
- la poursuite d'un objectif : la QUALITE.

I.4.1).La simplicité

Il s'agit d'un principe de bon sens, mais dont l'application n'est pas si aisée. C'est le fondement de la démarche scientifique : il est facile de faire des choses compliquées à partir de choses simples. Par ailleurs, simple ne signifie pas simpliste.

I.4.2). L'orthogonalité des processus

Cette règle est basée sur deux idées :

- les processus sont indépendants entre eux : on peut changer ou modifier un processus sans toucher aux autres.
- Tous les processus peuvent se combiner, c'est ce qui fait la puissance du code.

Il en résulte que l'on peut tester le fonctionnement des processus de manière indépendante.

I.4.3). La visibilité et la localité des processus

La visibilité vise à supprimer l'existence de données cachées, en imposant que toutes les données soient indiquées au processus de manière visible, là où elles sont utilisées. La localité permet principalement de détecter les erreurs de données à l'endroit où elles sont définies et non pas beaucoup plus loin dans le calcul, ce qui rendrait leur diagnostic malaisé.

Cette double règle a un corollaire immédiat : l'information créée par le processus doit aussi être visible.

I.4.4).La régularité des processus

Il s'agit d'une part de la régularité dans l'utilisation des processus et d'autre part de la régularité dans les possibilités d'un processus.

- Régularité dans l'utilisation des processus : il n'existe pas d'exception dans la syntaxe des données. Ceci permet d'avoir des syntaxes identiques pour des processus différents ayant besoin des mêmes données.
- Régularité dans les possibilités d'un processus : il n'existe pas d'exception dans les opérations possibles du processus.

I.4.5). La documentation des processus

La documentation d'un processus fait partie du processus et elle doit être développée simultanément au processus. C'est elle qui permet à l'utilisateur de connaître la fonction du processus et son utilisation.

La règle est que c'est la documentation qui a raison et non pas la programmation du processus.

I.5). Mise en œuvre

I.5.1). Notion de processus élémentaire

Il existe deux types de processus élémentaire : les OPERATEURS et les DIRECTIVES. Les informations sont appelées OBJETS.

- Les OBJETS sont nommés par l'utilisateur. Ils sont typés, ce qui permet aux opérateurs de les exploiter et de vérifier la syntaxe des données.
- Les OPERATEURS ont un nom. Ils créent un ou plusieurs objets dont les noms sont choisis par l'utilisateur. La seule condition. L'utilisation d'un opérateur s'écrira : {nom du (des) résultat(s)}= {nom de l'opérateur} {nom de (s) l'information (s)} ;

Le point-virgule indique la fin de l'instruction élémentaire.

- Les DIRECTIVES modifient un ou plusieurs objets existants ou produisent une sortie sur une unité logique (écran, imprimante, ...). Elles ne créent pas de nouveaux objets.

Il n'y a aucune distinction entre les opérateurs ou directives de prétraitement, de calcul et de post-traitement, ils peuvent donc être utilisés à tout moment du programme selon les besoins du problème.

I.5.2). Langage GIBIANE

Afin de convertir les noms des objets en entités informatiques utilisables par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre à l'utilisateur de communiquer directement avec le programme.

Les opérations avec GIBIANE consistent en une manipulation des objets existants dans le but de les modifier ou d'en créer de nouveaux.

I.6). Possibilités de CASTEM 2000

I.6.1). Traitement de nouveaux problèmes

Pour traiter de nouveaux problèmes, on peut être amené à développer dans CASTEM 2000 de nouveaux opérateurs ou de nouveaux types d'objets.

Le développement d'un nouvel opérateur est facilité par l'orthogonalité des opérateurs entre eux. Par contre, l'addition de nouveaux types d'objets est moins fréquente puisqu'elle requiert non seulement l'addition de nouveaux opérateurs capables de traiter ce nouveau type d'objet mais aussi la modification de nombreux opérateurs généraux existants en vertu de la règle de régularité.

I.6.2). Exécutions répétitives et alternatives

Certains problèmes nécessitent la répétition de quelques opérations élémentaires ou bien l'exécution conditionnelle de certaines opérations élémentaires ou bien l'exécution conditionnelle de certaines opérations. Ceci est rendu possible grâce à certains opérateurs (REPETER, QUITTER, SI, SINON, etc....) L'utilisateur peut ainsi élargir les possibilités du programme en fonction de son type de problème.

I.6.3). Utilisation de procédures

Une des conséquences de l'architecture adoptée pour CASTEM 2000 est la possibilité de créer des procédures, c'est-à-dire des méta-processus constitués d'un ensemble de processus élémentaires.

Ces procédures sont créées pour des besoins de natures diverses :

- Certains enchaînements de données peuvent se retrouver de manière répétitive, les regrouper dans une seule instruction permet d'améliorer la lisibilité du programme,
- Faciliter l'utilisation du programme pour des personnes peu familiarisées avec la méthode des éléments finis en revenant à un principe de boîte noire,

- Pour des problèmes assez difficiles tels que des calculs non linéaires, il n'est pas raisonnable d'obliger l'utilisateur à définir explicitement un algorithme de résolution,
- à l'inverse, l'utilisateur peut vouloir créer de nouveaux opérateurs, modifier ou remplacer certains opérateurs selon ses besoins.

Les procédures sont écrites en langage de données et ont les propriétés suivantes :

- elles sont utilisables comme des opérateurs élémentaires.
- une procédure peut en appeler une autre et peut s'appeler elle-même.
- on peut surcharger un opérateur ou une procédure existante par une procédure,
- la séquence d'opérateurs élémentaires contenus dans une procédure est entièrement visible.

Grace aux procédures, l'utilisateur peut programmer lui-même les processus nécessaires à la résolution de son problème. Il peut encore écrire et tester très rapidement de nouveaux algorithmes sans avoir besoin de modifier le logiciel.

A l'inverse, les procédures permettent de rendre transparents pour l'utilisateur des algorithmes et des méthodes relativement complexes, tels que les algorithmes de calcul en plasticité, en grands déplacements, contacts unilatéraux, etc....

I.7). Les modèles proposés par le code CASTEM pour la géotechnique

I.7.1). Le modèle de rupture de Cam Clay (modèle de Cambridge)

Le modèle de Cam-Clay a été développé par une équipe de chercheurs de l'université de Cambridge. Après avoir posé en 1958 les concepts fondamentaux d'état limite et d'état critique, ces chercheurs ont longuement travaillé à développer un modèle de comportement sur des argiles remaniées isotropes et afin de rendre le modèle quantitativement utilisable, ils ont introduit deux hypothèses importantes qui ont permis de définir la surface d'état limite ainsi que les déformations développées le long d'un cheminement d'état quelconque :

- La première hypothèse voulant que le sol soit un matériau plastique développant un écrouissage isotrope,
- La deuxième concernant l'équation de l'énergie dissipée.

Historiquement le nom “Cam Clay” a été attribué par Roscoe, Scholte et Thurairajah (1963) à un modèle de comportement, qui sur la base de notions théoriques telles que la surface d’état limite (SEL) et de “l’indice des vides critiques”, généralise le comportement de l’argile saturée et humide observé dans les différents essais de laboratoire. Ces auteurs ont analysé l’évolution de la déformation en termes de transfert d’énergie. Ils supposent d’abord que la loi d’écoulement est applicable à l’argile humide, que l’argile humide se comporte comme un milieu isotrope, élastique et non linéaire à l’intérieur de la surface d’état limite (SEL) et qu’il y a des déformations volumétriques réversibles et irréversibles tandis que les déformations de cisaillement sont irréversibles. Ils émettent ensuite une autre hypothèse à savoir la dissipation de l’énergie se fait par frottement interne avec un certain coefficient de frottement

$$M = \frac{q}{p} \quad (12)$$

Qui est constant ; p et q sont donnés respectivement par les relations :

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{I_1}{3} \quad (13)$$

La contrainte moyenne p peut être donnée en terme de contraintes effectives et on notera p' .

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{3I_2} \quad (14)$$

I_2 Est le deuxième invariant déviatorique et peut aussi s’écrire sous la forme :

$$I_2 = \frac{I_1^2}{3} - I_2 \quad (15)$$

A la différence des autres modèles, ils introduisent donc un autre espace de représentation qui est l’espace (p' , q , e), e représentant l’indice des vides.

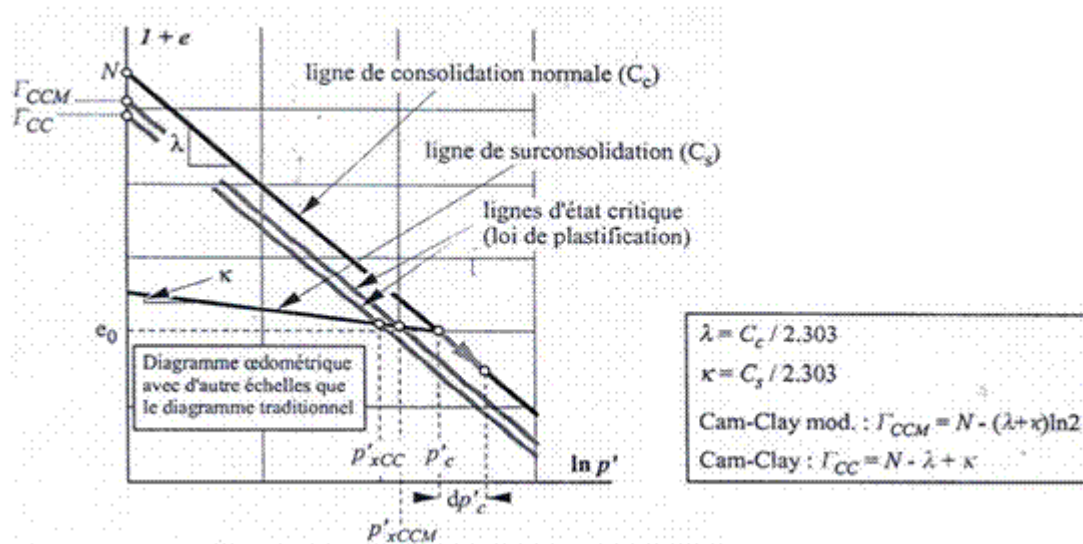
La fonction de charge pour ce critère est donnée dans le plan (p' , q) par la relation :

$$F = \frac{q}{M p'} + \ln \left(\frac{2,7183 P'}{P_c} \right) - 1 \quad (16)$$

P_c Est la contrainte de pré consolidation.

Borland (1965) a apporté au modèle de “Cam-Clay” une modification importante tout en conservant les hypothèses fondamentales de la méthode. On parle ainsi du modèle de “Cam-Clay modifié” dont la fonction de charge s’écrit sur la forme :

$$F = q^2 - M^2 P' P_c + M^2 P'^2 \quad (17)$$



Figure(1.8) : Diagramme œnométrique des modèles de Cam-Clay

La réponse mécanique d'un massif de sol dépend essentiellement des lois de comportement qui lui ont été affectées. Il est donc très important de choisir le modèle rhéologique qui pourra reproduire avec une fidélité optimale la réponse du massif face aux sollicitations qui lui sont imposées et en fonction des grandeurs recherchées.

Les modèles de Cambridge sont fondés sur une théorie simple et n'utilisent que quelques paramètres courants de mécanique des sols faciles à déterminer.

Le comportement d'un massif de sol, d'après ces modèles, peut être assimilé avec assez de succès à celui d'un matériau élastoplastique dont les relations fondamentales contraintes déformations ainsi que l'équation de la surface d'état limite sont bien définies.

1.7.2). Critère de rupture de Drucker-Prager

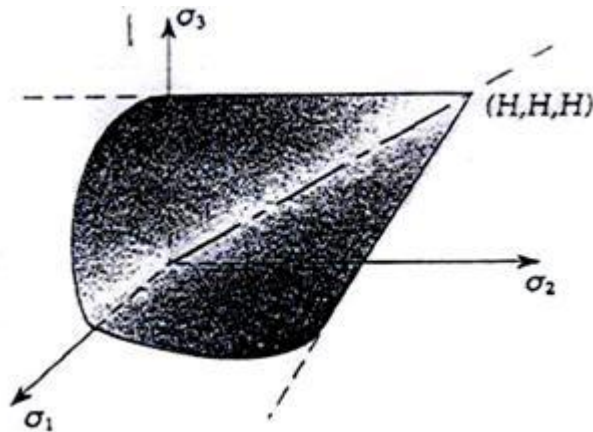
Au lieu du critère de Coulomb, Drucker et Prager (1952) ont proposé d'utiliser un critère mathématiquement plus régulier qui lui est apparenté et qui s'exprime en fonction simple des invariants I_1 et J_2 du tenseur des contraintes. La fonction de charge pour ce critère est de la forme :

$$F = \alpha \left(\frac{I_1}{3} - H \right) + \sqrt{J_2} \quad (20)$$

Où H est la limite théorique d'élasticité en traction triple ($H \geq 0$) et α est une constante positive qui dépend du matériau :

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Le domaine d'élasticité correspondant est représenté par un cône de révolution au lieu de la pyramide hexagonale du critère de Coulomb



Figure(I.9) : *Domaine d'élasticité du critère de Drucker-Prager*

I.7.3). Le critère de rupture de Mohr-Coulomb

Il est apparenté au critère de Tresca, il possède deux propriétés importantes :

1. Il ne porte que sur les contraintes principales extrêmes,
2. Seule la différence entre ces contraintes principales intervient dans l'expression de la fonction de charge.

Ainsi, en ordonnant les contraintes principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sous la forme $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ autrement dit en traction positive, la fonction de charge du critère de Tresca s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{F} = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_0 \quad (21)$$

Le critère de Coulomb conserve la première propriété du critère de Tresca et les deux contraintes principales extrêmes y interviennent explicitement. La fonction de charge de ce critère s'écrit alors sous la forme :

$$\mathbf{F} = \sigma_1 - \sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_3) \times \sin\phi - 2c\cos\phi \quad (22)$$

Elle fait donc intervenir deux constantes caractéristiques du matériau : c (la cohésion) et ϕ (l'angle de frottement interne). Le matériau est dit pulvérulent ou purement frottant si $\phi \neq 0$ et $c=0$ et il est purement cohérent si $\phi =0$ et $c \neq 0$ et dans ce cas, le critère se réduit à celui de Tresca avec $\sigma_0= 2c$.

Le domaine d'élasticité pour ce critère est représenté dans l'espace des contraintes principales par la figure ci-dessous.

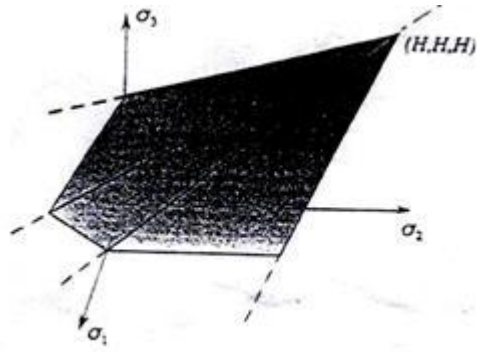
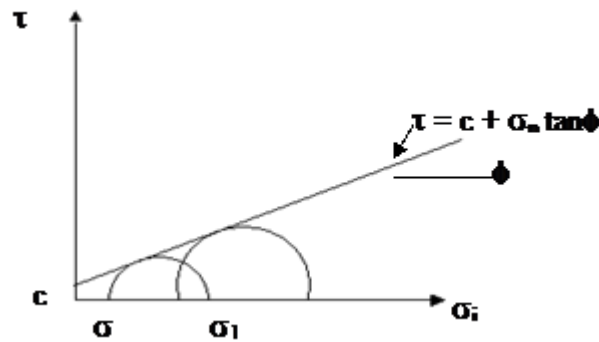


Figure (I.10) : *Domaine d'élasticité de Moha-Coulomb dans l'espace des contraintes principale.*

Ce critère est sous-tendu par la notion de frottement et suppose que le cisaillement maximal que peut subir le matériau (τ) est d'autant plus grand que la contrainte normale en compression est élevée. La limite admissible constitue la courbe intrinsèque dans le plan de Moha.



Figure(I.11) : *Représentation du critère de Moha-Coulomb dans le plan de Moha.*

CHAPITRE : II

Application au glissement de terrain de Ain Senour

II-1. APERCU GEOLOGIQUE

La zone d'étude se caractérise par des formations sédimentaires à dominance carbonatée représentée essentiellement par les argiles au sommet et des marnes grises à noires en profondeur, les marnes englobent des intercalaires de marna-calcaires assez dures, les traces d'érosion sur cette zone sont assez visibles.

D'une manière générale, l'ensemble de la région est représenté par des formations continentales appartenant au quaternaire, pliocène et au miocène supérieure ainsi que l'oligocène qui correspondent successivement aux formations :

- Alluvions anciennes et récentes, colluvions de pentes, coulées argileuses, tufs calcaires et croûtes calcaires
- Galets roulés
- Calcaire à hélicidés, gypses
- Argiles, conglomérats

Localement, le glissement s'est produit au niveau de formation d'argiles et de marnes de différents aspects et couleurs d'origine sédimentaire. Néanmoins, l'affleurement de



Photo (II.1) : Vue en plan du site de glissement

II-2). Observation des désordres :

Les désordres, qui occupent une superficie visible, constitués de plusieurs fissures longitudinales, ouvertes au cœur de la chaussée et du versant et quelques fissures transversales.

Ces désordres du talus de remblai, ont toutefois, évolué pendant la période pluvieuse et entraîne la déformation partielle de la chaussée.

L'examen de la morphologie du terrain et des gabions existants qui sont restés en place, montre que les désordres sont dus à un glissement avec une déformation du sol support du remblai du à la saturation de celui-ci.

Les déformations verticales (tassements) observées sur le gabion sont dues à un ancrage insuffisant dans les argiles stables ; ce qui semble justifier sa déformation.



Photo (II.2) : *Affaissement et glissement du remblai routier, gessière de sécurité inclinée par le mouvement*

Un cours d'eau, apparemment de faible ampleur superficielle se déverse en constituant deux branches, l'une s'écoule sur le trajet actuel sous le dalot, et l'autre branche emprunte un autre trajet naturel qui est l'axe transversal du remblai, les eaux ainsi s'accumulent et tentent de se frayer un autre cheminement en passant sous le remblai existant.



Photo (II.3) : écoulement des eaux à travers le talus

Les désordres sont directement liés aux caractéristiques des sols et aux régimes hydrauliques ou le régime initial est celui de la pente naturelle. La construction des remblais de recharge diminue la perméabilité des sols (sous l'action de son poids propre) d'où une sorte de barrage interne qui oblige la nappe à s'élever et devient presque captive en créant des conditions de stabilité plus défavorable.

II.3). Résultats de la reconnaissance géotechnique :

II-3.1). Reconnaissance in situ :

Un (1) sondage carotté de 30m de profondeur a été réalisé en tête du talus de remblai. Celui-ci a permis de distinguer les horizons suivants :

- En tête de talus, une couche de remblai de nature argileuse.
- En profondeur, on retrouve une couche de argile sableuse.
- En profondeur, on retrouve une couche de argile marneuse.
- En profondeur, on retrouve une couche de marne grise.
- Au delà' on retrouve une couche de grés tendre.

II-3.2). Essais au laboratoire :

a) Essais d'identification :

- ✓ Mesure de la teneur en eau naturelle ω en %.
- ✓ Mesure la masse volumique sèche γ_d en t/m^3 .
- ✓ Analyses granulométriques

- ✓ Limites d'Atterberg
 - Limite de liquidité W_L (%)
 - Limite de plasticité W_P (%)
 - Indice de plasticité I_P (%)
- ✓ Mesure de l'indice de consistance I_c en (%)
- ✓ Détermination de la valeur au bleu de Méthylène du sol VBS en(%)

b) Essais mécaniques :

- ✓ Essais de cisaillement rapide à la boîte de casa grande type (UU) (non consolidé et non drainé) avec mesure de C_u et ϕ_u respectivement cohésion en bar et angle de frottement interne en degrés.

- Couche de remblai

Les analyses granulométriques réalisées sur ces matériaux présentent des passants à $80\mu m$ de l'ordre de 60%.

Les limites d'Atte berg mesurées présent des teneurs en eau de limite de liquidité de 55%et des indices de plasticité de 25%.

Les densités sèches sont de $1.60t /m^3$ et les teneurs en eau naturelle sont de 18%. Ces matériaux sont moyennement saturés ($S_r=96\%$)

II.4). Modèle géométrique et numérique :

Notre première approche était de programmer une méthode de calcul classique sur CASTEM ou d'utiliser un critère de rupture combiné avec la méthode des éléments finis pour modéliser le glissement du terrain. Après plusieurs mois d'essais, des difficultés techniques nous ont empêché d'aller plus loin dans cette approche, pour ne pas continuer à perdre du temps, nous avons alors réorienté notre approche : Nous avons d'abord fait des calculs de stabilité sur le logiciel PLAXIS, cette première étape nous a permis de corrélérer le coefficient de sécurité avec le déplacement maximum critique dans le talus. La deuxième étape fut alors d'utiliser ce déplacement critique comme critère de stabilité dans le calcul par éléments fini de la déformation du talus par le code de calcul CASTEM.

II.4.1). Objet de la modélisation :

Le but de cette étude est d'analyser les causes de glissement du site d'une part et de trouver la méthodologie numérique et la caractérisation mécanique nécessaire à la simulation de la rupture probable du terrain constituant le site.

L'objet de la modélisation est de reproduire l'état réel du site en indiquant l'ensemble des données disponibles sur les matériaux afin d'analyser les phénomènes observés, en particulier le glissement du site en question.

Une attention particulière est apportée à la détermination des paramètres mécaniques et hydrauliques des matériaux. C'est l'objet de la synthèse géotechnique sur les matériaux qui précise plus particulièrement les valeurs des paramètres mécaniques (module de Young, angle de frottement, cohésion ...etc.)

a) *Modèle géométrique et numérique :*

Le site est modélisé par une coupe verticale à deux dimensions, il à la forme d'un trapèze, quant à la morphologie du terrain elle est caractérisé par des déclivités pratiquement faibles qui varient de 7% à 32%. Le talus s'étend à une longueur de 140m et d'une hauteur variable de 26.29m, dans la partie droite et 10m dans la partie gauche. Le modèle est discrétisé par un maillage en éléments finis avec des éléments triangulaires à 3 nœuds.

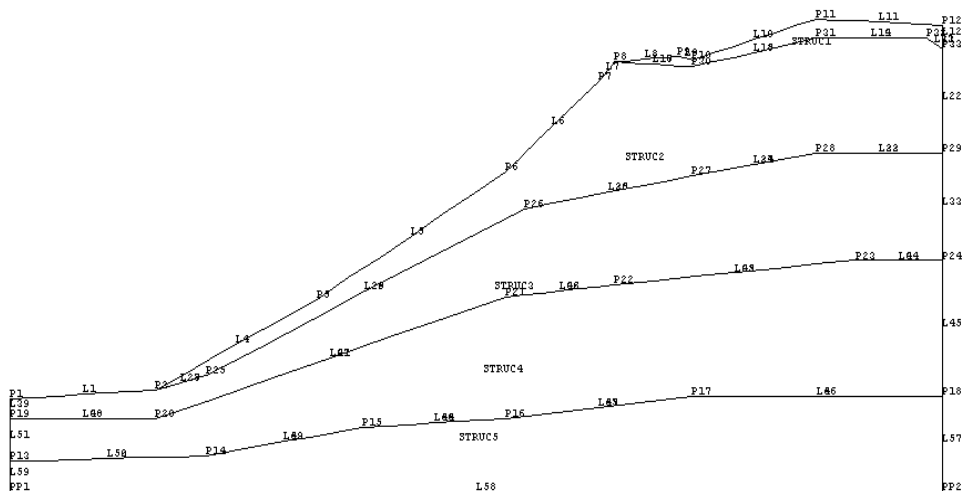


Figure (II.12) : *Modèle géométrique*

b) Modèle géotechnique :

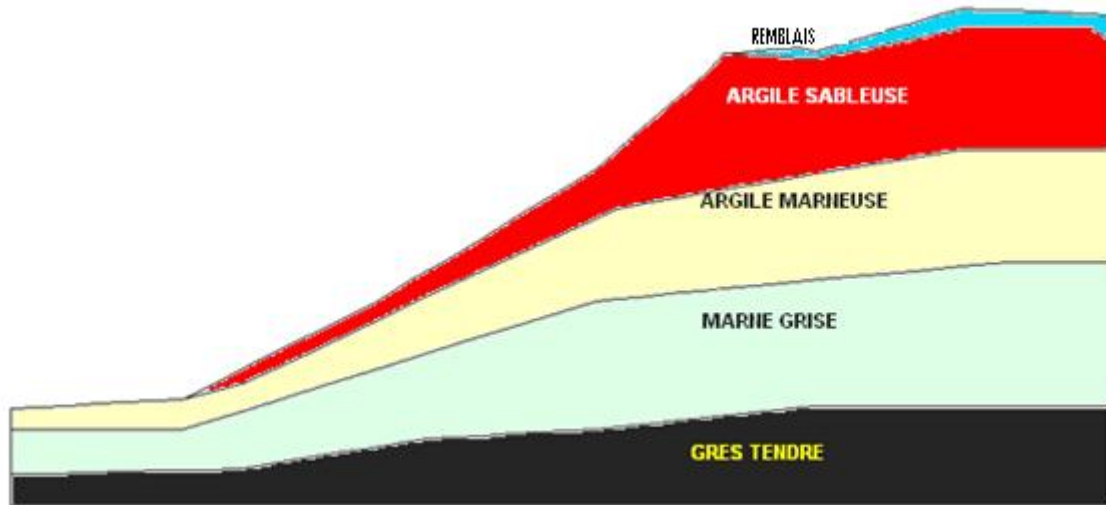


Figure (II.13) : Modèle géotechnique

Le modèle géotechnique considère (05) couches de sol, de différentes natures.

La loi de comportement pour les (05) couches est identique mais les paramètres sont différents la loi de comportement retenue est le modèle de Cam Clay Ce modèle a été Utilisé pour le calcul avec les données géotechniques qui sont dans le tableau ci-dessous :

Type de sol	γ_d KN/m ³	γ_{sat} KN/m ³	Module de Young E N/m ²	Coefficient de poisson ν	Cohésion C (KN/m ²)	Angle de frottement φ
Remblai	16.00	19.50	$2 \cdot 10^7$	0.30	0.00	25
Argile Sableuse	17.30	20.70	$1.5 \cdot 10^7$	0.35	53.00	16
Argile Marneuse	17.80	21.10	$1.5 \cdot 10^7$	0.35	77.00	21
Marne Grise	14.70	19.10	$1.5 \cdot 10^7$	0.35	60.00	16
Grés	22.00	22.00	$2.2 \cdot 10^7$	0.30	24.00	39

Tableau(II.2) : Caractéristiques géotechniques des couches de sol

Type de sol	E_0	P_0 (MP)	C_c	C_g	LAMDA	KAPA
Remblai	0.769	620	0.255	0.065	0.111	0.028
Argile Sableuse	0.769	620	0.255	0.065	0.111	0.028
Argile Marneuse	0.680	1630	0.122	0.020	0.053	0.009
Marne Grise	0.637	1450	0.106	0.030	0.046	0.013
Grés	0.637	1450	0.106	0.030	0.046	0.013

Tableau(II.3) : Caractéristiques audiométriques des couches de sol

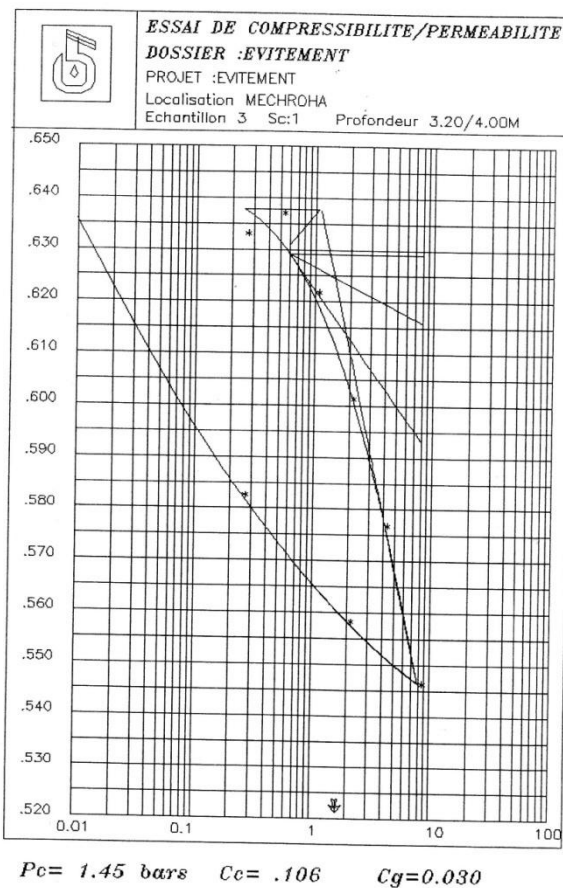
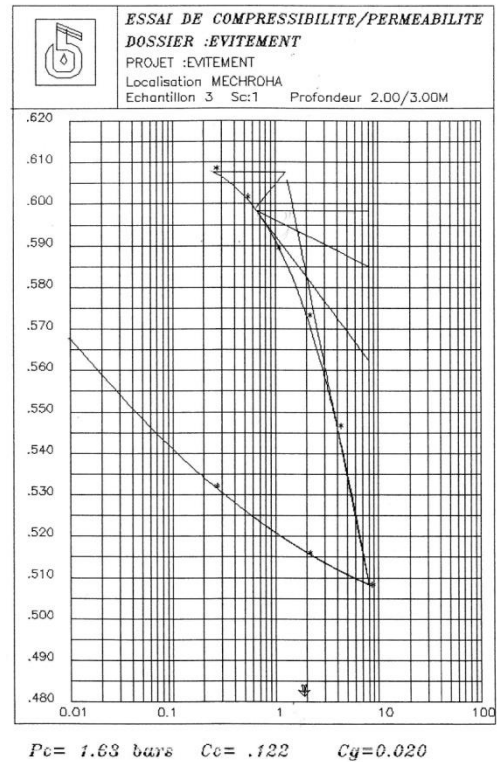
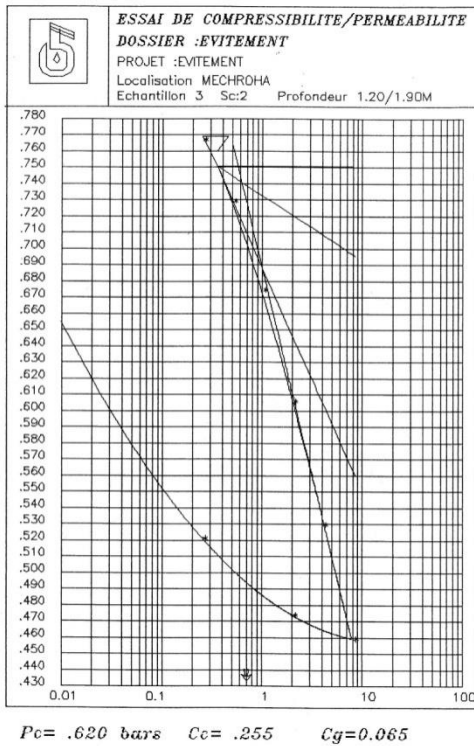


Figure (II.14) Résultats essais audiométriques des trois couches

Pour le calcul de LAMDA et KAPA on utilise les formules citées dans la **Figure (II.8)**

$$\text{LAMDA} = C_c / 2.303$$

$$\text{KAPA} = C_g / 2.303$$

Remarque : les données audiométriques des deux couches extrêmes : remblais et grès n'étant pas disponibles, on a pris les caractéristiques des couches voisines.

c) Conditions aux limites :

Les conditions aux limites dans un problème sont souvent complexes et elles conditionnent naturellement la qualité et la précision de la modélisation. Les conditions aux limites mécaniques sont celles se basant sur les équations d'équilibre mécanique

Elles sont généralement de deux types ; Soit cinématique, soit statique.

Dans notre cas, les déplacements sont imposés nuls selon l'axe OX à gauche et à droite du talus et nuls selon l'axe OY sur le fond du talus.

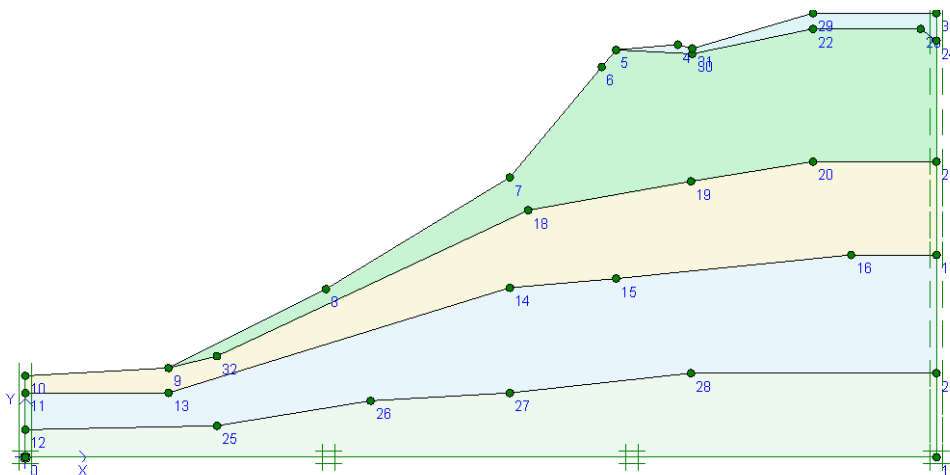


Figure (II.15) : conditions aux limites par logiciel plaxis

II-5. Les calculs

Fichier Ecrit En Langage GIBIANE

* DEBUT DU FICHIER geotech.DGIBI

*

TITR 'magister djahmi ;

OPTI DIME 2 ELEM TRI3 MODE PLAN CONT ;

*

* *******GEOMETRIE*******

*

* **POINTS**.....

P1= 0.00 692.08 ;

P2= 9.19 692.57 ;

*P3= 12.36 693.46 ;

*P4= 18.03 696.18 ;

P5= 19.33 697.66 ;

P6= 31.21 704.87 ;

P7= 37.08 709.96 ;

P8= 38.03 711.02 ;

P9= 41.99 711.34 ;

P10= 42.94 711.15 ;

P11= 50.70 713.42 ;
P12= 58.69 713.10 ;
PP1= 0. 686.85 ;
PP2= 58.69 686.85 ;
P13= 0.00 688.56 ;
P14= 12.36 688.88 ;
P15= 22.18 690.48 ;
P16= 31.22 690.96 ;
P17= 42.94 692.24 ;
P18= 58.69 692.24 ;
P19= 0.00 690.96 ;
P20= 9.19 690.96 ;
P21= 31.21 697.80 ;
P22= 38.03 698.44 ;
P23= 53.24 699.88 ;
P24= 58.69 699.88 ;
P25= 12.36 693.36 ;
P26= 32.36 702.81 ;
P27= 42.94 704.64 ;
P28= 50.71 705.92 ;
P29= 58.69 705.92 ;
P30= 42.94 710.76 ;
P31= 50.70 712.36 ;
P32= 57.68 712.36 ;

P33= 58.69 711.72 ;

*

***LIGNES**.....

d1=6 ;

L1 = P1 DROI d1 P2 ;

*L2 = P2 DROI d1 P3 ;

*L3 = P3 DROI d1 P4 ;

L4 = P2 DROI d1 P5 ;

L5 = P5 DROI d1 P6 ;

L6 = P6 DROI d1 P7 ;

L7 = P7 DROI d1 P8 ;

L8 = P8 DROI d1 P9 ;

L9 = P9 DROI d1 P10 ;

L10 = P10 DROI d1 P11 ;

L11 = P11 DROI d1 P12 ;

L12 = P12 DROI d1 P33 ;

L13 = P33 DROI d1 P32 ;

L14 = P32 DROI d1 P31 ;

L15 = P31 DROI d1 P30 ;

L16 = P30 DROI d1 P8 ;

L17 = P8 DROI d1 P30 ;

L18 = P30 DROI d1 P31 ;

L19 = P31 DROI d1 P32 ;

*L20 = P31 DROI d1 P32 ;

L21 = P32 DROI d1 P33 ;
L22 = P33 DROI d1 P29 ;
L23 = P29 DROI d1 P28 ;
L24 = P28 DROI d1 P27 ;
L25 = P27 DROI d1 P26 ;
L26 = P26 DROI d1 P25 ;
L27 = P25 DROI d1 P2 ;
L28 = P2 DROI d1 P25 ;
L29 = P25 DROI d1 P26 ;
L30 = P26 DROI d1 P27 ;
L31 = P27 DROI d1 P28 ;
L32 = P28 DROI d1 P29 ;
L33 = P29 DROI d1 P24 ;
L34 = P24 DROI d1 P23 ;
L35 = P23 DROI d1 P22 ;
L36 = P22 DROI d1 P21 ;
L37 = P21 DROI d1 P20 ;
L38 = P20 DROI d1 P19 ;
L39 = P19 DROI d1 P1 ;
L40 = P19 DROI d1 P20 ;
L41 = P20 DROI d1 P21 ;
L42 = P21 DROI d1 P22 ;
L43 = P22 DROI d1 P23 ;
L44 = P23 DROI d1 P24 ;

L45 = P24 DROI d1 P18 ;

L46 = P18 DROI d1 P17 ;

L47 = P17 DROI d1 P16 ;

L48 = P16 DROI d1 P15 ;

L49 = P15 DROI d1 P14 ;

L50 = P14 DROI d1 P13 ;

L51 = P13 DROI d1 P19 ;

L52 = P13 DROI d1 P14 ;

L53 = P14 DROI d1 P15 ;

L54 = P15 DROI d1 P16 ;

L55 = P16 DROI d1 P17 ;

L56 = P17 DROI d1 P18 ;

L57 = P18 DROI d1 PP2 ;

L58 = PP2 DROI d1 PP1 ;

L59 = PP1 DROI d1 P13 ;

STRUC1= L8 ET L9 ET L10 ET L11 ET L12 ET L13 ET L14 ET L15 ET L16 ;

STRUC2= L4 ET L5 ET L6 ET L7 ET L17 ET L18 ET L19 ET

L21 ET L22 ET L23 ET L24 ET L25 ET L26 ET L27 ;

STRUC3= L1 ET L28 ET L29 ET L30 ET L31 ET L32 ET L33 ET L34 ET L35

ET L36 ET L37 ET L38 ET L39 ;

STRUC4= L40 ET L41 ET L42 ET L43 ET L44 ET L45 ET L46 ET L47 ET L48

ET L49 ET L50 ET L51 ;

STRUC5= L52 ET L53 ET L54 ET L55 ET L56 ET L57 ET L58 ET L59 ;

TRACE (STRUC1 ET STRUC2 ET STRUC3 ET STRUC4 ET STRUC5) ;

* **LES SURFACES**.....

SURF1=surf STRUC1 'PLANE' coul bleu ;

SURF2=surf STRUC2 'PLANE' coul rouge;

SURF3=surf STRUC3 'PLANE' coul jaune ;

SURF4=surf STRUC4 'PLANE' coul vert ;

SURF5=surf STRUC5 'PLANE' ;

SURFTOT1= SURF1 ET SURF2 ET SURF3 ET SURF4 ET SURF5 ;

ELIM 0.01 SURFTOT1 ;

TRACE SURFTOT1 ;

*

*** *****CHOIX DU COMPORTEMENT DU MATERIAU**

ET DU MODEL EF*****

*

M1=MODE SURF1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CAM_CLAY ;

M2=MODE SURF2 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CAM_CLAY ;

M3=MODE SURF3 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CAM_CLAY ;

M4=MODE SURF4 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CAM_CLAY ;

M5=MODE SURF5 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CAM_CLAY ;

*

MATTOT=M1 ET M2 ET M3 ET M4 ET M5 ;

*

*******DONNEES MATERIAU ET**

ELEMENT*****

*

*EPAI : épaisseur de l'élément (m)

*YOUN: module de Young (N/m²)

*NU : coefficient de poisson (sans unité)

*E0 : indice des vides initial (sans unité)

*COHE : cohésion (N/m²)

*M : coefficient de frottement ou pente critique $M=6 \sin \phi / (3-\sin \phi)$ degré ou sans unité

*P0 : pression de reconsolidation (N/m²)

*KAPA : pente élastique dans le diagramme e-log(p) $k=C_s/\ln 10$

*LAMD : pente plastique dans le diagramme e-log(p) $\lambda_m=C_c/\ln 10$

*G1 : module de cisaillement $G=E/2(1+\text{NU})$ (N/m²)

*RHO : masse volumique (kg/m³)

* **LES COUCHES**.....

*

*REMBALIS

CARMAT1=MATE M1 DIM3 1. YOUN 2.E7 NU 0.3 E0 0.769 COHE 0 M 0.984

P0 620 LAMD 0.111 KAPA 0.028RHO 1950;

*

*ARGILE SABLEUSE

CARMAT2=MATE M2 DIM3 1. YOUN 1.5E7 NU 0.35 E0 0.769 COHE 5.3E4

M 0.607 P0 620 LAMD 0.111 KAPA 0.028 RHO 2070 ;

*

*ARGILE MARNEUSE

CARMAT3=MATE M3 DIM3 1. YOUN 1.5E7 NU 0.35 E0 0.680 COHE 7.7E4

M 0.814 P0 1630 LAMD 0.053 KAPA 0.009 RHO 2110 ;

*

***MARNE GRISE**

CARMAT4=MATE M4 DIM3 1. YOUN 1.5E7 NU 0.35 E0 0.637COHE 6.E4

M 0.607 P0 1450 LAMD 0.046 KAPA 0.013 RHO 1910 ;

*

***GRES TENDRE**

CARMAT5=MATE M5 DIM3 1. YOUN 2.2E7 NU 0.3 E0 0.637 COHE 240.E4 M 1.593

P0 1450 LAMD 0.046 KAPA 0.013 RHO 2200 ;

*

CARTOT=CARMAT1 ET CARMAT2 ET CARMAT3 ET CARMAT4 ET CARMAT5 ;

*

*******CONDITIONS AUX LIMITES*******

*

COND1=BLOQ UY L58 ;

COND2=BLOQ UX L39 ;

COND3=BLOQ UX L51 ;

COND4=BLOQ UX L59 ;

COND5=BLOQ UX L12 ;

COND6=BLOQ UX L22 ;

COND7=BLOQ UX L33 ;

COND8=BLOQ UX L45 ;

COND9=BLOQ UX L57 ;

COND10=BLOQ UZ SURFTOT1 ;

*

CONDTOT1 = COND1 ET COND2 ET COND3 ET COND4 ET COND5 ET COND6

ET COND7 ET COND8 ET COND9 ET COND10 ;

*

*****CHARGEMENT*****

*

*..... (POIDS PROPRE).....

MASS1=MASSE M1 CARMAT1 ;

POP1=MANU CHPO SURF1 1 UY -9.81 NATURE DIFFUS ;

FOR1=MASS1*POP1;

MASS2=MASSE M2 CARMAT2;

POP2=MANU CHPO SURF2 1 UY -9.81 NATURE DIFFUS ;

FOR2=MASS2*POP2;

MASS3=MASSE M3 CARMAT3;

POP3=MANU CHPO SURF3 1 UY -9.81 NATURE DIFFUS ;

FOR3=MASS3*POP3;

MASS4=MASSE M4 CARMAT4;

POP4=MANU CHPO SURF4 1 UY -9.81 NATURE DIFFUS ;

FOR4=MASS4*POP4;

MASS5=MASSE M5 CARMAT5;

POP5=MANU CHPO SURF5 1 UY -9.81 NATURE DIFFUS ;

FOR5=MASS5*POP5;

POPTOT1= FOR1 ET FOR2 ET FOR3 ET FOR4 ET FOR5;

*

FORTOT=POPTOT1 ;

*******RESOLUTION*******

*.....**MATRICE DE RIGIDITE**.....

RIGI1=RIGI MATTOT CARTOT ;

RIGICL1=RIGI1 ET CONDTOT1 ;

DEPL1=RESO RIGICL1 FORTOT ;

*

*******POST-TRAITEMENT*******

*

*.....**déplacements**.....

DEF0= DEFO DEPL1 SURFTOT1 0;

DEF1= DEFO DEPL1 SURFTOT1 1. ROUGE;

LIST (MAXI ABS (EXCO depl1 UX)) ;

LIST (MAXI ABS depl1 AVEC (MOTS Uy)) ;

TRACE (DEF0 ET DEF1) ;

depx1= exco ux depl1 ;

Trace depx1 surftot1 ;

depY1= exco uydepl1 ;

Trace depY1 surftot1 ;

*.....**les contraintes**.....

SIG1 = SIGMA MATTOT CARTOT Dep1;

CALSUP = CALP SIG1 CARTOT MATTOT SUPE;

OPTI ISOV SURFACE;

CALSUPX = EXCO SMXX CALSUP;

*TRACE MATTOT CALSUPX SURFTOT1;

CALSUPX = EXCO SMZZ CALSUP;

*TRACE MATTOT CALSUPX SURFTOT1;

CALSUPX = EXCO SMXZ CALSUP;

*TRACE MATTOT CALSUPX DEF1 ;

*les déformations.....

EPS1 = EPSI MATTOT CARTOT Dep1;

CALSUP = CALP EPS1 CARTOT MATTOT SUPE;

OPTI ISOV SURFACE;

CALSUPX = EXCO EPXX CALSUP;

TRACE MATTOT CALSUPX SURFTOT1;

CALSUPX = EXCO EPYY CALSUP;

TRACE MATTOT CALSUPX SURFTOT1;

CALSUPX = EXCO EPZZ CALSUP;

TRACE MATTOT CALSUPX DEF1 ;

*

*****FIN DE FICHIER*****

FIN ;

*

II -6). Résultats :

Le modèle EF choisi est le triangle massif à trois nœuds, la figure suivante montre le maillage obtenu.

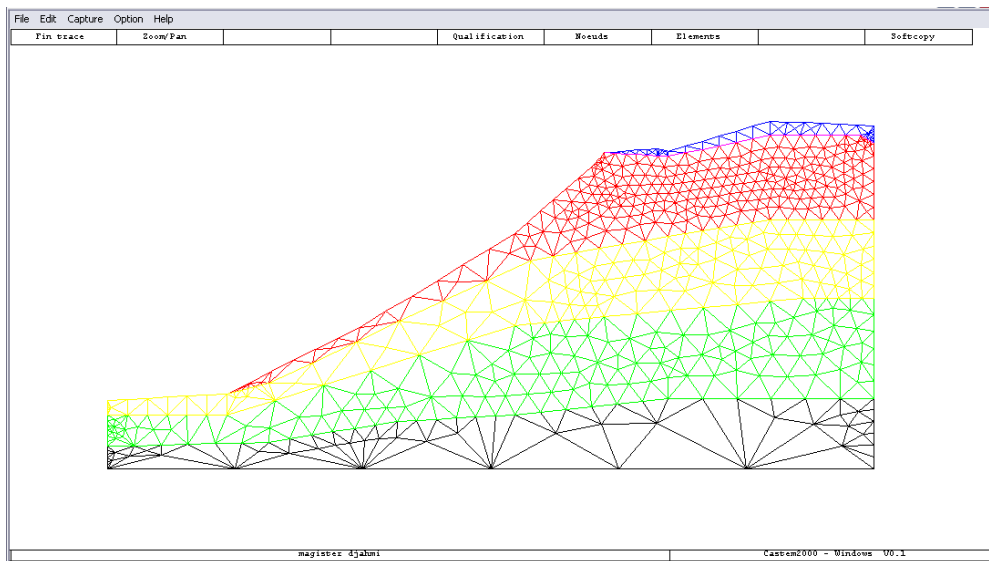


Figure (II-16) : *maillage du modèle*

Nous présentons les principaux résultats obtenus, graphiquement dans ce qui suit :

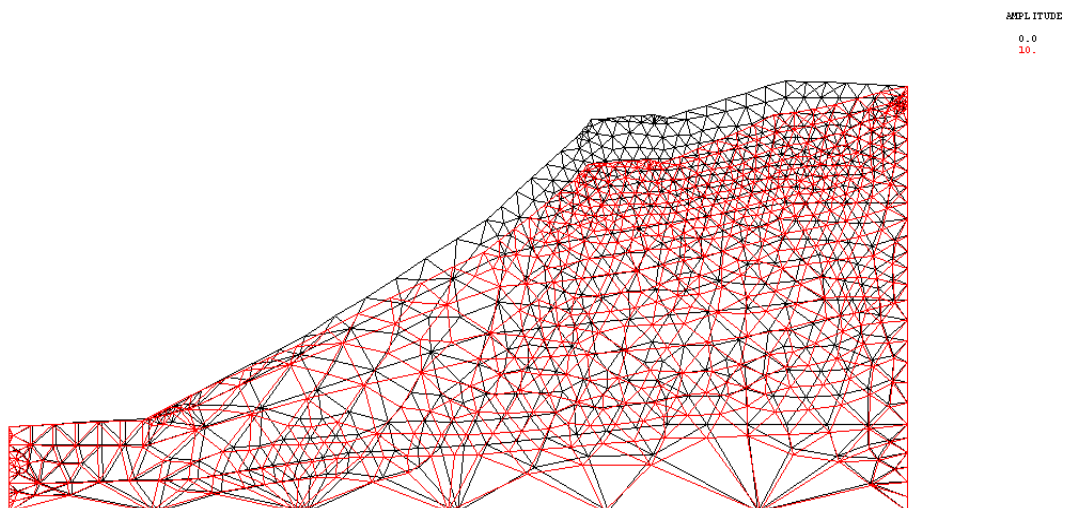


Figure (II-17) : *maillage déformé du modèle*

La déformation du maillage met en évidence l'association de deux types de mouvement : un tassement en tête du versant, et une translation d'ensemble qui provoque des déplacements des matériaux. Le tassement est caractérisé par des vecteurs de déplacement important dirigés vers la partie basse du talus

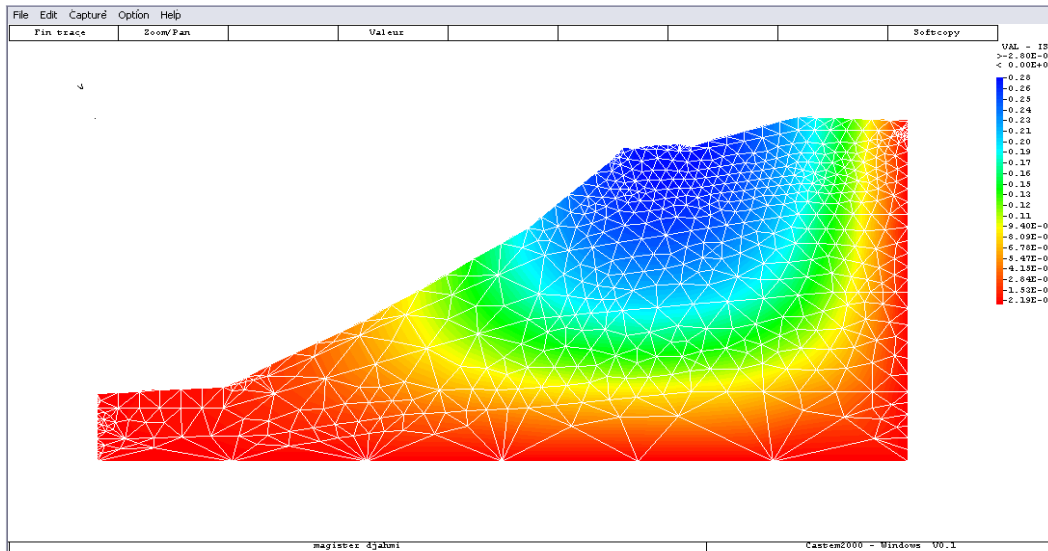


Figure (II-18) : Déplacement U_y

Ces déplacements sont le résultat de la somme des déformations élémentaires créées en tout point du massif, le tassement maximal en tête du talus atteint en fin de la phase

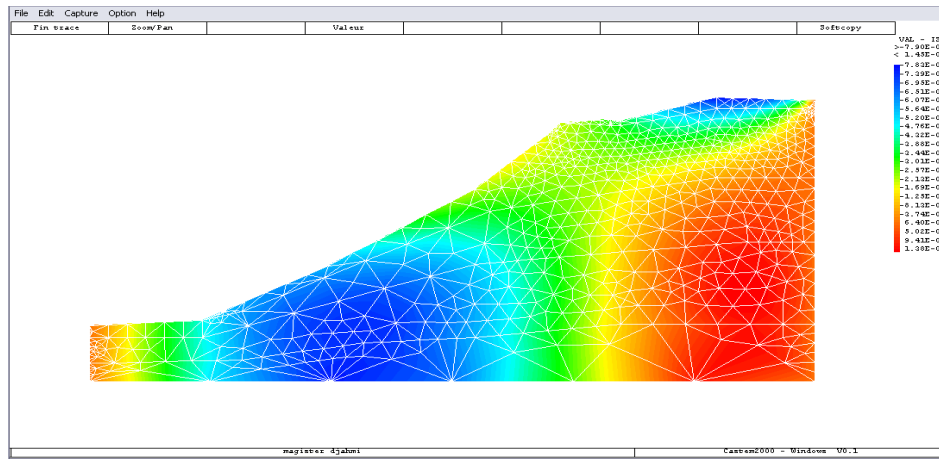


Figure (II-19) : Déplacement horizontal U_x

II -7). Etude paramétrique

L'objectif de cette étude est de montrer l'effet des différents paramètres sur le comportement du talus. Deux types de paramètres sont étudiés :

- Paramètres de modélisation
- Paramètres géotechniques

II -7.1). Paramètres de modélisation

Deux paramètres sont étudiés : L'élément fini utilisé et la densité de maillage

II -7.1) Eléments finis

On compare les résultats de déplacement maximaux obtenu avec deux types d'éléments finis : un triangle à 3 nœuds et un quadrilatère à 4 nœuds.

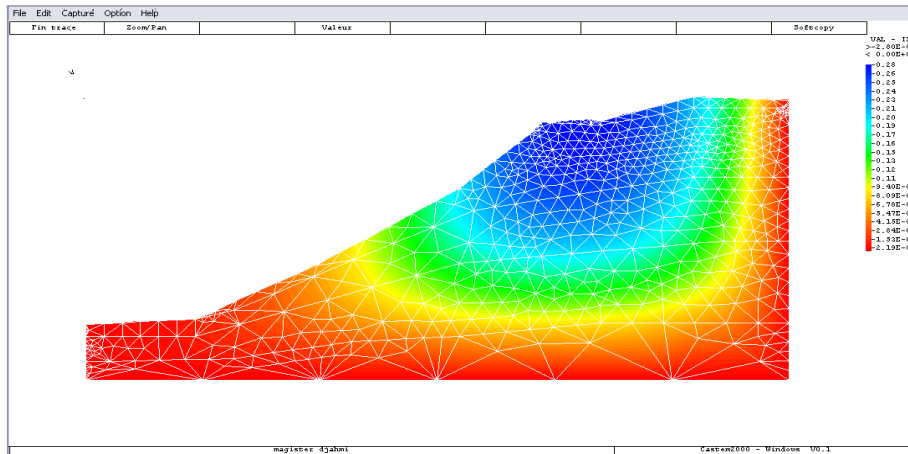


Figure (II-20) : Déplacement UY élément triangulaire

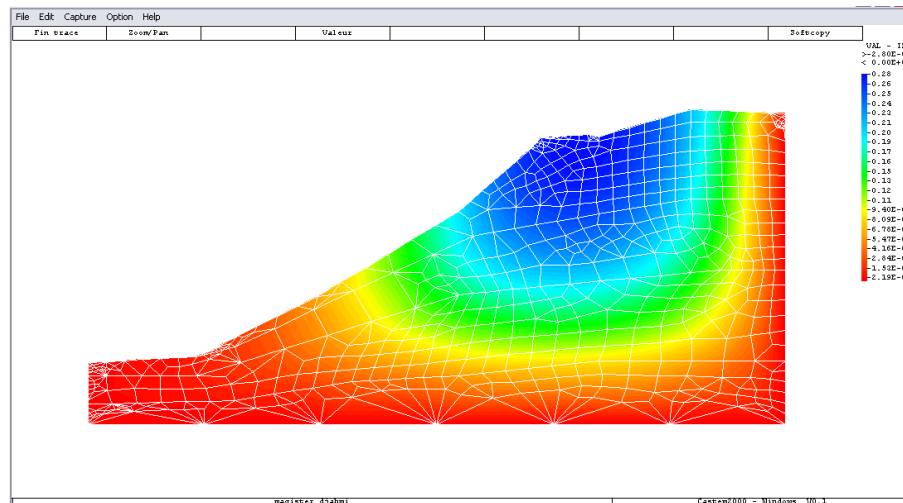


Figure (II-21) : Déplacement UY élément quadrilatéral

Les déplacements UY maximal trouvés identiques : élément triangulaire UX max= 0.364 m et élément quadrilatère UY max= 0.364 m nous concluons que l'élément choisi n'influe pas sur les résultats.

II -7.1.2). Densité du maillage

On compare les résultats de déplacement maximal obtenu avec deux types densités de maillage : 6 éléments par ligne et 10 éléments par ligne.

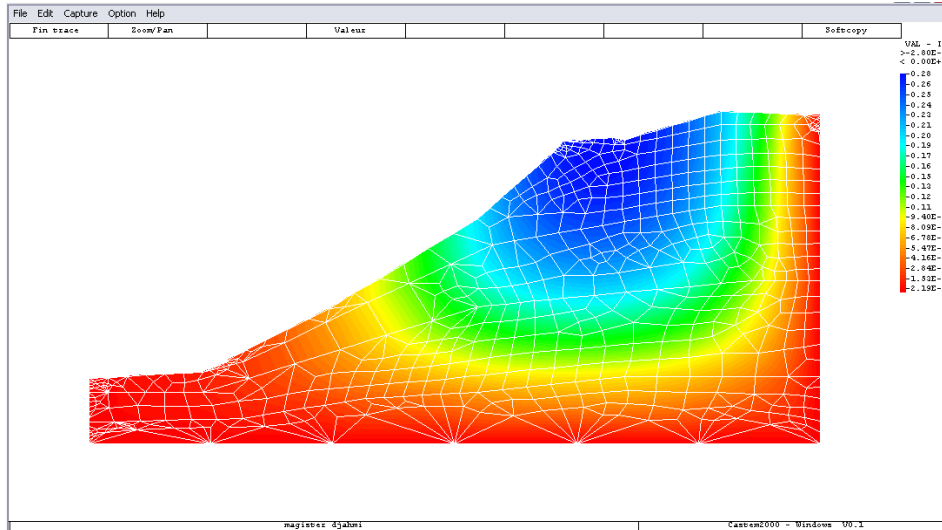


Figure (II-22) : Déplacement U_y 6 éléments quadrilatéral par ligne

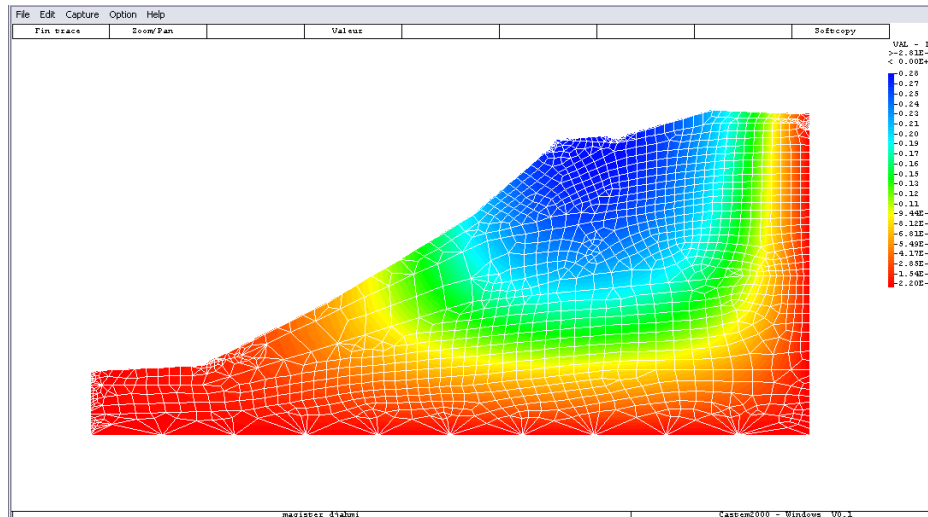


Figure (II-23) : Déplacement U_y 10 éléments quadrilatéral par ligne

Les déplacements U_y maximal trouvés identiques : 6 élément quadrilatères $U_y \text{ max} = 0.364 \text{ m}$ et 10 éléments quadrilatère $U_y \text{ max} = 0.364 \text{ m}$ nous concluons que la densité de maillage n'influe pas beaucoup sur les résultats.

II -7.2). Paramètres géotechniques

Trois paramètres sont étudiés : La cohésion, l'angle de frottement et le module de d'élasticité. On fait varier les valeurs initiales par de diminutions successives de 10%.

II -7.2.1).La cohésion

On étudie l'influence d'une chute de 10%, 20%, 30 % et 40% de la cohésion des différentes couches sur le déplacement U_y .

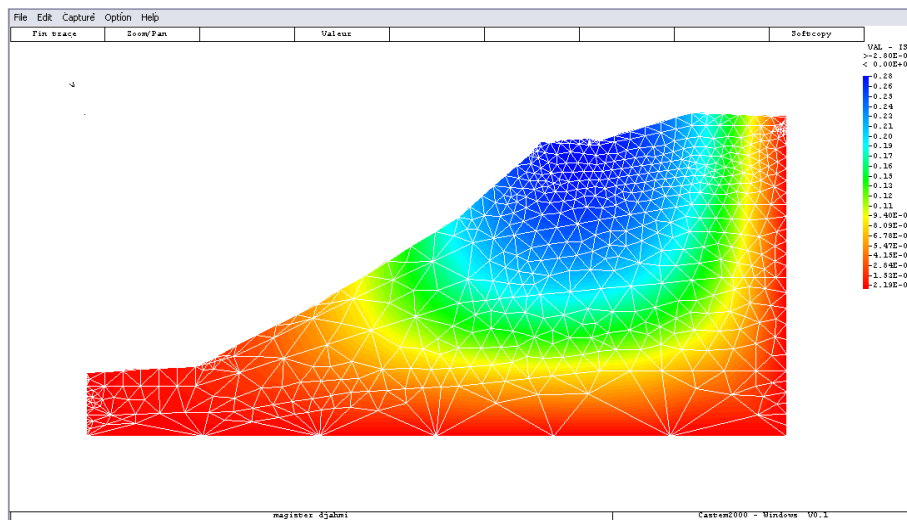


Figure (II-24) : Déplacement U_y cohésion origine

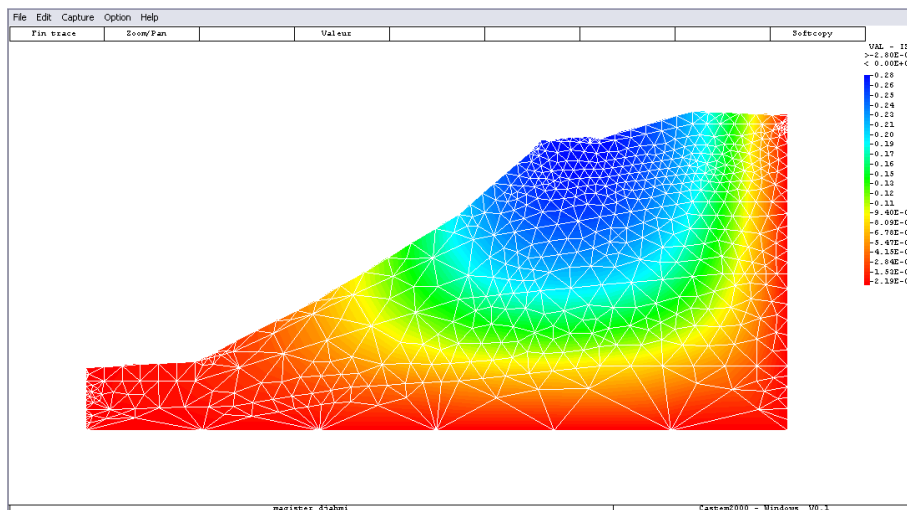


Figure (II-25) : Déplacement U_y cohésion diminuée de 20%

Cohésion	Cohésion d'origine	- 10%	-20%	-30%	-40%
UY	0.364	0.364	0.364	0.364	0.364

Tableau(II.4) : Tableau de valeurs de diminution de Cohésion

Les déplacements Uy maximal trouvés identiques, nous concluons que la cohésion n'influe pas beaucoup sur les résultats des déplacements pour ce modèle.

II -7.2.2).L'angle de frottement

On étudie l'influence d'une chute de 10%, 20%, 30% et 40% de l'angle de frottement des différentes couches sur le déplacement Uy.

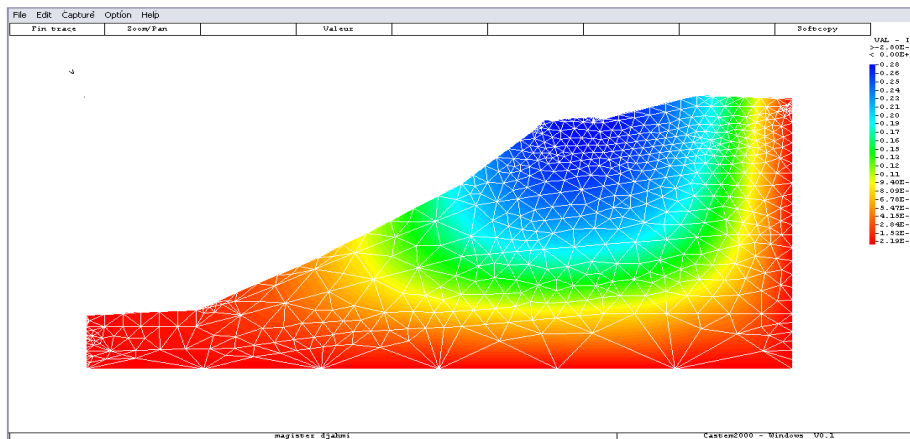


Figure (II-26) : Déplacement Uy angle de frottement d'origine

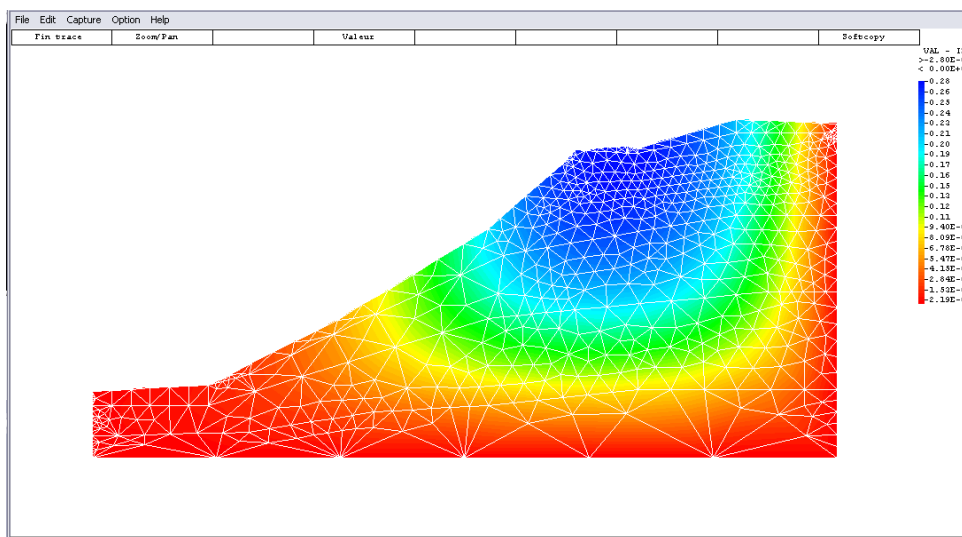


Figure (II-27) : Déplacement Uy angle de frottement diminué de 20%

Angle de frottement	d'origine	- 10%	-20%	-30%	-40%
UY	0.364	0.364	0.364	0.364	0.364

Tableau(II.5) : Tableau de valeurs de diminution Angle de frottement

Les déplacements Uy maximal trouvés identiques : nous concluons que cette diminution n'influe pas beaucoup sur les résultats.

II -7.2.3). Le module d'élasticité

Personne ne peut nier l'influence de la teneur en eau des différentes couches de sol sur la stabilité du terrain, d'ailleurs l'observation visuelle de notre cas laisse remarquer la présence en grande quantité d'eau due à un mauvais drainage de cette dernière d'où ce désordre dans la stabilité du terrain. Le modèle qu'on a choisi « clam-Clay » ne permet pas de prendre en compte directement la variation de la teneur en eau dans les différentes couches de sol du terrain, on a alors opté pour la corrélation entre une des caractéristiques mécaniques du sol et la teneur en eau. Une recherche bibliographique nous a conduits à choisir le module d'élasticité comme critère de variation indirecte de la teneur en eau car il est bien corrélé avec cette dernière [Krarup 1994]

Krarup a observé que le module de déformation des couches inférieures diminue de 35 à 40% avec la saturation

On étudie l'influence d'une chute de 10%, 20%, 30% et 40% du module d'élasticité des différentes couches sur le déplacement Uy.

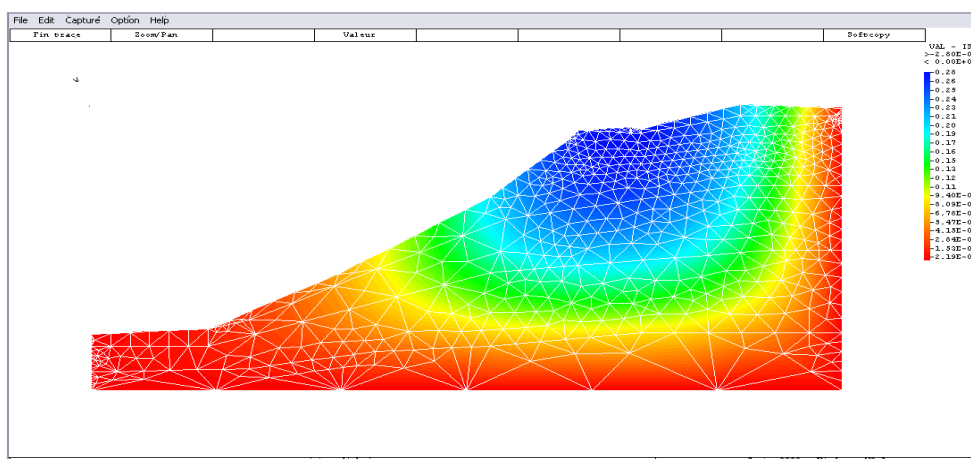


Figure (II-28) : Déplacement Uy module d'élasticité d'origine

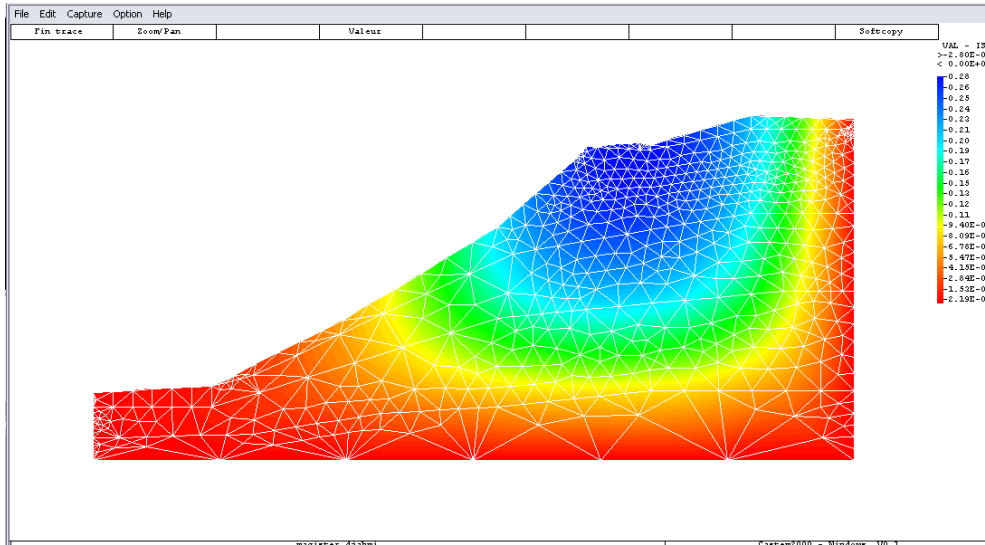


Figure (II-29) : Déplacement U_y module d'élasticité diminué de 20%

Module d'élasticité	d'origine	- 10%	-20%	-30%	-40%
UY	0.364	0.404	0.455	0.520	0.606

Tableau(II.6) : Tableau de valeurs de diminution de module d'élasticité

Les déplacements U_y maximal trouvés augmente avec la diminution de E donc avec l'augmentation de la teneur en eau. Ce résultat est logique et prévu car la teneur en eau influence beaucoup les caractéristiques mécaniques des couches du sol comme le rapporte plusieurs références bibliographiques et dans le modèle de Cam Clay c'est le module d'élasticité qui est pris en compte pour le calcul.

Ce résultat est en concordance avec les observations faites sur le terrain en effet un cours d'eau, apparemment de faible ampleur superficielle se déverse en constituant deux branches, l'une s'écoule sur le trajet actuel sous dalot, et l'autre branche emprunte un autre trajet naturel qui est l'axe transversal du remblai, les eaux ainsi s'accumulent et tentent de se frayer un autre cheminement en passant sous le remblai existant. Les désordres sont directement liés aux caractéristiques des sols et aux régimes hydrauliques ou le régime initial est celui de la pente naturelle. La construction des remblais de rechargement diminue la perméabilité des sols (sous l'action de son poids propre) d'où une sorte de barrage interne qui oblige la nappe à

s'élever et devient presque captive en créant des conditions de stabilité plus défavorable.

La solution (ou les solutions) à adopter doit viser principalement l'abaissement du niveau de la nappe d'eau et le drainage des eaux superficielles.

II -8. Méthode de confortement préconisé

L'étude technique des variantes proposées comme solution au problème posé doit répondre aux conditions technico-économiques, la solution qui présente le plus d'avantage sera prise en considération pour le choix de réalisation.

1 - terrassement

AVANTAGE :

- Facilement réalisable

INCONVENIENTS :

- N'assure pas la stabilité.
- Volume de terrassements important.
- Au cours de la réalisation des terrassements.

2-masque drainant avec renforcement en géotextile

AVANTAGES :

- Facilement réalisable
- Assurer un bon drainage interne du versant
- Abaisser le niveau statique de la nappe phréatique
- Le masque drainant jouera deux (02) rôles : l'un comme butée et l'autre comme filtre drainant

INCONVENIENTS :

- risque de contamination à long terme.
- Coefficient de sécurité faible.

3-mur en palplanche

AVANTAGES :

- Assure la stabilité avec $F_s=1.40$.

INCONVENIENTS :

- Solution très coûteuse.
- Nécessite une main-d'œuvre spécialisée.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail de recherche, nous pouvons conclure les points principaux suivant :

- Le glissement de terrain est un phénomène très dangereux et très compliqué à étudier car il fait intervenir beaucoup de paramètres à prendre en compte
- Les modèles de comportement de sols sont nombreux mais l'utilisateur doit veiller à utiliser les paramètres géotechniques les plus proches de la réalité du terrain (drainé, non drainé, saturé, sec...)
- La méthode des éléments finie est une méthode approchée de calcul très utile mais son utilisation correcte demande une attention particulière lors du choix du modèle mais aussi lors de l'interprétation des résultats
- Le code de calcul CASTEM est très puissant car il dispose de modèles de comportement très performant, il est très adapté aux travaux de recherche car il permet de choisir et de changer les paramètres de modélisation les plus poussés.
- Bien que beaucoup d'aléas nous ont fait perdre du temps, nous avons pu récupérer les données du terrain et les utiliser dans le modèle élément fini et voir ainsi le comportement du talus.
- Une étude paramétrique géotechnique a montré l'importance de la présence d'eau dans le sol (prise en compte indirectement par la variation du module d'élasticité dans notre cas) qui diminue fortement les caractéristiques mécaniques des couches du sol et déstabilise ainsi le talus.
- Les solutions de confortements doivent principalement œuvrer à abaisser le niveau de la nappe d'eau souterraine et au bon drainage des eaux superficielles.
- Les solutions de confortement existent c'est au praticien de choisir parmi toutes ces solutions celle qui convient au mieux au cas présent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: **M ALHAYARI. (1989)**, Une détermination des caractéristiques mécaniques résiduelles de versants naturels. Méthodes à l'équilibre limite et des éléments finis. *Thèse de doctorat, université de Grenoble, France*
- [2]: **A BENAÏSSA. (1989)**, Glissement de terrain-calcul de stabilité-O.P.U.
- [3]: **A.W BISHOP. (1955)**, the use of slip circle in the stability analyses of slopes. *Géotechnique*, V5, N1, pp.7-17.
- [4]: **R.N CHOWDHURY. (1978)**, Slope analysis, Elsevier Scientific publishing Company, Amsterdam
- [5]: **J COSTET ; G SANGLERAT. (1981)** Cours pratique de mécanique des sols. Tome 1 et 2, Duodi, Paris
- [6]: **RM FAURE (1982)**, Outil numérique en mécanique des sols- application aux stabilités des pentes, *Thèse de doctorat, université de Paris VI, France*
- [7]: **PHILIPPE PASQUET(1999)**, Calculs mécaniques II, *document interne, CEA, Paris, France*
- [8]: **Le Fi choux E. (1998)**, présentation et utilisation CASTEM 2000 ENSTA-LME
- [9]: **P RAULIN, G ROUQUES, A TOUBOL. (1974)**, Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire. *Rapport de recherche L.C.P.C n°36, Paris, France*
- [10]: **SPENCER. (1967)**, A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Géotechnique*, V17, N1, pp-11-26
- [11] **J KRARUP. (1994)**. Bearing capacity and water, part II: Measured Response. Danish Road Institute. Note 249.