

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE**  
**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**  
**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**N° d'ordre :**  
**Série :**

**Présentée pour l'obtention du Diplôme de**  
**Magister en Génie Civil**

**EFFET DE L'INSTABILITE DU TERRAIN SUR**  
**LE BATI**  
**CAS REEL DE L'UNIVERSITE MENTOURI**  
**DE CONSTANTINE**

**Option : Mécanique Des Matériaux, Des Sols Et Des Structures**

**Par : M<sup>elle</sup> CHIBANI Mounia**

**Devant le jury d'examen**

**Président: Dr HOUARI. H**

**Rapporteur: Dr BELOUAR. A**

**Examineurs: Dr LASSOUED. R**

**Dr BOULFOUL. A**

**Professeur. Université de Constantine**

**MC(A). Université De Constantine**

**MC(A). Université De Constantine**

**MC(A). Université De Constantine**

# Sommaire

Liste des notations

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

## **Chapitre1:** Introduction générale

1-1-Introduction.....	01
1-2- Problématique.....	01
1-3-Contenu de la thèse.....	02

## **Chapitre2:** Géologie globale de la wilaya de Constantine

2-1- L'importance de la reconnaissance géotechnique.....	03
2-2- Géologie globale de la wilaya de Constantine.....	03
2-2-1- Historique.....	04
2-2-2- Litostratigraphique.....	05
2-3- Géologie de la ville de Constantine.....	06
2-3-1-Tectonique.....	07
2-3-2-Structure.....	08
2-3-3-Hydrogéologie.....	08
2-4- Remarques d'ordre géotechnique.....	09

## **Chapitre3:** Certains importants mouvements des terres

3-1- Introduction.....	10
• Roquebillière (Alpes Maritimes).....	10
• Le Beausset (Var).....	10
• La RN57 (Nancy –Metz).....	10
• La Route de la Corte à Aléria en Corse.....	10
• La tranchée de la Culera sur le canal de Panama.....	10
• Mur de Quai à Göteborg (Suède).....	10
• Région de Lyon.....	10
• Le crassier de l'entrale de Jubilé près de Liège.....	11
• Eaux-Bonnes (Pyrénées- Atlantiques).....	11

• Grenoble.....	12
• Friolin.....	12
• Zone de Vizille et Séchilienne.....	12
• Sainte –Adresse(Nice).....	13
• Le Graben de Mordores.....	13
• Mont Toc dans la retenue de Vajont (1963).....	14
• Léaz.....	15
3-2-Glislements affectant la wilaya de Constantine.....	15
3-2-1-Université de Mentouri.....	16
3-2-2-Synthèse.....	17
3-2-3-Conclusion .....	17
<b>Chapitre4 : Types de mouvements de terrain</b>	
4-1-Introduction.....	18
4-2-type de rupture.....	19
4-2-1-Pente naturelles.....	19
4-2-1-1-Chutes de blocs, éboulement, écroulement.....	19
4-2-1-2-Glislements.....	20
4-2-1-3-Les mouvements lents, le fluage, solifluxion.....	21
4-2-1-4-Les coulées boueuses.....	22
4-2-2-Pentes artificielles.....	23
4-2-2-1-Talus en déblai et talus en remblai sur sol non compressibles.....	23
4-2-2-2-Talus en remblai sur sols compressibles.....	23
4-2-2-3-Digues et barrages en terre.....	24
<b>Chapitre5: Caractérisation géotechnique du site</b>	
5-1-Introduction.....	27
5-2-Localisation du site et caractérisation des sols.....	27
5-3- Technique de visualisation et stockage des données.....	29
5-4-Interprétation.....	29
5-5-Interprétation de la nouvelle empreinte.....	33
5-6- Conclusion.....	35
<b>Chapitre6: Pratique des éléments finis en géotechnique</b>	
6-1- Aperçu de la méthode des éléments finis.....	37
6-1-1-Introduction.....	37

6-1-2- Historique.....	37
6-1-3-Concept de base.....	37
6-1-4-Calcul par la MEF.....	38
6-2-présentation de Plaxis.....	38
6-2-1-Le code éléments finis Plaxis.....	39
6-2-2-Options par défaut et solutions approchées.....	39
6-3-Les modèles de comportement utilisés dans Plaxis.....	40
6-3-1-Introduction .....	40
6-3-2-Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles.....	41
6-3-3-Le modèle élastique.....	41
6-3-4-Modèle de Mohr-Coulomb.....	43
6-4-Conclusion.....	47
<b>Chapitre7: Présentation et interprétation des résultats obtenus</b>	
7-1-Introduction.....	48
7-2-Systèmes de coordonnées.....	48
7-3- Choix de la taille du modèle.....	48
7-4- Blocage.....	48
7-5-Entrée des caractéristiques générales.....	49
7-5-1-Géométrie.....	49
7-5-2-Condition aux limites.....	49
7-5-3-Caractéristique des matériaux.....	49
7-5-4- Génération du Maillage.....	50
7-5-5- Contraintes initiales.....	53
7-5-6-Ajout d'une surface piézométrique.....	54
7-5-7- Calculs.....	55
7-5-7-1-Général.....	55
7-5-7-2-paramètre.....	55
7-5-7-3- Points de contrôle.....	55
7-5-7-4-Calcul.....	56
7-5-8-Résultats.....	56
7-6-Conclusion.....	70
<b>Chapitre8: Etude paramétrique</b>	
8-1-Introduction.....	71

8-2-Effet des paramètres de calculs.....	71
8-2-1-Maillage.....	71
8-2-2-Précision des calculs.....	73
8-3-Effet des paramètres géotechniques.....	75
8-3-1-Effet des paramètres du sol.....	75
8-3-1-1-Cohésion "c".....	75
8-3-1-2-Angle de frottement " $\phi$ ".....	76
8-3-1-3-Module de Young "E".....	78
8-3-1-4-Coefficient de poisson "v".....	80
8-4-Conclusion.....	82
<b>Chapitre9: Conclusion générale</b>	
Conclusion générale.....	83
Références Bibliographiques	
Annexes	

# Liste des notations

- $\gamma_{\text{sat}}$  : Poids volumique saturé [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\varepsilon_v$  : Déformation volumique [-]  
 $\nu$  : Coefficient de Poisson [-]  
 $\nu_u$  : Coefficient de Poisson ultime [-]  
 $\sigma$  : Contrainte [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\tau$  : Contraintes de cisaillement [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\varphi$  : Angle de frottement interne du sol [°]  
 $\psi$  : Angle de dilatance du sol [°]  
 $c$  : Cohésion du sol [kN/m<sup>2</sup>]  
 $d$  : Epaisseur équivalente [m]  
 $E$  : Module d'Young [kN/m<sup>2</sup>]  
 $EA$  : Rigidité normale [kN/m]  
 $EI$  : Rigidité de flexion [kNm<sup>2</sup>/m]  
 $G$  : Module de cisaillement [kN/m<sup>2</sup>]  
 $K_0$ : Coefficient des terres au repos [-]  
 $K_x$  : Perméabilité horizontale [m/jour]  
 $K_y$  : Perméabilité verticale [m/jour]  
 $Y_{\text{ref}}$ : Unité de profondeur [m]  
 $n$  : Porosité [-]

# Liste des figures

Fig2.1: Carte de situation géographique source (Benaissa 1999).....	04
Fig2.2: Carte géologique simplifiée du site de Constantine source (Belouar 2005).....	07
Fig3.1: Novembre1985 source (Belouar, Benayoun année 2001-2002).....	16
Fig3.2 : Fouille exécutée sur une fuite d'eau du réseau incendie .....	16
Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)	
Fig3.3 : Façade Est du bloc des classes affaissement de la chaussée.....	16
Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)	
Fig4.1 : Type de mouvement avec quelles questions à se poser.....	19
Fig4.2: Glissement plan.....	20
Fig4.3: Glissement rotationnel.....	21
Fig4.4: Glissement successifs emboites.....	21
Fig4.5: Exemple de fluage.....	22
Fig4.6: Différents types de rupture.....	22
Fig4.7: Cercles de pied.....	23
Fig4.8: Cercle profond.....	23
Fig4.9: Digués et barrages en terre.....	24
Fig4.10: Glissement terrain.....	25
Fig4.11: Evolution des Glissements terrains à travers monde.....	26
Fig5.1: Empreinte de caractérisation des sols Campus Université Mentouri.....	31
Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)	
Fig5.2: Empreinte des sondages S <sub>1</sub> -S <sub>5</sub> Campus Université Mentouri.....	32
Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)	
Fig5.3: Empreinte de caractérisation des sols Campus Université Mentouri .....	36
Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)	
Fig6.1: Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.....	42
Fig6.2: Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique .....	42
Fig6.3: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.....	43
Fig6.4: Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour c=0.....	44
Fig6.5: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	44
Fig6.6: Définition du module à 50 % de la rupture.....	45
Fig6.7: Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulom.....	47

Fig7.1: La géométrie du modèle Plaxis.....	50
Fig7.2: Génération du maillage du modèle Plaxis.....	51
Fig7.3: Nœuds du modèle Plaxis.....	51
Fig7.4: Eléments du modèle Plaxis.....	52
Fig7.5: Points de Gauss du modèle Plaxis.....	52
Fig7.6: Contraintes effectives moyennes du modelé Plaxis.....	53
Fig7.7: Conditions aux limites hydrauliques du modelé Plaxis.....	54
Fig7.8: Menu général de calcul.....	55
Fig7.9: Maillage déformée du modèle Plaxis.....	56
Fig7.10: Déplacements vectorielles du modèle Plaxis.....	57
Fig7.11: Déplacements vectorielles du modèle Plaxis.....	57
Fig7.12: Déplacements verticaux du modèle Plaxis.....	58
Fig7.13: Déplacements verticaux du modèle Plaxis.....	58
Fig7.14: Déplacements horizontaux du modèle Plaxis.....	59
Fig7.15: Déplacements horizontaux du modèle Plaxis.....	59
Fig7.16: Indicateurs de plasticités du modèle Plaxis.....	60
Fig7.17:Géométrie du modèle Plaxis.....	62
Fig7.18: Génération du maillage du modèle Plaxis.....	62
Fig7.19: Nœuds du modèle Plaxis.....	63
Fig7.20: Eléments du modèle Plaxis.....	63
Fig7.21: Points de Gauss du modèle Plaxis.....	64
Fig7.22: Maillage déformée du modèle Plaxis.....	65
Fig7.23: Déplacements vectorielles du modèle Plaxis.....	66
Fig7.24: Déplacements vectorielles du modèle Plaxis.....	66
Fig7.25: Déplacements verticaux du modèle Plaxis.....	67
Fig7.26: Déplacements verticaux du modèle Plaxis.....	67
Fig7.27: Déplacements horizontaux du modèle Plaxis.....	68
Fig7.28: Déplacements horizontaux du modèle Plaxis.....	68
Fig7.29: Contraintes effectives moyennes du modelé Plaxis.....	69
Fig7.30: Indicateurs de plasticités du modèle Plaxis.....	69
Fig 8.1:Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol....	71
Fig8.2: Influence de maillage sur les tassements.....	72
Fig8.3: Comparaison de la solution exacte avec la solution numérique.....	73



Fig8.4: Influence de la précision des calculs sur les tassements.....	74
Fig8.5: Influence de la cohésion sur les tassements.....	75
Fig8.6: Influence de l'angle de frottement sur les tassements.....	77
Fig8.7: Influence du module d'élasticité sur les tassements.....	79
Fig8.8: Influence du coefficient de Poisson sur les tassements.....	81

# Liste des tableaux

Tableau5.1: Caractéristiques physiques des sols.....	28
Source (Benayoun année 2001-2002)	
Tableau5.2: Caractéristiques mécaniques des sols.....	28
Source (Benayoun année 2001-2002)	
Tableau5.3 : Caractéristiques physiques du sol.....	33
Source (Benayoun année 2001-2002)	
Tableau5.4 : Caractéristiques mécaniques du sol.....	34
Source (Benayoun année 2001-2002)	
Tableau7.1: Paramètres de modèle elasto-plastique de Mohr-Coulomb.....	49
Tableau7.2 : Paramètres mécaniques de la construction de modèle Plaxis.....	61
Tableau8.1: Pour les éléments de 15noeuds.....	72
Tableau8.2: Pour tolérance de 1 %.....	74
Tableau8.3: Pour tolérance de 6 %.....	74
Tableau8.4: Pour (c+5).....	76
Tableau8.5: Pour (c-5).....	76
Tableau8.6: Pour ( $\varphi + 5^\circ$ ).....	77
Tableau8.6: Pour ( $\varphi - 5^\circ$ ).....	77
Tableau8.7: Pour (E + 25%).....	79
Tableau8.8: Pour (E - 25%).....	79
Tableau8.9: Pour ( $\nu + 0.05$ ).....	81
Tableau8.10: Pour ( $\nu - 0.05$ ).....	81

# Résumé

Les principales formations géologiques de la ville de Constantine conglomérats, marnes et argiles sont d'âges très récents. Dans ce genre de sols, l'eau peut causer un mouvement et les marnes qui sont des sols surconsolidés peuvent se mettre en mouvement.

Les différents glissements produits à travers le monde mettent en évidence l'envergure du problème qu'il faut prendre avec beaucoup de prudence. Ces instabilités qui touchent la wilaya de Constantine sont dues principalement à ses versants instables, à son relief très accidenté et à son urbanisation anarchique.

L'étude de ces mouvements a son application directement liée aux problèmes géologiques, géomorphologiques, hydrauliques, topographiques et géotechniques.

Les résultats obtenus sur le cas réel (Université Mentouri) montrent une instabilité parfaite.

Un bref aperçu de la méthode des éléments finis (MEF) concerne l'historique, les concepts de base et l'utilisation de cette méthode dans le domaine géotechnique, on a choisi le code élément finis Plaxis, qui nous permet le passage d'un projet réel complexe au modèle numérique, et de faire l'étude paramétrique facilement et rapidement interprétable. Plaxis utilise plusieurs modèles de comportement (Mohr-Coulomb), qui dépendent de la nature du sol et de type d'ouvrage.

On détermine un modèle géotechnique de référence pour a mémoire, après la mise des hypothèses et la définition de la géométrie du modèle ainsi des caractéristiques des matériaux, on passe au calcul par Plaxis, d'abord faire le modèle, utiliser le maillage et mettre les conditions initiales, ceci est fait à l'aide du programme d'entrée des données ensuite calculer par le programme de calcul et les interpréter.

L'étude paramétrique qui montre l'effet des paramètres de calcul et des paramètres géotechniques sur les résultats, on utilise la même coupe site avec les mêmes données et on change chaque fois le paramètre, paramètre de calcul et paramètre géotechnique, la comparaison est présentée sur des diagrammes pour chaque paramètre.

L'étude a mis en évidence l'influence importante non seulement des paramètres géotechniques mais également des paramètres de modélisation sur les résultats de calcul, on peut donc expliquer les résultats très différents qui peuvent être obtenus pour le même thème par plusieurs utilisateurs même d'un seul logiciel.

## Mots clefs

Instabilité, Constantine (Cas Université), Caractérisation, MEF, Plaxis, Mohr-Coulomb.

# ملخص

المكونات الجيولوجية الرئيسية لمدينة قسنطينة ، الكونغلوميرا و المارن و الطين كلها ذات عمر حديث ،في هذا النوع من التربة ،يمكن للماء أن يسبب انزلاقا،فمثلا المارن عبارة عن تربة جد مدعمة بإمكانها الحركة.

مختلف انزلاقات التربة التي حدثت عبر العالم، وضحت مدى خطورة هذه الظاهرة التي يجب أخذها بعين الاعتبار بكل حذر.حالات عدم الاستقرار التي تمس ولاية قسنطينة ،ترجع أسبابها الرئيسية :

إلى أحواضها غير المستقرة، وتضاريسها الوعرة و بتآاتها الفوضوية.إن دراسة حركات التربة و تطبيقاتها مرتبطة مباشرة بالمشاكل المتعلقة : بالجيولوجية ، و الجيومورفولوجية ، و الري ، و الطبوغرافيا و الجيوتقنية .  
النتائج المحصل عليها الخاصة بجامعة منتوري بينت عدم استقرار الحوض .

في البداية لمحة مختصرة لطريقة العناصر المنتهية تخص تاريخها ،التصورات الأساسية و استعمال هذه الطريقة في الميدان الجيوتقني ،قمنا باختيار برنامج العناصر المنتهية بلاكسيس ،الذي يسمح لنا بالعبور من مشروع واقعي إلى نموذج رقمي ، و عمل دراسة للعوامل بسهولة و سرعة ،بلاكسيس يستعمل عدة نماذج للسلوكيات (مور- كولون) و التي ترتبط بطبيعة التربة و نوع المنشأ .

أخيرا، دراسة العوامل و التي تبين تأثير مختلف العوامل و سلوكيات التربة باستعمال نفس مقطع المشروع ، و بنفس المعطيات و نقوم بكل مرة بتغيير العامل المراد مقارنته ، لدينا نوعين من العوامل عوامل الحساب و عوامل الجيوتقنية ،المقارنة مقدمة على رسوم بيانية لكل عامل.

كخلاصة هذه الدراسة بينت بوضوح تأثير ليس فقط العوامل الجيوتقنية ،لكن بالقدر ذاته عوامل الصياغة على نتائج الحساب، إذ نستطيع تغيير النتائج المتباينة التي يمكن الحصول عليها لنفس المشروع من طرف عدة مستعملين و بنفس البرنامج .

## الكلمات المفاتيح

عدم الاستقرار، قسنطينة(الخاصة بجامعة)،المميزات،طريقة العناصر المنتهية ، بلاكسيس ، مور- كولون .

# Abstract

The main geological formations of the city of Constantine conglomerates, marls and clays are very recent age. In this type of soil, water can cause a movement and marl soils that are consolidated put in motion.

The different shifts products worldwide highlight the scale of the problem to be considered with great caution. These instabilities affecting the area of Constantine are mainly due to its instable slopes, with its rugged terrain and its anarchic urbanization.

The study of these movements has its application to problems directly related geological, geomorphologic, hydraulically, topographical and geotechnical.

The results obtained on the real case (University Mentouri) show instability perfect.

A brief overview of the finite element method(MEF) for the history, basic concepts and use of this method in the geosciences, we chose the finite element code Plaxis, which allows us to pass a real complex project the numerical model, and to make parametric studies quickly and easily interpretable. Plaxis uses several models (Mohr-Coulomb) that depend on soil type and type of structure.

Determining a geotechnical model of reference for a memory, after the assumptions and definition of model geometry(Mohr-Coulomb), and material characteristics, we pass to the calculation by Plaxis, first to the model, using the mesh and put the initial conditions, this is done using the data entry program then calculated by the calculation program, and interpret them.

The parametric study shows the effect of design parameters and geotechnical parameters on the results, we use the same cut site with the same data every time you change the parameter, parameter calculation and geotechnical parameter, the comparison is made on charts for each parameter.

The study highlighted the important influence not only parameters but also geotechnical modeling parameters on calculation results; we can explain the very different results that can be achieved for the same subject by several users even for one software.

Keys words:

Instability, Constantine (Case University), Characteristics,FEM, PLAXIS, Mohr-Coulomb,

# Chapitre 1

## Introduction générale

## **1.1. Introduction**

La ville de Constantine, se situe à l'Est du pays, connue pour ses problèmes de glissements de terrains. Elle possède un relief très accidenté avec des pentes de talus accentuées, située sur des terrains très escarpés et sismiquement actifs, a connu épisodiquement de graves problèmes de glissements. Ces derniers se sont manifestés parallèlement à une urbanisation rapide et anarchique autour du site de l'ancienne ville. Ces mouvements se sont aggravés lors des pluies orageuses de juillet 1994 et septembre 1998. En effet, la plupart des glissements de terrains sont réactivés au cours des hivers où la pluviométrie moyenne varie de 306mm à 733mm. De plus, la vétusté des réseaux enterrés de l'assainissement et de l'eau potable a subi des dommages, non localisés, ayant entraîné des fuites qui favorisent la lubrification des surfaces de décollement, aggravant de cette manière le problème.

En 1999, sur l'ensemble de la zone urbaine (ancien et nouveau tissu urbain), dix(10) sites présentant un fort potentiel de glissement ont été recensés.

La zone urbaine de Constantine d'une superficie de 5001 ha présente seize zones de glissements inventoriés et représentant une surface totale de 165 ha soit 30.30% avec une grande concentration d'habitants de l'ordre de 36%. Des quartiers entiers avec des centaines d'habitations sont concernés, endommagés ou détruits par ce phénomène.

L'analyse des mouvements de terrains observés sur la région de Constantine a conduit à préciser les facteurs de déclenchement, à en établir un diagnostic et à proposer des mesures de préventions dont les développements concernent une méthode d'évaluation du risque et un zoning (sectorisation) plus précis. Ce travail débute par une présentation du cadre naturel de la ville de Constantine, étant donné que la géologie du site était jusqu'à présent imprécise et assez complexe. Nous avons effectué une analyse détaillée de toutes les études géologiques qui ont été faites depuis 1912 jusqu'à 1999. En confrontant les hypothèses émises, nous avons essayé d'homogénéiser les données afin de les utiliser dans notre travail, qui est une partie considérable dans le comportement des sols dans la région de Constantine.

## **1.2. Problématique**

Depuis les années 1990, on assiste à forte augmentation des catastrophes naturelles dans le monde (mouvement de terrain...etc.) plus de 200 millions de personnes par an ont été touchés par des fléaux naturels.

En plus de l'impact des catastrophes naturelles sur la vie de population, leurs impacts sociaux-économiques sont souvent non négligeables et se décomposent en deux types :

- d'une part, les impacts tangibles (qui, en l'état actuelle des connaissances, ne sont pas traduits en termes monétaires, comme la dégradation des milieux naturels et la perte des biens irremplaçables comme le patrimoine).

- d'autre part, les effets directement liés aux phénomènes et les conséquences indirectes des événements. Confrontés à cette nouvelle donnée, il serait impératif de renforcer par des actions de préventions pour mieux protéger les populations et l'environnement.

Pour illustrer l'importance du problème et plus particulièrement la prédiction et l'évaluation des grands mouvements de terrain concernant la compréhension du phénomène et qui constituent un objectif majeur pour les géotechniciens que pour les collectivités locales et leur staff.

Du point de vue du géotechnicien, les zones affectées par les instabilités du sol et du sous-sol posent énormément de difficultés spécialement lorsqu'ils sont surchargés.

Un talus naturel est en général un milieu continu, hétérogène et anisotrope dont le comportement mécanique est étroitement lié à sa géométrie.

Le but de cette étude est l'analyse à l'aide du logiciel Plaxis 2D l'influence de différents paramètres, géométriques et mécaniques sur le comportement du sol en pente soumises à une variation de contrainte tels que le bâti ou la structure.

Afin d'illustrer ceci, nous avons choisi le site de l'Université Mentouri de Constantine.

### **1.3. Contenu de la thèse**

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

- Introduction sur le thème de recherche et son objectif sont traités au 1<sup>er</sup> chapitre.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude géologique de la wilaya de Constantine : l'importance de la reconnaissance géotechnique, la géologie globale de la wilaya de Constantine, géologie de la ville de Constantine, remarques d'ordre géotechnique.
- Le troisième chapitre présente certains importants mouvements de terrains à travers le monde : introduction, glissements affectant la wilaya de Constantine.
- Le quatrième chapitre présente types des mouvements de terrain : introduction, types de rupture.
- Au cinquième chapitre c'est l'élaboration d'une caractérisation géotechnique du site : introduction, localisation du site et caractérisation des sols, technique de visualisation et stockage des données, interprétation de l'empreinte, conclusion.
- Le sixième chapitre présente la pratique des éléments finis en géotechnique: aperçu de la méthode des éléments finis, présentation de Plaxis 2D, les modèles de comportement utilisés dans Plaxis 2D, conclusion.
- Le chapitre sept est consacré au calcul du site, en utilisant le logiciel Plaxis 2D et interprétation: introduction, systèmes de coordonnées, choix de la taille du modèle, blocage, entrée des caractéristiques générales, conclusion.
- Le chapitre huit c'est l'étude paramétrique : Introduction, effet des paramètres de calculs, effet des paramètres géotechniques, conclusion pour les paramètres de modélisation.
- Une conclusion générale est contenue dans le 9<sup>ème</sup> chapitre avec une bibliographie et des annexes.



# Chapitre 2

Géologie globale de la wilaya de Constantine

## **2.1. L'importance de la reconnaissance géotechnique**

La connaissance du sous-sol et la nature géologique des terrains rencontrés sont réellement primordiales et il n'est pas possible de faire de stabilité correcte sans une étude géologique, topographique et géotechnique approfondie au préalable. Il est important en particulier de reconnaître avec le maximum de précision la position du substratum, des pentes des talus, le cours d'eau et les paramètres physico-mécaniques éventuels qui sont susceptibles de provoquer des glissements.

La reconnaissance de la nature des couches, de leur disposition, de leur homogénéité sont à la base de toute étude détaillée géotechnique. Il est nécessaire de prélever des échantillons intacts pour essais de sols, mais il n'est pas indispensable en revanche que tous les sondages soient carottés. La réalisation d'une série de coupes géologiques selon les lignes de plus grande pente peuvent permettre ensuite de formuler une première hypothèse sur la position en profondeur de la surface de rupture.

L'étude approfondie du site (géologique, hydrogéologique, géotechnique) c'est d'ailleurs cette connaissance détaillée des données naturelles qui permet à l'ingénieur:

- De choisir avec discernement la méthode de calcul la mieux adaptée au problème étudié.
- De choisir au préalable les paramètres géométriques à introduire dans le calcul.

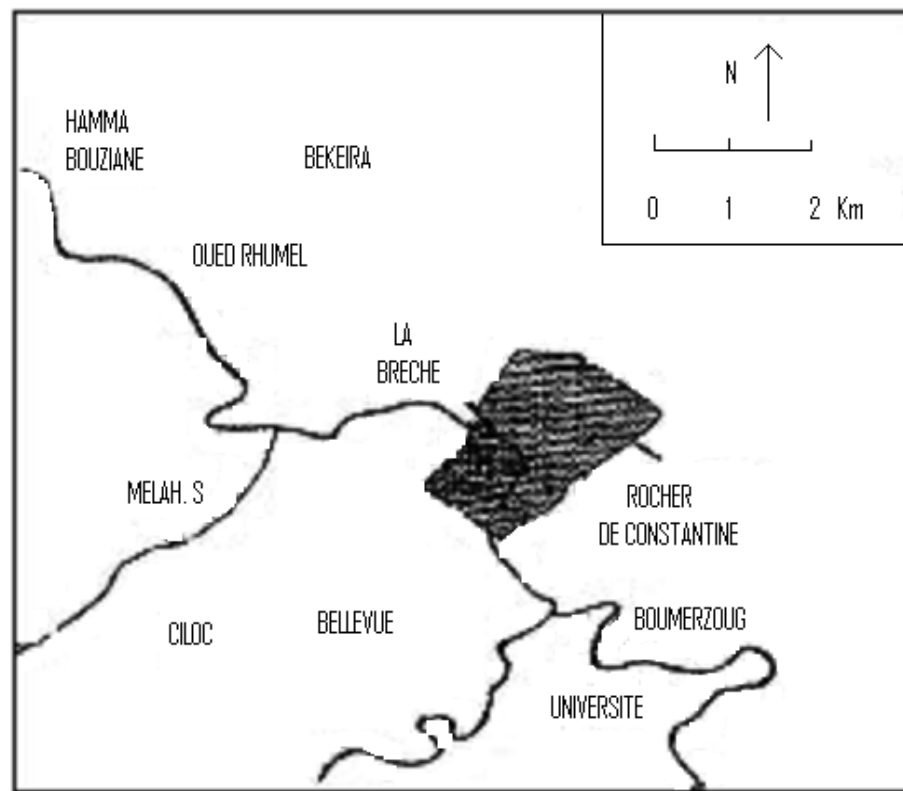
La géologie doit être complétée par une étude géomorphologique faite à partir de photographies aériennes et d'observations sur le terrain, ce qui est un document de travail extrêmement précieux et pratiquement indispensable si l'on veut avoir une vue d'ensemble du site.

## **2.2. Géologie globale de la wilaya de Constantine**

La ville de Constantine avec sa morphologie exceptionnellement accidentée, se trouve dans la zone Nord d'Atlas-Tellien, elle s'étend sur une superficie d'environ 15 Km<sup>2</sup> limitée par des reliefs très variés. On constate que les reliefs sont très accidentés avec une dissymétrie des versants, et l'altitude de la région allant 300m (niveau cours d'eau) jusqu'à 800m au sommet des buttes conglomératiques avec une irrégularité des pentes allant de 12° à 35°.

Elle se présente extrêmement compliquée grâce à une structure tectonique dominée par des nappes, caractérisée d'une part, par une sédimentation néritique ayant produit des calcaires et des marnes jusqu'au crétacé, puis de type flysch (poudingues et argiles sableuses) au Tertiaire, d'autre part, par un style tectonique de couverture aux plis souples et amples affectés de nombreuses failles.

Il existe une grande variation des formations de roche consistant entièrement des couches sédimentaires, l'âge de dépôts est entre le Crétacé et le Quaternaire.



**Fig2.1:** Carte de situation géographique

Source (Benaissa 1999)

### 2.2.1. Historique

La région de Constantine a fait l'objet de plusieurs études géologiques que soit sur le plan stratigraphique ou structural.

- Jolleaud [1] a étudié les terrains crétacés et tertiaires de Constantine, il développa dans sa thèse ses conceptions allochtonistes fort discutées actuellement.
- Deleau [2] fait une étude stratigraphique de Constantine, qui donne des précisions concernant Djebel Oum Settas.
- Vila [3,4] après une longue période, ses travaux aboutirent à la publication d'une impressionnante série des cartes au 1/50.000 et des cartes au 1/200.000 de Sétif et de Constantine.

Vila reprend et développe dans sa thèse l'idée de l'allochtonie du molle néritique du Constantinois.

Lahondère [5] soutient sa thèse consacrée à l'étude des séries ultra-Telliennes de l'Est Algérien.

- Chadi [6] remet en cause l'allochtonie des massifs néritiques et met en évidence une continuité dans la sédimentation du crétacé.
- Coiffait [7] accomplit un travail qui apporte un certain nombre de fait nouveau concernant notre région sur le point stratigraphique et structural.
- Aris [8] effectue une étude tectonique et microtectonique plus récente qui vise à retracer les différentes phases de déformations et reconstituer leurs champs de paléo-contraintes.

En conclusion, nous remarquons d'après les travaux concernant des études géologiques classiques, se sont succédées des études plus poussées, plus récentes introduisant de nouvelles techniques d'études (géophysique et micro-tectonique).

### **2.2.2. Litostratigraphique**

#### Trias

Le plus ancien terrain affleurant est le trias essentiellement constitué d'argiles rouges à gypse avec quelques cristaux de quartz. Localement ils existent des calcaires jaunes ou gris en plaquettes et des cargneules. Le trias n'affleure jamais dans des situations normales, mais sous formes de pointements diapirique, dont nombreux jalonnent des accidents tectoniques.

#### Jurassique

Il n'affleure nulle part dans la région (on pense à une lacune stratigraphique).

#### Crétacé inférieur et moyen

Ils se présentent sous deux aspects qui témoignent d'une sédimentation d'origines différentes:

- Des dolomites et des calcaires récifaux épais.
- Des marnes, des marnes schisteuses et des marno-calcaires, se sont déposées sur la partie centrale des monts de Constantine, ces sédiments uniquement calcaires ou dolomitiques passant latéralement à des marnes au Nord West (Lekhal), Nord Est et Sud Est. Vers le sud les formations hétérogènes calcaires, marno-calcaires, calcaires noduleux.

#### Crétacé supérieur et éocène

Dans le nord West il y avait une continuité de la sédimentation au dessus du turonien, mais au sud, le Santanien est discordant sur le Cenomano-Turonien.

### L'Enshérien (coniacien, santonien)

Il va de quelque mètre à 100 m d'épaisseur et comprend des marnes et des marno-calcaires.

### L'Aturien (campanien maastrichtien)

Ce sont des calcaires blancs et des marnes glaucomieuses à incrustations d'une hauteur de 270 m-300 m.

### Le Dano-Montien

Marneux ou argileux, mais souvent masqué, il a de 2 à 100m de hauteur. L'yprésien et lutétien inférieur sont représentés par des calcaires noirs bitumineux à silex, des marno-calcaires et des marnes (50à70m).

### Lutétien supérieur

Calcaires verdâtres ou jaunâtres, des marno-calcaires, des marnes et des argiles brunes à bancs de lumachelles dépassent 200m.

### L'Eocène supérieur et oligocène inférieur

Des grès quartzeux en bancs massifs et des argiles à la base, ne couvrent que le nord est de Constantine.

### L'Aquitainien continental

Les conglomérats et argiles rouges n'existent que tout à fait au sud.

### Miocène et Pliocène

Un conglomérat rougeâtre marque la base du miocène inférieur marin et représenté par des marnes brunes. Le miocène moyen laguno-lacustre (argiles grises gypses) affleure surtout dans la dépression séparant Constantine de la chaîne numidique et le miocène continental formé de dépôts détritiques rougeâtres quelquefois sableuses et des calcaires lacustres à plus ou moins travertins eux (Plaisacien, Astien).

### Quaternaire

Il comprend surtout dans cette région des alluvions anciennes (galets mêlés d'argiles ou de terres rouges en bordures des reliefs et des crêtes et des tufs calcaires, les alluvions récentes sont

surtout argileuses dans les grandes plaines du sud, et même souvent gypseuses (anciennes surfaces d'évaporation)

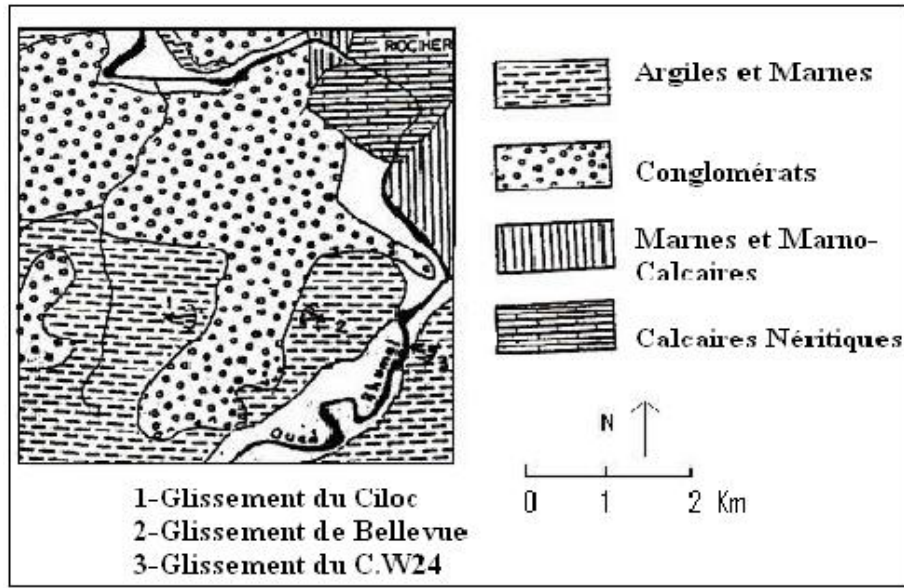
Au pied des grands massifs calcaires, les cônes d'éboulis sont importants, ils sont fonctionnels, mais ils se sont formés au quaternaire ancien car surcreusés, ils laissent apparaître des éboulis consolidés et même des croutes calcaires.

### **2.3. Géologie de la ville de Constantine**

Globalement, la ville de Constantine est construite sur 05 formations géologiques distinctes, qui se superposent et se juxtaposent, avec [9] :

1. les calcaires massifs du rocher de Constantine, peu épais, d'âge Cénomaniens, surmontés par des calcaires rubanés clairs et sombres d'âge turonien et une série transgressive marno-calcaire d'âge sénonien.
2. Au Nord et à l'Est: le vieux rocher est en contact tectonique net avec une série monotone de marnes noires à boules jaunes attribuées au Maastrichtien Supérieur-Paléocène. Au Nord de Sidi M'cid, affleurent des marnes grisâtres riches en blocs attribuées au Priabonien. Ces formations appartiennent aux nappes telliennes.
3. À l'Ouest de Sidi Mabrouk et le long de l'Ouest Boumerzoug, des îlots de flysch à affinité Massylienne affleurent au milieu des terrasses quaternaires, c'est des klippes constituées essentiellement de calcaires microbréchiques en plaquettes représentant le Campanien-Maastrichtien du flysch Massylien.
4. La partie occidentale de la ville est occupée par la formation, post-nappes, du Miopliocène représentée par des dépôts discordants de type continental, à faciès très variés, matériaux de remblaiement essentiellement, les niveaux de base à dominance détritique, attribués au Miocène supérieur sont surmontés par les argiles à gypse et à hélices dentées qui sont surmontés à leur tour, par des dépôts, restés horizontaux, d'argiles et de marnes gypsifères de teinte ocre et jaunâtres du Pliocène.
5. Au dessus, des dépôts du quaternaire limitent à des conglomérats à matrice argilo-sableuse rougeâtre (poudingue de Koudiat-Aty) de grès, des sables, des calcaires lacustres et travertins (tufs hydrothermaux de Mansourah) de la Villa Franchien.

On cite également, les éboulis anciens, les dépôts de pentes, les croutes, les alluvions récentes des principaux oueds (Rhumel et Boumerzoug).



**Fig2.2:** Carte géologique simplifiée du site de Constantine

Source (Belouar 2005)

### 2.3.1. Tectonique

Les mouvements qui ont affecté la région pour lui donner sa physionomie actuelle sont assez nombreux. L'orientation générale, suivant une direction SW-NE, a été donnée par des glissements qui ont commencés avant le dépôt du sénonien et qui ont eu leur paroxysme après le Lutétien, les grands accidents longitudinaux datent probablement de cette époque. Il s'agit de la phase pyrénéenne. Après le dépôt du Miocène, les mouvements reprennent.

Des plissements interviennent après le dépôt du Pliocène, suivant la direction majeure SW-NE la montée des argiles Triasiques a pu se poursuivre au cours de toutes ces périodes de plissement.

### 2.3.2. Structure

Dans l'ensemble, la structure est commandée par la présence des massifs calcaires qui ont toujours joué le rôle de socle résistants, d'où une tectonique cassante, les massifs sont bordés par des grandes fractures, on a souvent un seul flanc anticlinal (monoclinal), l'autre s'est effondré ces masses résistantes. la couverture postérieure en majeure partie marneuse.

A la faveur des fractures bordant les masses calcaires, le Trias plastique a pu montrer par diapirismes. Une ligne de fractures jalonnée d'affleurement triassique particulièrement

remarquable, est celle de direction SW-NE qui se suit depuis le sud de la station de chateaudum jusqu'à Constantine.

### **2.3.3. Hydrogéologie**

Elle se caractérise par un réseau hydrographique constitué essentiellement par de très importants affluents réunis dans un cours d'eau principal, l'Oued Rhumel. Hors des gorges, la circulation des eaux de ce dernier se fait dans un chenal de 2m de profondeur moyenne et de largeur très variable allant de 4m à 10m environ. Le régime climatique tranché en deux saisons contrastées: une saison sèche (estivale) et une saison humide (hivernale), a une influence sur le cours d'eau, qui a un caractère agressif excessif et irrégulier: voir par exemple les grandes crues dévastatrices de 1957 et 1967 [10]. Le Rhumel façonne les zones d'accumulation actuelles, sape les berges et emporte ainsi des pans entiers de basses terrasses, il creuse son lit dans des matériaux essentiellement peu cohérents, son action ne rencontre donc aucun obstacle, hormis au niveau des massifs calcaires ou des ensembles conglomératiques.

Sur l'échelle régionale, on a déterminé 03 unités hydrogéologiques :

- Vallée du RHUMEL: départ du côté d'El Eulma et embouchure au barrage Beni Harroun, de superficie de 86.5 Km<sup>2</sup> dont une partie dans la wilaya de Constantine.
  - Ø La nappe de ville franchien: conglomérats + calcaires.
  - Ø La nappe du Miopliocène: calcaire lacustre.
  - Ø La nappe des calcaires de l'Eocène.
  - Ø La nappe du Crétacé inférieur.
  
- Plaine d'El Khroub: 26.5 Km<sup>2</sup> dans la wilaya.
  - Ø La nappe des alluvions quaternaires.
  - Ø La nappe du Miopliocène: calcaire lacustre.
  - Ø La nappe de l'aptien : calcaire à grains fins à intercalation de marnes.
  
- Karst-hydro-thermal.
  - Ø La nappe de la vallée fossile Miopliocène.
  - Ø La nappe libre et captive : alluvions Quaternaires.
  - Ø La nappe des calcaires et dolomies du Crétacé inférieur et moyen.

### **2.4. Remarques d'ordre géotechnique**

- Le calcaire du Rocher de Constantine constitue une excellente assise pour des fondations sans pour cela laisser de côté les problèmes qui peuvent résulter de la karstification intense de ces roches qu'ils ont subies. Cette karstification se remarque par quelques poches d'argile et de nombreuses fissures.



- Le pendage et la nature schistogréseuse des formations de la zone centrale qui est recouverte de remblais importants font penser à de sérieux problèmes de retenue de terrain (mouvement des terrains).
- La superposition stratigraphique conglomérat. Que sur argile et graviers argileux généralement imperméables révèle une importance considérable tant du point de vue l'hydrologique qu'instabilité.
- En effet les conglomérats étant bien représentés, ils couvrent une surface assez considérable, et constituent par-là, même un réservoir d'eau important.

# Chapitre 3

Certains importants mouvements des terres

### 3.1. Introduction

Les glissements de terrain sont des phénomènes naturels qui évoluent dans le temps et l'espace, ce sont des mouvements de masse qui se développent dans des matériaux muables et généralement argileux. Ils se produisent dans des circonstances variées, affectent les ouvrages naturels ou construits par l'homme, ils créent des risques à sa vie et à ses constructions, chaque année on enregistre de nombreux accidents graves trouvant leur origine dans les mouvements de terrain.

A titre illustratif, on cite certains importants mouvements de terre survenus dans le monde (notamment en France) [11] et affectant directement des ouvrages ou des zones urbanisées, nous citerons:

- Roquebillière (Alpes Maritimes)

Une coulée de boue en 1926 a fait dix-neuf victimes, un glissement profond de 1.5 à 2 millions de mètres cube s'est produit en 1971 affectant l'ensemble du versant. En s'exprimant sur cette catastrophe M.MENEROUDE a indiqué qu'il n'y a pratiquement pas moyen raisonnable de l'arrêter.

- Le Beausset (Var)

De fortes pluies en février 1974 ont réactivé et étendu un glissement ancien, affectant le village du vieux BEAUSSET. Les moyens à mettre en œuvre pour drainer les dix hectares en mouvement et protéger les zones voisines dépassent sensiblement le budget de la commune.

- La RN57 (Nancy – Metz)

Trois glissements ont eu lieu dans la zone de CORNY-sur MOSELLE (1937-1956-1970) trente-six hectares sont affectés sur 15m de profondeur en moyenne.

- La Route de la Corte à Aléria en Corse

Elle est menacée en permanence de mouvement de grande ampleur, semblables à ceux de 1974 qui l'ont emportée sur plus de 200m, obligeant pratiquement à envisager un nouveau tracé.

- La Tranchée de la Culera sur le Canal de Panama

Plusieurs dizaines de millions de mètres cubes supplémentaires ont dû être retirés du canal.

- Mur de Quai à Göteborg (Suède)

Cet important glissement qui s'est produit en 1916 et a causé la ruine d'un mur de quai a été à l'origine des travaux de l'école géotechnique suédoise.

- Région de Lyon

De très nombreux glissements sont survenus sur le flanc de la colline de Fourvière. On note dès 1880 la chute d'une partie du forum romain après de fortes pluies qui avaient détrempe le sol.

À la suite d'un tremblement de terre au début du XVI<sup>e</sup> siècle, de nombreuses maisons se sont effondrées lors d'un glissement de terrain. Le vendémiaire an III (1795) soixante familles ont été englouties dans le quartier du chemin Neuf, près du marché St Jude.

Le 10 Novembre 1930, pendant des travaux de réfection du chemin Neuf, un cylindre s'enfonça profondément dans la chaussée. Ce premier signe alarmant est suivi le 11 Novembre par l'apparition de désordres dans différents bâtiments voisins. Enfin le 13 Novembre 1930, à 10h du matin, c'est un très grand glissement qui se produit en deux phases entraînant la mort de 50 personnes dont 23 sauveteurs ensevelis dans la deuxième vague d'éboulement ; deux ans plus tard, le 08 mai 1932 la colline de la CROIX-ROUSSE glisse à son tour, le long du cours d'Herbouville dans le quartier de SAINT-CLAIR.

Sur le même cours d'Herbouville, à une centaine de mètres en aval du pont de la boucle survenait le 31 juillet 1977, un nouveau glissement des terres de couverture du substratum molassique de la CROIX-ROUSSE se produit entraînant la mort de trois habitants.

- Le Crassier de la centrale de Jubille près de Liège

Il a été lui aussi le siège d'un important désordre. Le 03 Février 1961, ce crassier s'est effondré de manière pratiquement instantanée, ce fut une véritable avalanche de cendres, près de 150000 m<sup>3</sup> de matériaux ont ainsi été déplacés à très grande vitesse sur près de 700m. Plusieurs maisons ont été détruites et onze personnes ont perdu la vie. Les dépenses totales couvrant les travaux de déblaiement, la réparation des dommages et la construction d'ouvrages de sécurité ont été énormes. La catastrophe d'Aberfan au pays de GALLES est tout à fait analogue, l'effondrement d'un terril y a enseveli un groupe scolaire.

Ces accidents, comme celui du Quai Suet en Tunisie en 1950, et certains glissements des berges de la Moselle à la suite des travaux de canalisation, ou bien la catastrophe du barrage de Longeron en Italie qui a provoqué 2000 morts, montrent que malheureusement la liste de tels sinistres n'est pas close et que leurs conséquences peuvent être considérables.

- Eaux-Bonnes (Pyrénées- Atlantiques)

À la station de Gourette, comme des EAUX-BONNES, des craquements se produisirent dans la montagne, et des blocs de rocher de quelques centaines de kilos dévalèrent la pente et s'arrêtèrent à quelques mètres seulement d'une maison; la ligne électrique à haute tension

alimentant la station fut coupée à la suite de la chute d'un pylône. Le maire de la commune fit évacuer les habitations et alerta les services de l'équipement. On se rendit alors rapidement compte qu'il s'agissait d'un important glissement de terrain qui, de toute évidence, menaçait à plus ou moins long terme le CD 918 qui permet l'accès à la station de Gourette et au col d'Aubisque.

Fort heureusement, il y avait une possibilité de déviation moyennant quelques aménagements que les autorités locales décidèrent de réaliser rapidement. Dès le début de Décembre 1982, c'est-à-dire à l'ouverture de la saison hivernale, cet itinéraire de secours était mis en service. La suite des événements a montré que ces précautions n'avaient pas été inutiles, car le CD 918 était irrémédiablement coupé en Mars 1983.

Une petite enquête historique a montré que ce glissement était actif depuis déjà plusieurs dizaines d'années. Il s'agit d'un glissement dans une masse rocheuse de schistes sériciteux, rocher de qualité très médiocre et très altérable.

L'étude géomorphologique du versant montre les différents modes d'évolution des pentes dans cette formation et souligne les caractéristiques particulières de la zone où s'est produit le glissement et dont la conjonction peut expliquer le déclenchement du phénomène [12].

- Grenoble

Situé à 35 km au sud de Grenoble, dont la rupture s'est produite le 7 Mars 1981 au sein d'une formation d'argile lacustre litées. Une reconstruction de la structure du versant a permis de révéler la présence d'anciennes vallées du Drac creusées dans le substratum de calcaires argileux du lias. Elles sont comblées par un remplissage d'alluvions terminé par un niveau de transition d'argiles à galets. Ce dernier est recouvert par un placage superficiel de moraines. Ces argiles litées proviennent du remplissage d'un ancien lac qui s'était créé suite à l'obturation de la vallée du Drac par le glacier de l'Isère au Würm II, ce qui peut expliquer leur structure particulière, caractérisée par une alternance de lits réguliers listaux clairs et d'argiles grise-noire, d'épaisseur variable (du mm au dm), leur faciès pouvant changer tant verticalement qu'horizontalement. Au regard de l'épaisseur de ce dépôt [13].

- Friolin

À l'extrémité Nord-Ouest du massif de Belle Côte, domine de 1200 m la vallée de Peisey-Nancroix (Savoie). Elle recèle une menace, signalée de longue date par Jean GOGUEL, d'éboulement majeur susceptible de venir couper la route d'accès Rosuel (porte du parc national de la Vanoise) entre le palais de la Mine et les lanches.

C'est un ensemble de roches rudes (gneiss du socle métamorphique carbonifère de la Vanoise), culminant sous la forme d'un petit plateau vers cote 2700, dont le flanc Est constitue un escarpement de pente moyenne 45° sur 250 m de dénivellation et 600 m de longueur. Il repose sur une grande épaisseur, de l'ordre de 500 m de terrains solubles et peu résistants; gypse et cargneules. Le niveau du contact gneiss/gypse n'est pas exactement connu.

La solubilité du gypse est une cause d'instabilité pour les masses rocheuses sus-jacentes, surtout après qu'une première fissuration a rendu le gneiss perméable. La morphologie de la montagne témoigne de tassements et d'adaptations de la masse rocheuse: deux failles d'âge quaternaire coupent le versant sud, en y relevant le bas d'une pente absolument régulière déterminé par un manteau d'éboulis; de grands décrochements maquent le plateau sommital, formant des escarpements concentriques avec des basculements en échelon emboîtés [14].

- Zone de Vizille et Séchilienne

La route nationale 91 Grenoble –Briançon est soumise, au droit de la zone dite des ruines de Séchilienne, à des risques d'éboulements rocheux importants. Un premier dispositif d'auscultation et de surveillance a été mis en place en 1985 par le laboratoire régional de Lyon pour suivre et analyser le phénomène. Les premières études ont montré l'existence d'un risque majeur d'éboulement en grande masse affectant un volume de 2 à 3 millions de m<sup>3</sup> entraînant un risque d'obstruction partielle du fond de vallée. La poursuite des études a permis de confirmer l'existence d'une instabilité à plus grande échelle, dont le volume peut atteindre 20 à 30 millions de mètres cubes affectant la majeure partie du versant.

En 1988, avec l'aide financière conjuguée du Conseil général de l'Isère, de la direction des routes, du ministère de l'intérieur et de la délégation aux risques majeurs, un effort particulier a été porté sur l'équipement de surveillance du site d'une part et les études sur les effets d'un éboulement d'autre part [15].

- Sainte –Adresse(Nice)

LENNIER décrit un certain nombre de glissements dans le secteur de Sainte-Adresse.

Ainsi le 30 juin 1866 il indique «les basses falaises, en mouvement depuis près deux mois commencèrent à descendre vers la mer, en glissant sur les argiles Kimméridgiens. Le même jour, des fentes se produisirent sur le plateau, au dessus du terrain en mouvement.

Le lendemain, 1 juillet, les fentes s'étaient beaucoup élargies et, à dix heures du matin, une partie considérable de la falaise s'éboulaît avec un bruit sourd. En tombant sur le talus d'éboulement, cette masse de roche en accéléra la marche et toutes les basses falaises, sur une étendue d'environ 500m depuis la parie nord-ouest des parcs jusqu'aux signaux, furent ébranlées par le choc et suivirent le mouvement en avant vers la mer; mais elles s'arrêtèrent bientôt, et les effets de l'éboulement proprement dit furent circonscrits sur le point ou il s'était produit. En cet endroit, le talus d'éboulement avait à peu près 200m de largeur et il se terminait au bord de la mer par un escarpement formé d'argiles restèrent complètement étrangers au mouvementa mesure que le talus d'éboulement avançait, les parties placées en avant étaient précipitées du haut du petit escarpement Kimméridgien la mer; elles y formèrent bientôt un amas considérable.»

Sur ces terrains, résultats de glissements et d'éboulement, DUFAYEL commence des aménagements en 1905 qui comprennent:

- Ø Une digue de protection avec épis, le long de la mer.

- Ø Un grand nombre de canalisations de drainage et de captage des sources.
- Ø Des rues, routes et différents niveaux de terrassement pour l'urbanisation.

Pendant la guerre de 1939-1945, le site est perturbé: constructions de blockhaus, destruction partielle de la digue et prélèvement de galets sur la cote, ruptures de canalisations d'eau et de drainage, bombardements.

Dès 1944, apparaissent de grands mouvements que l'on peut classer en trois zones.

- Ø Zone A1: glissement en septembre 1944.
- Ø Zone A : mouvement de 1.60m en 1944-1945, mouvement de 0.50m en 1947-1948.
- Ø Zone B: premiers mouvements en 1947, tassement de 0.80m en 1948.

Divers mouvements sont signalés au printemps 1948 puis fin 1949, fin 1950 [16].

Liés à des effondrements en galeries, des ruptures de murs de soutènements et des venues d'eau.

- Le Graben de Mordores

Au pied de la montagne des Piniès présent, sur une superficie très restreinte un ensemble spectaculaire de mouvements de terrains de typologie très variée. Parmi ceux-ci, on remarque particulièrement l'affaissement d'une puissante falaise calcaire (50m en une cinquantaine d'années) et deux importantes coulées boueuses, périodiquement réactivées dans la même période. L'origine de ces mouvements ainsi que les mécanismes de leur mise en place ne peuvent s'expliquer que par la reconstitution d'une histoire géologique particulièrement complexe appuyée par une auscultation sommaire. L'ensemble fournit un exemple remarquable du lien étroit qui existe entre les conditions géologiques d'un site et les mécanismes de la déformation gravitaire d'un versant, à une échelle et dans des conditions d'observation particulièrement favorables [17].

- Mont Toc dans la retenue de Vajont (1963)

Ce glissement, survenu le 9 Octobre 1963, en tombant dans la retenue de VAJONT a provoqué une vague de 25000 000 m<sup>3</sup>, laquelle passant par dessus le barrage est allée détruite le village de Langarone, quelques kilomètres à l'aval (2000 morts).

Les grands ensembles géologiques sont les suivants, depuis le haut de la série:

- Crétacé supérieur et inférieur (200m au niveau du glissement).

- Ensemble de calcaires et calcaires marneux, souvent à lits et nodules de silex avec intercalations marneuses dans le haut et presque partout inter bancs argileux. La partie inférieure est plus finement (10cm).

- Malm supérieur (40cm).

- Ensemble de calcaires et calcaires marneux gris, en bancs de 30 à 40 cm, souvent réunis en couches de plus de 1m, avec marno-calcaires verdâtres entre ces couches. Cet ensemble est plus rigide que ceux sus et sous jacents.

- Malm inférieur (30m).

- Minces bancs de calcaires gris, riches en petites couches et nodules de noirs avec pellicules argileuses dans les interstrates. Dans la zone du glissement ces calcaires sont fracturés.

-Dogger (300m).

-Calcaires dolithiques, parfois dolithiques, massifs, en bancs de 1 à 4m (ces calcaires forment les appuis du barrage, leur solidité a été éprouvée lors du glissement, car une lame d'eau de plus de 40m de haut a déferlé par dessus le barrage. Celui ci est resté intact).

La surface de glissement du 9 Octobre 1963 suit la même forme que le toit des calcaires dolithiques du Dogger. Les sondages effectués après le glissement montrent toujours, dans la roche restée en place, quelques strates de calcaires siliceux en minces bancs du Malm inférieur. Donc la surface de glissement se trouve dans cette formation.

Le 4 Novembre 1960, lors d'un glissement de 700 000m<sup>3</sup> de roches dans la retenue, une grande fissure, longue de 25 00m s'était formée vers 1100 m d'altitude. C'est elle qui limitera, le 9 Octobre 1963, la masse de 250 millions de m<sup>3</sup> qui glissera.

En Novembre 1959, une prospection sismique, effectuée sur la zone de glissement donne, sous 10 à 20 m d'éboulis, une roche pour laquelle la vitesse de propagation est de 5 000 à 6000m/s.

En Novembre 1960, une autre prospection sismique révèle des réflexions vers 150m de profondeur. Dans la masse supérieure, les vitesses vont de 700 à 1500 m/s et au dessous de 150m elles atteignent 3500 m/s, des carottages sismiques effectués dans certains sondages après le glissement ont montré des vitesses allant de 2200 à 3500 m/s pour les matériaux glissés et de 5500 à 6000 m/s pour les matériaux en place.

- Léaz

Le cas de glissement de Léaz dominant la retenue de Génissiat est un exemple caractéristique où la surveillance a pour but de préciser le mécanisme des mouvements, prévoir dans quelles conditions ceux ci pourraient s'accélérer et juger de l'efficacité des travaux entrepris. On cherche en effet à assurer l'exploitation de la retenue dans des conditions normales de sécurité.

Ce glissement, connu avant établissement de la retenue, affecte une épaisseur de 10 à 14 m de matériaux argileux, représentant un volume total de  $1.4 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

La retenue n'a aucune influence sur les mouvements, la base du versant, constituée d'alluvions graveleuses, étant stable.

Les mesures de déplacements ont commencé fin 1964 avec la mise en place de 44 témoins mesurés en triangulation et par alignements. Les mesures de fréquence mensuelle à trimestrielle, ont permis de préciser les vitesses moyennes (5 à 30 cm/an) et l'existence d'une zone plus active du glissement était saisonnière mais pas de préciser le mécanisme exact. C'est pourquoi depuis 1974 ils ont adopté le système de surveillance suivant:

- Mesures par triangulation.
- Mesures au distance mètre.
- Enregistrement continu des déplacements, en parallèle avec les mesures de déplacements, on réalise des mesures de niveaux piézométriques et de pression interstitielle dans des cellules, de même que les mesures pluviométriques et de températures.



Ils ont constatés les points fondamentaux:

- Les périodes d'activité sont réduites dans le temps, avec un arrêt des mouvements, plusieurs mois par ans.
- L'activité du glissement se produit lorsque le niveau d'eau dépasse une valeur critique, ils ont vérifiés par la suit que ce niveau était pratiquement constant dans le temps.

En 1969, des travaux de drainage ont été réalisés.

Nous voudrions insister sur le fait que, les mesures topographiques seules n'auraient pas permis une démonstration aussi nette de l'efficacité du drainage.

Enfin, on peut constater que si on parvenait à abaisser le niveau d'eau sous le niveau critique, les déplacements seraient pratiquement nuls.

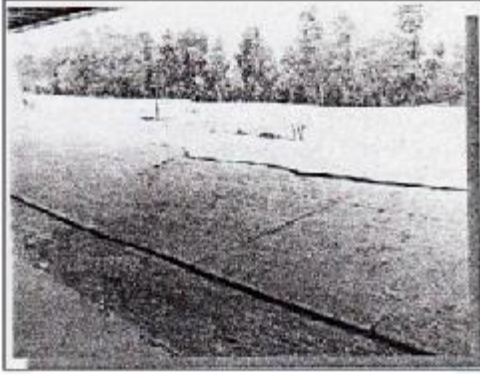
### **3.2. Glissements affectant la wilaya de Constantine**

Les glissement de terrain qui guettent la cité des ponts et lui font encourir le danger réel et imminent d'une catastrophe a grande échelle .ce phénomène naturel ne date pas d'hier il est presque centenaire et couvre une surface totale de 120ha touchant 12 sites a travers toute la wilaya, les sites les plus directement menacés sont: belouizdad, kaidi,kitouni ,mosquée Emir Abdelkader, Ciloc,Bardo, Pont Sidi Rachad, Boudraa Salah, El Menia RN27, le terrain du chemin forestier, le terrain de AIN EL BEY(Université de Constantine), constituent l'inquiétude de l'heure.

#### **3.2.1. Université de Mentouri**

Le terrain universitaire se trouve sur une colline entre la route N°79 et le chemin wilaya N°175.L'est du bâtiment universitaire allongé établi entre1972-1975 au-dessus de l'institut de technologie est fondé sur des pieux de 14m. De graves fissures, des inclinaisons et des courbures au terrain ainsi que la route voisine se sont produites par des déformations de la pente. Dans la partie moyenne du bâtiment on voit des tassements et des translations, Les mouvements ont commencé en 1985.

Il est nécessaire d'envisager des mesures de drainage parce que les sables et graviers situés au-dessous des bâtiments universitaires ont d'énormes quantités d'eau.



**Fig3.1:** Novembre 1985

Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)



**Fig3.2 :** Fouille exécutée sur une fuite  
d'eau du réseau incendie



**Fig3.3 :** Façade Est du bloc des classes  
affaissement de la chaussée

Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)

Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)

### 3.2.2. Synthèse

L'analyse de la stabilité des pentes est un problème complexe qui nécessite beaucoup de réflexion et de bon sens. Il faut considérer l'étude de stabilité des pentes à la place qui lui revient dans toute étude, connaître les conséquences que peut engendrer ce problème et le résoudre, afin d'éviter des catastrophes socio-économiques. Une négligence technique peut provoquer des catastrophes tout en sachant que le coût de l'étude de ce problème est plusieurs fois moins coûteuse par rapport aux coûts de ces catastrophes qu'il soit du côté humain ou du côté financier toute étude [18].

Globalement on constate les observations suivantes:

- Un relief très accidenté.
- Déformation tectonique de la couche avec une inclinaison jusqu'à 30° (a travers l'interprétation des photos aériennes, presque toutes les couches se présentent en position inclinée).
- Sédiments sensibles aux glissements du Moi-Pliocène (inter stratification d'argile, de marnes et conglomérats) et du Crétacé supérieur (marnes).
- Infiltrations locales des conduites d'eaux potables et usées.

L'eau est un facteur essentiel pour des mouvements de pentes ayant des effets négatifs dans les inter-stratifications de conglomérats perméables et des argiles marneuses non perméables.

### **3.2.3. Conclusions**

Le phénomène de glissement de terrain affectant un tiers du tissu urbain de la ville de Constantine soit une superficie de 120ha touchant une population de 120.000 habitants pour un parc de 15000 logements avec un nombre important d'équipement socio-éducatif.

La cause des glissements des terrains à travers la ville de Constantine est une combinaison de causes complexes:

- Ø La formation lithologique qui est plastiques dans certains sites, et argilo-gypseuse dans d'autres (d'âge mio-plio-quaternaires) plus la composition hétérogène du sol (conglomérats, argile, sable).
- Ø Le facteur eau qui a une grande influence sur ses mouvements, car l'action chimique de l'eau peut provoquer des modifications dans les propriétés chimiques de la roche argile ou la réhydratation ce qui rend le terrain moins résistant. D'après les études et les résultats fournis par le B.E(SAFEGE) les réseaux de distribution d'eau potable sont très vétustes, 40.000 à 45.000 m<sup>3</sup> d'eau représentent le volume d'eau perdu quotidiennement dans le sous-sol de la ville de Constantine. Par ailleurs que les réseaux d'assainissement sont très anciens et certains sont complètement détériorée, ce qui accélère les mouvements de terrain de la ville.
- Ø L'urbanisation anarchique et non contrôlée.
- Ø Le caractère sismique de la région de Constantine car elle est classée dans la zone II (de moyenne intensité).

# Chapitre 4

Types de mouvements de terrain

## 4.1. Introduction

Les problèmes de stabilité de pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. En outre certaines pentes naturelles sont ou peuvent devenir instables. Une rupture d'un talus peut être catastrophique et provoquer des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts naturelles considérables.

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.

L'étude d'un talus 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.

Cependant une longue expérience a été acquise tant que les méthodes de calcul que dans les techniques de construction, de telle sorte que les problèmes de stabilité de pentes peuvent maintenant être résolus avec une assez bonne fiabilité.

L'étude qui suit est générale et pourra être appliquée à l'ensemble de ces ouvrages que nous appellerons «talus».

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols, ...) et par leur dimension (certains glissements, comme celui de la Clapière dans les Alpes Maritimes, peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m<sup>3</sup>).

Leur répartition spatiale est guidée par la topographie et par la géologie (nature et fracturation des formations affleurantes, hydrogéologie) c'est-à-dire par l'environnement physique. Ils concernent non seulement les régions montagneuses et côtières, mais aussi les bassins à forte densité de vides souterrains (naturels ou minés), les sols argileux sensibles aux variations de teneur en eau, ... Leur occurrence est très marquée par les variations climatiques (périodes de fortes pluies, fonte des neiges, sécheresse) mais peut aussi être liée à des secousses sismiques ou encore être induite par les activités humaines

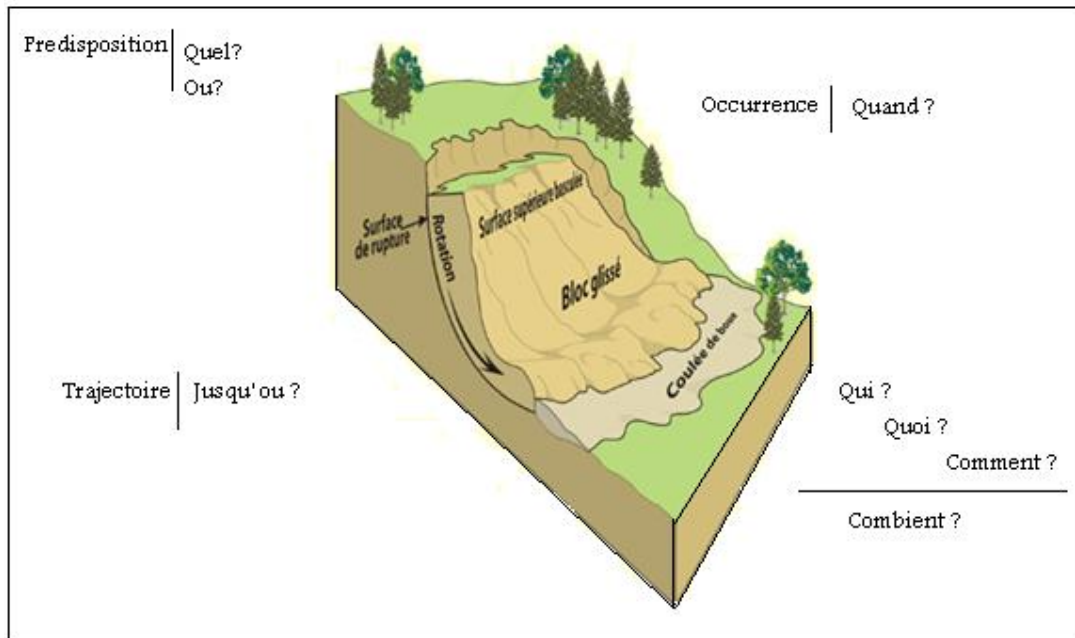
Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris: ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'Homme; leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique.

Dans la pratique cependant, les choses sont très complexes, du fait des incertitudes:

- sur les conditions initiales, notamment en profondeur,
- sur les propriétés mécaniques des terrains, en général hétérogènes, non linéaires, anisotropes, discontinus, ...
- sur les conditions hydrauliques: position de la nappe, phénomènes se produisant en zone non

saturée. L'eau est la cause déclenchant de la plupart des mouvements; c'est un facteur variable dans le temps.

Une bonne connaissance du risque "mouvements de terrain" doit permettre de répondre aux 6 questions reproduites ci après



**Fig4.1** : Type de mouvement avec quelles questions à se poser

## 4.2. Types de rupture

Dans leur construction et leur fonctionnement, les talus subissent des conditions de chargement variées. Nous pouvons classer les types de rupture liés aux mouvements de terrains, en deux groupes; ceux associés aux pentes naturelles et ceux des talus artificiels [19].

### 4.2.1. Pentes naturelles

#### 4.2.1.1. Chutes de blocs (pierres), Eboulement, Ecroulement

Ils rastérisent l'évolution d'une falaise rocheuse et se distinguent par le volume des masses rocheuses mises en mouvements en une seule fois.

##### a) Chute de bloc

Sous les actions météoriques, et en particulier le mouillage et le gel, la surface d'une falaise peut se disloquer et des blocs se détacher. Ce phénomène est spectaculaire et dangereux mais heureusement rare (ex : corniche Jijilienne).

## b) Eboulements (écoulements)

Ils sont des ruptures brutales intéressant des masses rocheuses importantes qui, en raison de leur position dans la topographie, sont sollicités par la pesanteur. Ils n'ont rien de commun avec le processus d'érosion normal de tous les massifs rocheux qui, blocs donne naissance aux cônes d'éboulis qui tapissent le pied des falaises rocheuses. Au moment de la rupture, le rocher est généralement soumis à des contraintes très inférieures à sa résistance. La rupture n'est possible que grâce à une fissuration préexistante, présentée sous ses diverses formes, ainsi qu'à une rupture par étapes.

## c) Ecoulements

C'est la chute d'une partie très importante de falaise.

### 4.2.1.2. Glissements

Les glissements affectent les sols, les vitesses de rupture peuvent être très variables, dans certains cas, la rupture est précédée de signes avant-coureurs, dans d'autres cas elle est brutale, ils se caractérisent par une surface de rupture nette:

#### a) Le glissement plan

La ligne de rupture est souvent une couche mince de mauvaise caractéristique sur laquelle s'exerce l'action de l'eau: on l'appelle la «couche savon» (celle qui favorise le glissement).

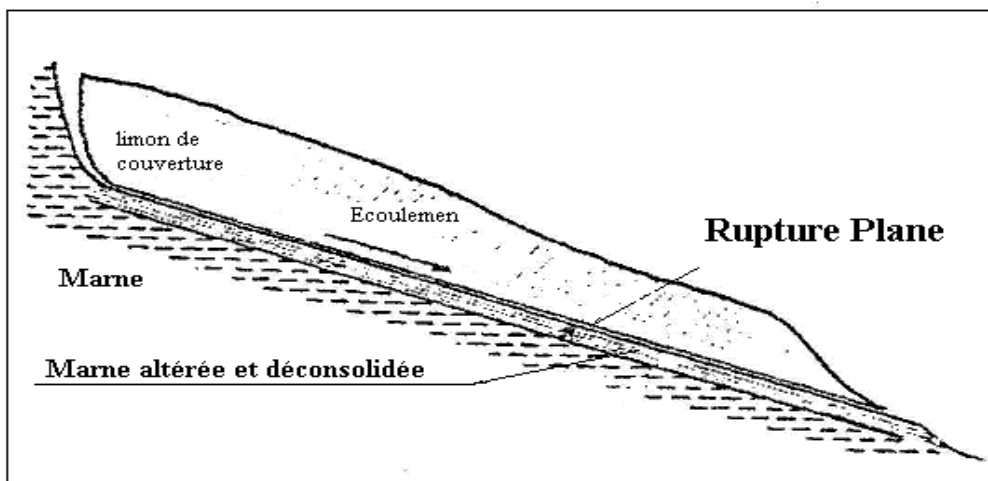


Fig4.2: Glissement plan

#### b) Le glissement rotationnel simple

ce sont les glissements les plus fréquents et leur surface de rupture est assimilée à un cylindre ou un cercle (dans la plupart des cas) d'où le nom de glissement circulaire. Dans le cas contraire, la surface de rupture est plus complexe et le glissement sera désigné sous le terme de glissement non circulaire.

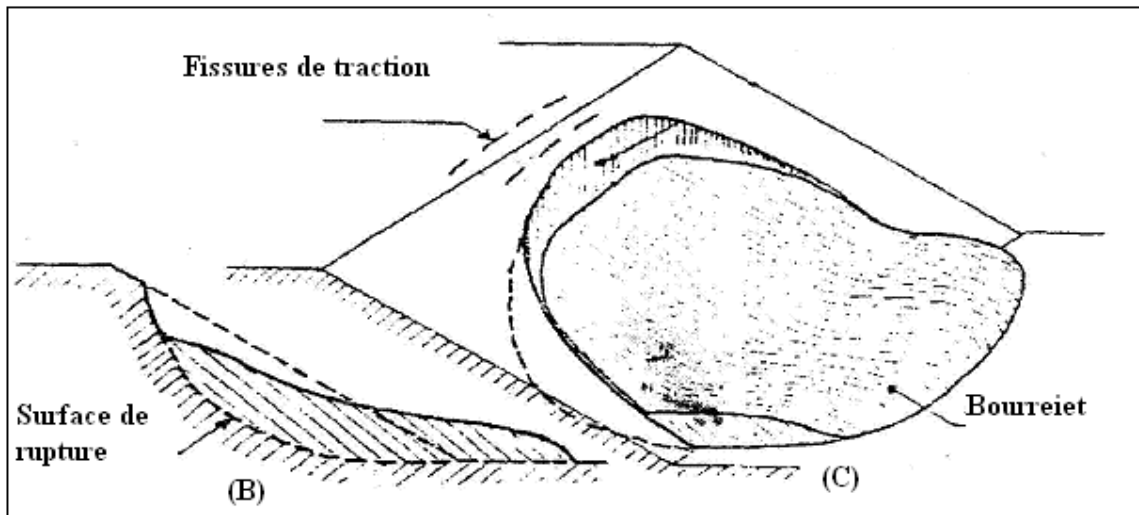


Fig4.3: Glissement rotationnel

### c) Le glissement rotationnel complexe

Il s'agit de glissements multiples emboîtés les uns dans les autres, dus à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, ce qui entraîne ainsi des glissements successifs remontant vers l'amont.

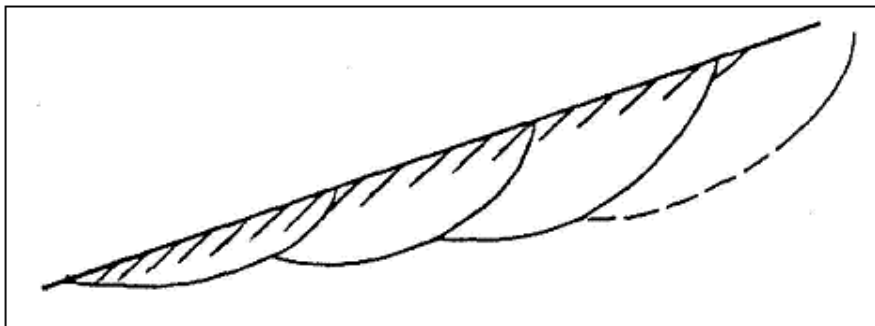


Fig4.4: Glissement successifs emboîtés

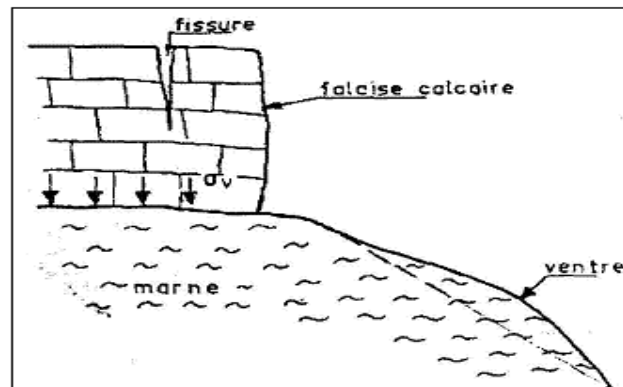
### 4.2.1.3. Les mouvements lents, Le fluage, Solifluxion



Sous l'action de contraintes inférieures à la contrainte de rupture, les sols se déforment lentement par fluage. Ce phénomène affecte les versants naturels, sont continus et ne présentent pas de surface de rupture nette.

### a) Le fluage

Il correspond à des mouvements lents dus à des sollicitations proches de la rupture (domaine plastique). Se sont des déformations viscoplastique lente sous contrainte intérieure à la résistance du cisaillement, concerne essentiellement les milieux argileux. Mais le simple jeu de la pesanteur peut aussi entraîner la poussée au vide d'une pente argileuse: on peut citer le célèbre glissement de la colline d'El Biar à Alger.



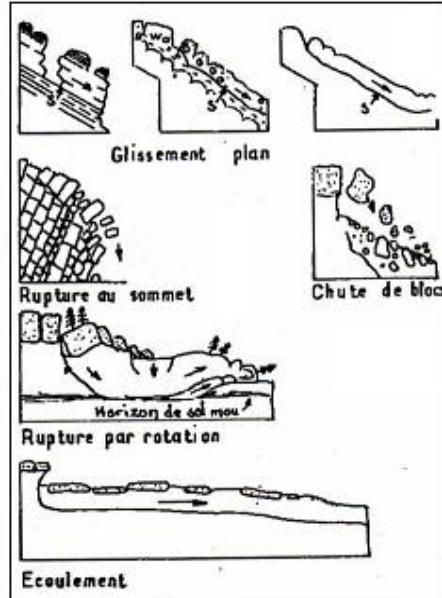
**Fig4.5:** Exemple de fluage

### b) Solifluxion

La solifluxion est un cas particulier de fluage. Il s'agit d'un phénomène superficiel du à la variation du sol au cours des saisons (gel et dégel en montagne, alternance de saisons sèches et pluvieuses). La solifluxion se repère par la présence d'ondulations du sol et l'inclinaison des arbres.

#### 4.2.1.4. Les coulées boueuses

Elles sont dues à des écoulements d'eau important transportant des matériaux solides, elles se produisent surtout en montagne. Il s'agit d'écoulements visqueux ou fluides, qui interviennent dans les milieux fins, souvent argileux, gorgés d'eau, qui peuvent cheminer sur des centaines de mètres et sur des pentes de quelques degrés seulement. Plus le versant milieu est fluide, plus le phénomène est brutal est étendu.



**Fig4.6:** Différents types de rupture

#### 4.2.2. Pentes artificielles [20]

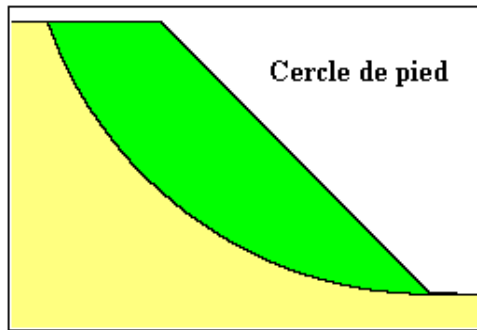
Les talus artificiels sont essentiellement affectés par des glissements et parfois par des phénomènes de fluage. On peut les classer en fonction des types d'ouvrages :

- talus en déblai.
- talus en remblai sur sol non compressible.
- talus en remblai sur sol compressible.
- digues et barrages en terre.

##### 4.2.2.1. Talus en déblais et talus en remblais sur sols non compressibles

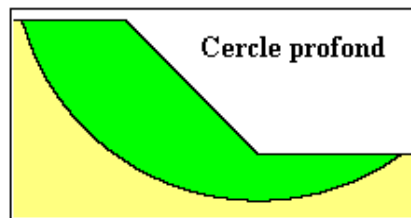
Les ruptures ont, d'une façon générale, l'allure de glissements rotationnels circulaires. On distingue:

- les cercles de talus se produisent généralement dans les sols hétérogènes, la base du cercle correspondant à une couche plus résistante.
- les cercles de pied (sont les plus courants dans ce type d'ouvrages).



**Fig4.7:** Cercles de pied

-les cercles profonds ne se produisent que dans le cas où le sol situé sous le niveau du pied du talus est de mauvaise qualité.



**Fig4.8:** Cercle profond

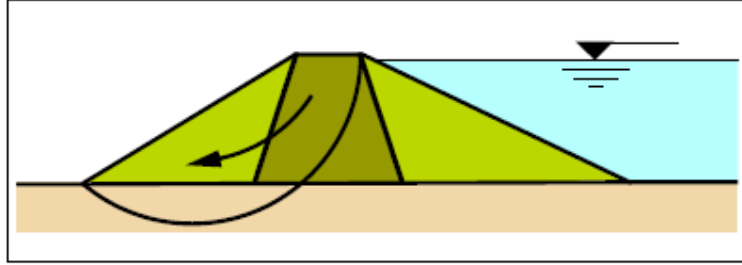
#### **4.2.2.2. Talus en remblais sur sols compressibles**

La rupture constatée dans des remblais en sol compacté (remblai routier par exemple) repose sur une couche d'argile molle, de vase ou de tourbe souvent profonde. Les cercles de rupture sont tangents à la base de la couche molle lorsque celle-ci est relativement peu épaisse.

Si le facteur de sécurité vis-à-vis de la rupture est peu élevé tout en étant supérieur à 1, il peut se produire un fluage du sol de fondation entraînant un tassement anormal du remblai latéral de la couche molle et une perte de résistance du remblai ou de la fondation ou des deux

#### **4.2.2.3. Digues et barrages en terre**

L'étude de la stabilité des talus amont et aval est la partie essentielle de la conception des barrages en terre. Différents cas doivent être étudiés en tenant compte de l'état des pressions interstitielles à l'intérieur de la digue.



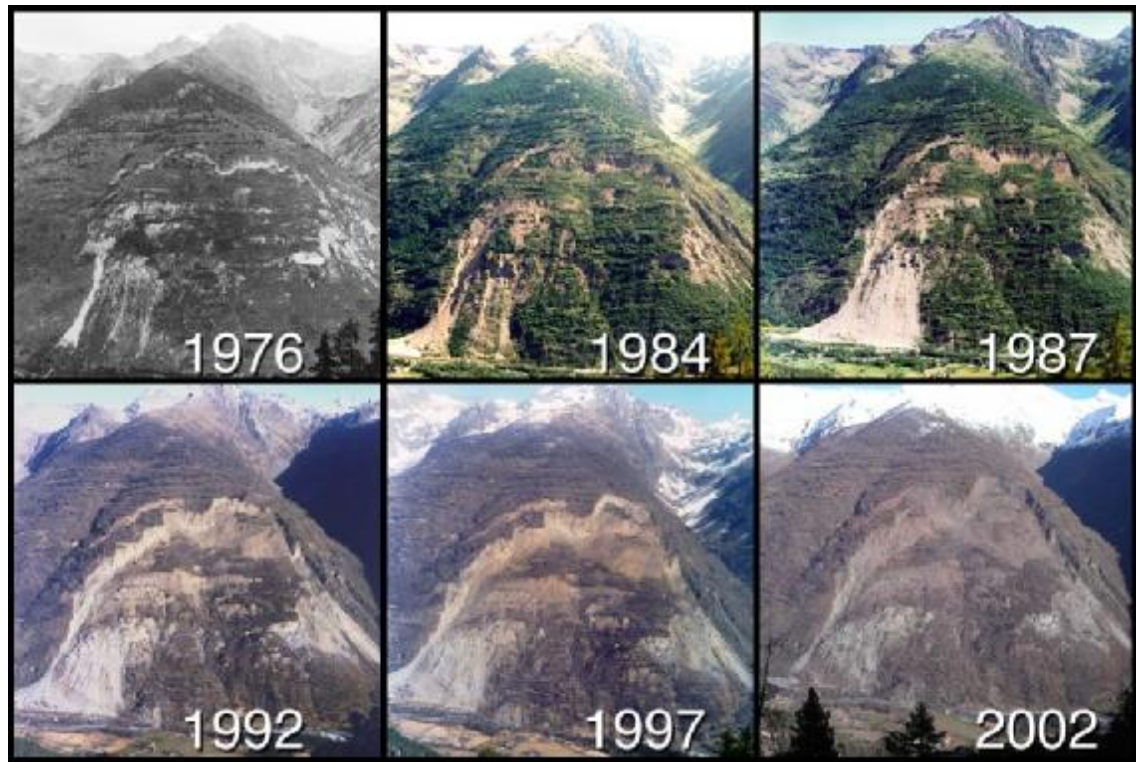
**Fig4.9:** Digue et barrages en terre

Pratiquement, on calculera le facteur de sécurité FS le long des cercles de glissement supposés :

- pendant la construction et peu après la construction.
- lorsque le barrage vient d'être rempli (avec percolation permanente).
- lors d'une vidange rapide.



**Fig4.10:** Glissement terrain



**Fig4.11:** Evolution des Glissements terrains à travers monde

# Chapitre 5

Caractérisation géotechnique du site

## 5.1. Introduction

Il est des données géologiques et géotechniques relatives a un site quelconque peuvent être stockées et traitées sous différentes formes (lithologie, paramètres physico-mécaniques, etc.) Pour permettre à tout utilisateur de pouvoir déterminer le comportement d'un site. En faisant appel a l'informatique qui est de plus en plus performant, il est tout à fait judicieux de rassembler ces données de façon à les traiter afin d'aboutir à des corrélations directes et à une meilleure compréhension des sols.

Une approche représentative des résultats d'essais a été prise en compte pour une meilleure compréhension des comportements des sols en fonction de leurs propriétés et leur nature. Une figure géométrique dont la forme et les dimensions reflètent les caractéristiques d'identification à savoir: courbes de distribution des dimensions des particules, plasticité et pourcentage des particules fines  $< 2\mu$ , est appelée empreinte. L'application de cette approche est basée sur l'idée d'une perspective importante pour stocker et faciliter l'interprétation des données géotechniques et pour permettre de prédire le comportement des sols.

Cette méthode permet l'interprétation des données géotechniques et facilite leur informatisation en vue de permettre aux ingénieurs d'identifier et classer facilement les sols à partir de leurs empreintes. La technique de l'empreinte a été appliqué au site étudié connu par son instabilité. Les différents essais géotechniques ont été réalisé par le laboratoire des travaux publics de l'Est de Constantine [21].

## 5.2. Localisation du site et caractérisation des sols

D'après la carte géologique d'El Haria (au 1 /50.000), le terrain est traversé par des formations géologiques d'âge Mio-pliocène. Il s'agit de conglomérats d'argiles sableuses rougeâtres .gèologiquement, le terrain est recouvert per un remblai d'abaisseur assez conséquente, succède d'une couche d'argile brune et d'une couche d'argile marneuse. Les profils géologiques montrent que le terrain est traversé par des lentilles de sable graveleux d'épaisseur variable.

Le tableau 5.1 comprend les résultats des essais de caractérisation physiques des sondages  $S_1 - S_5$ , le tableau 5.2 regroupe tous les résultats obtenu, sur des échantillons prélevés au niveau des sondages susnommés à partir d'essai réalisés au laboratoire LTP-Est [22].



S	Litho	Prof (m)	w%	$\gamma_h$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ t/m <sup>3</sup>	S <sub>r</sub> %	w <sub>L</sub> %	w <sub>p</sub> %	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>
1	Terre végétale	00.00-00.10	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile brune	04.50-04.90	15.55	2.05	1.78	81.85	48.9	21.4	27.5	1.21
	Argile marneuse brune	10.80-11.30	14.29	2.16	1.89	90.89	45.5	16.7	28.8	1.08
	Argile sablo-graveleuse	20.50-21.00	13.35	2.40	1.98	99.80	42.5	21.1	21.4	1.36
2	Argile sablo-graveleuse	00.00-02.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse brune	04.00-04.50	15.95	2.12	1.83	90.75	46.3	19.7	26.6	1.14
	Argile sablo-graveleuse	08.00-08.50	17.68	2.13	1.81	98.36	47.0	24.5	22.5	1.30
	Argile marneuse	13.00-13.50	16.73	2.14	1.83	96.40	45.2	20.8	24.4	1.17
3	Remblais	00.00-00.80	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile brune	03.20-03.50	9.91	1.98	1.90	4.42	4.9	25	9.91	1.52
	Argile marneuse avec passage sablo-graveleuse	06.60-07.50	17.26	2.13	1.91	97.48	42.0	20	22.00	1.12
4	Terre végétale	00.00-00.60	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile brune	07.10-07.50	15.24	2.19	1.90	98.67	41.5	20.2	21.3	1.23
	Argile marneuse brune	10.50-11.10	14.21	2.18	1.91	92.19	44	29	15	0.98
5	Terre végétale	00.00-00.40	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile brune humide	03.00-03.50	20.04	2.11	1.76	100	49.2	19.6	29.6	0.98
	Argile marneuse	09.40-09.80	19.51	2.16	1.81	100	51.3	19.4	31.9	0.99

**Tableau5.1:** Caractéristiques physiques des sols

Source (Benayoun année 2001-2002)

S	Litho	Prof (m)	$\sigma_c$ (bar)	C <sub>c</sub>	I <sub>g</sub>	C (bar)	$\phi$ (°)
1	Terre végétale	00.00-00.10	-	-	-	-	-
	Argile brune	04.50-04.90	-	-	-	0.52	5
	Argile marneuse brune	10.80-11.30	0.72	0.177	0.041	0.38	5
	Argile sablo-graveleuse	20.50-21.00	2.69	0.151	1.08	0.71	4
2	Argile sablo-graveleuse	00.00-02.00	-	-	-	-	-
	Argile marneuse brune	04.00-04.50	1.89	0.087	1.14	0.33	7
	Argile sablo-graveleuse	08.00-08.50	2.28	0.116	1.30	0.59	4
	Argile marneuse	13.00-13.50	3.5	0.121	1.17	0.69	2
3	Remblais	00.00-00.80	-	-	-	-	-
	Argile brune	03.20-03.50	1.28	0.106	1.52	0.37	6
	Argile marneuse avec passage sablo-graveleuse	06.60-07.50	1.72	0.147	0.044	-	-
4	Terre végétale	00.00-00.60	-	-	-	-	-
	Argile brune	07.10-7.50	2.20	0.123	0.032	0.76	2
	Argile marneuse brune	10.50-11.10	2.96	0.068	0.020	0.28	7
5	Terre végétale	00.00-00.40	-	-	-	-	-
	Argile brune humide	03.00-03.50	1.42	0.124	0.037	-	-
	Argile marneuse	09.40-09.80	1.74	0.128	0.051	0.11	11

**Tableau5.2:** Caractéristiques mécaniques des sols

Source (Benayoun année 2001-2002)

Des niveaux d'eau ont été observés dans les sondages  $S_1$  et  $S_3$  à des profondeurs spécifiques au niveau des lentilles sablo graveleuses. Cinq sondages carottés ont été réalisés sur ce site avec pose de deux piézomètres au sein des sondages  $S_1$  et  $S_3$ . D'après les essais effectués, on constate que le fuseau granulométrie caractérise un sol argilo limoneux sableux, consistant et plastique.

### 5.3. Technique de visualisation et stockage des données

La composition du sol est caractérisée à l'aide d'une simple empreinte déduite de l'identification des sols: courbes de distribution des dimensions des particules, limites d'atterberg, pourcentage des particules fines et indice d'activité.

Cette empreinte est composée de quatre quadrants dont le premier représente le tableau de Casagrande, le deuxième concerne le tableau de Skempton qui caractérise l'activité des sols, le troisième représente la distribution granulométrie et le dernier de permet de fermer l'empreinte (endoscopie du sol) En examinant le contenu de la Figure 5.1, on remarque que:

- la droite A pour équation,  $I_p = 0.73 (w_L - 20)$ . néanmoins les recherches récentes ont montrées que cette droite est mieux représentée par équation  $I_p = 0.98 (w_L - 27.5)$ . la ligne verticale  $w_L = 50\%$  séparant les argiles organiques des argiles inorganiques (CH, CL, MH et ML) est illustrée par le tableau de CASAGRANDE.
- Dans le deuxième quadrant, qui caractérise l'activité des sols fins défini par Skempton, la position relative du point  $P_2$ , ayant pour coordonnées  $(x_d\% - I_p)$ , peut facilement être visualisée par des droites d'activité égale à:  $I_A = I_p / x_{2\mu}$ . Les différents domaines d'activité: non active, active et extrêmement active sont respectivement délimités par les droites de valeur  $I_A = 0.5$ ,  $I_A = 1.0$  et  $I_A = 2.0$ .
- Le troisième quadrant présente la distribution dimensionnelle des grains. pour les sols grenus (non cohésif), on prend seulement la portion  $P_{10} - P_{90}$  à partir de  $x_d = 10\%$  de la courbe de distribution. pour les sols fins (limon et argile), la courbe de distribution de l'empreinte est caractérisée par la valeur  $P_{90}$  et le point  $P_3$  ayant comme abscisse  $x_{2\mu}$ .
- Dans le dernier quadrant, le point  $P_4$  à une abscisse égale à la limite de liquidité  $W_L$  et la même ordonnée que le point inférieur du troisième quadrant. pour les sables, ce point correspond au  $d_{10}$  et pour les argiles et les limons il correspond à  $d_{2\mu}$ .

Ainsi, en connectant les cinq points des différents quadrants on obtient une figure appelée empreinte ou endoscopie du sol, dont la forme et les dimensions donnent une information de base pour l'identification et la classification des sols.

### 5.4. Interprétation

En examinant le contenu de la Figure 5.2, on constate que dans le premier quadrant, le point  $P_1$  des différents sondages  $S_1 - S_5$  se trouve dans la zone des argiles minérales moyennement plastique puisque leur  $W_L$  ne dépasse pas 50%. L'expérience montre que les points représentatifs sur cet abaque de Casagrande des différents échantillons d'une même formation géologique forment une

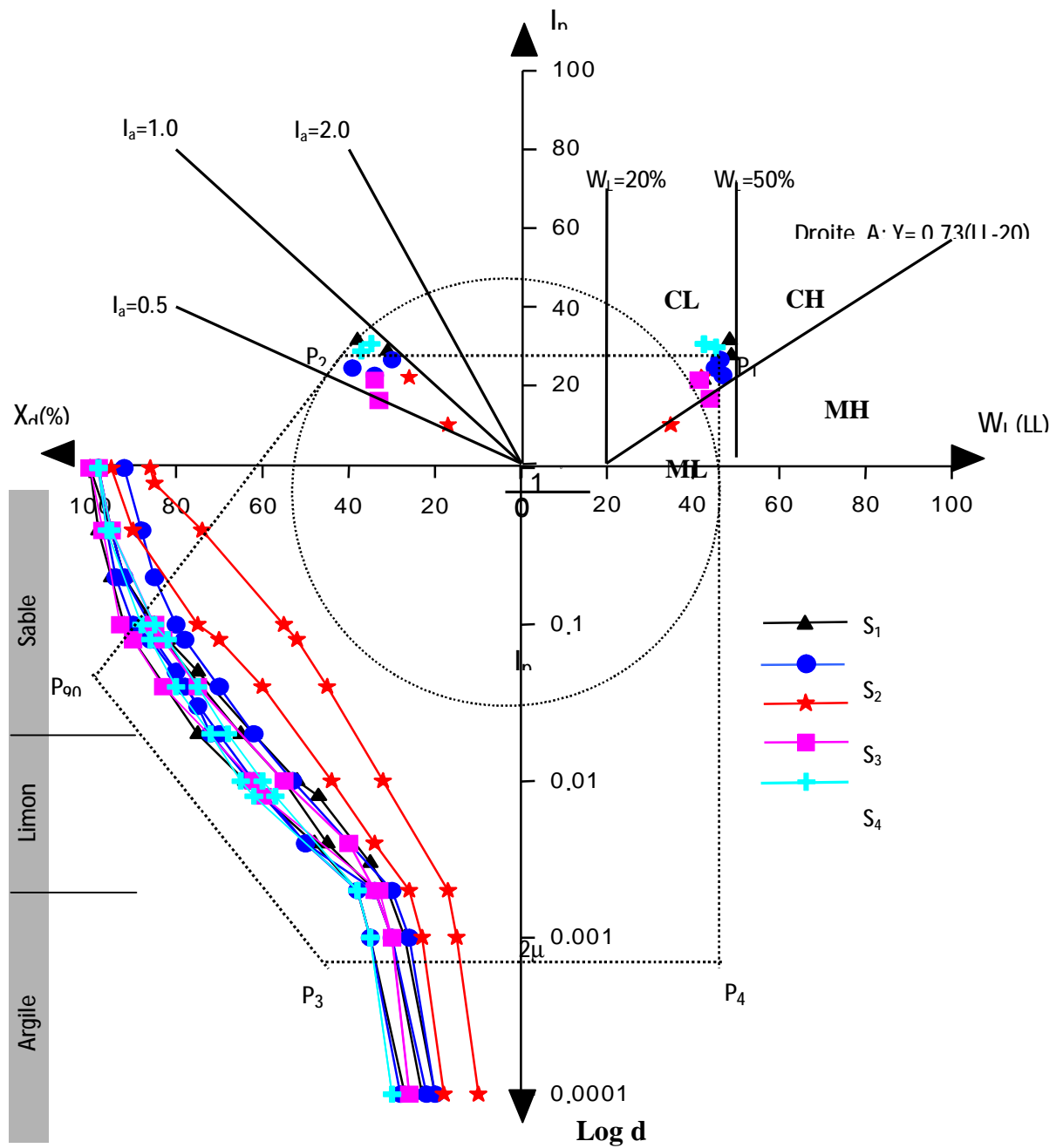
ligne droite sensiblement parallèle à la droite A on remarque pour le site étudié que les parallèle à l'exception du point P<sub>1</sub> sur sondage S<sub>3</sub> qui ne se trouve pas sur cette ligne. a priori, il semble ne pas appartenir à la même formation géologique que les autres sondages S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub> et S<sub>5</sub>.

Dans le deuxième quadrant, le point P<sub>2</sub> des différents échantillons testés présente une activité comprise entre 0.5 et 1.0, ainsi leur indice d'activité est actif. Par ailleurs, il est établi que l'activité est une caractéristique du minéral et elle croît avec la teneur en élément inférieur à 2 $\mu$ . D'après Skempton, les échantillons des sondages S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> et S<sub>5</sub> sont de moyennement actifs à actifs, par contre les sondages S<sub>3</sub> et S<sub>4</sub> sont peu ou faiblement actifs, en d'autres termes ils contiennent moins d'éléments actifs.

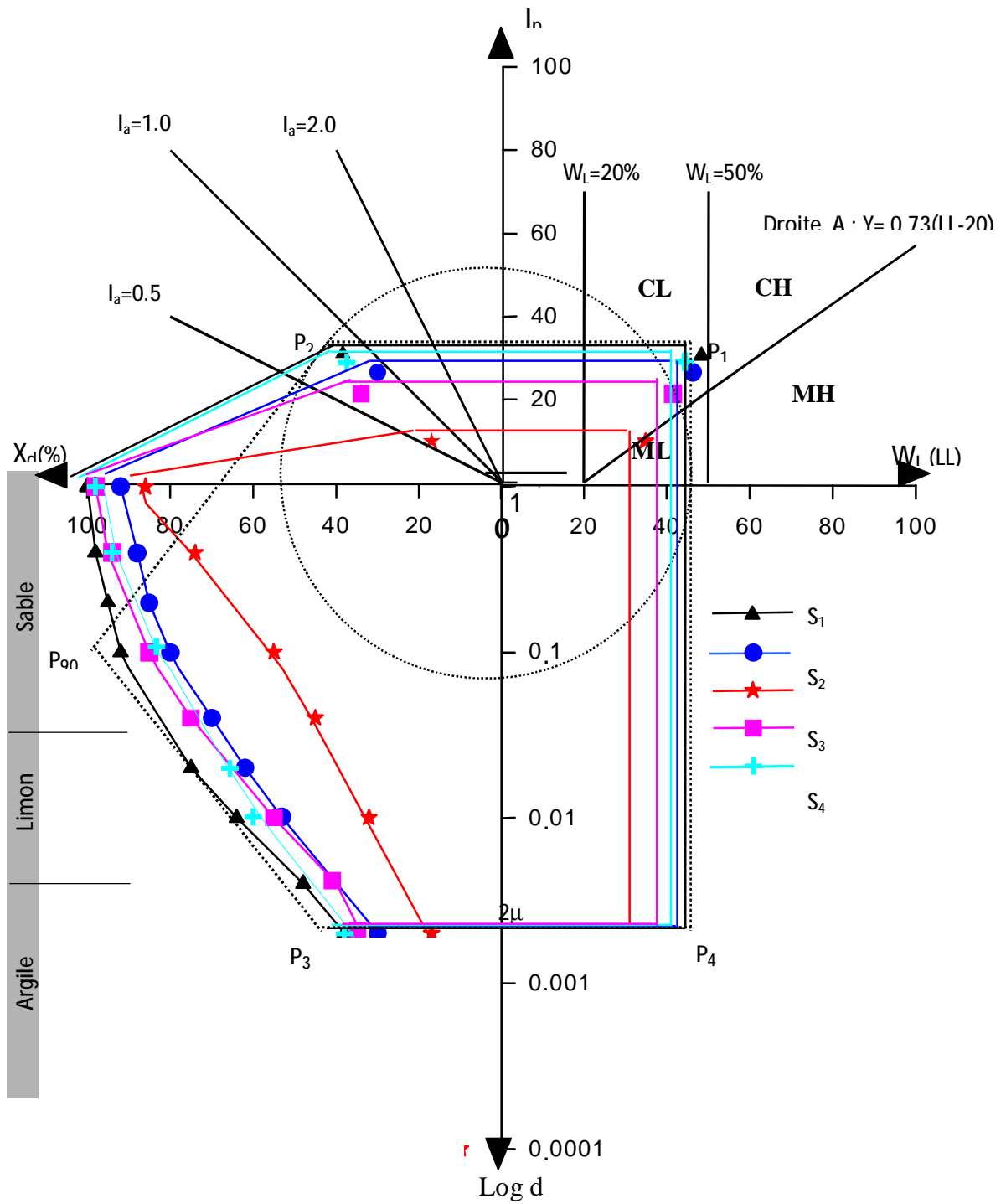
Au niveau du troisième quadrant caractérisant la distribution granulométrique des solides, on remarque que les sondages S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub> et S<sub>5</sub> ont un pourcentage des particules inférieures à 2 $\mu$  compris entre 30 et 45% ce qui explique leur appartenance à l'activité moyenne voire active.

Par contre, le sondage S<sub>3</sub> présente un pourcentage des particules fines inférieur à 20% ce qui explique sa faible activité et son non appartenance à la ligne parallèle à la droite A. Ce type de sol ne peut être qu'un limon de moyenne compressibilité.

Il ressort de cette analyse que l'empreinte constitue un moyen efficace de caractérisation et de classification des sols. On constate que les sondages S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub> et S<sub>5</sub> sont des sols de moyenne activité à actifs, ils présentent donc des capacités de gonflement et de retrait qui se traduisent par des désordres au niveau des ouvrages légers ce qui a été parfaitement constaté sur ce site. En comparant les différentes empreintes, on remarque que le sondage S<sub>1</sub> présente une empreinte enveloppe et que celles des sondages S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub> et S<sub>5</sub> lui sont très proches ce qui d'ailleurs permet de prédire un comportement similaire. Seul le sondage S<sub>3</sub> présente une empreinte bien spécifique caractérisant son état propre et sa formulation géologique différente.



**Fig5.1:** Empreinte de caractérisation des sols  
 Campus Université Mentouri  
 Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)



**Fig5.2:** Empreinte des sondages S<sub>1</sub>-S<sub>5</sub>  
 Campus Université Mentouri  
 Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)

## 5.5. Interprétation de la nouvelle empreinte

Les résultats des essais de caractérisation physiques et mécaniques effectués au pied du talus sont indiqués dans les tableaux 5.3 et 5.4.

S	Litho	Prof (m)	w%	$\gamma_h$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ t/m <sup>3</sup>	S <sub>r</sub> %	w <sub>L</sub> %	w <sub>p</sub> %	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>
1	Remblais	00.00-04.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse jaunâtre	04.00-06.00	19.33	2.12	1.78	100	45.00	23.40	21.60	1.19
	Marne argileuse grisâtre	06.00-11.00	12.03	2.25	2.01	95.40	37.80	19.10	18.70	1.38
	Argile marneuse	11.00-17.00	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Remblais	00.00-02.50	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse jaunâtre graveleuse	02.50-05.00	22.40	2.08	1.70	100	56.80	27.30	29.50	1.17
	Marne argileuse grisâtre	05.00-13.00	12.23	2.30	2.05	100	34.00	18.90	15.10	1.44
	Argile marneuse	13.00-17.00	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Remblais	00.00-01.50	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse jaunâtre	01.50-04.00	13.60	2.20	1.93	91	33	19.70	13.30	1.46
	Marne argileuse grisâtre	04.00-12.50	13.16	2.26	2.00	100	38	21.40	16.60	1.50
4	Remblais	00.00-04.50	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse graveleuse jaunâtre	04.50-08.50	13.96	2.22	1.95	97.52	38.50	19.20	19.30	1.30
	Marne grise	08.50-15.00	14.54	2.23	1.95	100	35	19.20	15.80	1.07
5	Remblais	00.00-04.40	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse	04.40-05.00	21.43	2.09	1.72	100	53	23.60	29.40	1.07
	Argile marneuse jaunâtre	05.00-08.00	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Remblais	00.00-02.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile marneuse	02.00-07.00	22.81	2.07	1.69	100	46	23.30	22.70	1.02
	Marne argileuse brune	07.00-17.00	17.97	2.16	1.83	100	47	22.80	24.20	1.20

**Tableau 5.3** : Caractéristiques physiques du sol

Source (Benayoun année 2001-2002)

S	Litho	Prof (m)	$\sigma_c$ (bar)	$C_c$	$I_g$	C (bar)	$\varphi$ (°)
1	Remblais	00.00-04.00	-	-	-	-	-
	Argile marneuse jaunâtre	04.00-06.00	5.00	0.138	0.061	0.300	14
	Marne argileuse grisâtre	06.00-11.00	1.00	0.059	0.025	0.600	20
	Argile marneuse	11.00-17.00	-	-	-	-	-
2	Remblais	00.00-02.50	-	-	-	-	-
	Argile marneuse jaunâtre graveleuse	02.50-05.00	2.60	0.132	0.038	0.800	14
	Marne argileuse grisâtre	05.00-13.00	7.00	0.064	0.023	0.600	9
3	Remblais	00.00-01.50	-	-	-	-	-
	Argile marneuse jaunâtre	01.50-04.00	3.20	0.073	0.028	0.600	9
	Marne argileuse grisâtre	04.00-12.50	10.00	0.08	0.030	0.700	16
4	Remblais	00.00-04.50	-	-	-	-	-
	Argile marneuse graveleuse jaunâtre	04.50-08.50	-	-	-	-	-
	Marne grise	08.50-15.00	3.80	0.130	0.030	0.82	22
5	Remblais	00.00-04.40	-	-	-	-	-
	Argile marneuse	04.40-05.00	3.00	0.104	0.048	0.23	30
	Argile marneuse jaunâtre	05.00-08.00	-	-	-	-	-
6	Remblais	00.00-02.00	-	-	-	-	-
	Argile marneuse	02.00-07.00	3.80	0.264	0.065	0.500	14
	Marne argileuse brune	07.00-17.00	7.00	0.152	0.051	0.37	20

**Tableau5.4** : Caractéristiques mécaniques du sol

Source (Benayoun année 2001-2002)

### Remarques

- Pour  $33\% \leq W_L \leq 56.8\%$  et  $13.3 \leq I_p \leq 29.5\%$ , cet intervalle de valeurs caractérise le domaine des argiles inorganiques de plasticité moyenne à forte plasticité.
- Les valeurs des densités sont assez élevées.
- Les teneurs en eau donnent des valeurs moyennes.
- D'après les valeurs du degré de saturation, le sol est très saturé.

En observant l'empreinte obtenue, on constate que la plupart des points différents sondages ,S<sub>1</sub>-S<sub>6</sub> se trouve dans la zone des argiles minérales moyennement plastique; parce que leur teneur en eau ne dépasse pas les 50%.par contre pour les sondages S<sub>2</sub> à la profondeur 5.00-5.70m et S<sub>5</sub>à la profondeur 4.40-5.00 m, les deux points P<sub>1</sub> se trouvent dans la zone CH, c'est-à-dire des argiles très plastique.

On remarque que les points P<sub>1</sub> des différents sondages forment une parallèle à la droite A, dont l'équation est de :  $y=0.73$  (LL-12), cela signifie que les différents échantillons appartiennent à la même formation géologique.

Dans le deuxième quadrant, le point  $P_2$  des différents échantillons présente une activité entre 0.28 et 1.18, ainsi leur indice d'activité est actif à très actif, sachant que l'indice d'activité croît avec la teneur en élément inférieur à  $2\mu$ . On remarque que les échantillons des sondages  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  et  $S_6$  sont actifs, par contre l'échantillon du sondage  $S_5$  est de forte activité (pourcentage de 64% d'éléments inférieur à  $2\mu$ ).

Au niveau du troisième quadrant, caractérisant la courbe granulométriques des particules solides, on remarque que les sondages  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  et  $S_6$  ont un pourcentage de particules fines entre 20% et 59%, ce qui explique leur activité, par contre le sondage  $S_5$  présente un pourcentage des particules fines de 64% ,ce qui explique sa forte activité, ce type de sol ne peut être que de l'argile.

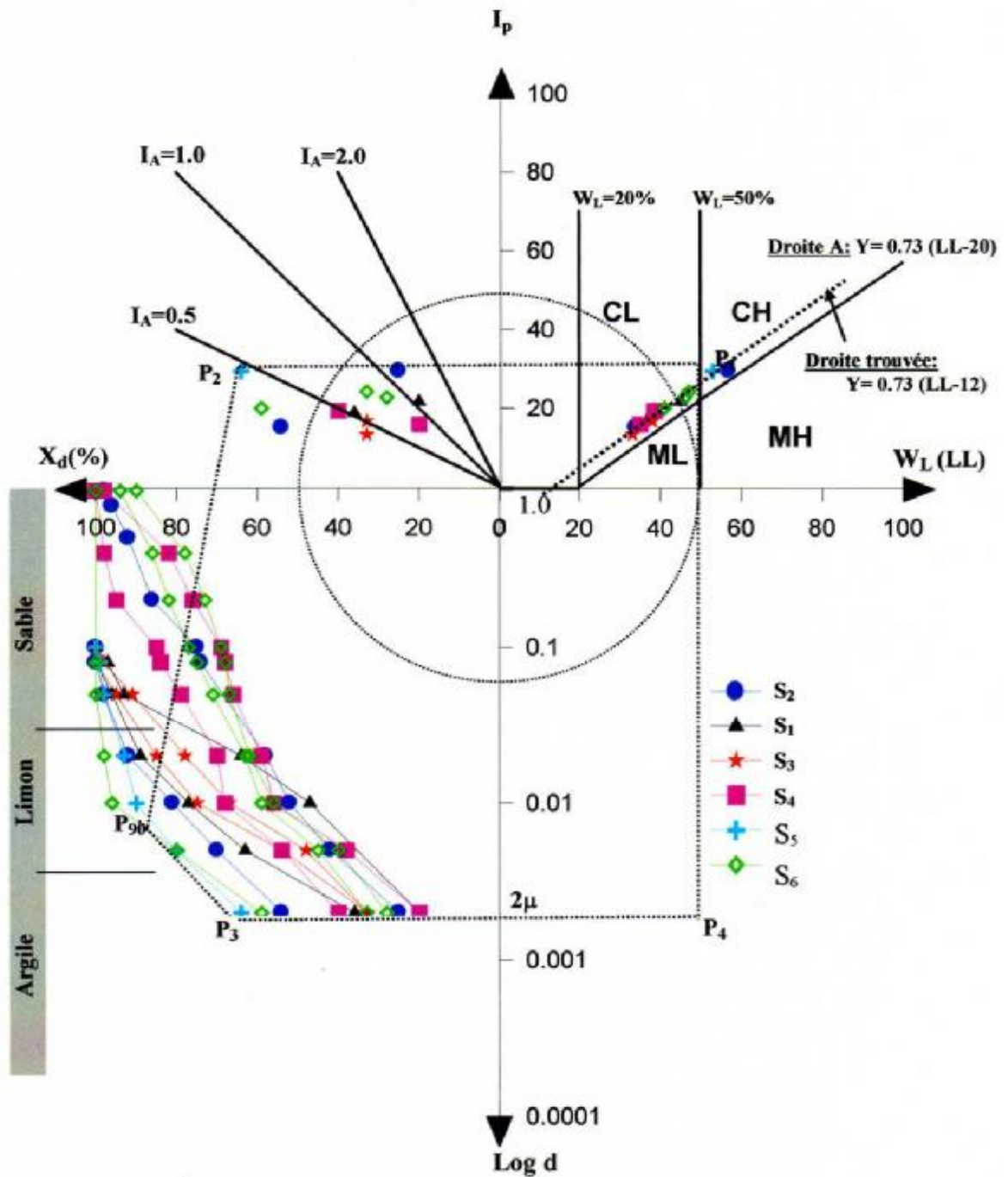
En comparant les différentes empreintes, on remarque que le sondage  $S_5$  présente une empreinte enveloppe, et que celles des sondages  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  et  $S_6$  sont proches ce qui permet de prédire un comportement similaire.

## **5.6. Conclusion**

A partir d'informations des données géotechniques stockées et traitées, on peut en déduire une lithologie d'un terrain qui correspondra à une formation bien définie d'ère géologique.

- Les données traitées peuvent donner naissance à une classification bien précise appelée «empreinte d'un sol » en zone d'activité moyenne ou forte avec une plasticité bien définie et une distribution des particules représentée.
- L'empreinte permet de déterminer la zone d'instabilité d'un sol et donc son endoscopie physique, ces différentes empreintes peuvent également être utilisées pour classer les sols.





**Fig5.3:** Empreinte de caractérisation des sols  
 Campus Université Mentouri  
 Source (Belouar, Benayoun année 2001-2002)

# Chapitre 6

Pratique des éléments finis en géotechnique

## **6.1. Aperçu de la méthode des éléments finis**

### **6.1.1. Introduction**

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation, la méthode des éléments finis est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application où elle est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique, technique off-shore, ... etc. [23].

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

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

### **6.1.2. Historique**

L'histoire de la MEF a commencé en 1819, quand Navier définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité, puis Maxwell en 1864 et Castigliano en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début du 20ème siècle, des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation ont été établis en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximation variationnelles. En 1955, Argyris présente une approche unifiée des méthodes des déplacements et des forces, l'année suivante Turner et Clough publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et représentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes.

### **6.1.3. Concepts de base**

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité du déplacement réel de la structure en tant qu'objet continu.

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

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

#### **6.1.4. Calculs par la MEF**

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

Elle nécessite :

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Cam-Clay, ... etc.
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

Elle permet :

- D'effectuer les calculs d'écoulement.
- De simuler toutes les phases de travaux.
- De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain

Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :

- Les déplacements des ouvrages.
- Les sollicitations internes des ouvrages.

Et pour le sol :

- Les déplacements du sol.
- Les déformations du sol.
- Les contraintes totales et effectives dans le sol.
- Les pressions interstitielles.

Et donc la possibilité d'étudier l'interaction de l'exécution d'un écran sur des ouvrages existants. Les principaux logiciels utilisés en France, sont :

1. CESAR (LCPC) : Logiciel 2D ou 3D, spécialement utilisé pour les tunnels.
2. PLAXIS (logiciel hollandais développé par l'équipe du Pr. Vermeer) : Logiciel 2D dédié à la géotechnique. Pour notre problème, on utilise Plaxis.

#### **6.2. Présentation de Plaxis**

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes

déliçats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers [24].

### **6.2.1. Le code éléments finis Plaxis**

Conçu par des géotechniciens numériques, le code éléments finis Plaxis représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné [24]

### **6.2.2. Options par défaut et solutions approchées**

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui est un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

Les options par défaut commencent dès le maillage : L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importe, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le meilleur est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.

De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements : Si celles-ci son complexes, l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise, face de bloc par face de bloc. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre. Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état  $K_0$  donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre  $K_0$  et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application

de la gravité. L'option  $K_0$  est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple).

Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans Plaxis : Pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles en régimes permanent ou transitoire, c'est possible grâce au module d'écoulements en milieu poreux. Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine). Si la nappe phréatique n'est pas trop éloignée de l'horizontale, dans ses états initial et final, on sait que la pression diffère peu de la pression hydrostatique ; si l'on adopte ce champ de pression approchée, les calculs deviennent très simples puisqu'il s'agit seulement de manier les variations de la poussée d'Archimède ; Plaxis offre cette possibilité qui est souvent très appréciable.

La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse d'utilisation que procure ce logiciel : L'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, ... etc. ; s'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière. Pour les calculs de consolidation, réalisés en différences finies explicites sur le temps, le choix du pas de temps peut également être décidé par l'utilisateur, ou bien calculé dans l'option par défaut, selon les critères numériques connus.

Un calcul par éléments finis fournit une masse imposante de résultats : Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et 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

## **6.3. Les modèles de comportement utilisés dans Plaxis**

### **6.3.1. Introduction**

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par éléments finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation. La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans des codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important [24].

La démarche suivie dans le développement du code Plaxis est différente. Un des objectifs de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant

des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. En ce sens, Plaxis peut apparaître comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, ou le micro-ordinateur a remplacé la règle. C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans Plaxis sont des modèles qui peuvent apparaître simple, voire simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

Pour traiter un problème de soutènement (paroi moulée, palplanche, ... etc.), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastique et le modèle de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas ; on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élastoplastiques de coefficient de raideur. Mais pour traiter d'une construction de remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'écroutissage. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le Soft Soil Model qui prend en compte cette évolution du matériau. Pour un calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation ; dans ce cas un modèle élastoplastique peut être justifié

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

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

En ce sens, la modélisation numérique ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

### 6.3.2. Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles

Le comportement des sols est régi par les propriétés du squelette ; il est donc nécessaire d'utiliser des contraintes effectives et d'écrire des lois de comportement en contraintes effectives. La pression interstitielle générée dans les ouvrages est une conséquence du non variation de volume celle ci est elle même dépendante de la perméabilité du sol. Un sable peut être non drainé in situ sous des sollicitations sismiques (rapides) de même qu'une argile est toujours non drainée à court terme. Les variations de volumes empêchées par les perméabilités créent des pressions interstitielles ; en fait, celles ci dépendent des variations de volume ; en élasticité, si les grains de sols sont incompressibles, on démontre que :

$$\sigma_w = \frac{K_w}{n} \varepsilon_v$$

Où  $\sigma_w$  est la surpression interstitielle,  $n$  la porosité,  $K_w$  le module volumique de l'eau et  $\varepsilon_v$  est un incrément de déformation volumique.

Des calculs en contraintes totales sont possibles. Ils permettent par exemple, des calculs de tassements et de stabilité de remblai après construction. Ces calculs ignorent la génération de pressions interstitielles. Ils présentent l'avantage d'être simples et de se recalculer par rapport à des calculs plus classiques de stabilité à court terme.

Leur inconvénient majeur est d'ignorer les pressions interstitielles, quand on connaît leur rôle majeur sur la stabilité de remblai [24].

### 6.3.3. Modèle élastique

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement  $G$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ . L'avantage de  $G$  est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ( $G_u = G'$ ), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé.

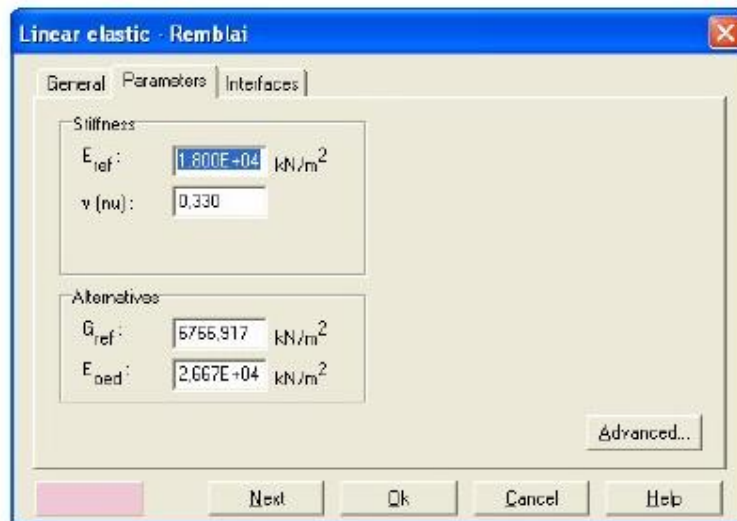
Il aurait pu sembler logique, si  $G$  est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser  $K$  comme second paramètre. D'une part  $K_u$  est infini (correspondant à  $\nu_u = 0.5$ ) et il est moins courant d'emploi.  $G$  est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques [25].

La relation entre le module d'Young  $E$  et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} ; k = \frac{E}{3(1+\nu)} ; E_{\text{oed}} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

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

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la figure 6.1 :



**Fig6.1:** Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire

Et les paramètres avancés sur la figure 6.2 :





**Fig6.2:** Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{oed} = E_{ref} + (y_{ref} - y) E_{increment} \quad \text{avec} \quad y < y_{ref} .$$

$E_{increment}$  : Augmentation de la rigidité [kN/m<sup>2</sup>/m]

$y_{ref}$  : Unité de profondeur  $y_{ref}$  [m]

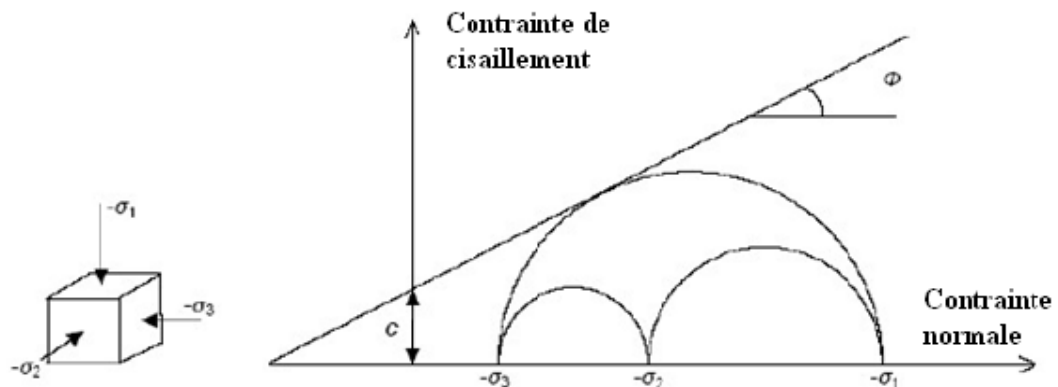
### 6.3.4. Modèle de Mohr-Coulomb

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 :

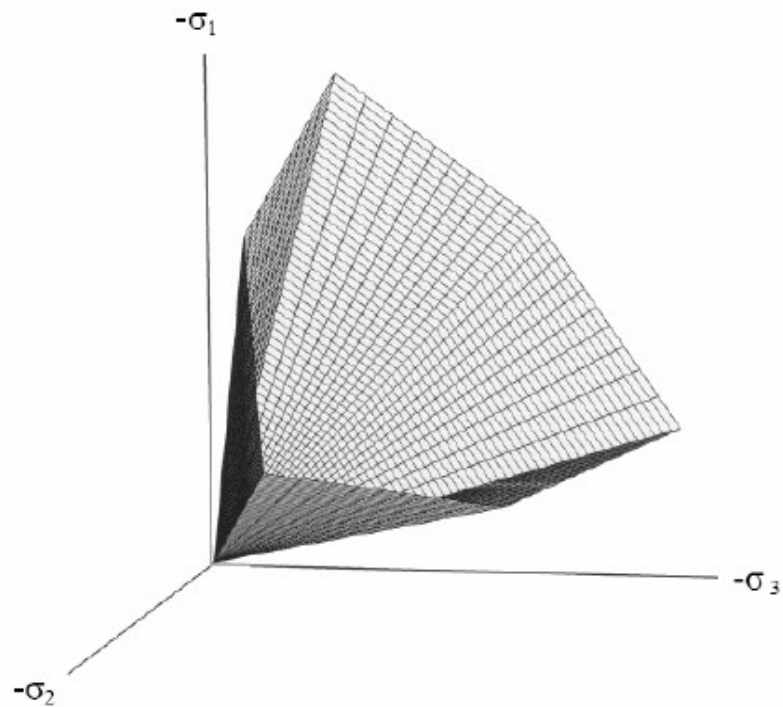
$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c$$

Où  $\sigma_n$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et  $c$  et  $\phi$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure 6.3).



**Fig6.3:** Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (figure 6.4) sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb.



**Fig6.4:** Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour  $c=0$

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres (figure 6.5). Les deux premiers sont  $E$  et  $\nu$  (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont  $c$  et  $\phi$ , respectivement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

Section	Parameter	Value	Unit
Stiffness	$E_{ref}$	7995,000	$\text{kN/m}^2$
	$\nu$ (nu)	0,300	
Strength	$c_{rel}$	1,000	$\text{kN/m}^2$
	$\phi$ (phi)	26,000	
	$\psi$ (psi)	0,000	
Alternatives	$G_{ref}$	3075,000	$\text{kN/m}^2$
	$E_{oed}$	1,076E+04	$\text{kN/m}^2$

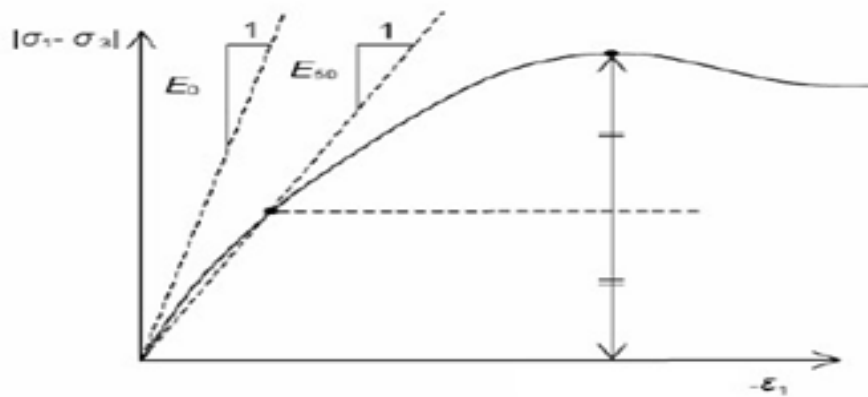
**Fig6.5:** Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

### a) Module d'Young

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au  $G_{max}$  mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux.

Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture (figure 6.6).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple.



**Fig6.6:** Définition du module à 50 % de la rupture

Dans la boîte de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

### b) Coefficient de poisson

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure  $K_0$  ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

### c) Angle de frottement

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent

considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur

de  $35^\circ$  est compatible avec les angles de frottement  $\varphi_{cv}$  (à volume constant, au palier).

En peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb (figure 6.3).

#### **d) Cohésion**

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottants, une très faible cohésion

(0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec  $\phi_u = 0$ , Plaxis

offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c-depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problèmes (typiquement en kPa/m).

#### **e) Angle de dilatance**

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté  $\psi$  ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30^\circ \text{ pour } \varphi > 30^\circ$$

$$\psi = 0^\circ \text{ pour } \varphi < 30^\circ$$

Le cas où  $\psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur  $\psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

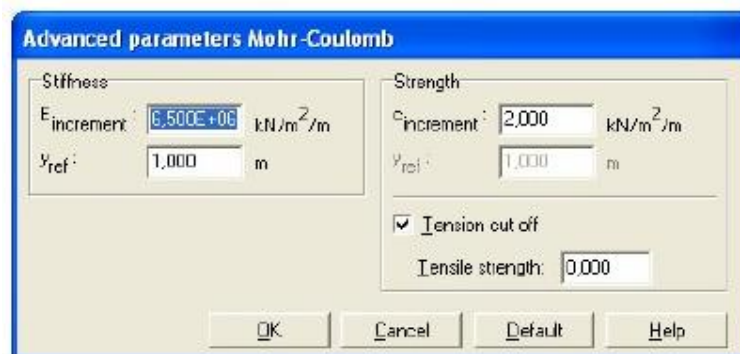
#### **f) Les contraintes de traction**

La pyramide de Mohr-Coulomb permet des contraintes de traction (figure 6.4). Celles-ci sont

souvent peu réalistes pour les sols et il est possible de couper ces contraintes de traction (tension cut-off) ou de les diminuer (Tensile strength).

### g) Les paramètres avancés

Pour tenir compte des variations avec la profondeur, on utilise les paramètres avancés (figure 6.7).



**Fig6.7:** Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb

## 6.4. Conclusion

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

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

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans Plaxis n'est pas différente d'un

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

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

# Chapitre 7

Présentation et interprétation des résultats obtenus

## **7.1. Introduction**

Dans le cadre toujours de la modélisation du talus de site de l'Université Mentouri de Constantine , le logiciel Plaxis nous a permis d'obtenir une estimation à court et à long terme des déformations qui sont produit, à l'intérieur du versant . Les résultats présents sont des résultats de modélisation en déformation plane. Leur justesse et leur précision dépendent étroitement des hypothèses choisies pour la représentation du massif et distribution de ses caractéristiques mécaniques.

La définition des modèles numériques s'est faite progressivement, afin d'aboutir une représentation intégrant l'ensemble des données disponibles relatives au secteur étudié.

## **7.2. Systèmes de coordonnées**

Le système de coordonnées utilisé par le logiciel Plaxis pour les calculs des contraintes, est le système de coordonnées cartésiennes. Dans une analyse en déformation plane, la coordonnée Z représente la direction perpendiculaire au plan et  $\sigma_{ZZ}$  est la contrainte suivant cette direction.

Dans tous les résultats, les forces et contraintes de compression, de même que les pressions interstitielles, sont comptées négativement.

## **7.3. Choix de la taille du modèle**

La détermination des dimensions du modèle global, par rapport à celles de la zone d'étude, a été le point de départ de notre analyse. La taille de la région modélisée doit être suffisamment importante pour éviter les effets d'interaction avec les limites si celles-ci sont trop proches de la zone d'étude, mais relativement petite afin de minimiser les temps de calcul.

Des études paramétriques permettent d'évaluer l'étendue minimale de la région à numériser pour que l'effet des chargements appliqués ne soit pas perturbé par les limites du modèle. En théorie,

pour un modèle infini les limites doivent avoir une influence minimale, voire nulle, sur la zone d'étude. Réciproquement, le chargement doit avoir une influence minimale sur les limites du modèle. Parallèlement, au fur et à mesure que la taille du modèle diminue, la présence des bords du maillage influence l'état de contraintes régnant à proximité du chargement. En déterminant un seuil de tolérance sur la variation des contraintes et/ou des déformations au niveau de la zone d'étude, on pourra ainsi déterminer une taille optimale, pour laquelle les limites du modèle influencent peu les modifications liées au chargement.

Si l'écart entre les résultats est faible, le modèle peut être considéré comme suffisamment grand. En revanche, si des différences significatives apparaissent, il est indispensable d'augmenter la taille du modèle.

## 7.4. Blocage

Les blocages sont des déplacements imposés nuls. Ces conditions peuvent être appliquées sur des lignes géométriques comme sur des points. Dans le modèle géométrique, une distinction peut être faite entre les blocages horizontaux ( $u_x=0$ ) et les blocages verticaux ( $u_y=0$ ) comme on peut également utiliser un total qui est la combinaison des deux précédents ( $u_x=u_y=0$ ).

Pour notre modèle on utilise le réglage standard des conditions aux limites géométriques imposé par Plaxis 2D. Ces conditions aux limites sont générées suivant les règles suivantes.

- Les lignes géométriques verticales pour lesquelles l'abscisse  $x$  est égale à la plus petite ou à la plus grande des abscisses  $x$  du modèle sont bloquées horizontalement ( $u_x=0$ ).
- Les lignes géométriques pour lesquelles la cote  $y$  est égale à la plus petite ordonnée  $y$  du modèle sont entièrement bloquées ( $u_x=u_y=0$ ).

## 7.5. Entrée des caractéristiques générales

- **Modèle sans construction**

La procédure d'entrée des caractéristiques générales se fait en suivant les étapes suivantes :

### 7.5.1. Géométrie

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches.

### 7.5.2. Condition aux limites

On a choisi les conditions aux limites par défaut, libres en vertical et bloquées au fond.

### 7.5.3. Caractéristique des matériaux

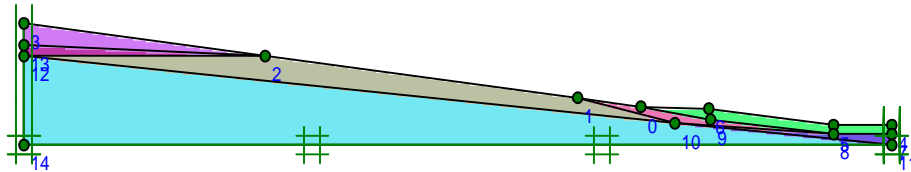
Dans Plaxis, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux : sols et interfaces (*Soil & Interfaces*), plaques (*Plates*), géogrilles (*Geogrids*) et ancrages (*Anchors*). A partir de la base de données, ces paramètres peuvent être assignés à des couches de sol, ou aux éléments de structure dans le modèle géométrique.



Les propriétés géotechniques du sol sont regroupées dans le tableau 7.1.

MOHR COULOMB	Couche1	Couche2	Couche3	Couche4	Couche5	Couche6	Couche7
$\gamma_{\text{unsat}}$ (KN/m <sup>3</sup> )	18	18	18	18	18	18	18
$\gamma_{\text{sat}}$ (KN/m <sup>3</sup> )	19	19	19	19	19	19	19
$K_x$ (m/day)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$K_y$ (m/day)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$c$ (KN/m <sup>2</sup> )	40	60	70	33	71	10	71
$\phi$ (°)	0	4	14	7	16	14	16
$\psi$ (°)	0	0	0	0	0	0	0
$\nu$ (-)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
$E$ (KN/m <sup>2</sup> )	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
$G$ (KN/m <sup>2</sup> )	3.846E4	3.846E4	3.846E4	3.846E4	3.846E4	3.846E4	3.846E4
$E_{\text{oed}}$ (KN/m <sup>2</sup> )	1.346E4	1.346E4	1.346E4	1.346E4	1.346E4	1.346E4	1.346E4

**Tableau 7.1:** Paramètres de modèle elasto-plastique de Mohr-Coulomb



**Fi**

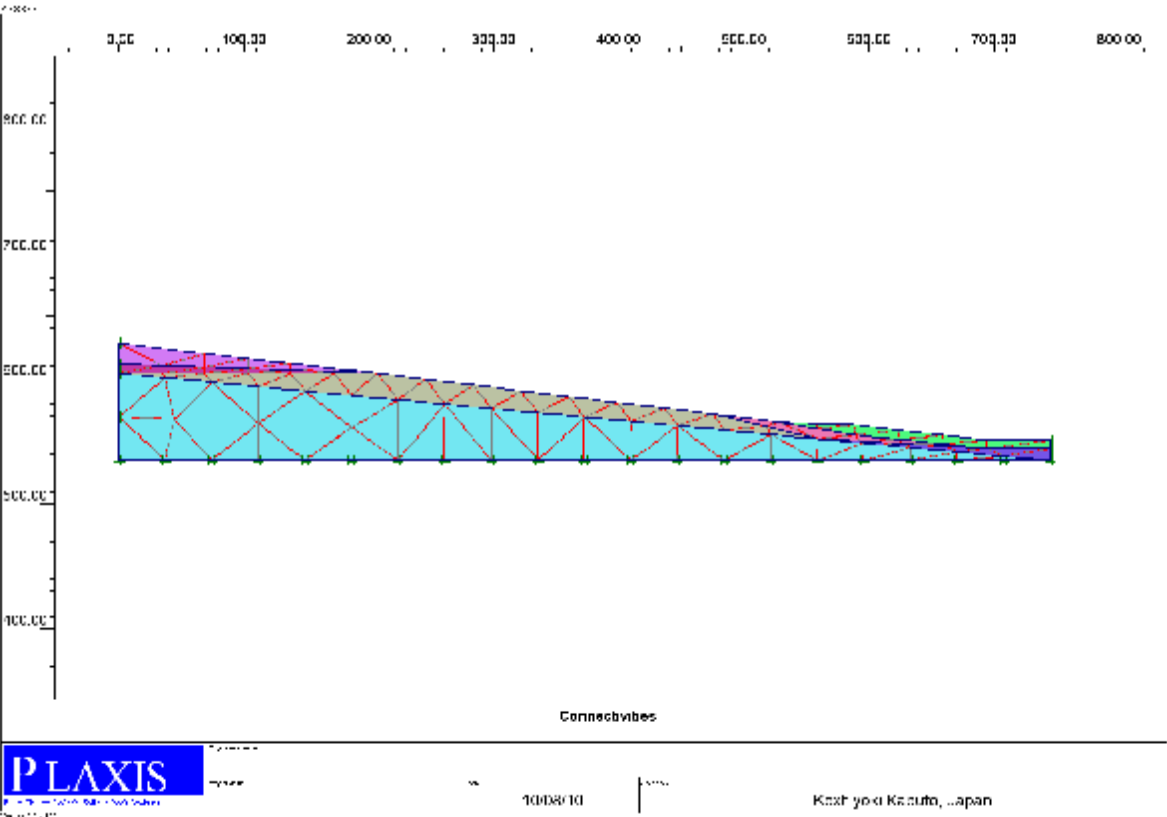
**g7.1:** La géométrie du modèle Plaxis

#### 7.5.4. Génération du Maillage

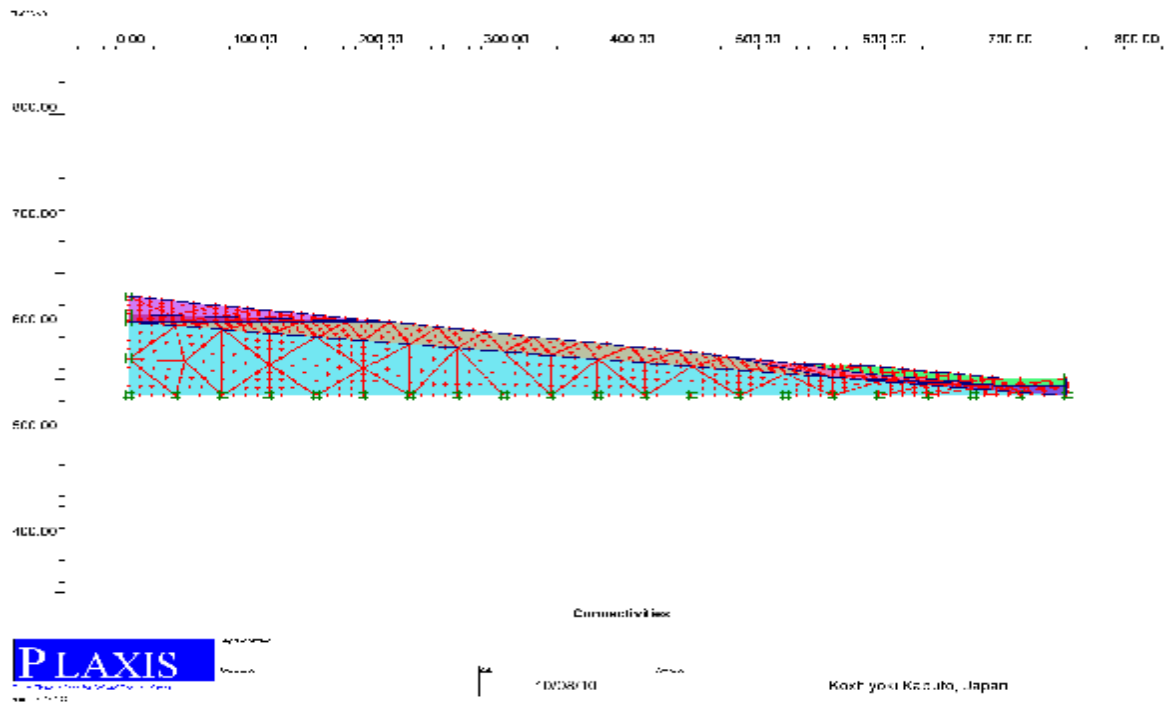
Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis.

L'élément fondamental, utilisé dans notre modèle est l'élément triangulaire à 6 nœuds, il fournit l'interpolation est d'ordre deux et l'intégration numérique se fait sur trois points de Gauss. Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standards en déformations, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments.

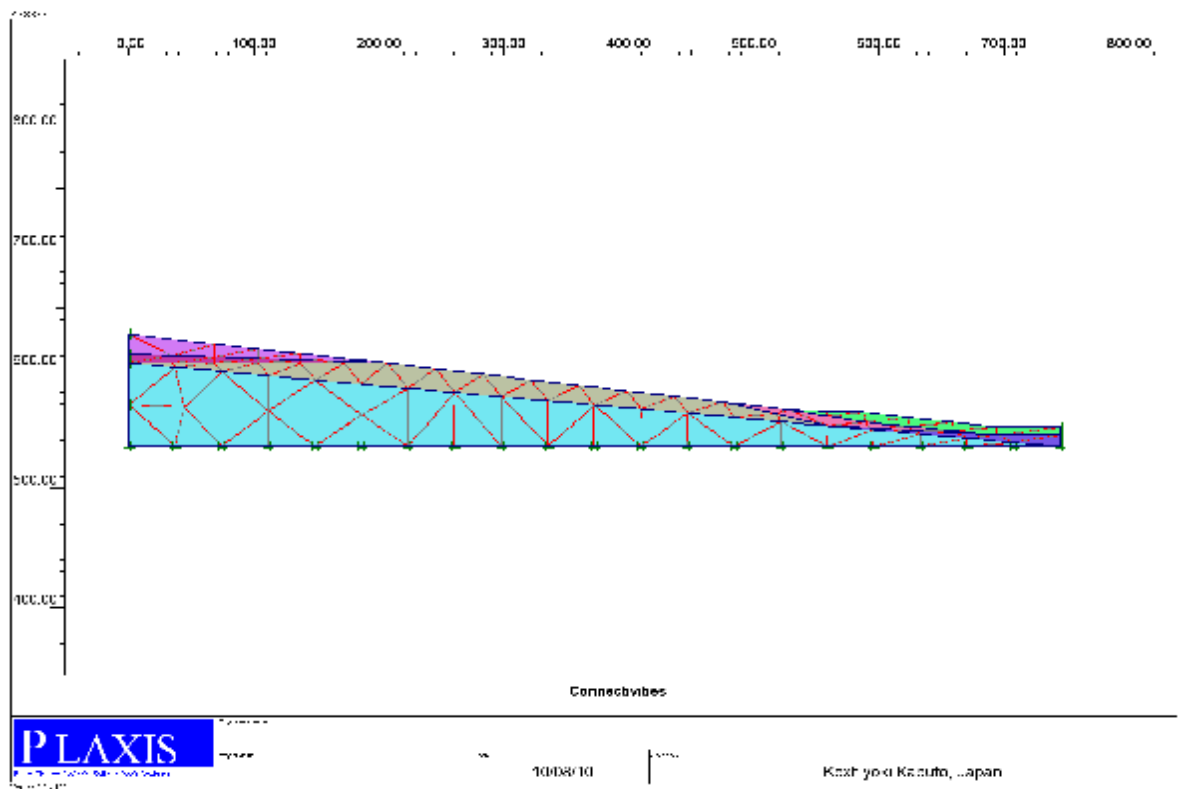
Le maillage utilisé pour les calculs est présenté sur la figure 7.2, il est constitué par 299 nœuds et de 126 éléments, avec 378 points de Gauss, il est réalisé en élément fini à 6 nœuds, chargé par le poids propre de sol (pression interstitielle comprise).



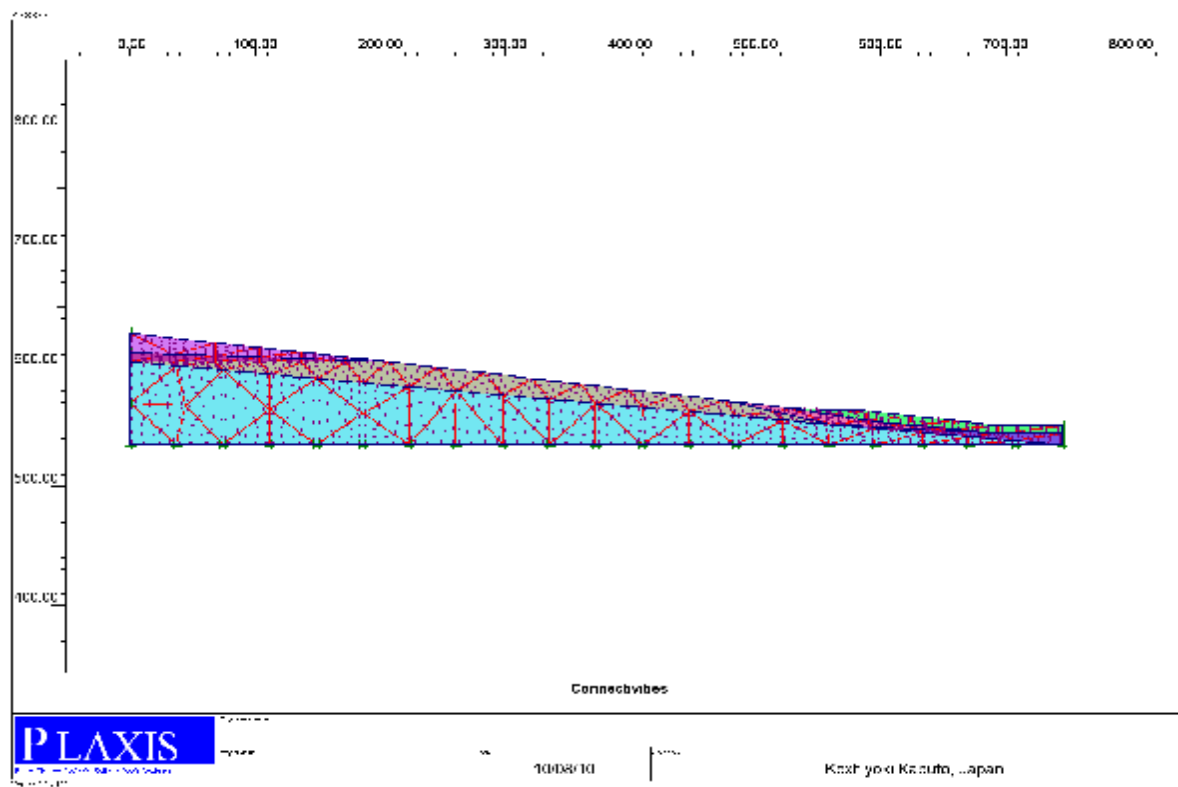
**Fig7.2:** Génération du maillage du modèle Plaxis



**Fig7.3:** Nœuds du modèle Plaxis



**Fig7.4:** Eléments du modèle Plaxis



**Fig7.5:** Points de Gauss du modèle Plaxis

### 7.5.5. Contraintes initiales

Une fois que le maillage a été généré, la deuxième étape de création de notre modèle numérique consiste à instaurer, au sein du massif de sol, un champ de contraintes initiales correspondant à un état d'équilibre stable. Le problème, dans un modèle comportant une topographie irrégulière ou simplement non horizontale, est de pouvoir générer et maintenir un champ de contraintes, de telle sorte qu'il soit en équilibre avec les forces de gravité et les conditions aux limites du modèle.

Dans le cas simple du chargement litho statique, pour un milieu hétérogène limite par une surface topographique horizontale, la contrainte verticale  $\sigma_v$  est due au poids des sols supérieures, tandis que la contrainte horizontale  $\sigma_h$  est égale à une fraction ou une fonction affine de  $\sigma_v$ . L'application d'un gradient de contraintes obéissant à ces deux critères suffit à obtenir un état d'équilibré stable dans tout le modèle.

En revanche, lorsque la topographie est irrégulière, la détermination d'un état de contraintes aboutissant à un équilibrage des forces dans le modèle est une tâche très complexe. La solution consiste à laisser le code de calcul de manière autonome la répartition des contraintes dans le modèle, éventuellement à partir d'un champ de contraintes initiales imposé par l'utilisateur. Cette phase de calcul est dénommée consolidation du massif.

La figure présente les courbes d'iso valeurs de contraintes effectives moyennes obtenues après consolidation du massif pour les conditions aux limites

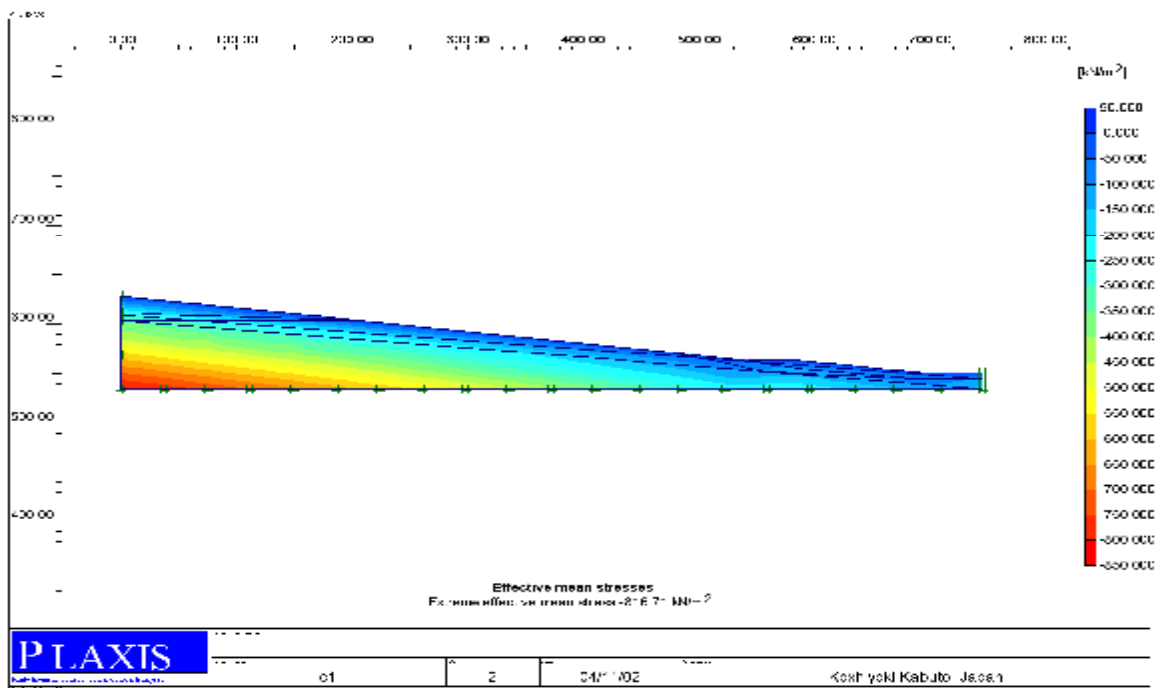
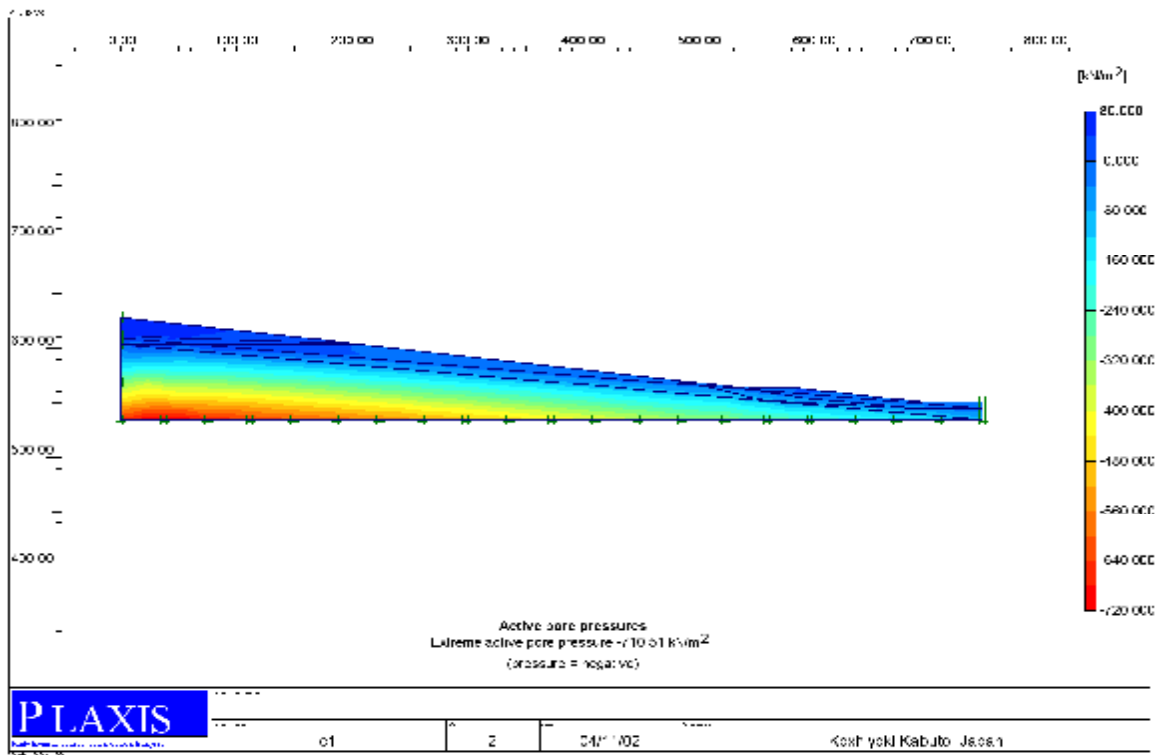


Fig7.6: Contraintes effectives moyennes du modelé Plaxis

### 7.5.6. Ajout d'une surface piézométrique

Une étape importante est la prise en compte de l'eau dans les modèles numériques. L'eau est présente dans le massif à travers les pores du sol. La prise en compte du facteur hydrogéologique passe notamment par l'utilisation de contraintes effectives qui considèrent la présence d'une pression interstitielle, calculée à partir de niveaux piézométriques prédéfinis.

La surface piézométrique délimitée par cette eau souterraine a donc été introduite dans les simulations, et son tracé a été réactualisé au fur et à mesure de l'avancée de calcul. La figure 7.7 présente le niveau de la nappe phréatique. Cette figure présente également les courbes d'isovaleurs de pressions interstitielles à l'intérieur du massif.



**Fig7.7:** Conditions aux limites hydrauliques du modelé Plaxis

## 7.5.7. Calculs

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués.

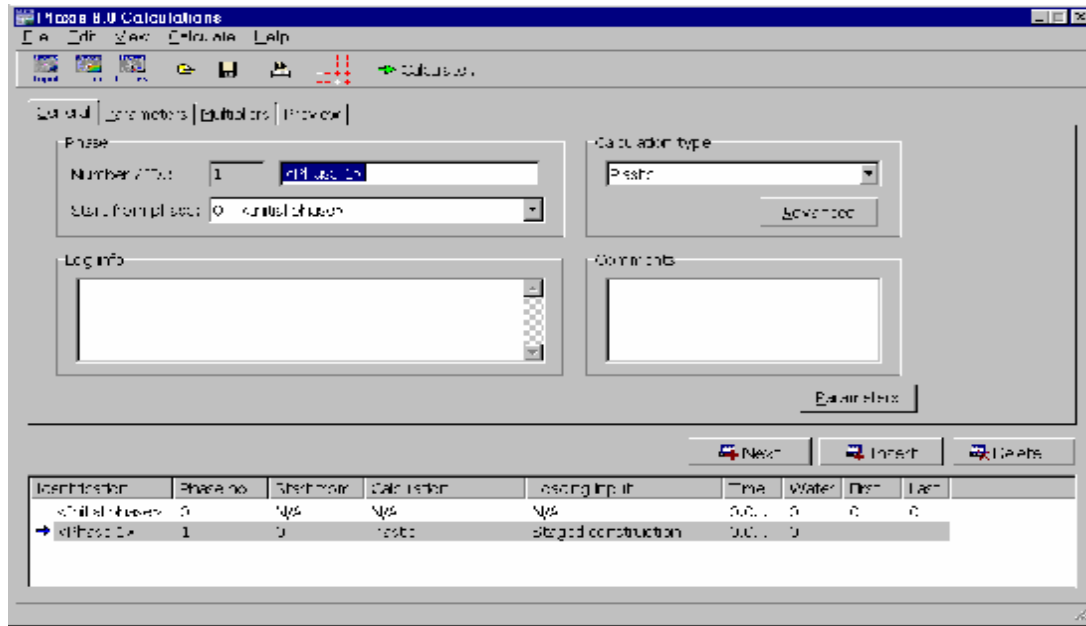


Fig7.8: Menu général de calcul

### 7.5.7.1. Général

On choisit un calcul plastique.

### 7.5.7.2. paramètres

On choisit la construction par étape (staged construction) qui va permettre de revenir sur les écrans de dessin en cliquant sur le bouton Define

### 7.5.7.3. Points de contrôle

Après la définition des phases de calcul, et avant de lancer le calcul, il est possible de sélectionner des points pour tracer des courbes effort-déplacement et des chemins de contraintes. Pendant les calculs, les résultats relatifs aux points sélectionnés sont stockés dans un fichier à part. Après le calcul, le programme de tracé des courbes (*Curves*) permet de générer des courbes effort-déplacement et des chemins de contraintes. La génération de ces courbes repose sur les informations placées dans le fichier spécifique.

Il n'est donc pas possible de générer des courbes pour des points qui n'ont pas été sélectionnés avant le calcul.

#### 7.5.7.4. Calcul

On peut alors lancer le calcul. Pendant celui-ci, une fenêtre d'information apparaît donnant l'évolution du calcul.

#### 7.5.8. Résultats

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points de contraintes.

Le maillage déformé de notre modèle est présenté sur la figure 7.9. Cette déformation est due seulement au poids propre de terrain.

La figure 7.11 indique la distribution des déplacements vectoriels avec une valeur maximale de  $875.91 \times 10^{-3}$  m, ces déplacements diminuent en fonction de profondeur jusqu'à une valeur nulle à la base du versant. Cette distribution de déplacements donne une idée sur la masse du sol en mouvement et celle stable. La figure 7.13 présente également les déplacements verticaux avec une valeur maximale de  $-691.23 \times 10^{-3}$  m, La figure 7.15 présente également les déplacements horizontaux avec une valeur maximale de  $875.84 \times 10^{-3}$  m.

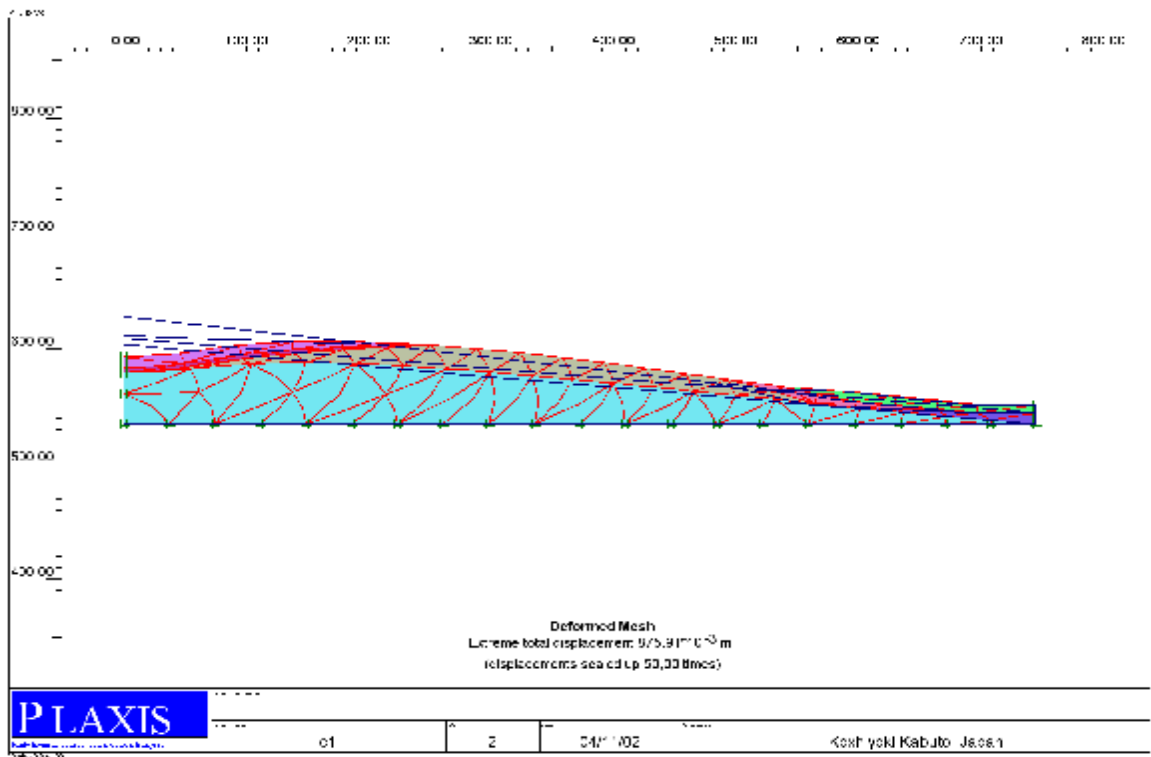


Fig7.9: Maillage déformée du modèle Plaxis



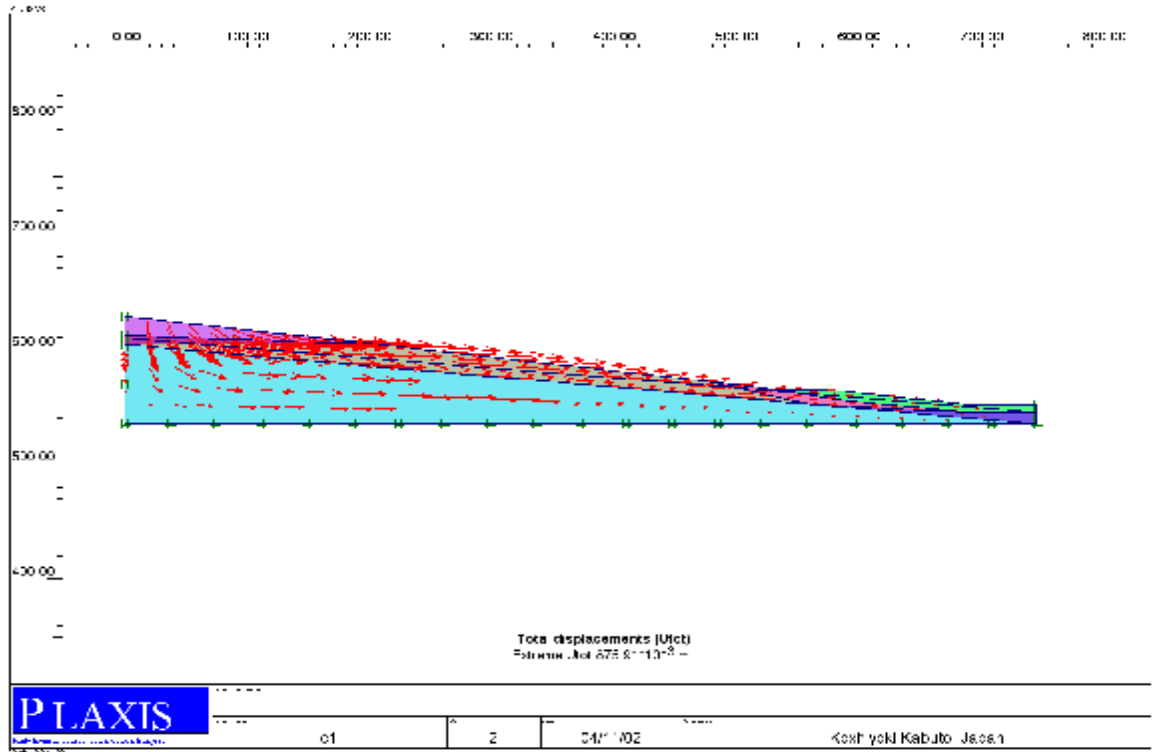


Fig7.10: Déplacements vectorielles du modèle Plaxis

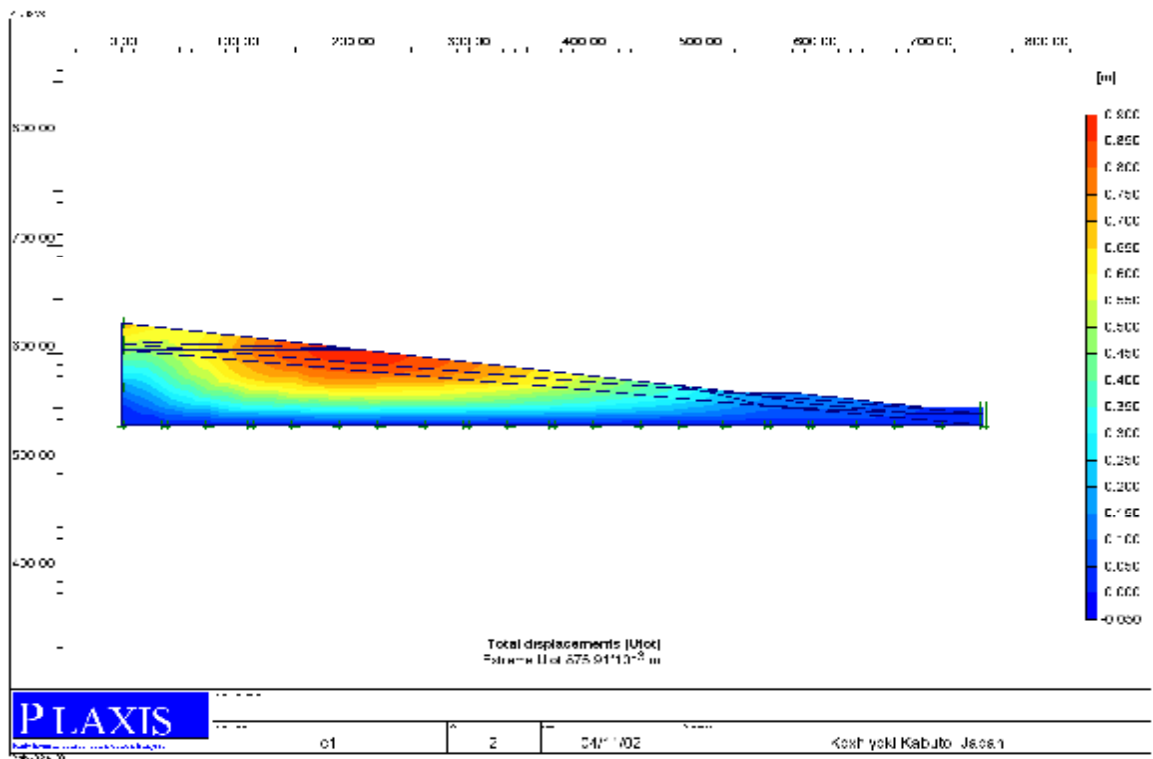
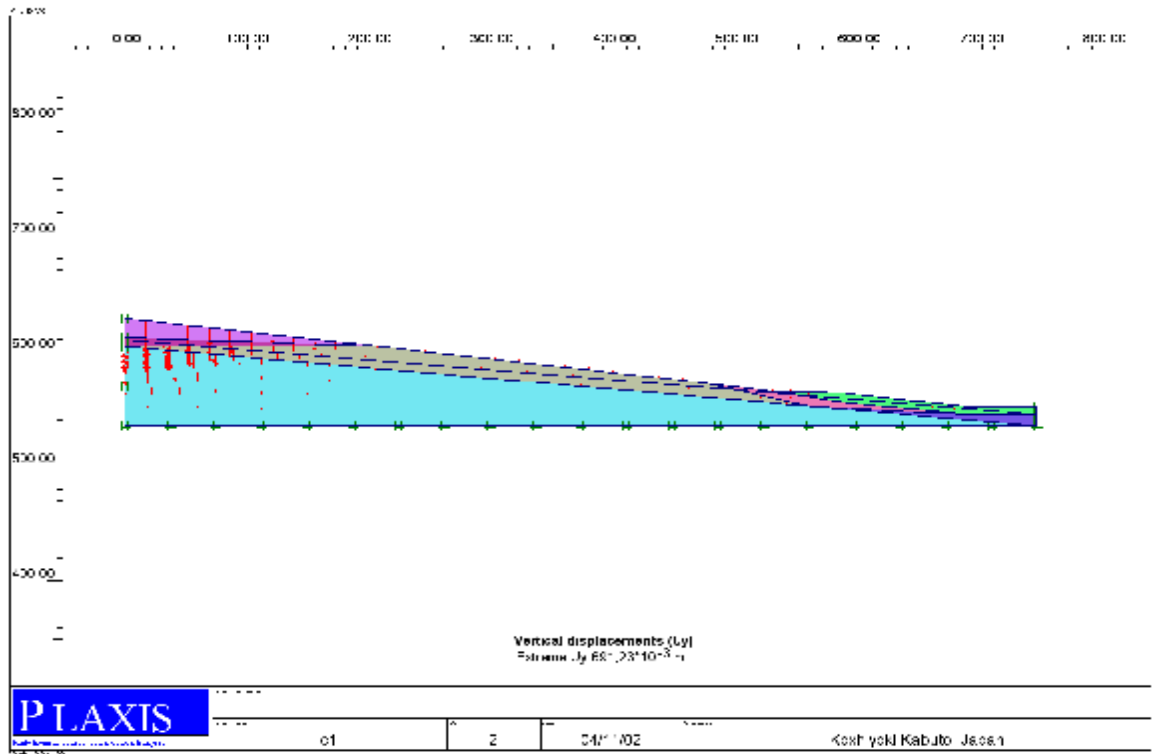
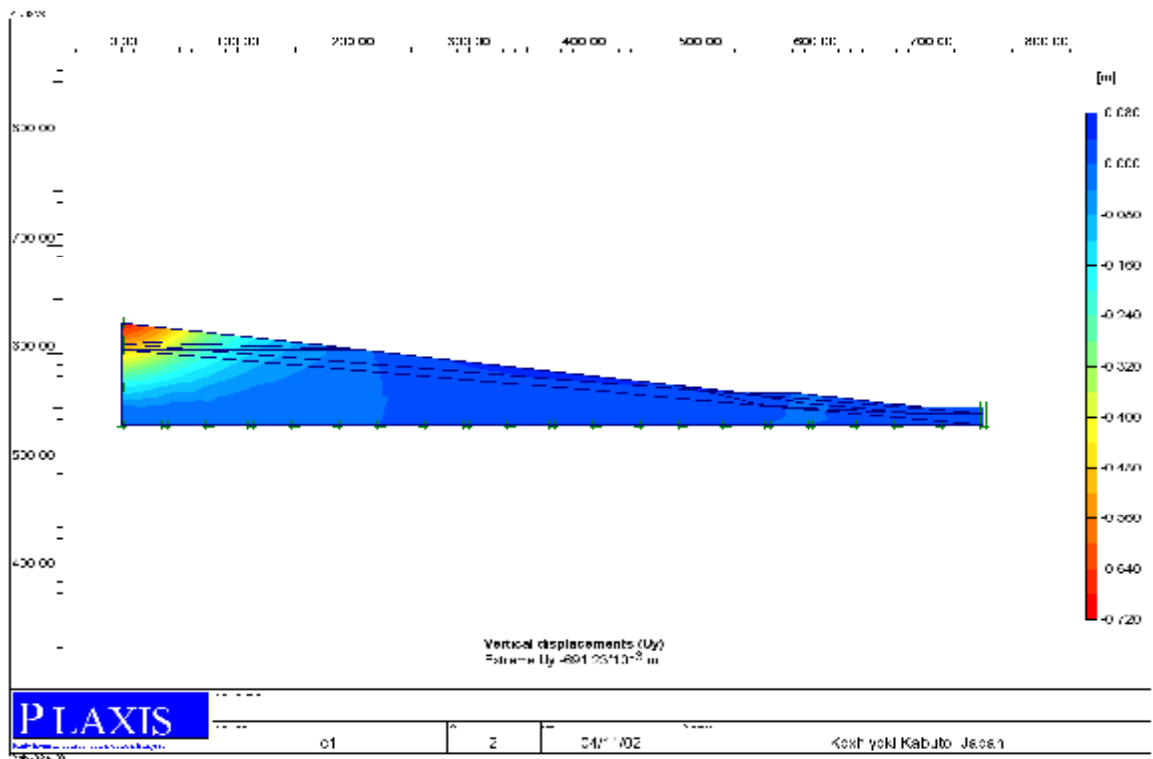


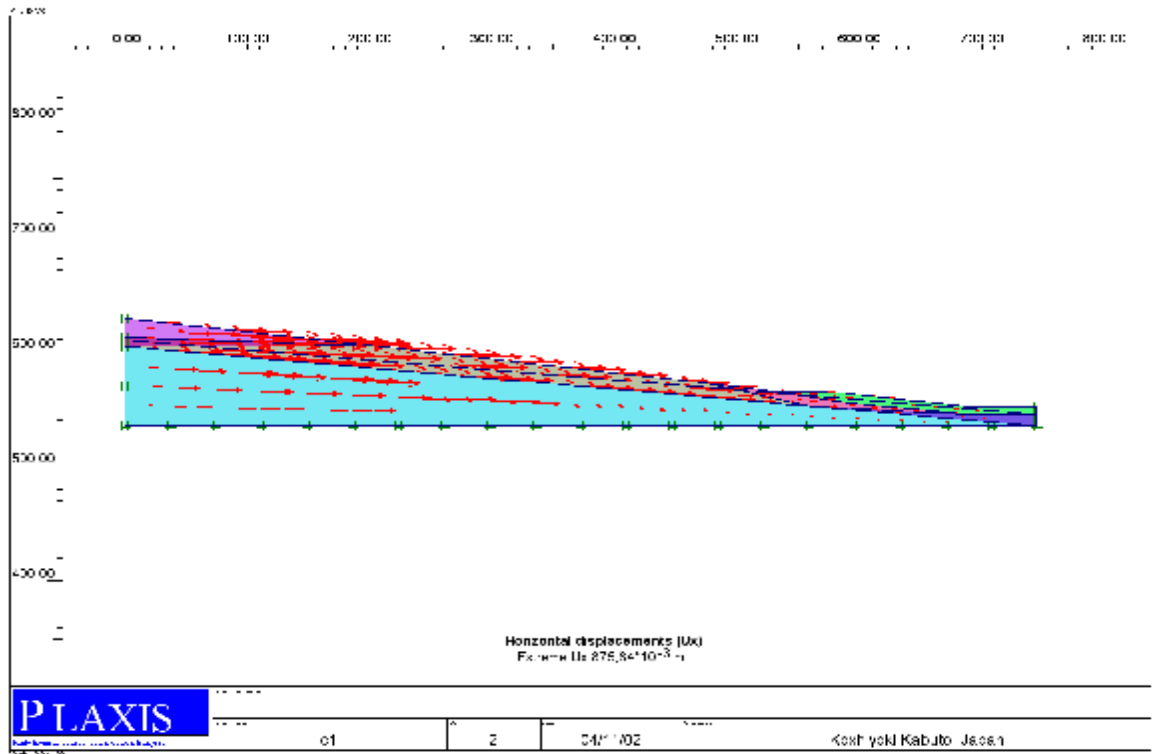
Fig7.11: Déplacements vectorielles du modèle Plaxis



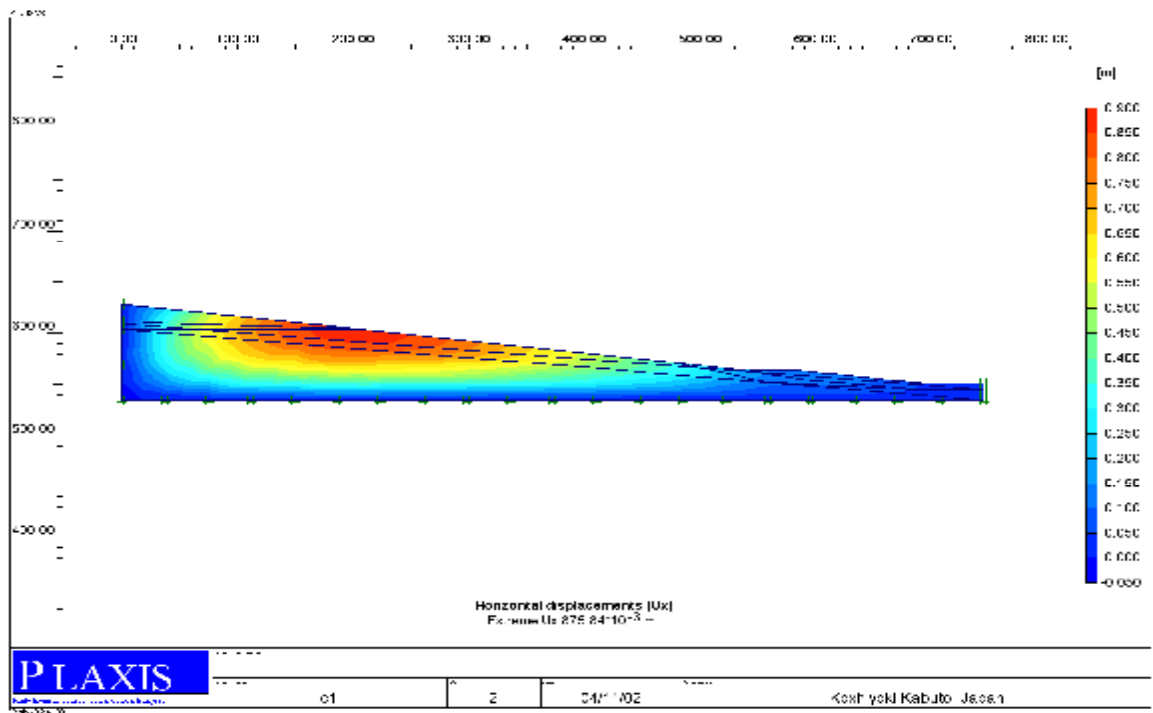
**Fig7.12:** Déplacements verticaux du modèle Plaxis



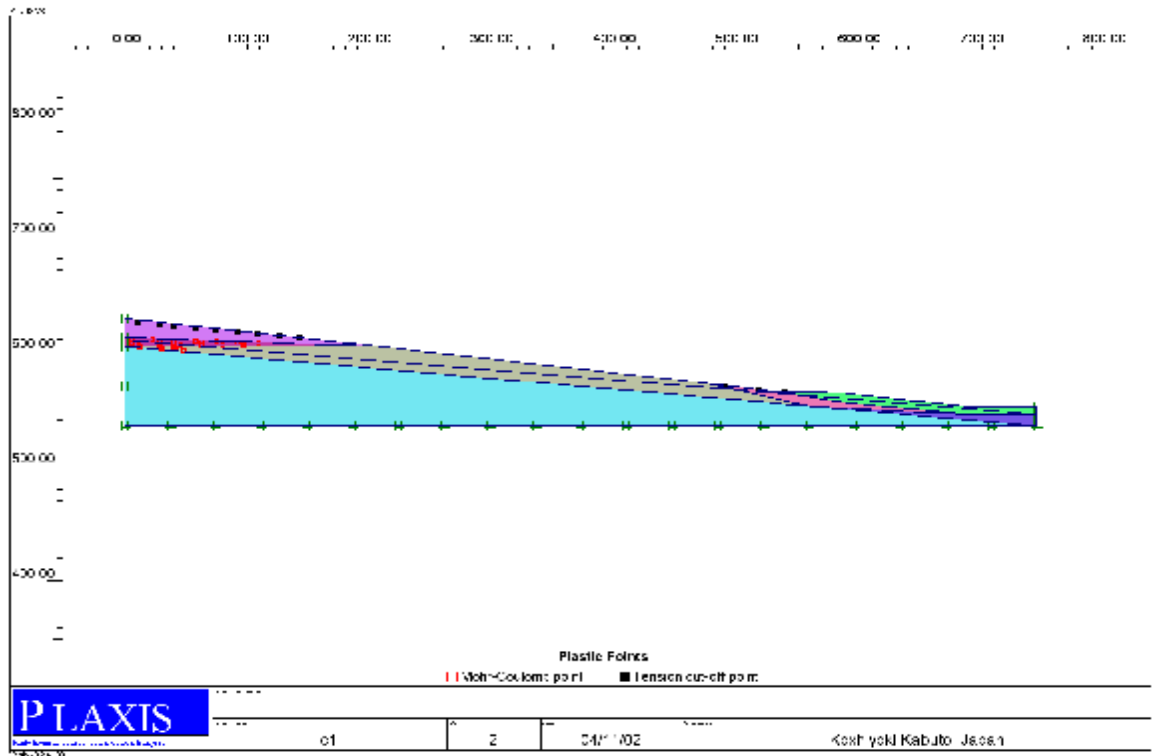
**Fig7.13:** Déplacements verticaux du modèle Plaxis



**Fig7.14:** Déplacements horizontaux du modèle Plaxis



**Fig7.15:** Déplacements horizontaux du modèle Plaxis



**Fig7.16:** Indicateurs de plasticités du modèle Plaxis

- **Modèle avec une construction**

Sur le même modèle précédent du versant l'Université Mentouri de Constantine nous modélisons un immeuble de 23 étage (RDC + 3sous sols+19etages), cet immeuble est 40m x10m.

Les façades principales dont verre, les murs pignons en béton armé ne comportent aucune ouverture.

Les étages sont utilisés à usage de bureaux, les sous sols à usage d'imprimerie, de magasin et d'atelier d'entretien technique. Il est desservi par une sortie principale et une sortie de service située au niveau de 3<sup>ème</sup> sous sol.

Les cloisonnements sont constitués de divers matériaux (bois, matière synthétique, aluminium), les plafonds sont en aggloméré de liège.

Les moyens de lutte et de secours sont constitués par des postes d'incendie (R-I-A).et extincteurs au niveaux de chaque étage et sous sol.

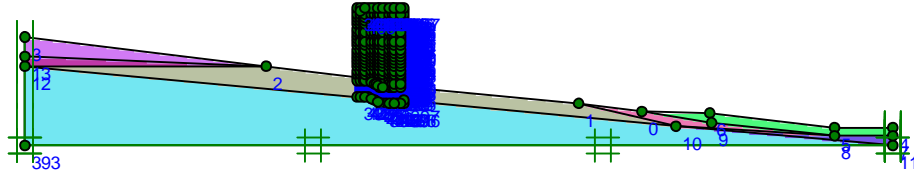
Sa structure porteuse est constituée par des voiles en béton armé .Le comportement mécanique des matériaux de cette construction suit le critère élastoplastique avec les propriétés mentionnées dans le tableau7.2.

Les voiles sont modélisés dans le code Plaxis 2D par un ensemble de plaques dans la direction perpendiculaire au plan à l'aide de la méthode des éléments finis en 2D, on peut modéliser ces plaques par des éléments poutre à trois degrés de liberté par nœuds ,deux degrés de liberté en translations( $u_x$  et  $u_y$ ) et un degré de liberté en rotation ( rotation dans le plans x-y , $\phi_z$ ).Si les éléments de sol sont des triangulaires à 6 nœud , alors chaque élément de poutre est défini par 03 nœuds, alors que des éléments poutre à 5 nœuds sont combinés avec les éléments triangulaires de sol à 15 nœuds. Dans le logiciel Plaxis 2D les éléments de poutre sont basés sur la théorie des poutres de Mindlin. Cette théorie prend en compte les déformations de la poutre par effort tranchant en plus de celles dues à la flexion. Les éléments de poutre peuvent en outre plastifier si le moment de flexion maximal ou l'effort normal maximum, atteint un seuil défini au préalable (seuil de plasticité).

Ces éléments sont définis par leur rigidité de flexion EI, leur raideur normale EA et leur moment fléchissant ultime. Les paramètres mécaniques des éléments du bâtiment de notre modèle sont résumés dans le tableau7.2 ci-dessous :

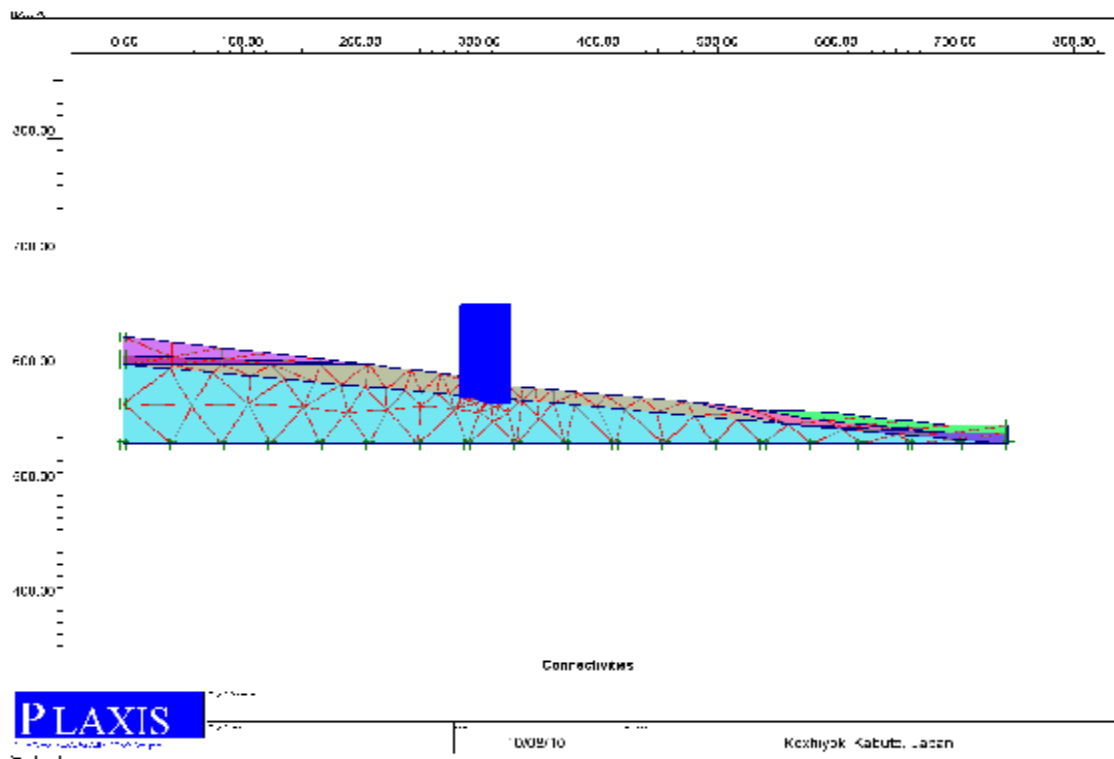
Elasto-plastique	Elément poutre	Maçonnerie
EA (KN/m)	5E6	-
EI (KNm <sup>2</sup> /m)	9000	-
N	0.25	-
MP (KNm/m)	1E15	-
NP (KN/m)	1E15	-
$\Gamma$ (KN/m <sup>2</sup> )	-	25
E (KN/m <sup>2</sup> )	-	3.2E7
N	-	0.25
G (KN/m <sup>2</sup> )	-	1.391E7

**Tableau7.2** : Paramètres mécaniques de la construction de modèle Plaxis



**Fig7.17**:Géométrie du modèle Plaxis

Le maillage utilisé pour les calculs est présente sur la figure7.18, il est constitue par 2033 noeuds et de 964 éléments, avec 2892 points de Gauss,



**Fig7.18**: Génération du maillage du modèle Plaxis

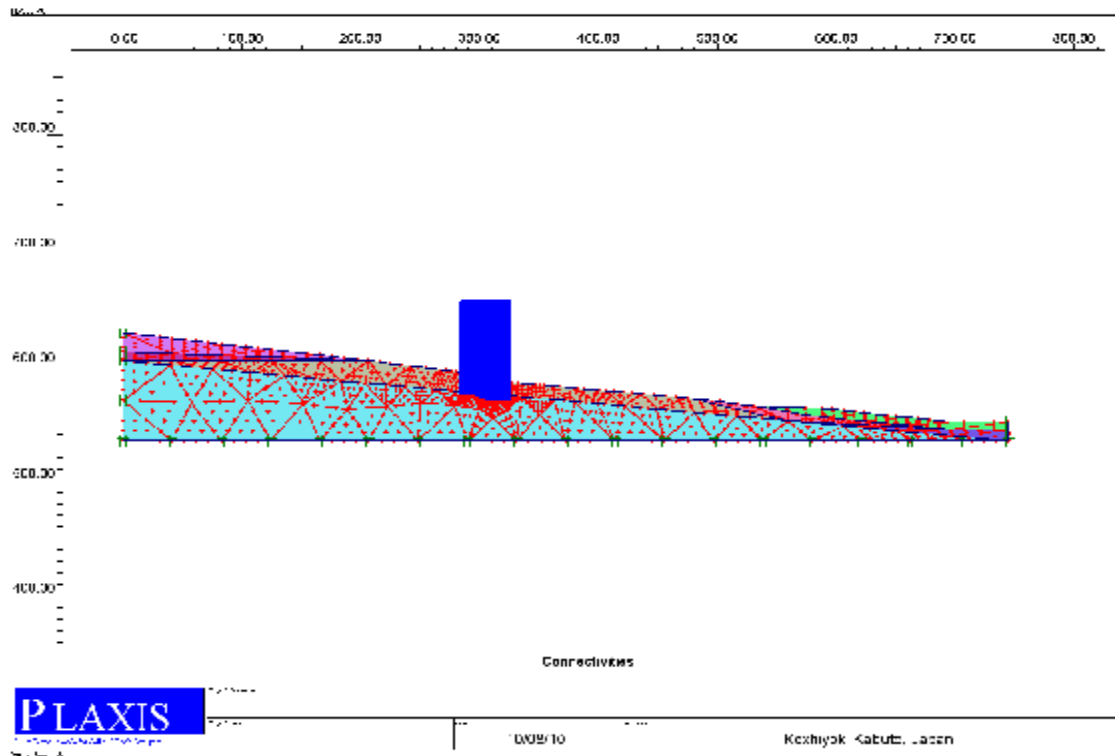
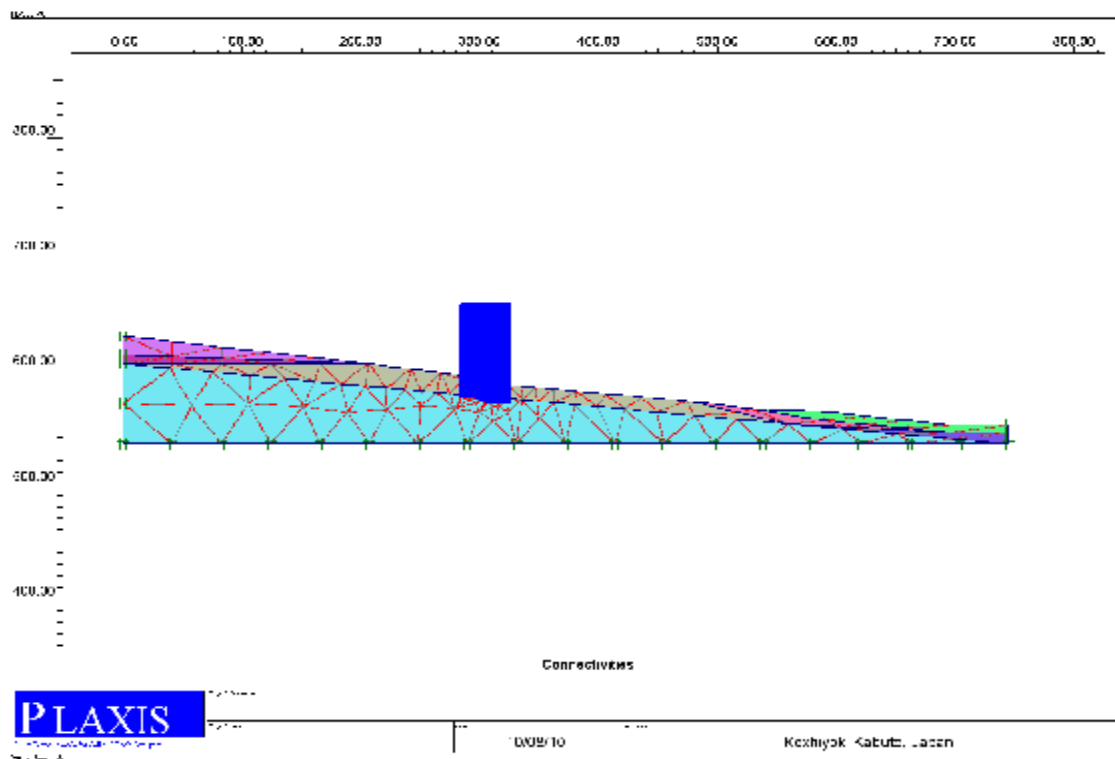
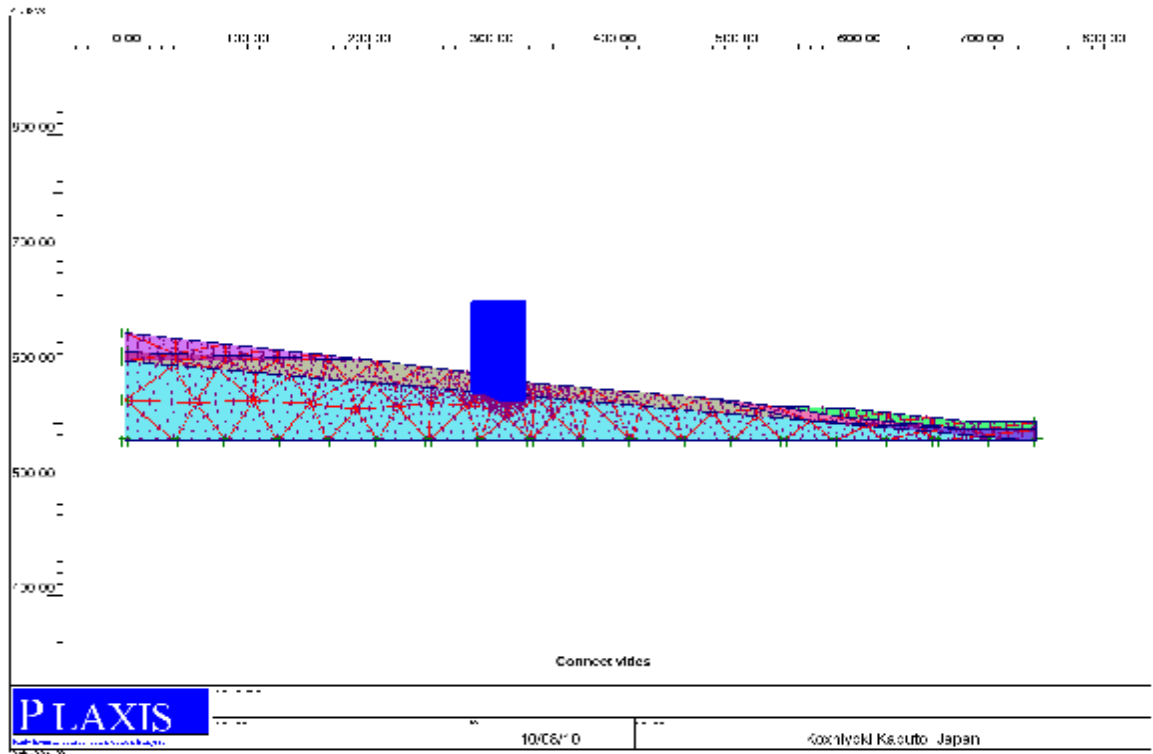


Fig7.19: Nœuds du modèle Plaxis



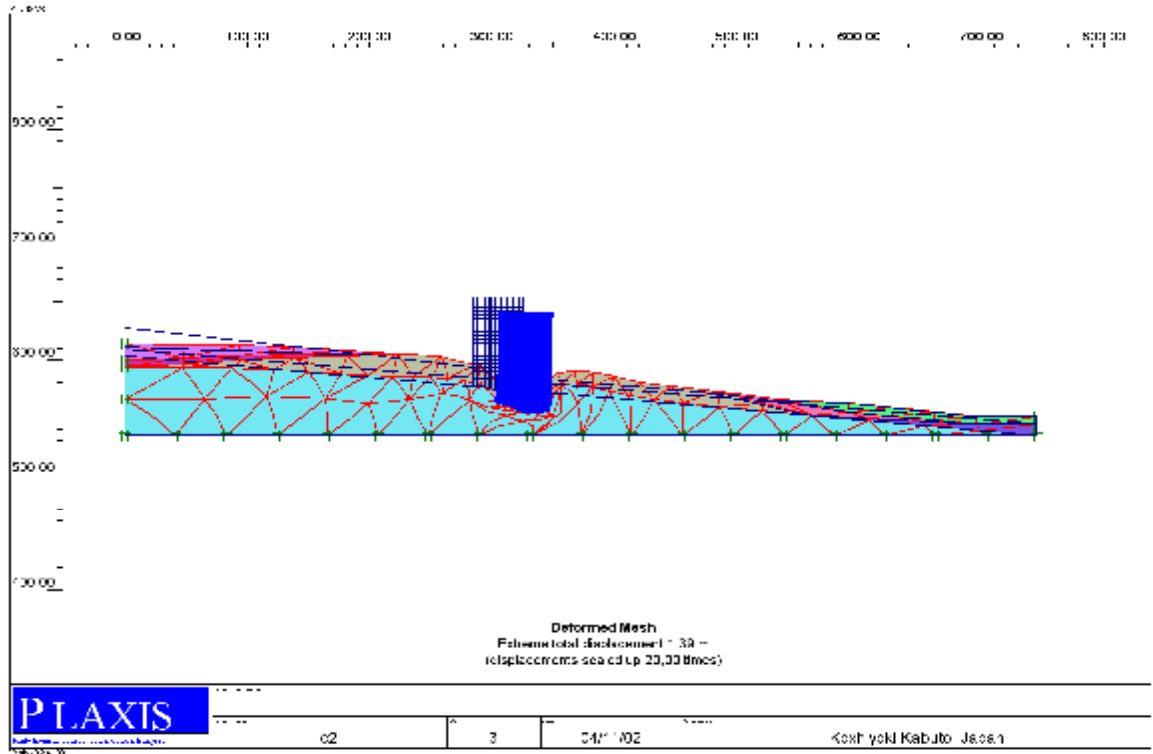
**Fig7.20:** Eléments du modèle Plaxis



**Fig7.21:** Points de Gauss du modèle Plaxis

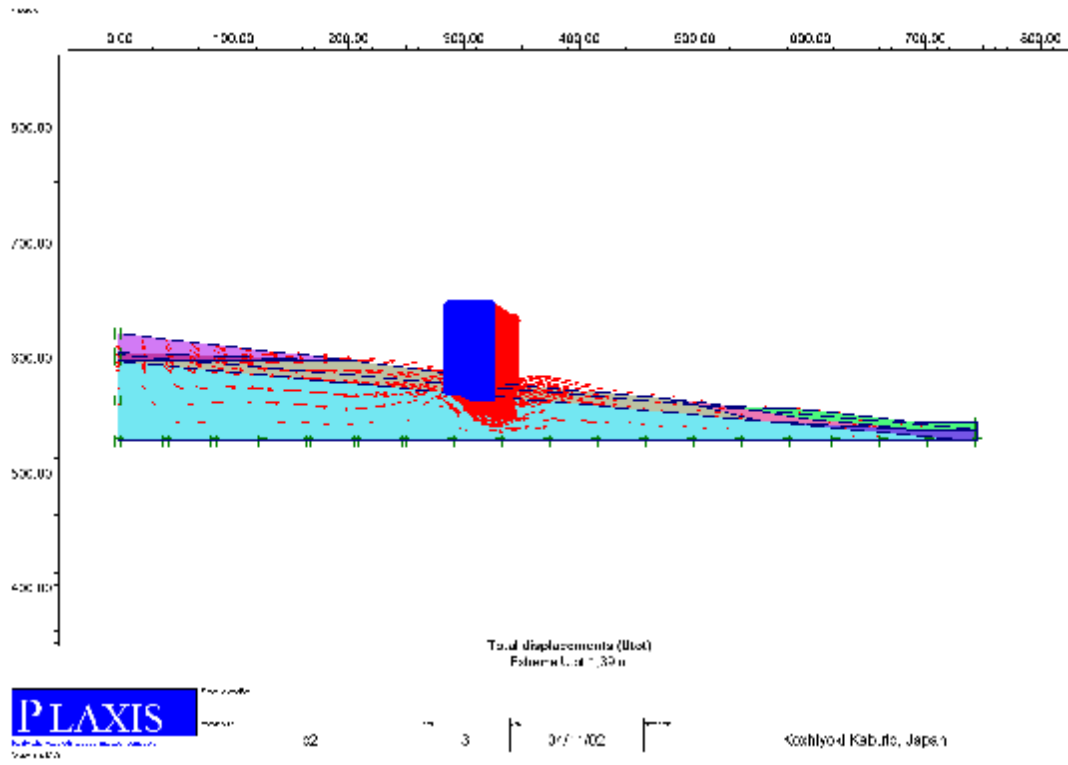
Après stabilisation du calcul, on observe d'autre part, le basculement vers l'avant de la construction.



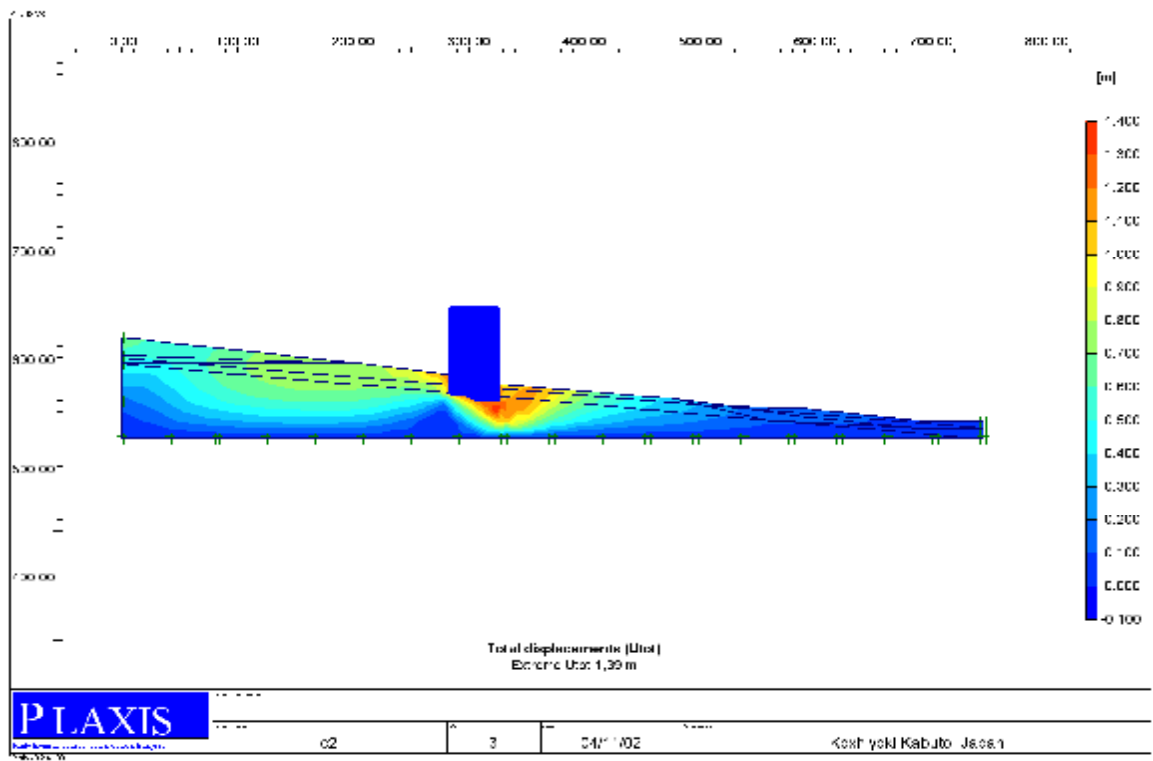


**Fig7.22:** Maillage déformée du modèle Plaxis

La figure7.23 indique la distribution des déplacements vectoriels avec une valeur maximale de 1.39 m, ces déplacements diminuent en fonction de profondeur jusqu'à une valeur nulle a la base du versant. Cette distribution de déplacements donne une idée sur la masse du sol en mouvement et celle stable. La figure7.25 présente également les déplacements verticaux avec une avec une valeur maximale de  $778.35 \times 10^{-3} \text{m}$ , La figure7.27 présente également les déplacements horizontaux avec une avec une valeur maximale de 1.30m.



**Fig7.23:** Déplacements vectorielles du modèle Plaxis



**Fig7.24:** Déplacements vectorielles du modèle Plaxis

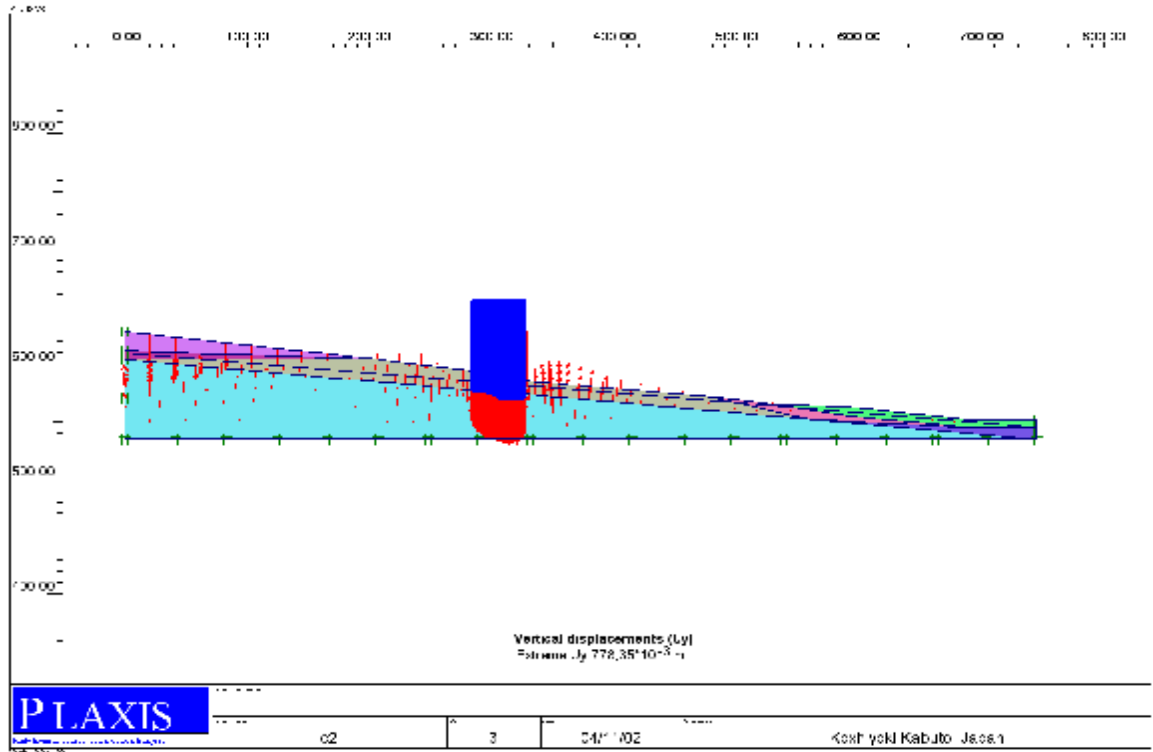


Fig7.25: Déplacements verticaux du modèle Plaxis

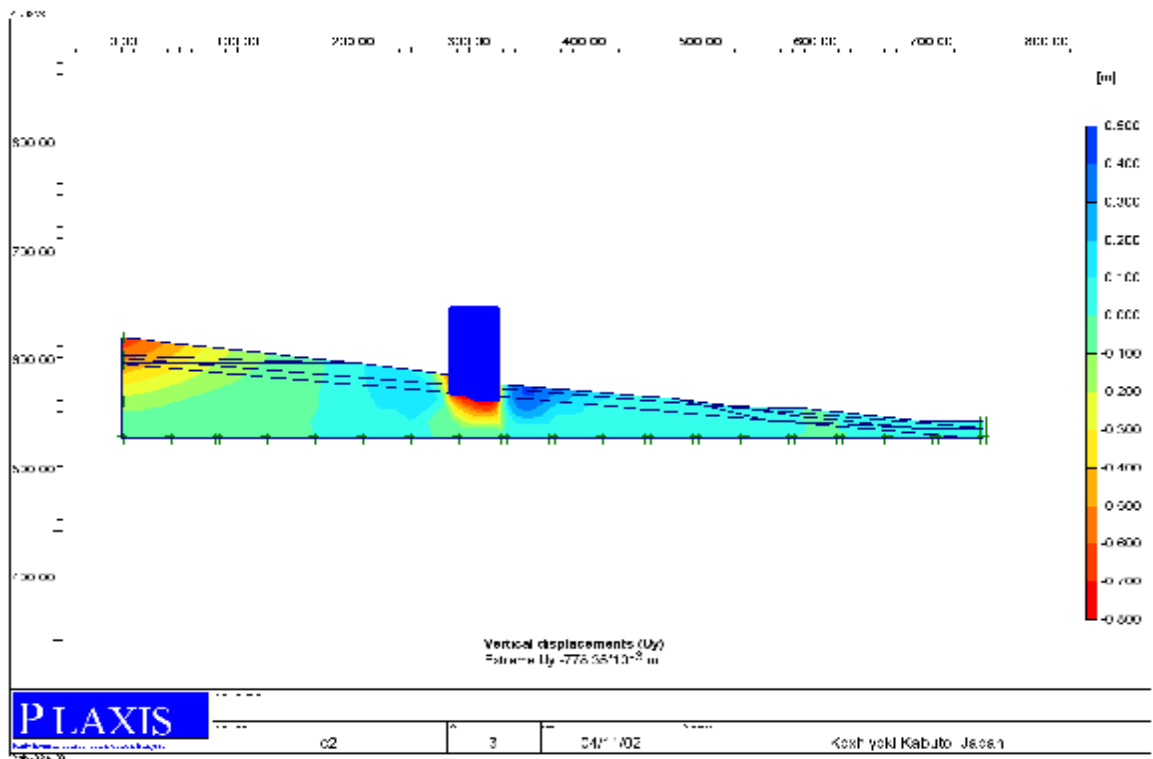


Fig7.26: Déplacements verticaux du modèle Plaxis

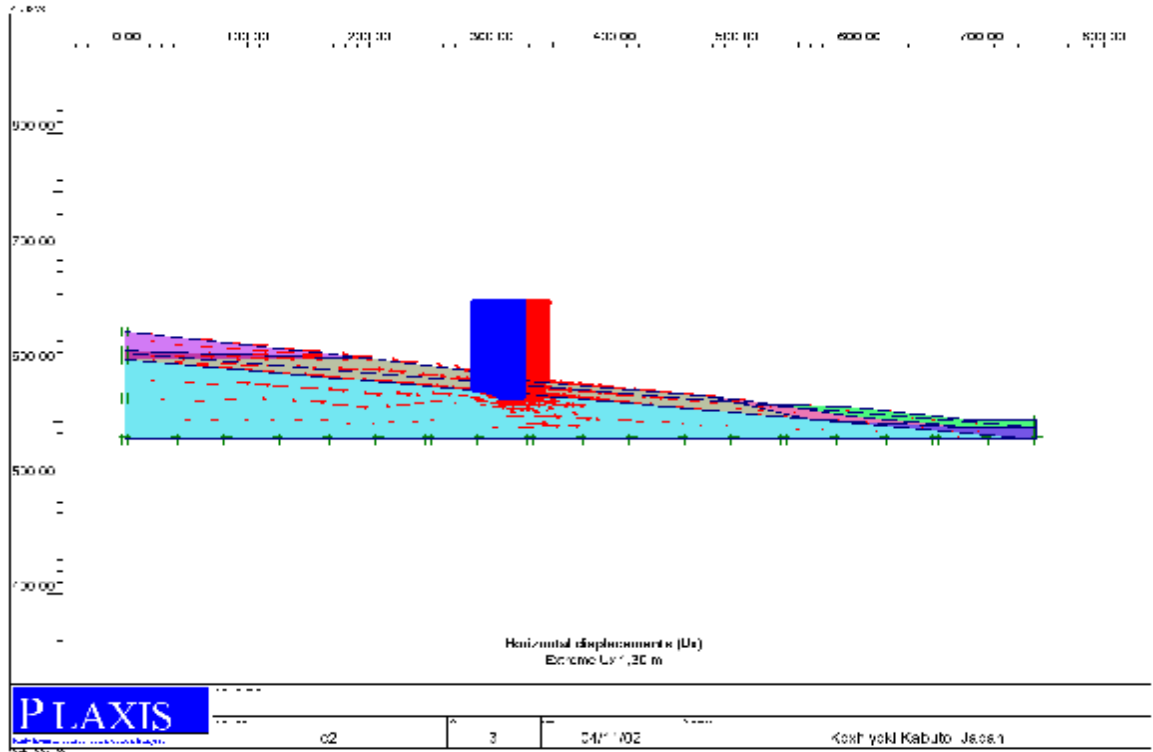


Fig7.27: Déplacements horizontaux du modèle Plaxis

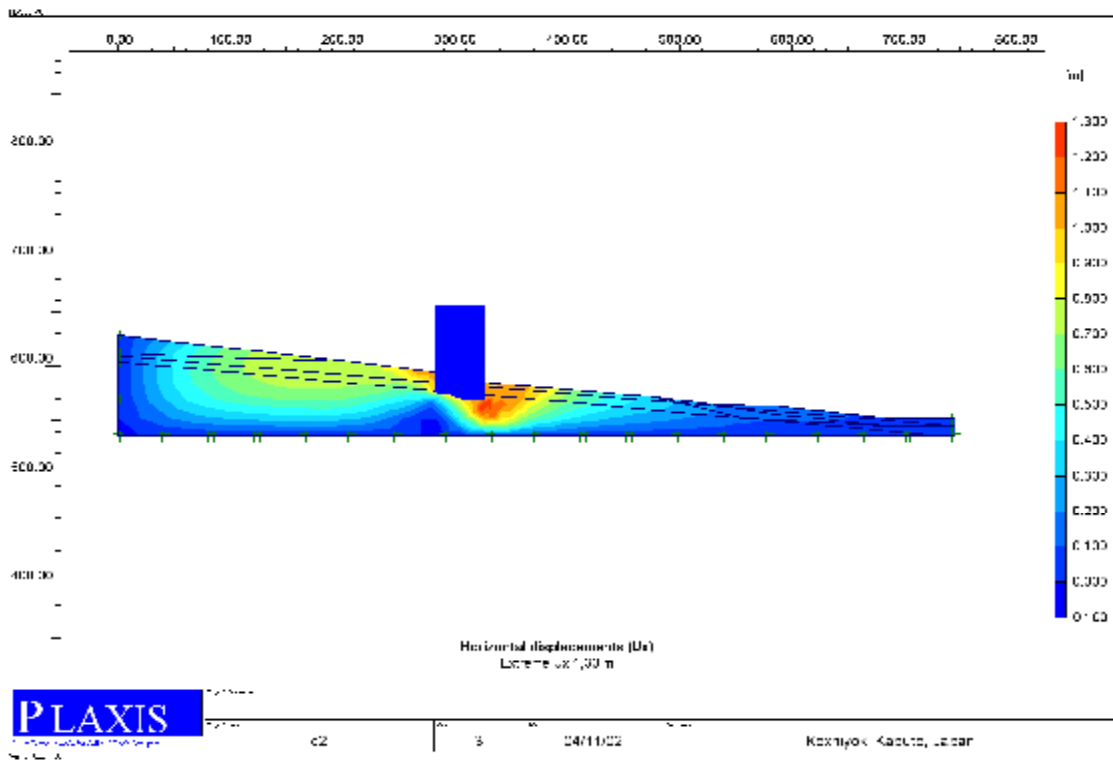


Fig7.28: Déplacements horizontaux du modèle Plaxis

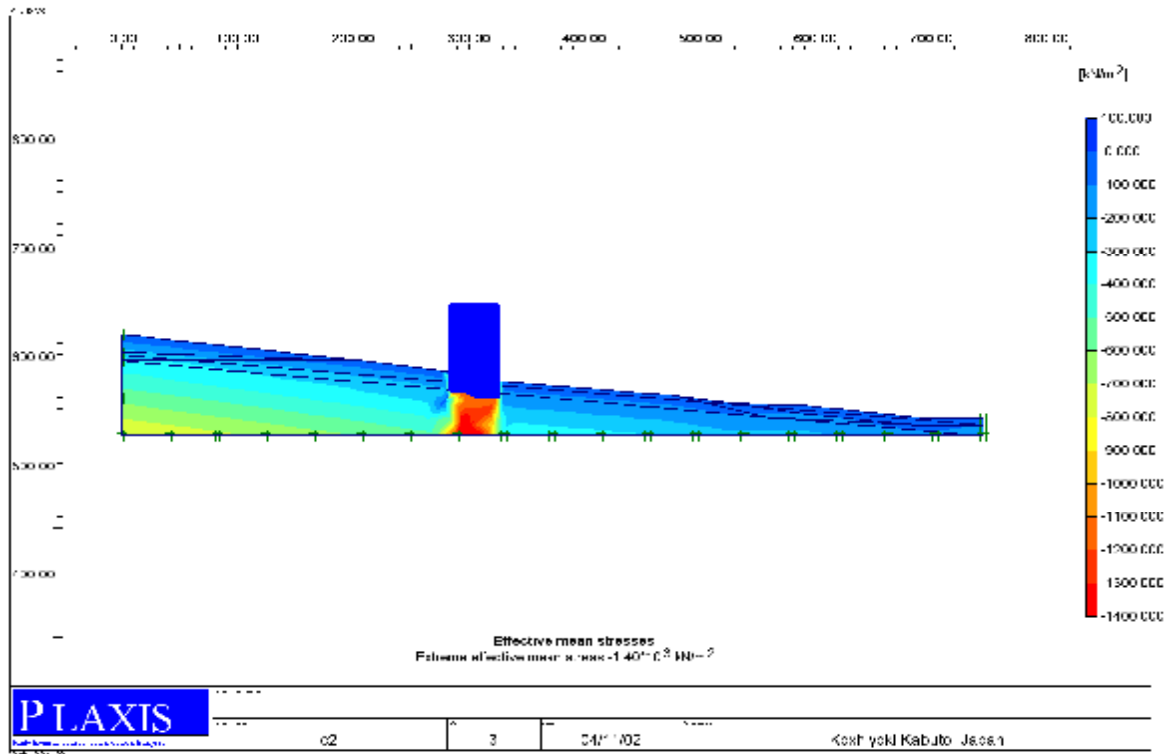


Fig7.29: Contraintes effectives moyennes du modelé Plaxis

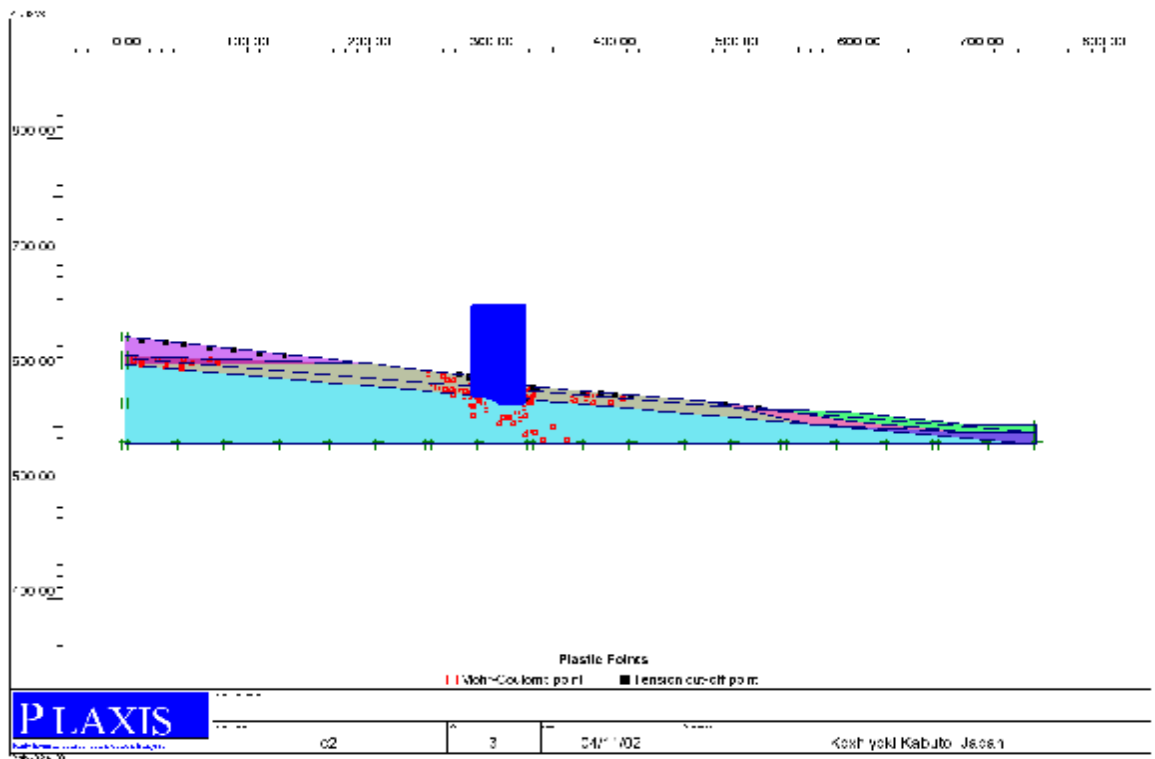


Fig7.30: Indicateurs de plasticités du modèle Plaxis

## **7.6. Conclusion**

L'étude de la déformation à l'aide du modèle Plaxis 2D (modèle en éléments finis), a permis de mettre en évidence que le versant l'Université Mentouri de Constantine est instable sous son chargement gravitaire (déplacements importants). Cette instabilité est produite aussi dans le cas où le versant est chargé par une construction. Ce qui provoque des dégâts importants de la structure de bâtiment.

La précision des résultats de ce modèle dépend de plusieurs paramètres, afin que les calculs soient en accord avec les caractéristiques géologiques, mécaniques et hydrauliques de la masse de sol réel ainsi qu'avec les efforts mécaniques réels à l'intérieur du massif.

Une analyse paramétrique approfondie de certaines de ces grandeurs est parfois une méthode incontournable pour déterminer leur impact sur les résultats de calcul final.

Parmi ces paramètres, propres au concept de la modélisation et pourtant étroitement liés au sujet d'étude (cas réel), on mit en avant la taille de modèle global, la dimension des éléments finis, le modèle de comportement et la nature des conditions aux limites

# Chapitre 8

## Étude paramétrique

## **8.1. Introduction**

Après l'établissement du modèle de référence et les résultats obtenus, l'étude paramétrique sera effectuée. Il sera question de montrer l'effet de différents paramètres sur les résultats. On utilise la même coupe du site de l'étude, avec les mêmes données et on change chaque fois le paramètre à comparer (les paramètres ont été modifiés un par un), et toujours dans des fourchettes raisonnables.

On a deux types de paramètres :

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

## **8.2. Effet des paramètres de calculs**

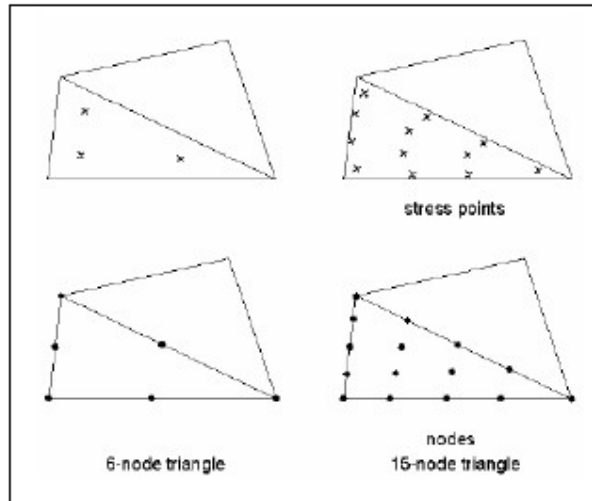
Parmi les paramètres de modélisation, on propose l'étude de l'effet des deux paramètres suivants :

- Le maillage.
- La précision des calculs (tolérance).

### **8.2.1. Maillage**

L'utilisateur de Plaxis doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut de Plaxis est le triangle à 6 nœuds. Il fournit des interpolations du second ordre pour les déplacements. La matrice de rigidité des éléments est évaluée par intégration numérique en utilisant au total trois points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 15 nœuds, l'interpolation est d'ordre quatre, et l'intégration nécessite douze points de contrainte. Le type d'éléments pour les éléments de structure est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi [26].



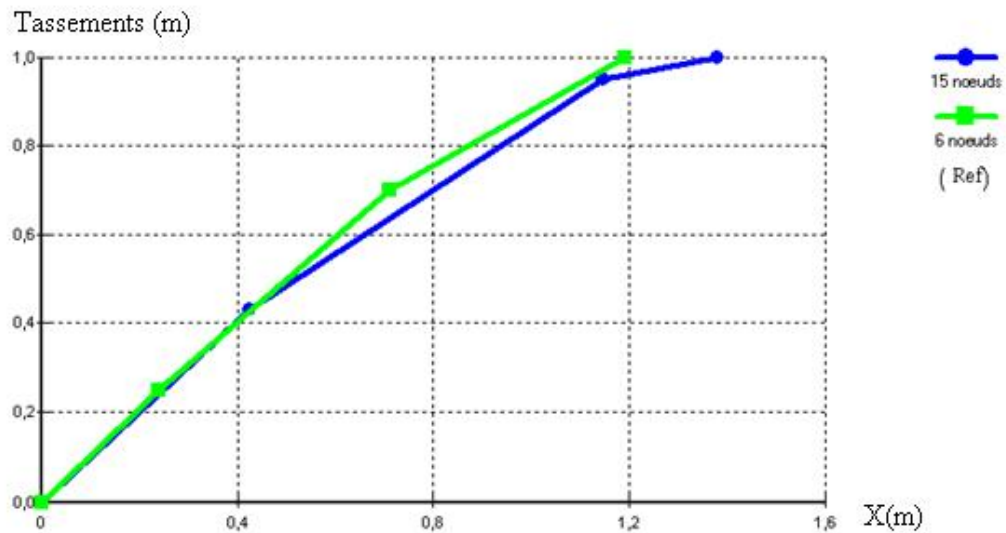


**Fig 8.1:**Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol

Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles. L'utilisation des triangles à 15 nœuds implique une consommation de mémoire assez élevée, et les calculs et la manipulation sont donc un peu ralentis. C'est pour cela qu'un type d'éléments plus simple est également disponible.

Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standard en déformation, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments. Cependant, il faut être prudent dans le cas de modèles axisymétriques ou dans des situations où une rupture (possible) est à prendre en compte, comme un calcul de capacité portante ou le calcul de coefficient de sécurité selon la méthode de phi-c réduction. Les charges à la rupture et les coefficients de sécurité sont généralement surévalués avec des éléments à 6 nœuds. Pour ces calculs, il convient d'utiliser plutôt des éléments à 15 nœuds.

On change le maillage des éléments de 6 nœuds à 15 nœuds et on compare les résultats obtenus aux résultats du modèle de référence. Les résultats obtenus sont :



**Fig8.2:** Influence de maillage sur les tassements

Pour les éléments de 15 nœuds les résultats obtenus dans le tableau 8.1 sont :

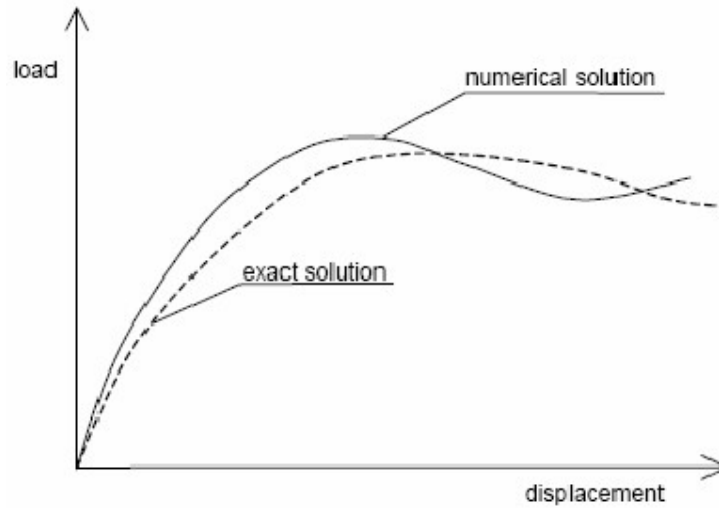
Nœuds	7921
Éléments	964
Points de Gauss	11568
Maillage déformée	1.56 m
Déplacements vectorielles	1.56 m
Déplacements verticaux	$-973.94 \times 10^{-3} \text{m}$
Déplacements horizontaux	1.45 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.44 \times 10^3 \text{KN/m}^2$

**Tableau8.1:** Pour les éléments de 15noeuds

### 8.2.2. Précision des calculs

Dans toutes les analyses non linéaires où un nombre défini de pas de calcul est utilisé, un décalage avec la solution exacte apparaît. Un algorithme de résolution doit s'assurer que les erreurs d'équilibre restent localement et globalement dans des limites acceptables. Les seuils d'erreur adoptés par Plaxis sont liés directement à la valeur spécifiée de l'erreur tolérée (tolerated error) [26].

A l'intérieur de chaque pas, le programme de calcul continue les itérations jusqu'à ce que les erreurs calculées soient inférieures à la valeur spécifiée. Si l'erreur tolérée est réglée sur une valeur élevée, le calcul sera relativement rapide mais peut s'avérer inexact ; si elle est petite, le temps de calcul peut être très long. En général, le réglage standard de 0,03 est acceptable dans la plupart des calculs.



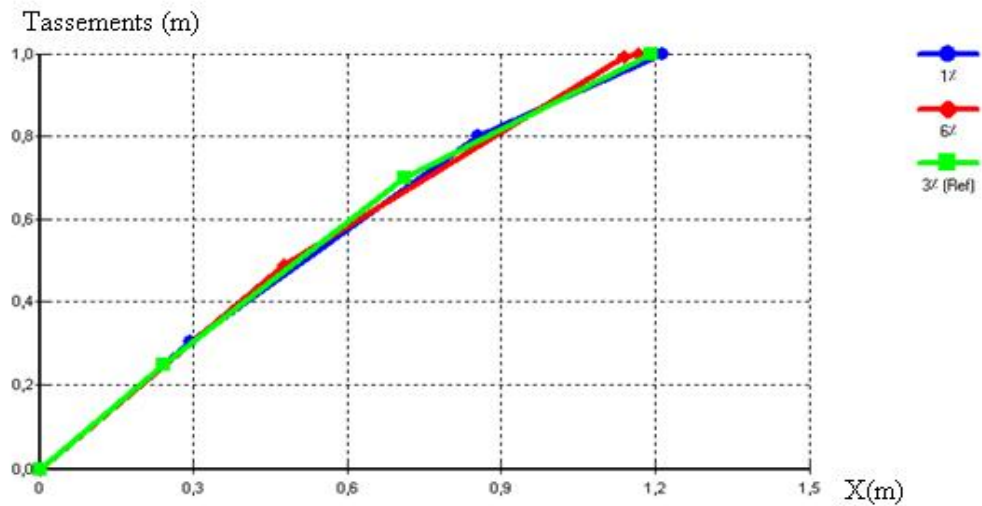
**Fig8.3:** Comparaison de la solution exacte avec la solution numérique

La précision des calculs est définie par la tolérance sur la convergence des calculs. Par défaut la tolérance est de 3 %, celle utilisée pour le calcul du modèle de référence.

Pour étudier l'effet de ce paramètre on fait le calcul pour :

- Tolérance de 1 %.
- Tolérance de 6 %.

Les résultats obtenus sont :



**Fig8.4:** Influence de la précision des calculs sur les tassements

Les résultats obtenus pour Tolérance de 1 % dans le tableau 8.2 sont :

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.48 m
Déplacements vectorielles	1.48 m
Déplacements verticaux	$-795.24 \times 10^{-3} \text{m}$
Déplacements horizontaux	1.33 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{KN/m}^2$

**Tableau8.2:** Pour tolérance de 1 %

Les résultats obtenus pour Tolérance de 6 % dans le tableau 8.3 sont :

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.36 m
Déplacements vectorielles	1.36 m
Déplacements verticaux	$-724.09 \times 10^{-3} \text{m}$
Déplacements horizontaux	1.26 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{KN/m}^2$

**Tableau8.3:** Pour tolérance de 6 %

### 8.3. Effet des paramètres géotechniques

Pour ce qui concerne les paramètres géotechniques on va étudier l'influence de quatre types de paramètres.

#### 8.3.1. Effet des paramètres du sol

Les paramètres du sol sont : la cohésion, l'angle de frottement, le module d'Young (module d'élasticité) et le module de Poisson.

##### 8.3.1.1. Cohésion "c"

Dans le modèle de référence la cohésion  $c = 40 \text{KN/m}^2$  pour la 1ère couche,  $c = 60 \text{KN/m}^2$  pour la 2ème couche et  $c = 70 \text{KN/m}^2$  pour la 3ème couche, et  $c = 33 \text{KN/m}^2$  pour la 4ème couche, et  $c = 71 \text{KN/m}^2$  pour la 5ème couche, et  $c = 10 \text{KN/m}^2$  pour la 6ème couche, et  $c = 71 \text{KN/m}^2$  pour la 7ème couche. Pour l'étude paramétriques les calculs ont été faits pour :

- $c + 5 \text{KN/m}^2$
- $c - 5 \text{KN/m}^2$

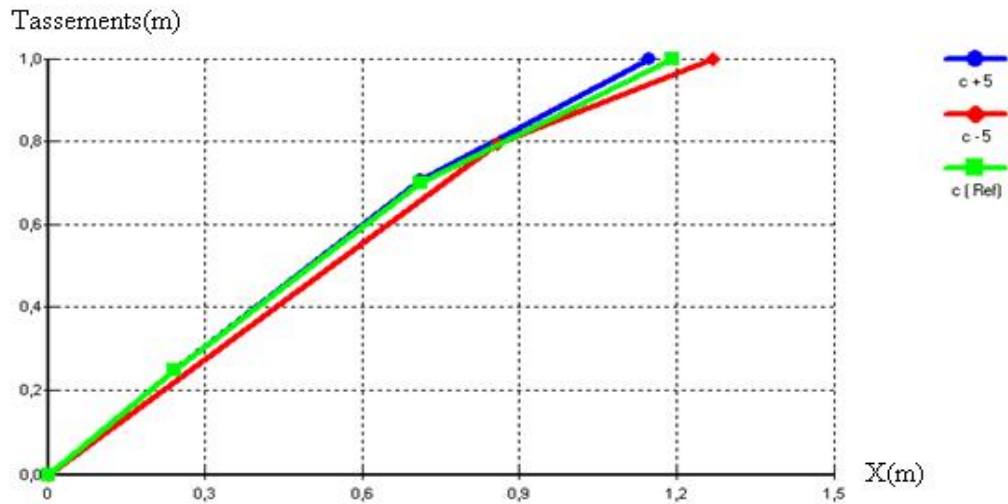
Pour toutes les couches simultanément

Remarque

Plaxis peut manipuler des sables sans cohésion ( $c = 0$ ), mais certaines options ne fonctionneront

pas bien. Pour ne pas avoir de complication, il est conseillé d'entrer au moins une valeur faible (prendre  $c \geq 0,2$  kPa) [24].

Les résultats des calculs sont :



**Fig8.5:** Influence de la cohésion sur les tassements

Les résultats obtenus pour (c+5) dans le tableau 8.4 sont :

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.34 m
Déplacements vectorielles	1.34 m
Déplacements verticaux	$-712.40 \times 10^{-3}m$
Déplacements horizontaux	1.24 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$

**Tableau8.4:** Pour (c+5)

Les résultats obtenus pour (c-5) dans le tableau 8.5 sont :

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.50 m
Déplacements vectorielles	1.50 m
Déplacements verticaux	$-824.70 \times 10^{-3}m$
Déplacements horizontaux	1.38 m

Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$
---------------------------------	------------------------------------

**Tableau 8.5:** Pour (c-5)

### 8.3.1.2. Angle de frottement " $\varphi$ "

L'angle de frottement  $\varphi$  (phi) est entré en degrés. Des angles de frottement élevés, obtenus

parfois pour des sables denses, augmenteront de manière substantielle la difficulté numérique des calculs plastiques [24].

Le temps de calcul varie exponentiellement avec de l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet. Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés.

Dans le modèle de référence l'angle de frottement est pris entre  $0^\circ$  et  $16^\circ$ .  $\varphi = 0^\circ$  pour la

première couche,  $\varphi = 4^\circ$  pour la deuxième couche et  $\varphi = 14^\circ$  pour la troisième couche et  $\varphi = 7^\circ$

pour la quatrième couche et  $\varphi = 16^\circ$  pour la cinquième couche et  $\varphi = 14^\circ$  pour la sixième

couche et  $\varphi = 16^\circ$  pour la septième couche.

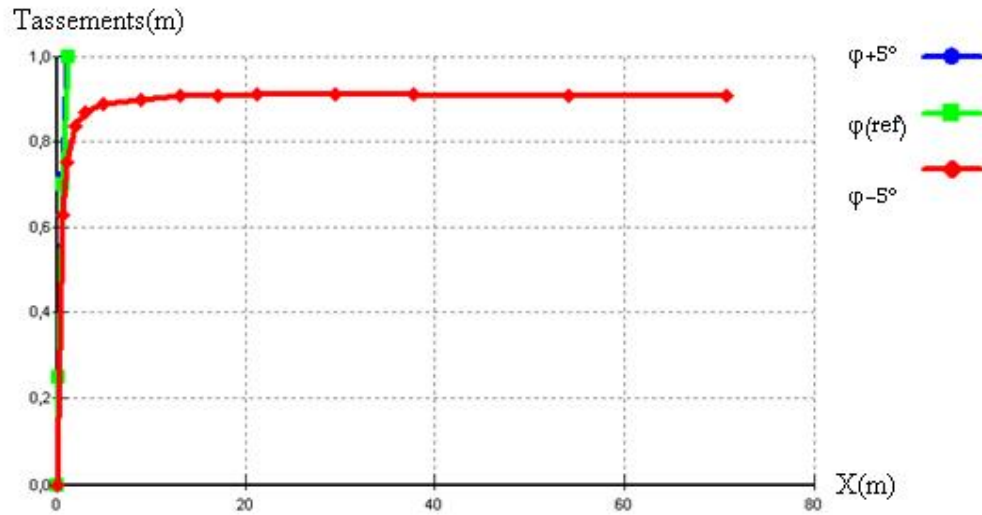
Pour l'étude paramétrique, les calculs ont été faits pour :

–  $\varphi = 5^\circ$ .

-  $\varphi + 5^\circ$ .

Pour toutes les couches simultanément.

On obtient les résultats suivants :



**Fig8.6:** Influence de l'angle de frottement sur les tassements

On obtient les résultats suivants pour ( $\varphi + 5^\circ$ )

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.25 m
Déplacements vectorielles	1.25 m
Déplacements verticaux	$-663.91 \times 10^{-3} \text{m}$
Déplacements horizontaux	1.16 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{KN/m}^2$

**Tableau8.6:** Pour ( $\varphi + 5^\circ$ )

On obtient les résultats suivants pour ( $\varphi - 5^\circ$ )

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	73.99 m

Déplacements vectorielles	73.99 m
Déplacements verticaux	-49.78 m
Déplacements horizontaux	71.95 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$

**Tableau8.6:** Pour ( $\varphi - 5^\circ$ )

### 8.3.1.3. Module d'Young "E"

Plaxis utilise le module d'Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb, mais d'autres modules de déformation sont également considérés. Un module de déformation a la dimension d'une contrainte (force par unité de surface). Les valeurs de raideur adoptées dans un calcul demandent une attention particulière parce que la plupart des géomatériaux présente un comportement non linéaire dès le début du chargement [24].

En mécanique des sols, la pente initiale est appelée  $E_0$  et le module sécant à 50% de la résistance en compression est noté  $E_{50}$ . Pour des argiles très surconsolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, il est réaliste d'utiliser  $E_0$  alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre  $E_{50}$ .

Pour les sols, le module initial et le module sécant tendent à augmenter avec la pression de confinement. Par conséquent, les couches de sol en profondeur ont souvent une raideur plus élevée que les couches en surface. De plus, la raideur apparente dépend du chemin de contrainte suivi. La raideur durant les cycles charge-décharge est supérieure à celle durant un chargement primaire. En outre, la raideur observée pour un sol en terme de module d'Young est généralement plus petite pour des compressions drainées que pour du cisaillement. Donc, en choisissant un module de déformation constant pour représenter le comportement du sol, l'utilisateur devra retenir une valeur qui prenne à la fois en compte le niveau de contrainte et le chemin de contrainte. Remarquons que des comportements de sols dépendant des contraintes sont pris en compte dans les modèles avancés de Plaxis. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, Plaxis propose une option spéciale pour définir une rigidité variable avec la profondeur (voir Paramètres avancés).

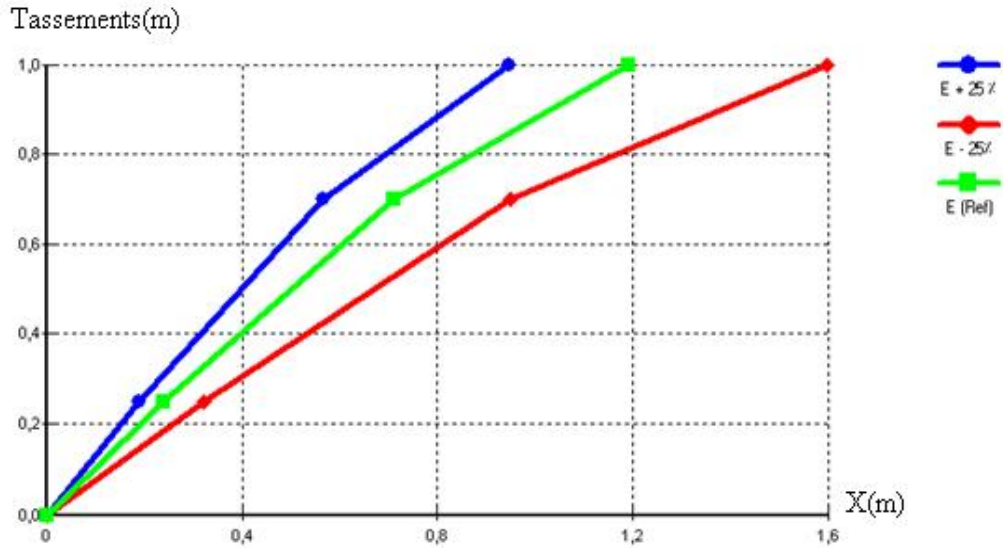
Dans le modèle de référence on a pris un module pour chaque couche  $E = 1.10^4 \text{ KN/m}^2$ .

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- E -25% ;
- E +25%.

Pour tous les modules simultanément, les résultats suivants ont été obtenus :





**Fig8.7:** Influence du module d'élasticité sur les tassements

Les résultats suivants ont été fait pour (E + 25%)

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.12 m
Déplacements vectorielles	1.12 m
Déplacements verticaux	$-608.37 \times 10^{-3} \text{ m}$
Déplacements horizontaux	1.04 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$

**Tableau8.7:** Pour (E + 25%)

Les résultats suivants ont été faits pour (E - 25%)

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.87 m
Déplacements vectorielles	1.87 m
Déplacements verticaux	-1.00 m
Déplacements horizontaux	1.72 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$

**Tableau8.8:** Pour (E - 25%)

Des essais triaxiaux standards drainés peuvent montrer une diminution significative de volume au tout début du chargement et révéler ainsi une faible valeur du coefficient de Poisson ( $\nu_0$ ) [23].

Dans certains cas, comme des problèmes de déchargement particuliers, il peut être réaliste d'employer une valeur initiale aussi faible, mais en général, pour le modèle de Mohr-Coulomb, l'utilisation d'une valeur plus élevée est recommandée.

Le choix d'une valeur pour le coefficient de Poisson est particulièrement simple dans le cas du modèle élastique ou du modèle de Mohr-Coulomb avec un chargement gravitaire. Dans ces types de chargement, Plaxis devrait fournir des valeurs réalistes pour le rapport  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ . Comme les deux modèles donneront le rapport bien connu de  $\sigma_h / \sigma_v = \nu / (1 - \nu)$  pour une compression unidimensionnelle, il est facile de choisir un coefficient de Poisson qui donne une valeur réaliste pour  $K_0$ . Ainsi,  $\nu$  est évalué par l'intermédiaire de  $K_0$ . Dans la plupart des cas, les valeurs de  $\nu$  seront comprises entre 0,3 et 0,4. En général, de telles valeurs peuvent être aussi utilisées pour des conditions de chargement autres que la compression unidimensionnelle. Dans le cas d'un comportement non drainé, il est conseillé d'entrer une valeur effective pour le coefficient de Poisson et de sélectionner Undrained comme type de comportement. De cette façon, Plaxis ajoutera automatiquement un module de compressibilité pour le fluide interstitiel, basé sur un coefficient de Poisson non drainé implicite de 0,495. Dans ce cas, le coefficient de Poisson effectif devra être inférieur à 0,35. Utiliser des valeurs plus élevées du coefficient de Poisson impliquerait que l'eau ne soit pas suffisamment raide par rapport au squelette du sol pour simuler un comportement non drainé.

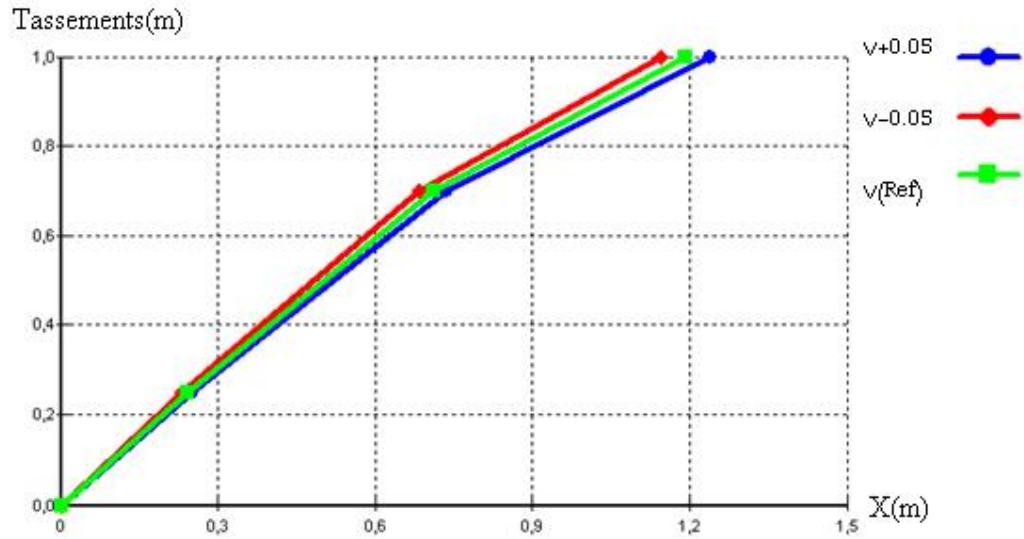
Dans le modèle de référence on a pris un coefficient pour chaque couche :  $\nu = 0,3$  pour la  
Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

–  $\nu - 0,05$

–  $\nu + 0,05$

Pour tous les coefficients simultanément

Les résultats obtenus sont :



**Fig8.8:** Influence du coefficient de Poisson sur les tassements

On obtient les résultats suivants pour ( $\nu + 0.05$ )

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.46 m
Déplacements vectorielles	1.46 m
Déplacements verticaux	$-784.14 \times 10^{-3} \text{ m}$
Déplacements horizontaux	1.34 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.39 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$

**Tableau8.9:** Pour ( $\nu + 0.05$ )

On obtient les résultats suivants pour ( $\nu - 0.05$ )

Nœuds	2033
Éléments	964
Points de Gauss	2892
Maillage déformée	1.35 m
Déplacements vectorielles	1.35 m
Déplacements verticaux	$-728.21 \times 10^{-3} \text{ m}$
Déplacements horizontaux	1.25 m
Contraintes effectives moyennes	$-1.40 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$

**Tableau8.10:** Pour ( $\nu - 0.05$ )

## 8.4. Conclusion

Pour les paramètres du sol : une augmentation de  $c$ ,  $\varphi$  ou des modules conduit à :

-Ces variations sont plus sensibles pour  $\varphi$  que pour la cohésion et les modules.

-La diminution de  $c$  et  $\varphi$  a une influence beaucoup plus importante que leur augmentation.

-L'augmentation des modules a une influence beaucoup plus importante que leur diminution.

# Chapitre 9

## Conclusion générale

## **Conclusion générale**

La ville de Constantine est essentiellement construite sur 03 formations géologiques qui se superposent :

- Le rocher calcaire peu épais Cénomaniens sur lequel la ville a été construite.
- Les marnes et argiles du Miocène qui ont fait l'objet des sols soumis à l'extension de la ville vers la partie Sud-ouest.
- Les conglomérats d'âge quaternaire .ces principales formations concernent pratiquement tous les versants de la ville.

Ces deux dernières formations peu ou pas consolidées entraînent des mouvements.

Un relief très accidenté et une tectonique cassante qu'a subie la ville favorisent les glissements de terrain.

L'étude des mouvements des terres à travers le monde a permis de mettre en évidence l'envergure de ces phénomènes qui peuvent mettre en péril la vie des personnes et entraînant des dégâts aux constructions. Ce qui prévaut des remèdes très coûteux.

L'utilisation de l'empreinte pour classifier et caractériser les sols est une méthode très significative puisqu'elle permet de définir leur ère géologique (notre cas est un remblai récent peu profond).la fraction d'argile en excédent, l'activité (sol actif) et les indices de plasticités provoquent des mouvements des terres. Ce qui prédit son comportement à court et long terme se faillant.

L'établissement d'un calcul de référence pour ce site donné : ce calcul de référence n'est pas la solution au problème, mais une approximation raisonnable de la réalité. La variation des paramètres géotechniques, et leur influence ont données des fourchettes de variation raisonnables.

L'étude paramétrique a mis en évidence l'influence importante non seulement des paramètres

géotechniques, mais également des paramètres de modélisation (définis en général par défaut).

Des systèmes de confortements sont proposés afin d'éviter de lourds dégâts aux constructions du site.

Quelques remarques :

- Cette étude ne prétend pas être exhaustive : on aurait pu faire varier d'autres paramètres, ou étudier l'influence des variations de paramètres sur d'autres types de résultats.
- L'influence combinée de plusieurs paramètres, qui n'a pas été étudiée ici, peut bien sûr être encore plus importante.
- Les conclusions tirées de cette étude paramétrique ne sont pas généralisables, même pour d'autres calculs équivalents.
- L'étude présentée s'est limitée à une étude en deux dimensions.

# Bibliographie

[1] : Jolleaud, Etude géologique de la chaîne Numidique et des monts de Constantine. Thèse, Paris Mont pellier, Montane, Si....cardi et Valentin dit.436p., 6pl.

[2] : Deleau, Etude stratigraphique de Constantine de Djbel Oum Settas. Thèse, Paris, pub.Serv.Carte géolAlgérie, (2), N°14, texte et Atlas. Alger.

[3,4] : Villa, Paléogéographie et tectonique des unités allochtones de types flysch à Microbrèches dans le nord de Constantine (Algérie).P 1047-1050Paris.

Villa, La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Aléro-Tunisiennes, Thèse des sciences, Université de Paris VI. France.

[5] : Lahondère, Etude des séries ultra Telliennes de l'est Algérien .C.R.Acad. SC, (D) Paris.

[6] : Chadi, Allochtonie des massifs néritiques (thèse, Paris) bull.serv.carte géol. Algérie (Nord Constantine).

[7] : Coiffait, Un bassin post-nappe dans son cadre structural. L'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord-orientale). Thèses de Doctorat d'état, Nancy.

[8] : Aris, Etude tectonique et microtectonique de la chaîne calcaire (nord. Constantine,

- Algérie).C.R.somm.soc.géol.fr.p.178, 1 fig.Paris.
- [9] : A.B enaissa.M . A.Bellouche (1999), Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie).Bull Eng .Géol 57,301-310.
- [10] : A.Benaissa, (15-juillet1984).Contribution à l'étude des mouvements de terrain de la région de Constantine (Algérie).Université Joseph Fourier-Grenoble.
- [11] : F.Blondeau , (mars1976). Rapport général. Bull.liaison labo.P. et ch.spécial.
- [12] :Jean-François Largillier , Observations sur le glissement de terrain des Eaux Bonnes dans les Pyrénées Atlantiques.
- [13] : M.Alhayari .P.Antoine (janvier1990). Détermination des caractéristiques mécaniques au cisaillement des argiles, cas du glissement de la Combe d'Hamalière. Rev.Franç.Géotech N°50pp71.77.
- [14] :F.Girault, B Goguel , J-P Aste .(4eme trimestre 1995), Le glissement du Friollin en Savoie, mesure par imagerie numérique.Revue française de géotechnique N°73.
- [15] :Henry Evrard , Thierry Gouin (jan-févr 1990), Séchillienne Risques majeurs d'éboulements en masse, point sur la surveillance du site . Bull.liaison labo .P.et ch-165-réf3464.
- [16] :J.C-Blivet , Note technique , suivi d'un versant instable à Sainte Adresse.
- [17] :P.Antoine .P.Desvarreux(4eme trimestre(1998)), Les mouvements de versant de la montagne des Piniés (Drome).Revue Franç de géotech N°89.
- [18] :Belouar A. (2004) Détermination des caractéristiques géotechniques d'une zone potentiellement instable. International Conférence on Geotechnical Engineering, Beyrouth, Lebanon.
- [19] : Skempton and Hutchinson (1969), Stability of Natural Soil Slopes and Embankment Foundations , State of the Art Report 291-340.
- [20] : Groupe d'étude des talus (décembre 1968), Les glissements de talus routiers, étude des désordres observés entre 1963-1967.
- [21] : S.Andrei, Test data systematization and stockage to predict the parameters describing the



Behaviour of unsaturated soils.

- [22] : Belouar A. Benayoun F (2001), Caractérisation d'un site géotechnique. Séminaire national de génie civil .Tébessa, Algérie.Vo11 pp 35-47.
- [23] : Imbert J.F. : « Analyse des structures par éléments finis », Edition SEPADUES, 1979.
- [24] : Boulon M., Flavigny E., Malecot Y. et ... : « Pratique éclairée des éléments finis en géotechnique », document 1, Laboratoire 3S et Terrasol, décembre 2004.
- [25] : Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. : « PLAXIS Version 8 material model manual », DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.
- [26] : Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. : « PLAXIS Version 8, manuel de référence », DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.

Annexe

## Caractéristiques

Plaxis V8 est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destiné à l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des ouvrages géotechniques. Les applications géotechniques nécessitent des lois de comportement avancées pour la simulation du comportement des sols et/ou des roches, non linéaire, dépendant du temps et anisotropie. De même, le sol étant un matériau polyphasique, des procédures spéciales sont nécessaires pour prendre en compte les pressions interstitielles, que celles-ci soient ou non hydrostatiques. Bien que la modélisation du sol lui-même soit un problème important, beaucoup de projets géotechniques impliquent également la modélisation des structures et de leur interaction avec le sol. Plaxis est doté de fonctionnalités tout à fait remarquables pour traiter tous les aspects des structures géotechniques complexes. Un résumé des fonctions essentielles est donné ci-dessous :

### Saisie des données



Définition graphique de la géométrie : La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques pratiques, ce qui permet une description précise de la coupe. Le maillage 2D est généré automatiquement à partir de ce modèle géométrique.



Génération automatique du maillage : Plaxis offre une génération entièrement automatique de maillages non structurés d'éléments finis, avec des options pour raffiner le maillage, globalement ou localement. Le maillage peut contenir des milliers d'éléments. Éléments de degré élevé : Des éléments triangulaires quadratiques à 6 nœuds et du 4<sup>ème</sup> ordre à 15 nœuds sont disponibles pour modéliser les déformations et les contraintes dans le sol.



Coques: Des éléments spécifiques de poutre sont utilisés pour modéliser la flexion des murs de soutènement, des revêtements de tunnel et autres éléments élancés de structures. Ces éléments sont définis par leur rigidité de flexion, leur raideur normale et leur moment fléchissant ultime. Une rotule plastique est introduite dès que le moment ultime est atteint. Ces éléments peuvent être utilisés conjointement avec des éléments d'interface pour conduire des analyses réalistes de tous les ouvrages géotechniques.

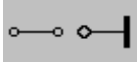


Articulations et raideurs à la rotation : Une articulation est une liaison entre éléments de

poutre qui permet une rotation au point de jonction. Les articulations peuvent être introduites pour créer des joints là où les rotations sont possibles. Il est également possible de définir une raideur à la rotation lorsque la liaison n'est ni une rotule ni un encastrement.



**Interfaces:** Ces éléments joints sont nécessaires pour les calculs impliquant l'interaction d'un ouvrage et du sol. Ils peuvent servir à modéliser la zone de matériau très fortement cisailé sous la base des fondations, contre les pieux, les géotextiles ou les murs de soutènement. Ils sont caractérisés par les valeurs de l'angle de frottement et de l'adhérence, qui ne sont pas nécessairement les mêmes que l'angle de frottement et la cohésion du sol encaissant.



**Ancrages :** Des éléments de ressort élastoplastique servent à représenter les ancrages et les butons. Ils sont définis par leur raideur normale et la valeur maximale de l'effort normal. Une option spéciale permet d'analyser les ancrages ou appuis précontraints.



**Géotextiles :** Les géotextiles ou les géogrilles sont souvent utilisés dans la pratique pour la construction de remblais ou de soutènements en sol renforcé. Ils peuvent être simulés dans Plaxis par l'emploi d'éléments spéciaux de traction. Il est souvent commode d'associer ceux-ci avec des éléments d'interface pour modéliser l'interaction avec le sol encaissant.



**Tunnels :** Plaxis offre une option qui facilite la création des tunnels circulaires ou non circulaires composés d'arcs successifs. Des éléments de poutre et d'interface peuvent être adjoints pour modéliser le revêtement du tunnel et l'interaction avec le sol encaissant. Des éléments isoparamétriques servent à définir les limites curvilignes au sein du maillage. Plusieurs options sont également disponibles pour analyser les déformations provoquées par la construction du tunnel.



**Conditions aux limites :** Les "fixités" sont des déplacements nuls imposés. Ces conditions peuvent être appliquées aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle, dans les directions x ou y. D'autre part, il est possible de définir des déplacements imposés non nuls pour certaines frontières du modèle. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard variables dans la majorité des cas.



**Chargements :** Deux systèmes de chargement indépendants sont proposés pour appliquer des forces ponctuelles ou des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie, les charges réparties sur n'importe quelle ligne de la géométrie, sans se limiter à la seule frontière extérieure. Les valeurs des chargements peuvent être modifiées dans le mode "Construction par étapes" et/ou par l'utilisation des multiplicateurs.

## Lois de comportement du sol



**Base de données des matériaux :** Les propriétés des matériaux sont regroupées dans une base de données du projet. Toutes les données figurant dans les bases de données des différents

projets peuvent être partagées via une base de données globale.

**Modèle de Mohr-Coulomb** : Ce modèle non-linéaire simple et robuste n'utilise que des paramètres qui sont connus habituellement. Tous les facteurs de non-linéarité ne sont cependant pas couverts par ce modèle. Le modèle de Mohr-Coulomb permet d'estimer de manière réaliste la charge de rupture de fondations circulaires, de pieux courts, ... etc. Il peut également servir à calculer un coefficient de sécurité par une approche de phi-c réduction.

**Modèles avancés de sol** : Plaxis offre d'autres modèles de comportement de sol : le Hardening Soil Model (modèle hyperbolique en élastoplasticité) pour les sols raides, comme les argiles surconsolidées et les sables ; le Soft Soil Creep Model (modèle de type Cam-Clay) pour l'analyse du comportement des sols compressibles normalement consolidés. En complément,

Plaxis inclut un modèle pour l'analyse des roches en comportement anisotropique : le Jointed Rock model.

**Modèles définis par l'utilisateur** : dans Plaxis, l'utilisateur a la possibilité de définir ses propres lois de comportement. Cette option, particulièrement utile en premier lieu pour les chercheurs, dans les universités et les instituts de recherche, peut également se révéler intéressante dans les milieux professionnels. Dans les années à venir, les modèles validés et documentés fournis par les utilisateurs seront mis à disposition sur Internet.

**Régime d'écoulement permanent** : Des réseaux complexes de pressions interstitielles peuvent être générés par combinaison de lignes phréatiques et de saisie directe de pressions. Les pressions interstitielles peuvent également être générées par un calcul d'écoulement permanent.

**Calcul du réseau d'écoulement** : Les distributions de pressions interstitielles complexes peuvent être générées à partir d'un calcul d'écoulement à deux dimensions. Des drains et des puits peuvent être modélisés grâce à des éléments spécifiques. Les potentiels aux limites du modèle sont définis comme des niveaux phréatiques.

**Surpressions interstitielles** : Plaxis distingue les comportements drainés ou non drainés des sols, pour modéliser les sables perméables comme les argiles quasi-imperméables. Les surpressions interstitielles sont calculées lorsque des couches de sol non drainé sont soumises à des chargements. Les conditions de chargement non drainé conditionnent souvent la stabilité des ouvrages géotechniques.

## **Fonctions de calcul**



Le programme de calcul permet de conduire des analyses en déformation menées par un calcul plastique, un calcul de Consolidation ou un calcul en Grandes déformations. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies avant le lancement du calcul.

**Incrémentation automatique du pas de chargement** : Ce mode évite à l'utilisateur d'avoir à choisir par lui-même les pas de chargement adaptés au calcul plastique incrémental, tout en garantissant une procédure de calcul fiable et efficace.

**Contrôle de la longueur d'arc** : Cette fonction permet un calcul correct des charges et mécanismes de rupture. Dans les calculs à charge contrôlée, la procédure itérative échoue dès

que la charge imposée dépasse la valeur de pic. Avec le contrôle de la longueur d'arc, la charge appliquée est automatiquement réduite pour pouvoir examiner le phénomène de pic ainsi que toute évolution éventuelle après ce pic.

**Construction par étapes :** Il est possible de simuler les phases de construction ou d'excavation, par activation/désactivation de groupes d'éléments, application de chargements ou changement des conditions hydrauliques. Cette procédure permet une estimation réaliste des contraintes et déplacements provoqués par exemple par la construction d'un barrage en terre ou une excavation profonde.

**Consolidation :** La dissipation des surpressions interstitielles avec le temps peut être simulée par un calcul de consolidation. Une analyse de consolidation nécessite la définition des perméabilités de chacune des couches de sol. Des procédures d'incrémentation automatique du pas de temps rendent l'analyse performante et facile à utiliser. L'option "Construction par étapes" peut être combinée avec une analyse en consolidation.

**Analyse en variables de Lagrange actualisées :** Avec cette option, le maillage est actualisé en permanence durant le calcul. Dans certaines situations, une analyse classique en petites déformations peut révéler des modifications importantes de la géométrie. Dans ces situations, il est recommandé de procéder à un calcul plus précis par actualisation des variables de Lagrange. Cette option est disponible pour tous les types de calcul.

**Coefficients de sécurité :** Le coefficient de sécurité est généralement défini comme le rapport de la charge de rupture à la charge de service. Cette définition est adaptée aux fondations, mais non aux remblais ou aux ouvrages de soutènement en palplanches. Dans ces derniers cas, il est plus approprié d'utiliser la définition du coefficient de sécurité de la mécanique des sols, c'est à dire le rapport entre la résistance au cisaillement mobilisable et la résistance au cisaillement mobilisée à l'équilibre. Dans PLAXIS, le coefficient de sécurité est calculé par une procédure de réduction de  $c$  et  $\phi$ .

**Gestionnaire de calculs :** Dans le gestionnaire de calculs, plusieurs projets peuvent être sélectionnés pour un calcul différé. Cette option permet une utilisation optimale de l'ordinateur en arrière-plan, et est utile dans le cas d'études paramétriques.

## **Analyse des résultats**

Le post-processeur Plaxis a des fonctions avancées pour restituer les résultats du calcul, sous forme de graphiques et tableaux. Ceux-ci peuvent être envoyés sur n'importe quelle imprimante ou copiés dans le presse-papier de Windows pour être exportés vers un autre logiciel.

**Déformations :** La visualisation des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, de déplacements ou déformations totaux ou incrémentaux. Tous les graphiques de déplacement ou de déformation peuvent être présentés avec flèches, lignes isovaleurs ou domaines isovaleurs.

**Contraintes :** La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles. Ces contraintes peuvent être figurées en lignes isovaleurs comme en domaines isovaleurs.

**Efforts et déplacements dans les éléments de structure :** Des graphiques et tableaux fournissent

directement les déplacements, efforts normaux, tranchants, circonférentiels et les moments fléchissant de tous les éléments de structure. Les efforts et déplacements peuvent être tracés par phase, ou sous forme d'enveloppe de toutes les phases précédentes.



**Coupes** : Cette option très commode est offerte par Plaxis pour créer des graphiques des sollicitations ou des déplacements selon des coupes sélectionnées dans le modèle.



**Générateur de rapports** : Un générateur de rapport a été développé pour permettre l'édition d'un rapport des données saisies et des résultats obtenus pour un modèle. Ce rapport peut être édité dans Word.

**Animations** : Il est possible de générer des animations vidéo pour toutes les sorties graphiques, notamment les déplacements et efforts dans les éléments de structure.



**Curves** : Un outil spécifique permet de représenter les courbes charge-déplacement, les chemins de contraintes, les courbes effort-déformation, ou encore l'évolution de tassements avec le temps.