

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : GEOTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par :

SAOULI Chaima et AZZOUZ Sara

Intitulé :

**Capacité portante d'une fondation  
superficielle située à proximité d'une  
pente soumise à un chargement incliné**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. MAHAMEDI Abdelkrim	Université de M'sila	Président
Mr. LAHMADI Azzeddine	Université de M'sila	Encadreur
Dr. MEKKI Lakhdar	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

# *Remerciement*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu pour tout ce que nous sommes.*

*Nos sincères remerciements et notre gratitude vont en second lieu à tous nos enseignants du département de Génie Civil de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, en particulier à notre encadrant, M. LATMADI Azzeddine.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury d'être parmi nous aujourd'hui.*

*Enfin, nous remercions nos parents, que Dieu les garde.  
Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

# DEDICACES

*Je me dédie d'abord ce succès à moi-même, puis à tous ceux qui ont travaillé dur avec moi pour accomplir ce voyage. Puisse-tu toujours être pour moi un soutien qui ne disparaît jamais. À celui qui a récolté les épines sur mon chemin pour m'ouvrir le chemin de la connaissance après la grâce de Dieu. Ce que je suis remonte à mon cher père.*

*À mon ange dans la vie, à celui dont les prières étaient le secret de ma réussite et dont la tendresse était le baume de mes blessures, à celle qui était ma mère, ma sœur, mon amie, mon premier soutien et ma force - ma mère-*

*À la source de ma force, à ceux qui ont parié sur ma réussite... à ceux qui ont fait des efforts pour m'aider et qui ont été une aide et un soutien - mes frères.*

*Je n'oublierai jamais mes âmes sœurs qui ont partagé avec moi les étapes de ce chemin*

*Louange à Dieu qui m'a aidé à ce moment-là. Louange à Dieu, Seigneur des mondes, et que la bénédiction et la paix soient sur son noble Prophète.*

**SAOULI Chaima.**

# DEDICACES

*Je présente le fruit de mes humbles efforts*

*À ceux qui m'ont donné la vie, l'espoir et grandir avec passion  
Connaissance, et ceux qui m'ont appris à gravir les échelons de la vie avec  
sagesse et patience ; Par droiture, gentillesse et loyauté envers eux, mon  
cher père et ma chère mère.*

*A ceux à qui Dieu m'a donné la bénédiction de leur présence dans ma vie, au  
contrat solide*

*Ceux qui m'ont aidé dans mon parcours de recherche : mes frères Walid et  
Amin, et mes sœurs Souria, Amel et Radhia.*

*À ceux qui m'ont accompagné alors que nous avons ouvert la voie ensemble  
vers la réussite de notre parcours scientifique*

*A mes compagnons sur mon chemin, Kholoud, Hanane et Chaima.*

*Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé et ont contribué, de près ou de loin, à la  
réalisation de cette étude :*

*Demander à Dieu de récompenser chacun avec la meilleure récompense dans  
ce monde et dans l'au-delà.*

*Puis à tout chercheur de savoir qui cherche à mettre son savoir au profit  
de l'Islam et des musulmans*

*Avec toutes les connaissances que Dieu lui a données*

*AZZOUZ Sara*

## Résumé :

La configuration d'une fondation à proximité d'une pente est une situation fréquemment observée en géotechnique, posant ainsi un défi majeur dans l'évaluation de la capacité portante des fondations superficielles dans ce contexte. Des études théoriques et expérimentales ont démontré que la proximité d'une pente a un impact significatif sur la portance d'une fondation superficielle, la rendant inférieure à celle d'une fondation sur un sol horizontal. Par conséquent, une correction par le biais d'un coefficient réducteur est nécessaire.

Ce mémoire vise à examiner l'impact de l'inclinaison du terrain sur la capacité de charge des fondations superficielles. Une analyse numérique a été réalisée en utilisant le logiciel de méthode des éléments finis OPTUM G2. Cette étude a impliqué la variation de plusieurs paramètres, notamment l'angle de la pente ( $\beta$ ) et l'angle de la charge appliquée sur la fondation ( $\alpha$ ). L'objectif principal était d'évaluer l'influence de l'inclinaison du terrain sur la capacité de charge d'une fondation superficielle soumise à une charge inclinée.

## Mots clés :

Capacité portante, fondation, charge inclinée, pente, analyse numérique, OPTUM G2.

## **Abstract:**

The configuration of a foundation near a slope is a frequently observed situation in geotechnics, posing a major challenge in assessing the bearing capacity of shallow foundations in this context. Theoretical and experimental studies have demonstrated that the proximity of a slope significantly impacts the bearing capacity of a shallow foundation, making it lower than that of a foundation on horizontal ground. Consequently, a correction through a reduction coefficient is necessary.

This thesis aims to examine the impact of slope inclination on the bearing capacity of shallow foundations. A numerical analysis was conducted using the finite element method software OPTUM G2. This study involved varying several parameters, including the slope angle ( $\beta$ ) and the angle of the load applied to the foundation ( $\alpha$ ). The main objective was to evaluate the influence of slope inclination on the bearing capacity of a shallow foundation subjected to an inclined load.

## **Keywords:**

Bearing capacity, foundation, inclined load, slope, numerical analysis, OPTUM G2.

## ملخص:

تعد وضعية الأساس بالقرب من منحدر حالة شائعة في الجيوتقنية، مما يشكل تحديًا كبيرًا في تقييم قدرة التحمل للأساسات السطحية في هذا السياق. وقد أظهرت الدراسات النظرية والتجريبية أن القرب من المنحدر له تأثير كبير على قدرة التحمل للأساس السطحي، مما يجعله أقل من أساس موضوع على أرض أفقية. وبالتالي، يصبح من الضروري إجراء تصحيح من خلال معامل تخفيض.

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير ميلان الأرض على قدرة التحمل للأساسات السطحية. تم إجراء تحليل رقمي باستخدام برنامج طريقة العناصر المحدودة OPTUM G2. وشملت هذه الدراسة تغيير عدة معايير، بما في ذلك زاوية المنحدر ( $\beta$ ) وزاوية الحمل المطبق على الأساس ( $\alpha$ ). كان الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير ميلان الأرض على قدرة التحمل للأساس السطحي الذي يتعرض لحمل مائل.

## الكلمات المفتاحية:

قدرة التحمل، الأساس، الحمل المائل، المنحدر، التحليل العددي، OPTUM G2.

## SOMMAIRE

Remerciement.....	I
DEDICACES.....	II
DEDICACES.....	III
Résumé : .....	IV
Abstract: .....	V
ملخص.....	VI
SOMMAIRE .....	VII
LISTE DES FIGURES .....	XI
Liste des tableaux .....	XIII
Liste des notations :.....	Erreur !
<b>Signet non défini.</b>	
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les fondations superficielles</b>	
I.1. Introduction :.....	19
I.2. Le rôle des fondations :.....	19
1. Capacité portante de la semelle de fondation : .....	19
2. Actions de la structure au niveau du sol de fondation : .....	19
I.3. Les différents types de fondations : .....	20
I.3.1. Types de fondations superficielles : .....	20
I.4. Capacité portante et tassement des fondations superficielles : .....	21
I.4.1. Définition :.....	21
1. Capacité portante des fondations superficielles : .....	21
2. Tassement des fondations superficielles : .....	22
I.4.2. - Tassement des fondations : .....	23
I.4.3. Les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations superficielles : ..	23
I.4.3. 1.Introduction : .....	23
I.4.3.2. Calcul de la capacité portante à partir des essais de laboratoire (Méthode « c- $\phi$ ») : .....	24
I. 5. Fonctionnement des Fondation superficielles : .....	30
I.5.1. Comportement des fondations superficielles chargées : .....	30
I.5.2 Mécanismes de rupture d'une fondation superficielle : .....	32

I.5.2.a Mécanisme général d'enfoncement des fondations :.....	32
I.5.2.b Un mécanisme de cisaillement localisé :.....	33
I.5.2.c Une rupture par poinçonnement : .....	34
I.6. Fondation au bord d'une pente : .....	34
1.6.1. Méthodes théoriques : .....	34
I.7. Conclusion : .....	40

## **Chapitre II : Présentation du logiciel de calcul OPTUM**

II.1. Introduction : .....	42
II.2. Bref historique : .....	42
II.3. Bref aperçu sur la méthode des éléments finis : .....	43
II.4. Présentation de l'OPTUM G2 : [16].....	44
II.4.1. Interface de démarrage :.....	44
II.4.2 Géométrie :.....	45
II.4.3. Caractéristiques : .....	45
II.4.3.1.Prise en charge : .....	46
II.4.3.2.Charges :.....	46
II.4.3.3.Structurel : .....	47
II.4.3.4.Maillage : .....	47
II.4.3.5.Autre :.....	47
II.4.4.Régisseur de scène : .....	48
II.4.5.Modèles de matériaux : .....	48
II.4.5.1.Modèle général :.....	49
II.4.5.2.Rigide : .....	49
II.4.5.3.Elastique linéaire :.....	49
II.4.5.4.Mohr-Coulomb :.....	50
II.4.5.4.1 Rigidité :.....	50
II.4.5.4.2.Fonction de rendement :.....	50
II.4.5.4.3.Règle de flux : .....	50
II.4.5.5.Tresca : .....	51
II.4.5.5.1 Rigidité :.....	51
II.4.5.5.2 Fonction de rendement :.....	51
Conclusion :.....	52

## **Chapitre III : Etude numérique**

III.1. Introduction : .....	54
-----------------------------	----

## Table de matières

---

III.2. Présentation du cas étudié : .....	54
III.3. Caractéristiques générales : .....	56
III.3.1. Géométrie : .....	56
III.3.2. Conditions aux limites : .....	57
III.3.3. Caractéristiques des matériaux : .....	57
a) Caractéristiques de sol .....	57
b) Caractéristiques de la fondation .....	57
III.3.4. Génération du Maillage : .....	58
III.3.5. Conditions initiales : .....	58
III.3.6. Calculs .....	59
a) Général : .....	59
b) Calcul.....	59
III.3.7. Application numérique.....	60
1) charge sur terrain horizontal .....	60
2) Calcul théorique de la capacité portante (selon Terzaghi, Meyerhof et Hansen) On donne.....	60
III.4. RESULTATS : .....	61
1) Sur terrain horizontal : .....	649
2) Au bord d'une pente : .....	50
III.5. Comparaison : .....	683
III.6. Conclusion : .....	694
Conclusion générale .....	716
Références bibliographiques .....	58



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1:</b> Types des fondations superficielles Frank (1998). .....	21
<b>Figure I.2:</b> Courbe chargement-tassement d'une fondation superficielle (Frank 1998). ...	22
<b>Figure I.3:</b> Tassement des fondations. ....	23
<b>Figure I.4:</b> Schéma de rupture d'une fondation superficielle. ....	24
<b>Figure I.5:</b> Capacité portante. Méthode de superposition de Terzaghi (méthode « c- $\phi$ »). . .....	24
<b>Figure I.6:</b> Courbes de tassement vertical pour une fondation superficielle (a) pour un sol mou ou peu compact ; (b) pour un sol relativement résistant, K Terzaghi, (1943). .....	32
<b>Figure I.7:</b> a Rupture par cisaillement générale. ....	33
<b>Figure I.8:</b> b Rupture par cisaillement local. ....	33
<b>Figure I.9:</b> c Rupture par poinçonnement. ....	34
<b>Figure I.10:</b> Surface de rupture d'une fondation filante rugueuse située sur une pente d'après Meyerhof (1957) .....	35
<b>Figure I.11:</b> Variation du facteur de la capacité portante $Nc_q$ pour un sol purement cohérent (fondation sur une pente) d'après Meyerhof (1957) .....	36
<b>Figure I.12:</b> Variation du facteur de portance $N\gamma_q$ pour un sol purement frottant, cas d'une fondation sur pente, d'après Meyerhof (1957) .....	37
<b>Figure I.13:</b> Surface de rupture d'une Fondation filante au bord d'une pente d'après Meyerhof (1957) .....	37
<b>Figure I.14:</b> Facteur de portance $Nc_{qd}$ de Meyerhof pour un sol purement cohérent (fondation située à proximité d'une pente) d'après Meyerhof (1957) .....	38
<b>Figure I.15:</b> Facteur de portance $N\gamma_{qd}$ de Meyerhof, pour un sol purement frottant, (fondation située à proximité d'une pente) d'après Meyerhof (1957) .....	39
<b>Figure II.1:</b> Une vue plein écran de l'interface graphique OPTUM G2	44
<b>Figure II.2:</b> Ruban de géométrie dans OPTUM G2 .....	44
<b>Figure II.3:</b> Ruban de matériau dans OPTUM G2 .....	45
<b>Figure II.4:</b> Ruban de fonctionnalités dans OPTUM G2 .....	45
<b>Figure II.5:</b> Ruban de résultats dans OptumG2 .....	46
<b>Figure II.6:</b> Application du maillage et de l'éventail de maillage à une semelle directe. ..	47
<b>Figure II.7:</b> Une vue de la fenêtre du gestionnaire de scène .....	48
<b>Figure III.1:</b> La définition géométrique pour une surface horizontale. ....	55
<b>Figure III.2:</b> La définition géométrique pour une pente. ....	56

## Table de matières

---

<b>Figure III.3:</b> Ruban de géométrie. ....	56
<b>Figure III.4:</b> Maillage après le calcul. ....	58
<b>Figure III.5:</b> conditions initiales .....	59
<b>Figure III.6:</b> Une vue de la fenêtre du gestionnaire de scène .....	59
<b>Figure III.7:</b> Fenêtre l'évolution du calcul. ....	60
<b>Figure III.8:</b> Mécanismes de rupture "surface horizontale".....	62
<b>Figure III.9:</b> Mécanismes de rupture "d'une pente (1/2)" .....	62
<b>Figure III.10:</b> Déplacements verticaux. ....	63
<b>Figure III.11:</b> Variation de l'influence de l'inclinaison de la charge sur la capacité portante : cas terrain horizontal. ....	64
<b>Figure III.1:</b> Variation l'influence de l'inclinaison de la charge Sur la capacité portante dans cas pente 1/4.....	65
<b>Figure III.13:</b> Variation de l'influence de l'inclinaison de la charge Sur la capacité portante dans : pente 1/3.....	66
<b>Figure III.2:</b> Variation de l'influence de l'inclinaison de la charge Sur la capacité portante : cas pente 1/2.....	67

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Facteurs de la capacité portante donnée par Terzaghi. ....	26
<b>Tableau I.2:</b> Variation de la $N_c$ , $N_\gamma$ et $N_q$ selon Meyerhof. ....	27
<b>Tableau I.3:</b> Facteurs de capacité portante de Hansen (1970). ....	28
<b>Tableau I.4:</b> Coefficients de forme. Valeurs de Terzaghi. (Conditions non drainées et drainées) ; le DTU 13.12 retient les mêmes valeurs. ....	29
<b>Tableau III 1:</b> Propriétés de sol .....	57

## Liste des notations

**a** : l'attraction

**B** : Largeur de la semelle ou la plus petite dimension.

**C** : Cohésion du sol sous la base de la fondation.

**Cu** : cohésion non drainée

**D** : Encastrement

**F** : la charge

**L** : Longueur de la semelle

**N $\gamma$**  ; **N $q$**  ; **N $c$**  : Facteurs de portance (fonction de  $\phi$ ),

**q** : surcharge verticale latérale a la fondation

**ql** : Contrainte de rupture (capacité portante par unité de surface),

**Qu** : Capacité portante ultime.

**S** : surface

**S $\gamma$**  ; **S $q$**  ; **S $c$**  : Coefficients de forme de la semelle

**$\gamma_2$**  : Poids volumique du sol latéralement à la fondation,

**$\gamma_1$**  : Poids volumique du sol sous la base de la fondation,

**$\phi$**  : Angle de frottement interne du sol

**$\phi'$**  : Angle de frottement interne effectif du sol

**$\lambda_{c\beta}$ ,  $\lambda_{q\beta}$ ,  $\lambda_{\gamma\beta}$**  : Des facteurs de pente

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

La fondation revêt une importance primordiale au sein de toute structure, étant le socle sur lequel repose l'intégralité du bâtiment. Afin d'assurer la stabilité et la pérennité de l'ouvrage, il est essentiel de comprendre la nature du sol, son comportement et sa capacité de charge.

Diverses recherches ont contribué de manière significative à l'avancement des connaissances sur le comportement des fondations superficielles soumises à des charges. Néanmoins, les approches classiques pour le dimensionnement des semelles exigent un niveau élevé de fiabilité pour prévenir les défaillances. Par conséquent, il est essentiel de placer la capacité portante du sol au centre des préoccupations lors de la conception de toute fondation, tout en veillant à évaluer correctement les tassements dans le contexte approprié.

La première considération à laquelle nous prêtons une attention particulière concerne la proximité d'une fondation avec une pente. Cette configuration peut résulter de deux situations distinctes : la construction d'un ouvrage au bord d'un talus préexistant ou à proximité de celui-ci.

Diverses hypothèses ont été étudiées par de nombreux chercheurs afin d'évaluer la capacité portante des fondations superficielles situées sur une pente ou à proximité de celle-ci. L'approche initiale de l'estimation de la capacité portante sur sol en pente, introduite par Meyerhof [13], a été ultérieurement développée grâce aux travaux de plusieurs autres chercheurs spécialisés dans ce domaine.

La problématique liée à la détermination de la capacité portante d'une fondation reposant sur un sol de résistance spécifique est une question fondamentale ancienne dans le domaine du génie géotechnique. En 1943, Terzaghi [15] a introduit la première équation générale visant à estimer ladite capacité portante pour une fondation superficielle placée sur un sol sollicité par une charge verticale centrée. Ce travail de recherche se concentre sur l'analyse de l'interaction entre le sol et la fondation superficielle située à proximité d'une pente, en supposant un comportement purement frottant du sol.

Meyerhof (13) a mis en avant que, dans le cas d'une fondation située sur une pente ou à proximité de celle-ci, la zone plastique du côté de la pente est proportionnellement plus réduite que celle d'une fondation similaire établie sur un sol horizontal, entraînant ainsi une diminution de la capacité portante ultime de ladite fondation.

Griffiths (8) a réalisé des simulations par la méthode des éléments finis afin d'évaluer la capacité portante du sol en pente, et a obtenu des résultats cohérents, en particulier pour les fondations situées à proximité des pentes.

Graham et al. (2007) ont développé une méthode analytique basée sur le modèle de rupture de Meyerhof (1976) afin d'analyser la capacité portante et la répartition des contraintes des fondations posées sur des pentes, notamment dans le cas de sols non cohésifs. Leur étude a été confirmée par des expérimentations .

Le but principal de cette étude est d'effectuer une analyse numérique de la capacité portante d'une fondation superficielle filante placée en bordure d'une pente et exposée à des charges centrées et inclinées. Plusieurs paramètres ont été modifiés dans cette analyse, tels que l'angle d'inclinaison de la pente ( $\beta$ ) et l'angle d'inclinaison de la charge appliquée sur la fondation ( $\alpha$ ).

Ce mémoire est structuré en trois chapitres, avec une introduction générale et une conclusion:

- Une introduction générale portant sur le travail réalisé est exposée.
- Le premier chapitre a abordé des considérations générales concernant les fondations superficielles.
- Le chapitre suivant expose le logiciel de calcul OPTUM.
- Le chapitre trois expose l'analyse numérique réalisée.
- Pour conclure, une synthèse générale sera présentée .

# Chapitre I

Généralités sur Les fondations

Superficielles

## Chapitre I : Généralités sur les fondations superficielles

### I.1. Introduction :

La fondation d'une construction est l'une des activités les plus anciennes dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, et demeure encore aujourd'hui l'un des problèmes de géotechnique les plus courants.

La fondation est la partie qui transfère les charges du bâtiment aux couches de sol sous-jacentes, Les fondations constituent la partie inférieure du bâtiment et de son infrastructure, et sa fonction principale est de soutenir et de stabiliser la superstructure du bâtiment et de transférer ses charges au sol en toute sécurité.

Les fondations doivent également épouser la forme et le déploiement de la structure et s'adapter aux diverses propriétés du sol, des roches et de la nappe phréatique, Les fondations peuvent être : superficielles ou profondes.

Les fondations superficielles, caractérisées par une faible compacité, sont conçues pour transmettre les charges vers les couches superficielles du sol. En revanche, les fondations profondes sont conçues pour transférer les charges vers des couches plus profondes du sol, tout en impliquant également les couches superficielles qu'elles traversent.

Dans ce chapitre, nous étudierons le comportement des fondations superficielles.

### I.2. Le rôle des fondations :

Le rôle de la fondation est crucial pour assurer la stabilité d'une structure en transmettant les charges provenant des actions exercées sur la structure. Ainsi, le concepteur doit tenir compte des éléments suivants :

#### 1. Capacité portante de la semelle de fondation :

La semelle doit être dimensionnée pour supporter les charges sans provoquer de rupture ou de tassement excessif du sol en dessous.

#### 2. Actions de la structure au niveau du sol de fondation :

La semelle doit résister aux forces et contraintes induites par la structure, afin de maintenir la stabilité globale.

En résumé, la fondation est un élément crucial pour garantir la sécurité et la durabilité d'une construction. Elle doit être conçue avec soin pour répondre aux exigences spécifiques du projet.

### **I.3. Les différents types de fondations :**

Il existe deux catégories de fondations:

- Les fondations superficielles
- Les fondations profondes et spéciales

#### **I.3.1. Types de fondations superficielles :**

Fondations superficielles selon Frank (1998) :

- **Semelles filantes :**

Elles ont généralement une largeur B modeste (au plus quelques mètres).

Leur longueur L est importante ( $L/B > 10$  pour clarifier).

- **Semelles isolées :**

Leurs dimensions en plan, notées B et L, ne dépassent que de quelques mètres.

Cette catégorie englobe les semelles de forme carrée (avec un rapport longueur/largeur de 1) ainsi que les semelles de forme circulaire de diamètre B.

- **Radiers ou dallages :**

Ils ont des dimensions importantes en plan, B et L.

Cette catégorie englobe les radiers généraux.. [6]

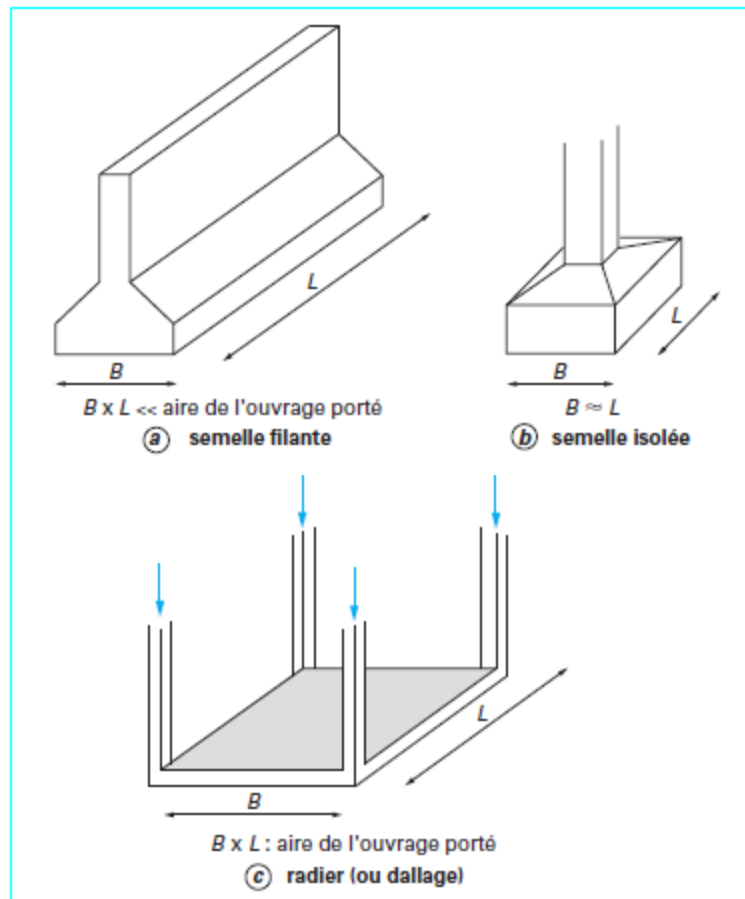


Figure I.1: Types des fondations superficielles Frank (1998). [6]

## I.4. Capacité portante et tassement des fondations superficielles :

### I.4.1. Définition :

La capacité portante et le tassement des fondations superficielles revêtent une importance primordiale dans les domaines du génie civil et de la construction :

#### 1. Capacité portante des fondations superficielles :

- C'est la capacité d'une fondation à supporter la charge des structures qu'elle soutient, en les transférant au sol de manière sécurisée.
- La capacité portante dépend de facteurs tels que la nature du sol, la profondeur de la fondation, la géométrie de la fondation, et les charges appliquées par la structure

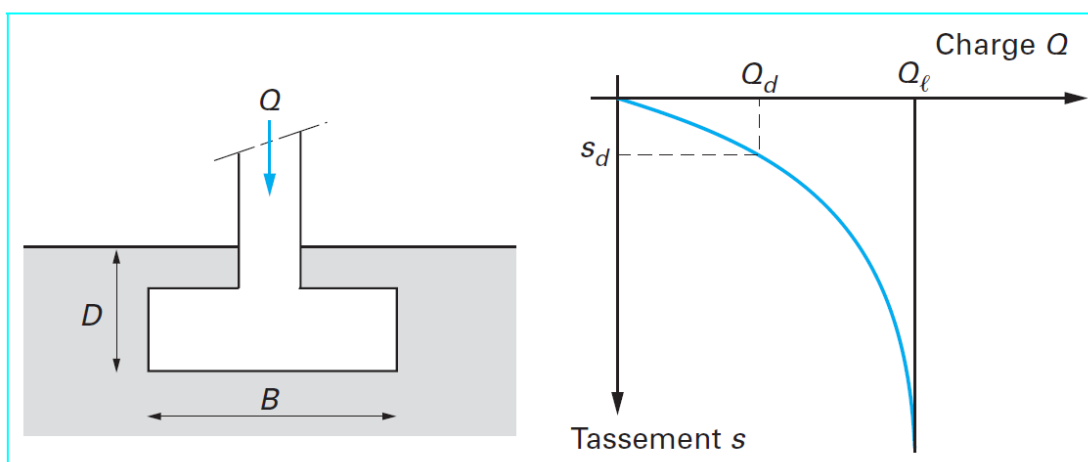
## 2. Tassement des fondations superficielles :

- Le tassement est la déformation verticale du sol sous la fondation due à la charge appliquée par la structure.
  - Les tassements excessifs peuvent entraîner des dommages structuraux et des problèmes de stabilité.
- Il est important de prédire et de contrôler le tassement des fondations pour garantir la durabilité et la sécurité des structures.
- la capacité portante et le tassement des fondations superficielles déterminent la performance et la stabilité des bâtiments et des infrastructures construits sur ces fondations.

Des notions de capacité portante et de tassement illustrées par la Figure I .2:

- La capacité portante d'une fondation superficielle se réfère à sa capacité à supporter une charge sans échec. Dans le contexte de la figure, la largeur de la fondation est notée  $B$ , et la profondeur où se trouve sa base est notée  $D$ .

- Lorsque nous appliquons une charge monotone croissante à la fondation (de manière quasi statique), nous observons des tassements représentés par  $s$  en fonction de la charge appliquée  $Q$ . [6]



**Figure I.2:** Courbe chargement-tassement d'une fondation superficielle (Frank 1998). [6]

### I.4.2. - Tassement des fondations :

#### ❖ Tassement des fondations superficielles :

Est la déformation verticale du sol sous la fondation due à la charge appliquée par la structure, il est essentiel de prendre en compte ce phénomène lors de la conception et de la construction de bâtiments pour garantir leur stabilité et leur durabilité.

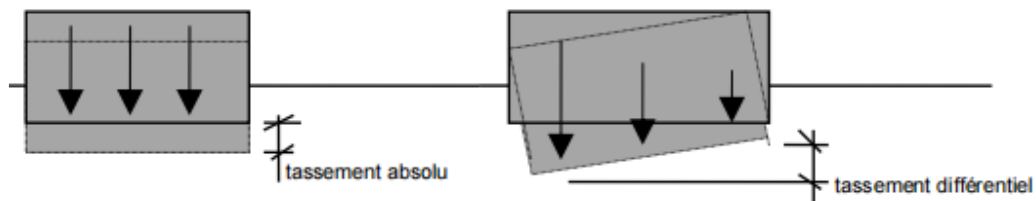
❖ Voici quelques points importants concernant le tassement de la fondation :

#### 1. Tassements absolu :

Ces tassements sont uniformément répartis et n'affectent généralement pas de manière significative la structure elle-même.

#### 2. Tassements différentiels :

Un tassement différentiel se réfère à un phénomène de déformation du sol caractérisé par une variation non uniforme.



**Figure I.3:** Tassement des fondations. [4]

### I.4.3. Les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations superficielles :

#### I.4.3. 1.Introduction :

Les techniques de calcul de la capacité de charge des fondations superficielles ont connu un développement progressif depuis le début du XXe siècle, largement influencé par les travaux pionniers de Terzaghi, Meyerhof et Brinch Hansen. Ces chercheurs ont formulé des principes empiriquement validés qui s'appliquent à une grande variété de cas rencontrés dans la pratique courante.

Étant donnée l'importance de l'évaluation de la capacité portante d'un sol pour garantir la stabilité d'une structure, il convient d'analyser diverses méthodes spécifiques de calcul applicables aux fondations superficielles.

I.4.3.2. Calcul de la capacité portante à partir des essais de laboratoire (Méthode « c-φ ») :

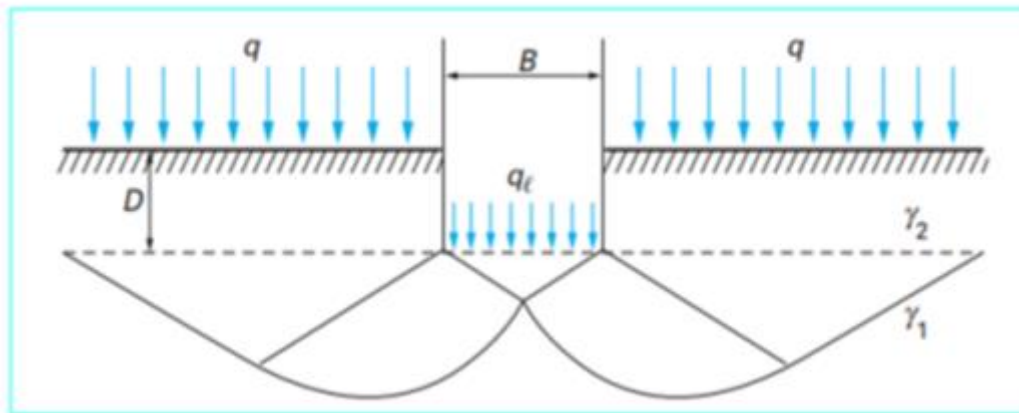


Figure I.4: Schéma de rupture d'une fondation superficielle. [6]

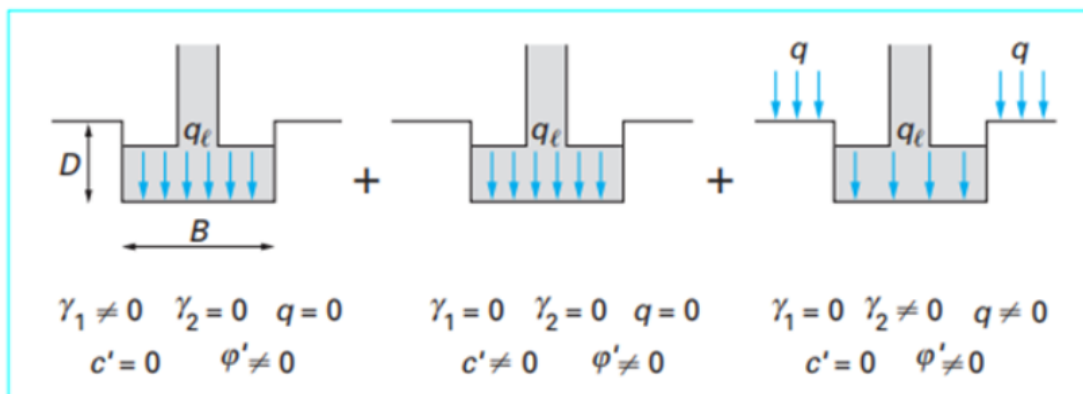


Figure I.5: Capacité portante. Méthode de superposition de Terzaghi (méthode « c-φ »). [6]

La capacité portante maximale d'une fondation superficielle est établie en combinant ces trois modes de résistance. Il s'agit de la charge maximale que la fondation peut supporter avant de subir un enfoncement excessif dans le sol.

La méthode de superposition de Terzaghi est un instrument essentiel pour l'évaluation de la stabilité et de l'efficacité des fondations superficielles dans le cadre de la conception d'infrastructures de génie civil.

En présence d'une semelle filante, la contrainte de rupture sous une charge verticale centrée peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante :

$$q_1 = \frac{1}{2} \gamma_1 B N_\gamma(\varphi) + C N_c(\varphi) + (q + \gamma_2 D) N_q(\varphi)$$

Les termes variés se présentent comme suit :

- le premier terme  $\frac{1}{2} \gamma_1 B N_\gamma(\varphi)$  est le terme de surface, qui dépend à la fois de la largeur de la fondation B et du poids volumique du sol  $\gamma_1$  sous la fondation. Il s'agit de la charge limite selon la théorie rigide-plastique pour un sol cohérent et frottant exclusivement.
- le deuxième terme est  $C N_c(\varphi)$  le terme de cohésion. C'est la charge limite pour un sol frottant et cohérent, mais non pesant.
- le troisième terme  $(q + \gamma_2 D) N_q(\varphi)$  est le terme de surcharge ou de profondeur.

Il s'agit de la contrainte limite pour un sol en frottement pur et soumis à une charge latérale, où  $\gamma_2$  représente la masse volumique du sol au-dessus du plan de la base.

Avec :

- \*  $ql$  La contrainte de rupture, également appelée capacité portante par unité de surface,
- \*  $\gamma_1$  poids volumique du sol sous la base de la fondation,
- \*  $\gamma_2$  poids volumique du sol latéralement à la fondation,
- \*  $q$  Surcharge verticale latérale à la fondation,
- \*  $c$  cohésion du sol sous la base de la fondation,

\*  $N_\gamma(\varphi); N_c(\varphi); N_q(\varphi)$  facteurs de portance sont uniquement fonction de l'angle de frottement interne  $\varphi$  du sol situé sous la base de la fondation. [13]

Avec :

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right).$$

$$N_c = \left( \frac{N_q - 1}{\tan \varphi} \right).$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi.$$

Tableau I.1: Facteurs de la capacité portante donnée par Terzaghi. [15]

$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	16.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	116.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	161.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	416.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Tableau I.2: Variation de la  $N_c$ ,  $N_q$  et  $N_\gamma$  selon Meyerhof. [13]

$\varphi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\varphi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\varphi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1.00	0.00	17	12.34	4.77	1.66	34	42.16	29.44	31.15
1	5.38	1.09	0.002	18	13.10	5.26	2.00	35	46.12	33.30	37.15
2	5.63	1.20	0.01	19	13.93	5.80	2.40	36	50.59	37.75	44.43
3	5.90	1.31	0.02	20	14.83	6.40	2.87	37	55.63	42.92	53.27
4	6.19	1.43	0.04	21	15.82	7.07	3.42	38	61.35	48.93	64.07
5	6.49	1.57	0.07	22	16.88	7.82	4.07	39	67.87	55.96	77.33
6	6.81	1.72	0.11	23	18.05	8.66	4.82	40	75.31	64.20	93.69
7	7.16	1.88	0.15	24	19.32	9.60	5.72	41	83.86	73.90	113.99
8	7.53	2.06	0.21	25	20.72	10.66	6.77	42	93.71	85.38	139.32
9	7.92	2.25	0.28	26	22.25	11.85	8.00	43	105.11	99.02	171.14
10	8.35	2.47	0.37	27	23.94	13.20	9.46	44	118.37	115.31	211.41
11	8.80	2.71	0.47	28	25.80	14.72	11.19	45	133.88	134.88	262.74
12	9.28	2.97	0.60	29	27.86	16.44	13.24	46	152.10	158.51	328.73
13	9.81	3.26	0.74	30	30.14	18.40	15.67	47	173.64	187.21	414.32
14	10.37	3.59	0.92	31	32.67	20.63	18.56	48	199.26	222.31	526.44
15	10.98	3.94	1.13	32	35.49	23.18	22.02	49	229.93	265.51	674.91
16	11.63	4.34	1.38	33	38.64	26.09	16.17	50	266.89	319.07	873.84

Tableau I.3: Facteurs de capacité portante de Hansen (1970). [9]

$\phi$ (degrees)	Nq	Nc	Ny
0	1.0	1.5	0.0
5	1.6	16.5	0.1
10	2.5	8.3	0.4
15	3.9	11.0	0.2
20	6.4	14.8	1.9
25	10.7	20.7	2.8
30	18.4	30.1	15.1
31	20.6	32.7	17.7
32	23.2	35.5	20.8
33	26.1	38.6	42.4
34	29.4	42.2	28.8
35	33.3	46.1	33.9
36	37.8	50.6	40.1
37	42.9	55.6	47.4
38	48.9	61.4	56.2
39	56.0	67.9	66.8
40	64.2	75.3	78.5
42	85.4	93.7	114.0
44	115.3	118.4	165.6
46	158.5	152.1	244.6
48	222.3	199.3	368.7
50	319.1	266.9	568.6

L'introduction des coefficients multiplicatifs  $S_c$ ,  $S_q$  et  $S_\gamma$  modifie la relation afin de prendre en considération la forme de la fondation :

$$q_1 = S_\gamma \frac{1}{2} \gamma_1 B N_\gamma(\varphi) + S_c C N_c(\varphi) + S_q (q + \gamma_2 D) N_q(\varphi)$$

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été rapportés par divers auteurs tels que Caquot et Kerisel, Brinch Hansen, ainsi que Meyerhof. L'étude du problème axisymétrique relatif à une semelle circulaire a été abordée par Berezantzev, Shield, Cox et al., et Martin. [3]

**Tableau I.4:** Coefficients de forme. Valeurs de Terzaghi. (Conditions non drainées et drainées) ; le DTU 13.12 retient les mêmes valeurs. [5]

Fondation	Rectangulaire ou carrées (B/L =1)		Circulaire
$s_\gamma(1)$	1-(0,2B/L)	0,8	0,6
$S_c$	1+ (0,2B/L)	1,2	1,3
$S_q$	1	1	1
(1) conditions drainées seulement			

- **Calcul en conditions non drainées**

En situation non-drainée, en présence d'un sol cohérent fin saturé en tant que sol porteur, les calculs à court terme sont réalisés en se basant sur les contraintes totales. [3]

Voici les paramètres que nous prenons en compte :

- **Cohésion non drainée (Cu) :** Le sol est caractérisé par sa cohésion non drainée.
- Nous prenons :  $C = C_u$  et  $\varphi = 0$ .

Il en résulte  $N_\gamma = 0$ , et  $N_q = 1$ , donc pour une semelle filante :

$$q_1 = C_u N_c(0) + q + \gamma_2 D$$

Avec :

- \*  $N_c(0) = \mathcal{L}b+2$  pour les fondations lisses
- \*  $N_c(0) = 5,17$  pour les fondations rugueuses
- \*  $\gamma_2$  est le poids volumique total du sol latéral.

#### • Calcul en conditions drainées

Le calcul à long terme pour les sols cohérents et le calcul dans les sols pulvérulents sont effectués en conditions drainées, en utilisant les contraintes effectives. [3]

Voici les paramètres de résistance drainés :

- **Cohésion** : Nous utilisons la valeur de  $C'$  (cohésion effective).
- **Angle de frottement interne ( $\varphi'$ )** : Nous utilisons la valeur de  $\varphi'$  (angle de frottement interne effectif).

Dans ce cas, et toujours pour une semelle filante :

$$q_1 = \frac{1}{2} \gamma_1' B N_\gamma(\varphi') + C' N_c(\varphi') + (q + \gamma_2' D) N_q(\varphi')$$

Avec :

$\gamma_1'$  et  $\gamma_2'$  poids volumiques effectifs les valeurs des facteurs de portance sans dimension  $N_c(\varphi')$ ,  $N_q(\varphi')$ , on utilise la solution classique de Prandtl :

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad ; \quad N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \varphi'}$$

## I. 5. Fonctionnement des Fondation superficielles :

### I.5.1. Comportement des fondations superficielles chargées :

Comportement des fondations superficielles est un domaine d'étude crucial en génie civil. Voici quelques éléments pour mieux comprendre ce comportement :

#### ❖ Comportement sous les charges :

- Lorsqu'une charge est appliquée à une fondation superficielle, elle subit un tassement.

Au début du chargement, le comportement est généralement linéaire, avec une proportionnalité entre le tassement et la charge.

- Cependant, deux types de comportement distincts sont observés en fonction de la nature du sol :

**a. Sol mou ou peu compact (sable lâche) :**

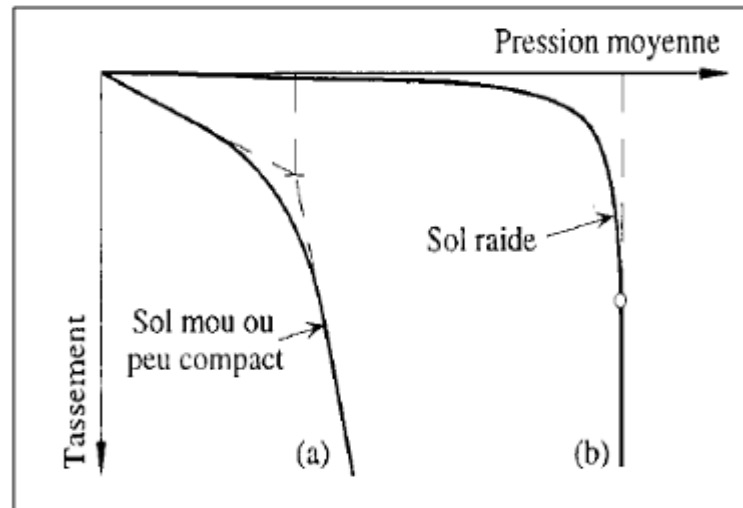
- La courbe de comportement a tendance à augmenter indéfiniment jusqu'à de très grandes déformations.
- Le phénomène de rupture est moins net dans ce cas.
- La charge de rupture est alors définie de manière conventionnelle.

**b. Sol relativement résistant (sable dense) :**

- La courbe pression-tassement présente un palier d'écoulement plastique marqué.
- Le tassement augmente sans augmentation significative de la pression.
- Ce comportement est typique des sols résistants.

Chacune de ces courbes comporte trois phases successives :

1. Une phase quasiment élastique, qui peut survenir pendant la construction ou à la fin de celle-ci, au moment de l'application de la charge de service.
2. Durant cette phase, le sol subit une plastification sous l'effet des charges croissantes, et une surface de glissement se forme progressivement.
3. À l'étape ultime de la plastification, la surface de glissement entraîne la rupture du sol sous la fondation. [11]



**Figure I.6:** Courbes de tassement vertical pour une fondation superficielle (a) pour un sol mou ou peu compact ; (b) pour un sol relativement résistant, K Terzaghi, (1943). [15]

### I.5.2 Mécanismes de rupture d'une fondation superficielle :

Les études théoriques concernant l'état d'équilibre plastique sous les semelles filantes conduisent à des conclusions générales importantes. Lors de la transition d'un état à un autre, la répartition des réactions du sol sur la base de la semelle et l'orientation des contraintes principales dans le sol subissent des variations. Ce processus commence aux bords extérieurs de la fondation et se propage, comme illustré dans les figures I.7 a, I.8 b, I.9c, qui s'appliquent à une semelle continue (ou filante) reposant sur un massif homogène de sable.

Les résultats d'essais sur des semelles rigides révèlent l'existence de trois mécanismes potentiels de rupture, mobilisant un volume limité de sol. [11]

#### I.5.2.a Mécanisme général d'enfoncement des fondations :

Un mécanisme courant dans le comportement des fondations est caractérisé par la formation d'un coin sous la base de la fondation. Ce coin refoule le sol latéralement, créant des lignes de glissement qui débouchent à la surface. Lorsque la fondation s'enfonce, elle provoque généralement un soulèvement du sol, d'autant plus net que la structure est moins déformable. Ce phénomène se produit notamment dans le cas de sols relativement résistants (voir figure I.7.a). [11]

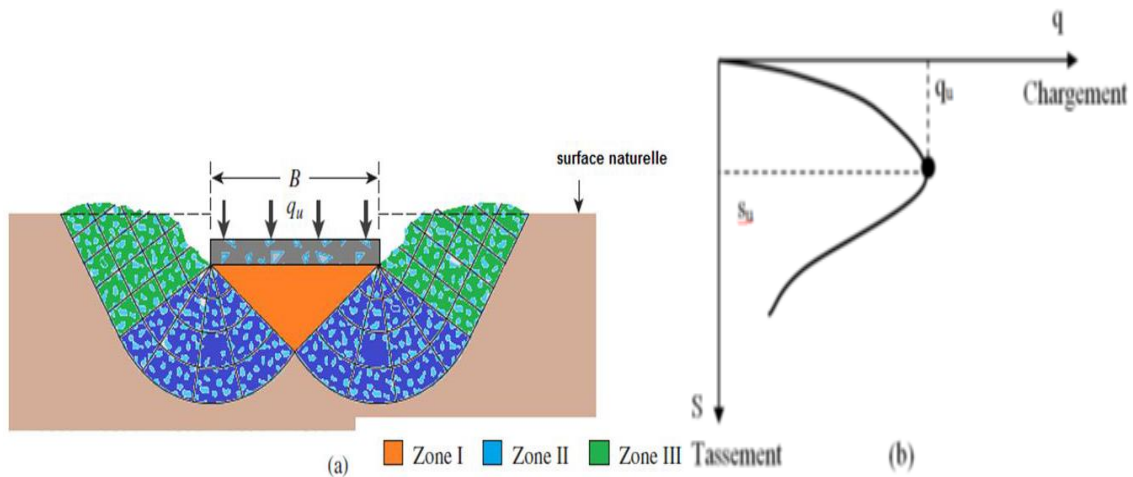


Figure I.7: a Rupture par cisaillement générale. [11]

I.5.2.b Un mécanisme de cisaillement localisé :

Qui ne s'étend qu'au voisinage immédiat de la fondation. Il y a également soulèvement du sol, mais après un enfoncement très important. C'est le cas pour les sols très compressibles comme des sables lâches figure I.8.b. [11]

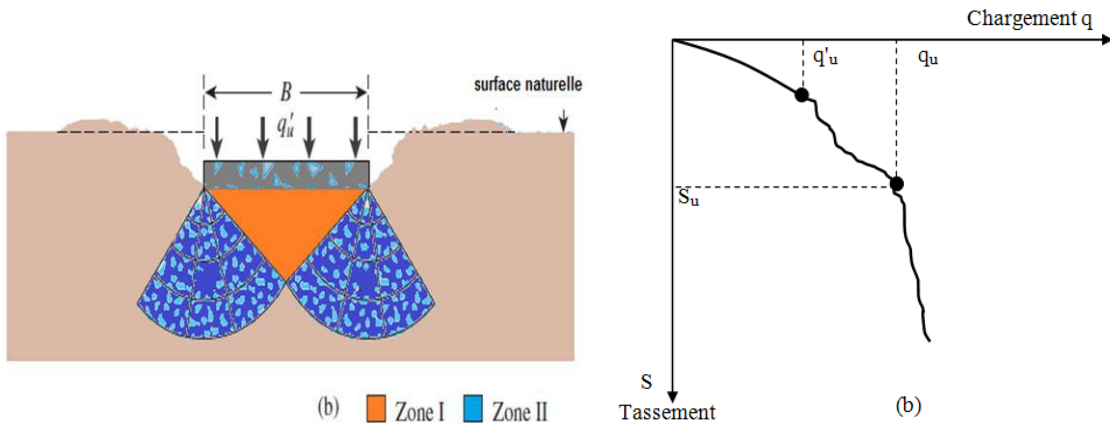


Figure I.8: b Rupture par cisaillement local. [11]

### I.5.2.c Une rupture par poinçonnement :

La fondation pénètre verticalement dans le massif sans perturber le sol qui n'est pas directement sous la fondation figure I.9.c [11]

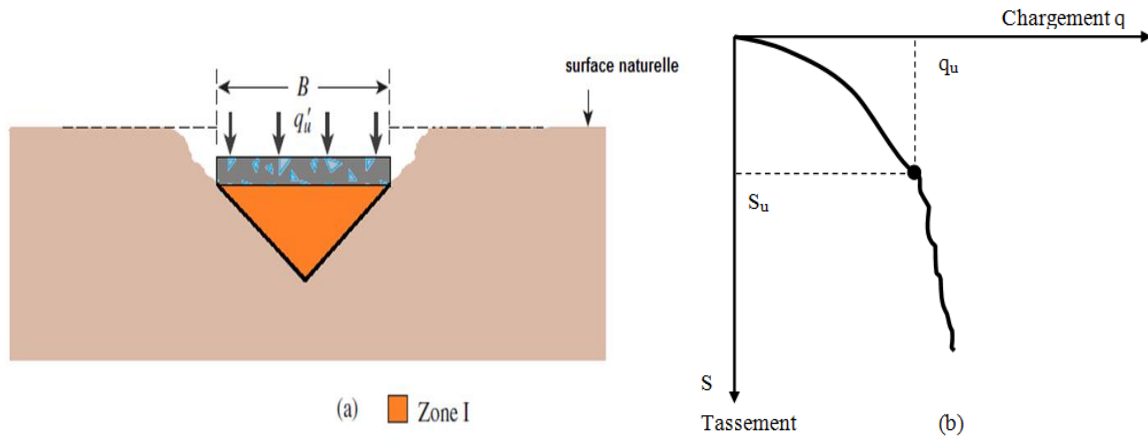


Figure I.9: c Rupture par poinçonnement. [11]

### I.6. Fondation au bord d'une pente :

La capacité portante d'une fondation superficielle située au bord d'une pente est un sujet classique en mécanique des sols. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont montré que lorsque la fondation est proche d'une pente, sa capacité portante est considérablement affectée par cette configuration. En effet, elle devient plus faible que celle d'une fondation posée sur un terrain horizontal

Il existe une diversité d'approches de calcul, dont les plus courantes sont :

- 1) La théorie de poussée/butée des terres sur un écran, combinée au principe de superposition des effets [Meyerhof G (1957)], [Giroud J-P, Tran Vô-Nhiem (1972)], et [Narita K, Yamagushi H (1990)]. [12]
- 2) La théorie du champ des lignes de glissement (ou méthode des caractéristiques de contraintes), limitée aux problèmes plans ou axisymétriques Sokolovski V.N (1942), et [Graham J, Andrews M, Shields D-H (1988)]. [3]

#### 1.6.1. Méthodes théoriques :

1).En 1957, Meyerhof a utilisé la méthode d'équilibre limite pour étudier deux configurations d'une semelle rugueuse par rapport à la pente. Voici les détails :

## 1. Semelle sur la Pente :

- Dans le premier cas, l'auteur examine la capacité portante d'une semelle posée sur la pente.

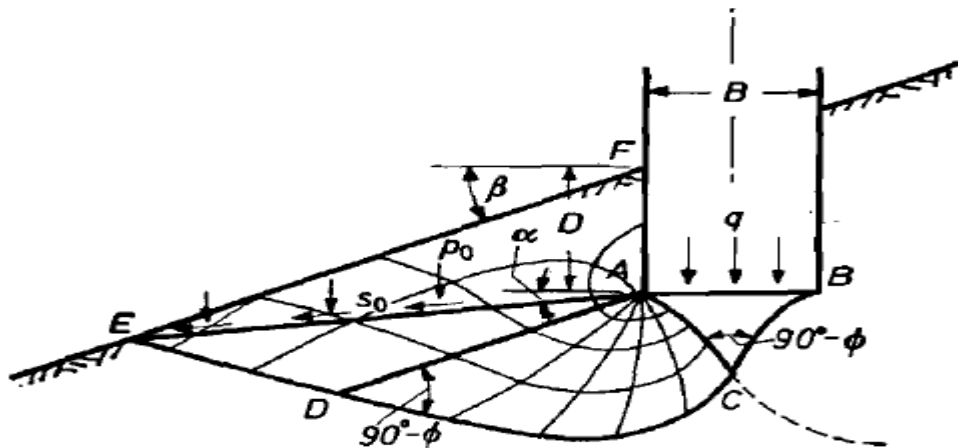
- La semelle est située directement sur la surface inclinée du sol.

## 2. Fondation sur la Surface d'un Talus :

- Meyerhof a proposé une théorie pour déterminer la capacité portante d'une fondation superficielle située sur la surface d'un talus.

- La figure (I.10) illustre la zone plastique développée dans le sol lors de la charge de la fondation.

Cette approche permet d'évaluer la stabilité des fondations dans des conditions de pente et de tenir compte des caractéristiques du sol. [3]



**Figure I.10:** Surface de rupture d'une fondation filante rugueuse située sur une pente d'après Meyerhof (1957) [13]

Sous la fondation filante rugueuse de largeur B située sur un talus Meyerhof a proposé trois zones :

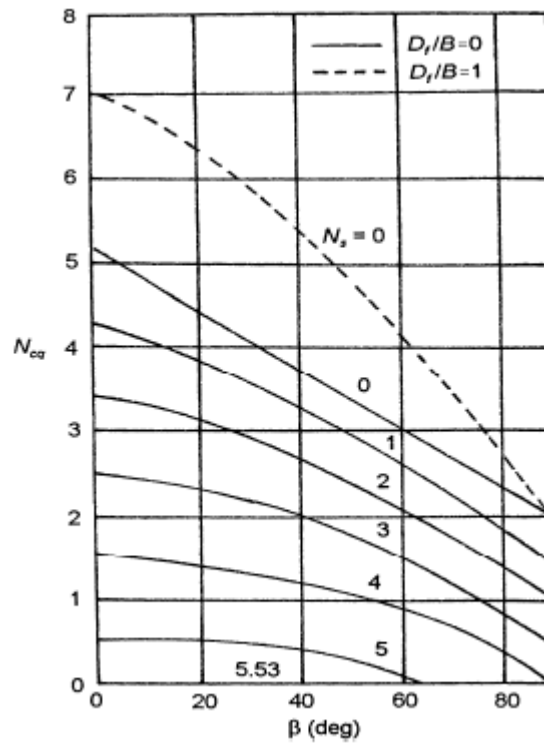
**1. Zone Élastique (ABC) :** Cette zone subit des déformations élastiques et suit les lois de comportement élastique du sol.

**2. Zone de Cisaillement Radial (ACD) :** Dans cette zone, le sol subit un cisaillement radial.

**3. Zone de Cisaillement Mixte (ADE) :** Cette zone présente un mélange de cisaillement radial et de cisaillement tangentiel.

Les efforts normaux et de cisaillement sur le plan AE sont  $P_0$  et  $S_0$  respectivement.

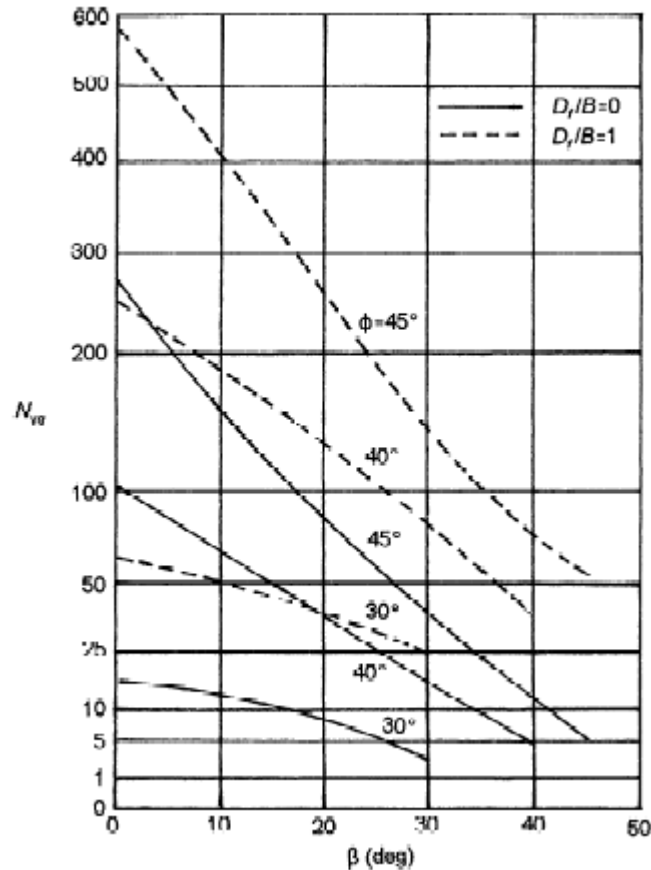
On note aussi que le talus fait un angle  $\beta$  avec l'horizontale. [3]



**Figure I.11:** Variation du facteur de la capacité portante  $Ncq$  pour un sol purement cohérent (fondation sur une pente) d'après Meyerhof (1957) [13]

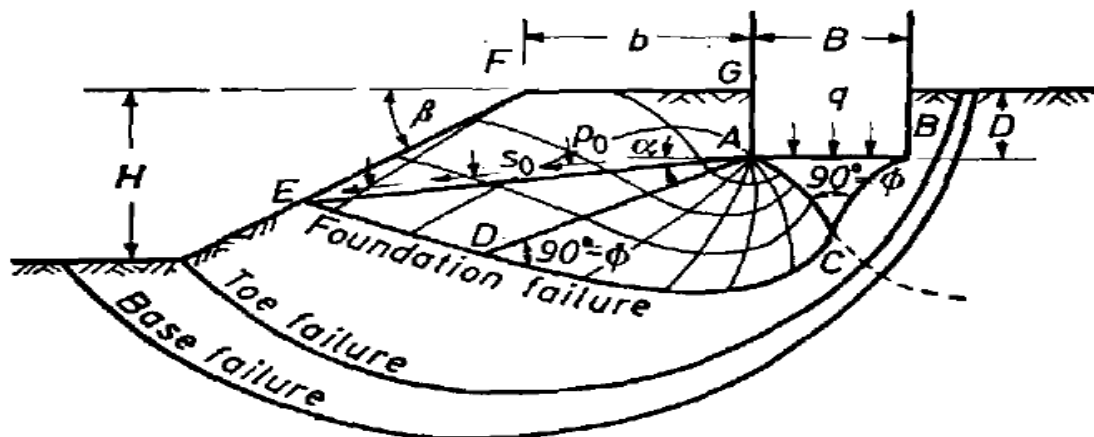
D'une façon semblable pour un sol purement frottant ( $c = 0$ ), la figure (I.12) montre la variation de  $N\gamma q$  avec l'angle  $\beta$  du talus :

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma q}$$



**Figure I.12:** Variation du facteur de portance  $N_{\gamma q}$  pour un sol purement frottant, cas d'une fondation sur pente, d'après Meyerhof (1957) [13]

La figure (I.13) illustre le deuxième cas étudié par Meyerhof (1957) Dans ce cas, il considère une fondation filante rugueuse de largeur  $B$  située au bord d'une pente de hauteur  $H$ . La fondation est placée à une distance  $b$  à partir de la crête de la pente. [3]

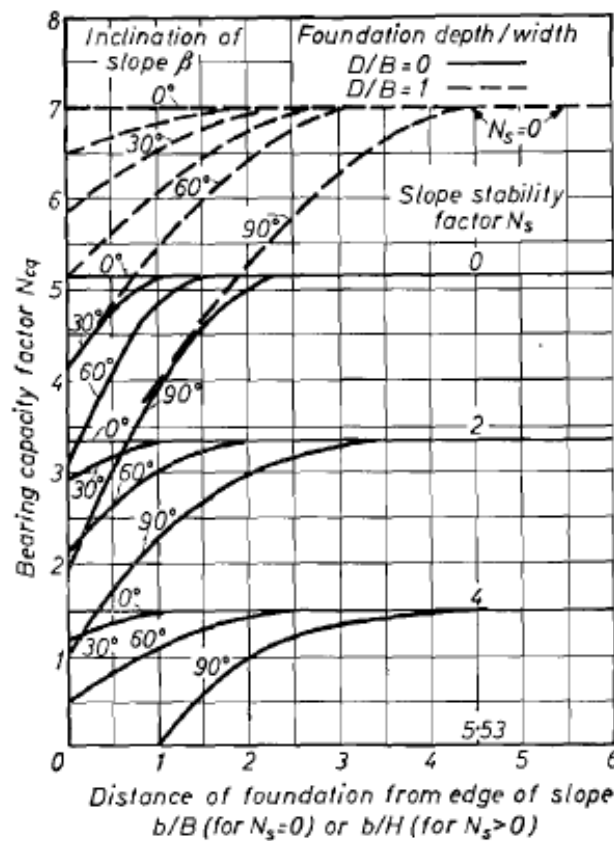


**Figure I.13:** Surface de rupture d'une Fondation filante au bord d'une pente d'après Meyerhof (1957) [13]

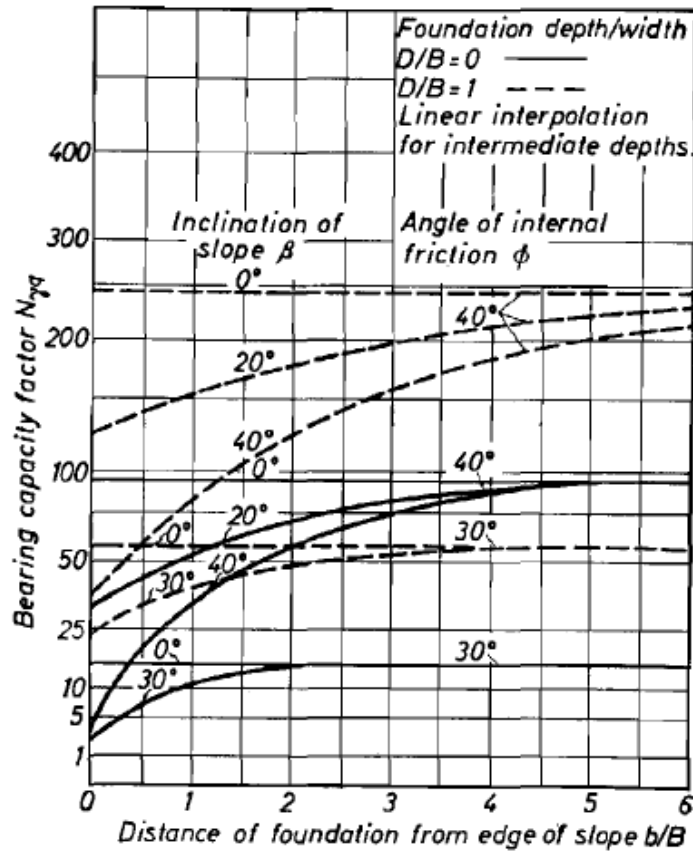
La capacité portante d'une fondation peut être exprimée par l'équation suivante  $q_u = cN_{cq} + 1/2\gamma BN_{\gamma q}$ . Meyerhof a développé des variations théoriques pour les facteurs  $N_{cq}$  dans le cas des sols purement cohérents ( $\varphi=0$ ) et  $N_{\gamma q}$  pour les sols purement frottant ( $C=0$ ). Voici ces variations illustrées sur les figures (I.14) et (I.15) respectivement :

- Pour le sol purement cohérent ( $\varphi=0$ ) :  $q_u = cN_{cq}$
- Pour le sol purement frottant ( $c=0$ ) :  $q_u = \frac{1}{2}\gamma BN_{\gamma q}$

Ces facteurs sont essentiels pour évaluer la capacité portante des fondations dans différents types de sols. [3]



**Figure I.14:** Facteur de portance  $N_{cq}$  de Meyerhof pour un sol purement cohérent (fondation située à proximité d'une pente) d'après Meyerhof (1957) [13]



**Figure I.15:** Facteur de portance  $N_{\gamma q}$  de Meyerhof, pour un sol purement frottant, (fondation située à proximité d'une pente) d'après Meyerhof (1957) [13]

Pour une fondation en crête de talus, Hansen (1970) a proposé la relation de la capacité portante d'une fondation filante.

$$q_{\mu} = cN_c \lambda_{c\beta} + qN_q \lambda_{q\beta} + 1/2 \gamma B N_{\gamma} \lambda_{\gamma\beta}$$

$\lambda_{c\beta}, \lambda_{q\beta}, \lambda_{\gamma\beta}$  : Sont des facteurs de pente.

D'après Hansen :

$$\lambda_{q\beta}, \lambda_{\gamma\beta} = (1 - \tan \beta)^2$$

$$\lambda_{c\beta} = \frac{N_q \lambda_{q\beta} - 1}{N_q - 1} \quad \text{Pour } (\varphi > 0)$$

$$\lambda_{c\beta} = 1 - \frac{2\beta}{\pi + 2} \quad \text{Pour } (\varphi = 0)$$

**I.7. Conclusion :**

La capacité portante des fondations superficielles est un sujet maîtrisé par les ingénieurs géotechniciens, grâce à leur expérience accumulée au fil des années. Plusieurs méthodes ont été proposées par des chercheurs pour calculer les paramètres de portance. La théorie conventionnelle de Terzaghi est couramment utilisée pour estimer la capacité portante des fondations superficielles chargées verticalement, en adoptant les valeurs appropriées des facteurs de portance. Cependant, pour d'autres formes de fondations (rectangulaires, carrées, circulaires, annulaires, etc.) ou des procédés de chargement différents (centré, excentré, incliné), les méthodes classiques ne fournissent des réponses qu'à travers des coefficients de forme empiriques.

Cela suscite l'exploration d'autres approches et techniques pour mieux comprendre la capacité portante.

# Chapitre II

Présentation du logiciel de calcul

OPTUM

---

## Chapitre II : Présentation du logiciel de calcul OPTUM

### II.1. Introduction :

OPTUM est un logiciel de calcul des structures et d'ouvrages par 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 anisotrope.

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.

OPTUM est doté de fonctionnalités tout à fait remarquables pour traiter tous les aspects des structures géotechniques complexes. Il permet de mener des calculs élasto-plastiques et des calculs du type « calcul à la rupture » ou « analyse limite ».

Il existe plusieurs versions ou modules de ce logiciel :

- OPTUM G2 : Destiné aux problèmes bidimensionnels tels que les déformations planes ou les conditions axisymétriques.
- OPTUM G3 : Conçu pour l'analyse des problèmes tridimensionnels.
- OPTUM Cs : Spécialisé dans le calcul des murs et planchers en béton.

Dans ce chapitre, nous aborderons les fonctionnalités et les utilisations de l'application OPTUM G2.

### II.2. Bref historique :

Le projet OPTUM a vu le jour à Copenhague, Danemark, à l'été 2010, où se trouve actuellement son siège social. Les frères Kristian et Jørgen Krabbenhøft, accompagnés d'Andrei Lyamin, ont entrepris le développement d'un logiciel pour éléments finis basé sur une approche totalement nouvelle. Leur vision était claire : mettre à disposition des praticiens en ingénierie des outils d'analyse MEF avancés, sans nécessiter une expertise approfondie en MEF. Pour concrétiser cette vision, une refonte complète de l'approche traditionnelle du MEF était essentielle. En combinant leurs connaissances de l'industrie et

du monde universitaire, le groupe a réussi à donner vie à leur vision et à lancer le premier package commercial en 2014. Depuis lors, OPTUM est utilisé dans plus de 50 pays, et plus de 400 universités intègrent ce logiciel dans leurs activités d'enseignement et de recherche.[1]

### **II.3. Bref aperçu sur la méthode des éléments finis :**

Méthode des éléments finis (MEF) est une technique mathématique utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Elle a été développée dans les années 60 et permet de décrire le comportement global d'une structure complexe à partir de fonctions simples et paramétrées définies pour chaque zone du modèle. Voici les principaux points à retenir sur la méthode des éléments finis :

- **Maillage et Éléments :** Pour appliquer la MEF, on découpe le domaine d'étude en zones élémentaires appelées éléments. Ces éléments sont reliés entre eux en différents points appelés nœuds. Un maillage du domaine permet de définir ces éléments.
- **Équations Discrètes :** La méthode consiste à résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles (EDP) dont on cherche une solution approchée. On obtient ainsi une formulation algébrique du problème initial.
- **Conditions aux Limites :** La MEF comporte des conditions aux limites qui assurent l'existence et l'unicité de la solution. Ces conditions peuvent être de type Dirichlet (valeurs aux bords), Neumann (gradients aux bords) ou Robin (relation gradient/valeurs sur le bord).
- **Applications :** La MEF permet de résoudre numériquement des problèmes complexes tels que le mouvement d'une corde secouée, le comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, ou encore la déformation d'une structure métallique.

La méthode des éléments finis est un outil puissant pour modéliser et résoudre des problèmes physiques et mathématiques dans divers domaines tels que l'ingénierie et les sciences physiques. [2]

## II.4. Présentation de l'OPTUM G2 : [14]

OPTUM G2 est un logiciel complet d'éléments finis conçu pour l'analyse de la stabilité géotechnique et des déformations dans des conditions de contrainte plane ou d'axisymétrie.

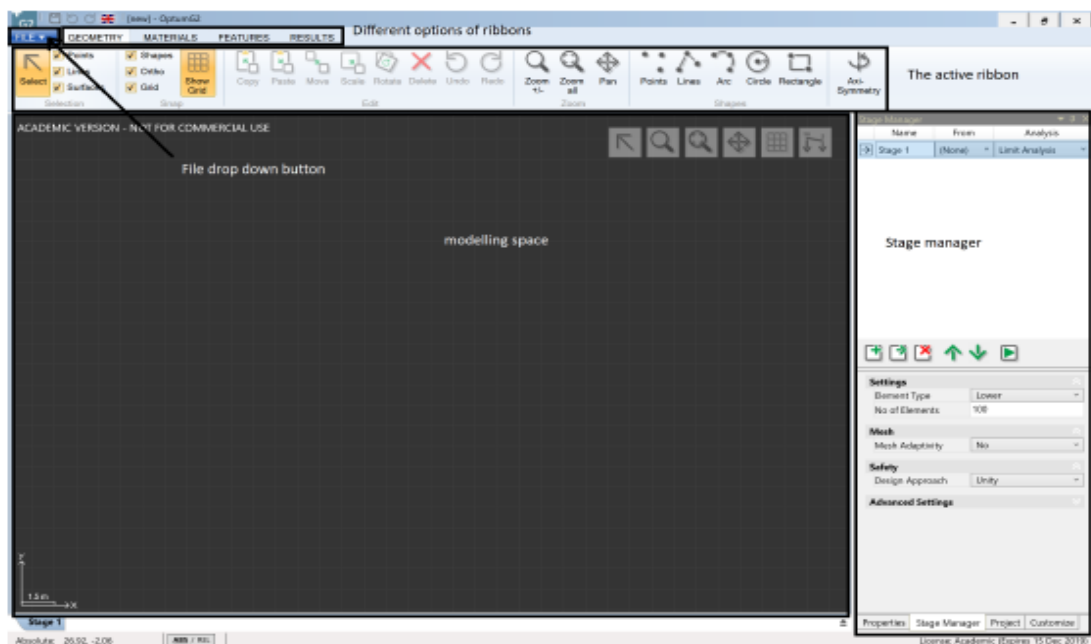
### II.4.1. Interface de démarrage :

Le programme OPTUM G2 contient une interface facile à utiliser, car il affiche tout l'écran au démarrage de l'utilisation, comme le montre la Figure II.1. La figure montre les différents composants présents dans le programme.

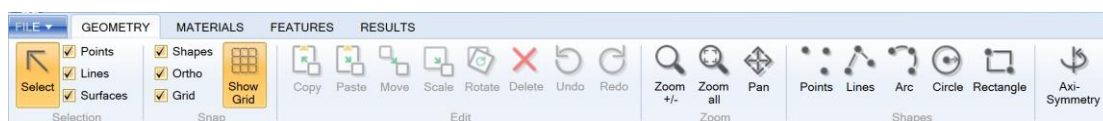
Le programme a les rubans suivants :

- ✚ Géométrie
- ✚ Matériaux
- ✚ Caractéristiques
- ✚ Résultats

Ces rubans sont représentés respectivement sur la Figure II.2, la Figure II.3, la Figure II.4 et la Figure II.5.



**Figure II.1:** Une vue plein écran de l'interface graphique OPTUM G2



**Figure II.2:** Ruban de géométrie dans OPTUM G2

Dans le ruban Fonctionnalités, les fonctionnalités telles que la charge, la plaque, etc. peuvent être attribuées au dessin.

Géométrie et le ruban Résultats affiche les résultats du calcul. Dans le régleur, c'est possible de créer et de gérer les différentes étapes de la simulation.

Dans la sous-section suivante, chacun de ces rubans et ce qu'ils font seront expliqués.

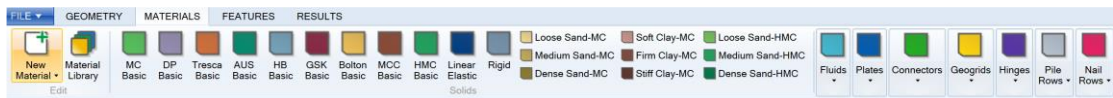
**II.4.2 Géométrie :**

Dans OPTUM G2, le ruban Géométrie est l'endroit où vous pouvez créer la géométrie souhaitée pour résoudre un problème de valeurs limites géotechniques.

Suivant des options sont disponibles pour dessiner la géométrie souhaitée :

- Points
- Lignes
- Arc
- Cercle
- Rectangle

Il existe également la possibilité d'importer du DXF pour dessiner la géométrie. Il est également possible pour importer une image avec une hauteur et une largeur spécifiées pour dessiner la géométrie à partir de celle-ci.



**Figure II.3:** Ruban de matériau dans OPTUM G2



**Figure II.4:** Ruban de fonctionnalités dans OPTUM G2

Ce programme peut également effectuer une analyse de déformation plane et une analyse de symétrie axiale, ce qui peut être déterminé Dans cette cassette.

**II .4.3. Caractéristiques :**

Les charges, les conditions aux limites et les éléments structurels sont placés dans le ruban « Caractéristiques ». Chacun des ceux-ci peuvent être appliqués à n'importe quelle ligne (ou point) en cliquant sur la ligne et en cliquant sur le bouton souhaité.

Dans le ruban « Fonctionnalités », les fonctionnalités suivantes peuvent être vues :

Débit BC	Consolidation BC
Prise en charge	Charges
Ancrages	Structurel
Maille	Autre

Les fonctionnalités telles que le support, les charges et autres qui sont pertinentes ici seront expliquées.

#### II .4.3.1.Prise en charge :

Cette catégorie contient les fonctionnalités suivantes :

- Complet : Cette option contraint le déplacement dans toutes les directions le long de la ligne sélectionnée.
- Normal : le déplacement normal à la ligne sélectionnée est attribué à zéro.
- Tangentiel : les déplacements le long de la ligne sont mis à zéro.
- Fixités standard : Cette option applique le « Support normal » à toutes les lignes verticales et le « Support complet » support » aux lignes horizontales.
- Plaque BC : cette fonctionnalité attribue des fixités verticales, horizontales et de moment à un point donné.
- Le déplacement peut être soit fixe, soit libre, ou avoir une valeur donnée

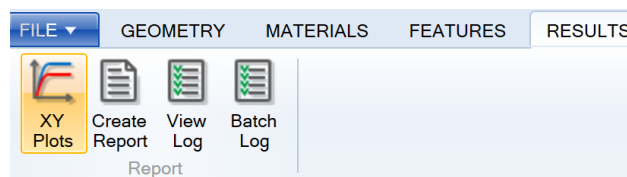


Figure II.5: Ruban de résultats dans OptumG2

#### II.4.3.2.Charges :

OPTUM G2 possède six fonctionnalités différentes qui peuvent être classées en deux catégories : Charges fixes (indiquées en vert) et charges multiplicatrices (indiquées en rouge). Les charges multiplicatrices ont une importance dans le Analyse limite où ils sont agrandis pour atteindre une charge limite. La charge fixe exerce une charge fixe charge dans tous types d'analyses.

### II.4.3.3.Structurel :

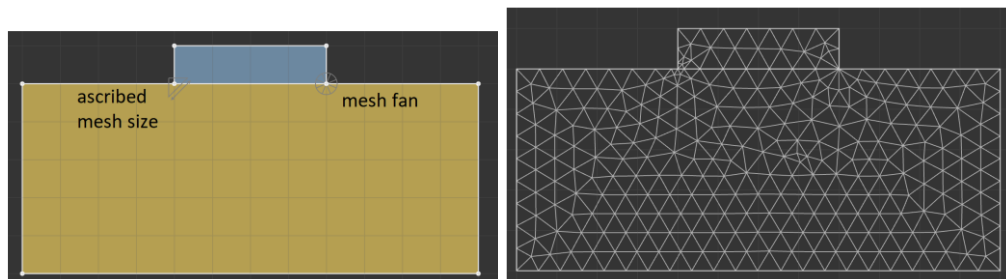
Cette catégorie présente les caractéristiques suivantes :

- Plaques : Ce sont des éléments de poutre qui sont utilisés pour modéliser des éléments structurels minces tels que comme des palplanches. Les ensembles de matériaux possibles disponibles seront présentés ultérieurement.
- Géogrille : ce type d'éléments de ferme est utilisé pour modéliser des géogrilles et des ancrages injectés. Les ensembles de matériaux possibles pour la modélisation des géogrilles seront présentés ultérieurement.
- Pile Row : éléments spéciaux pour tenir compte de la tridimensionnalité du problème.
- Rangée de clous : il s'agit d'une fonctionnalité similaire à la rangée de pieux, mais au lieu du pieu, les clous sont définis.

### II.4.3.4.Maillage :

La catégorie maillage contient deux fonctionnalités :

- Mesh Fan : ces fonctionnalités peuvent être appliquées à des points qui créent un éventail d'éléments autour le point (comme le montre la Figure II. 6).
- Taille du maillage : cette fonctionnalité peut être appliquée à tout type de géométrie où la taille du maillage peut être précisée au préalable.



(a) Fonction de ventilateur de maillage  
et de taille de maillage

(b) Maillage résultant

**Figure II.6:** Application du maillage et de l'éventail de maillage à une semelle directe.

### II.4.3.5.Autre :

Cette catégorie contient deux fonctionnalités :

- Point de résultat : cette fonctionnalité enregistre les résultats à un point donné à des fins de traçage ultérieur.

- Section Résultat : Cette fonctionnalité agit comme une plaque virtuelle où les forces de section sur cette Les plaques sont calculées et peuvent être tracées.

#### II.4.4.Régisseur de scène :

Dans cette fenêtre, il est possible de gérer et d'exécuter les différentes étapes de l'analyse (voir Figure II. 7). La partie supérieure de la fenêtre montre les différentes étapes et le type d'analyses attribuées pour eux. La moitié inférieure de la fenêtre contient le réglage de l'étape sélectionnée. Entre ces deux boutons de commande sont situés et permettent d'ajouter, de supprimer, de déplacer et d'exécuter le fichier sélectionné analyse.

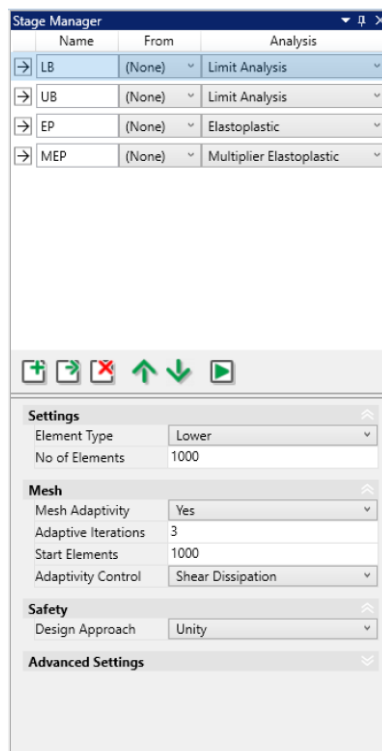


Figure II.7: Une vue de la fenêtre du gestionnaire de scène

#### II.4.5.Modèles de matériaux :

Les matériaux disponibles dans OPTUM G2 peuvent être attribués à six catégories d'éléments différentes :

- Solides : Matériaux solides tels que le sol, la roche et le béton et interfaces entre les matériaux
- Fluides : pour la modélisation des fluides
- Plaques : pour la modélisation de structures en acier
- Géogrilles : pour la modélisation de géogrilles

- Connecteurs : pour la modélisation d'ancrages à extrémité fixe et de connecteurs plaque à plaque
- Charnières : pour la modélisation des charnières

Dans ce travail, des modèles rigides, élastiques linéaires, de Mohr-Coulomb et de Tresca ont été souvent utilisés. La description et les caractéristiques pertinentes de ces modèles seront discutées et présentées dans les sous-sections suivantes :

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| -Rigide                     | -Tresca                                   |
| - Élastique Linéaire        | -Cisaillement anisotrope non drainé (AUS) |
| -Mohr-Coulomb               | -GSK                                      |
| - Drucker-Prager            | -Boulonner                                |
| -Hoek-Brun                  | - Argile à came modifiée                  |
| - Durcissement Mohr-Coulomb |   |

Nous fournissons une description de ces modèles dans les sous-sections suivantes :

#### II.4.5.1.Modèle général :

Le modèle général pour les modes de drainage des matériaux se décline en trois catégories :

- |          |                    |             |
|----------|--------------------|-------------|
| - Drainé | -Drainé/non drainé | -Non poreux |
|----------|--------------------|-------------|

En choisissant le type « Drainé/Non drainé » et en choisissant l'analyse « court terme » dans Stage Manager, il est possible d'effectuer une analyse sans drainage.

#### II.4.5.2.Rigide :

Ce type de matériau décrit un matériau parfaitement rigide sans aucune limitation de résistance.

#### II.4.5.3.Elastique linéaire :

Les matériaux élastiques linéaires suivent la loi de Hooke, qui définit un matériau indéfiniment résistant avec une relation linéaire entre la déformation et la contrainte effective. Dans le programme, il est possible d'utiliser deux ensembles de paramètres pour le module de déformation :

- |                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| • Ensemble A :             | Ensemble B :             |
| • Module de Young, E [MPa] | Module de masse, K [MPa] |



**II.4.5.5. Tresca :**

Le modèle Tresca fait partie des modèles simples et connus utilisés en géotechnique.

Le modèle utilisé dans l'OPTUM G2 suit les principes théoriques de base, comme mentionné, pour par exemple, dans Grande et al. [2016].

**II.4.5.5.1 Rigidité :**

Le modèle fonctionne avec un ensemble de paramètres élastiques simples non drainés, à savoir  $E_u$  ou  $G$ .

**II.4.5.5.2 Fonction de rendement :**

La fonction de rendement pour le modèle Tresca est définie comme :

$$F = |\sigma_1 - \sigma_3| - 2 \cdot S_u$$

**Conclusion :**

Le logiciel de calcul OPTUM offre aux ingénieurs géotechniciens un outil puissant et polyvalent pour résoudre une gamme étendue de problèmes de génie civil et de géotechnique. Avec ses fonctionnalités avancées, telles que la modélisation tridimensionnelle, la prise en compte des non-linéarités, et la simulation multiphysique, OPTUM permet une analyse précise et efficace des structures et des conditions du sol. Son interface conviviale et ses capacités d'optimisation des designs en font un choix idéal pour les professionnels cherchant à atteindre les meilleures performances géotechniques dans leurs projets.

En somme, OPTUM représente une solution complète pour les défis complexes rencontrés dans le domaine de la géotechnique, offrant des résultats fiables et des solutions innovantes pour les ingénieurs du monde.

# Chapitre 03

Etude numérique

## Chapitre III : Etude numérique

### III.1. Introduction :

Ce chapitre se penche sur le calcul numérique de la capacité portante d'une fondation filante soumise à un déplacement vertical au bord d'une pente. L'étude utilise le code OPTUM. Voici les points clés de cette étude : L'étude portera sur la variation des paramètres incluant l'angle d'inclinaison de la pente  $\beta$ , la distance entre la fondation et la crête de talus dans le but :

- Évaluer la capacité portante de la fondation près de la pente.
- Prendre en compte les coefficients réducteurs dus à la proximité de la pente.

### III.2. Présentation du cas étudié :

L'étude de l'influence de l'excentricité de la charge sur la capacité portante d'une fondation superficielle est essentielle en géotechnique. Voici les points clés de cette problématique :

- La fondation est une semelle filante non encastrée, rigide et rugueuse.
- Elle repose sur la surface d'un sol pulvérulent.
- La largeur de la fondation est  $B = 1$  mètre.
- La distance entre la fondation et le bord de la pente est  $D$  encastrement  $= 0$
- Le problème est étudié dans un modèle géométrique plan (2D).
- La largeur du modèle est  $20B$  et la hauteur est  $10B$ .
- La figure 3.1 illustre la définition géométrique retenue pour cette étude.

- a) terrain plat  $\beta = 0$  :
- $\alpha = 0^\circ$  ;
- $\alpha > 0^\circ$  (à droite) =  $+5^\circ$  ;  $+10^\circ$  et  $+20^\circ$  ;
- $\alpha < 0^\circ$  (à gauche) =  $-5^\circ$  ;  $-10^\circ$  et  $-20^\circ$ .
- b) une pente de  $\beta = 1/4$  :
- $\alpha = 0^\circ$  ;
- $\alpha > 0^\circ$  (à droite) =  $+5^\circ$  ;  $+10^\circ$  et  $+20^\circ$  ;
- $\alpha < 0^\circ$  (à gauche) =  $-5^\circ$  ;  $-10^\circ$  et  $-20^\circ$ .
- c) une pente de  $\beta = 1/3$  :
- $\alpha = 0^\circ$  ;

$\alpha > 0^\circ$  (à droite) =  $+5^\circ$  ;  $+10^\circ$  et  $+20^\circ$  ;

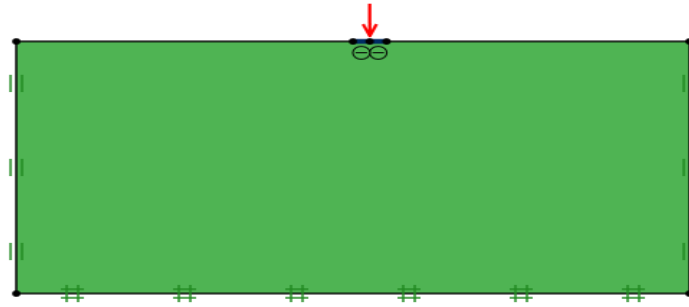
$\alpha < 0^\circ$  (à gauche) =  $-5^\circ$  ;  $-10^\circ$  et  $-20^\circ$ .

d) une pente de  $\beta = 1/2$  :

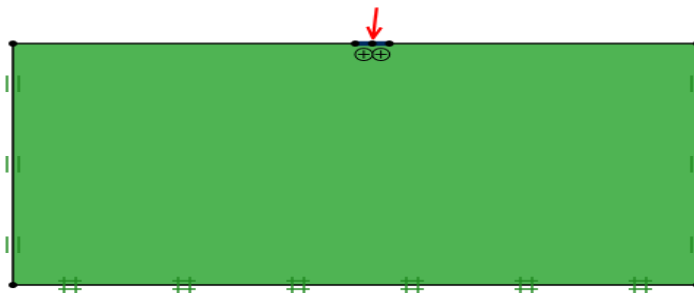
$\alpha = 0^\circ$  ;

$\alpha > 0^\circ$  (à droite) =  $+5^\circ$  ;  $+10^\circ$  et  $+20^\circ$  ;

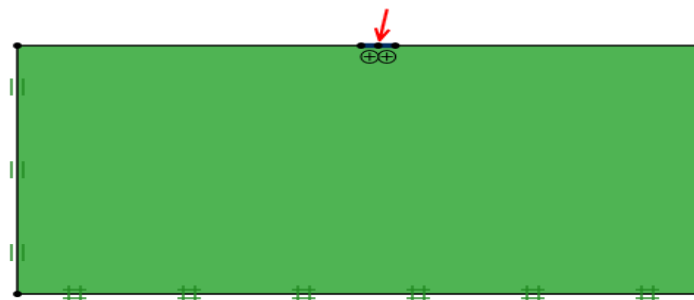
$\alpha < 0^\circ$  (à gauche) =  $-5^\circ$  ;  $-10^\circ$  et  $-20^\circ$ .



**a.1.** Surface horizontale avec  $\alpha = 0$ .

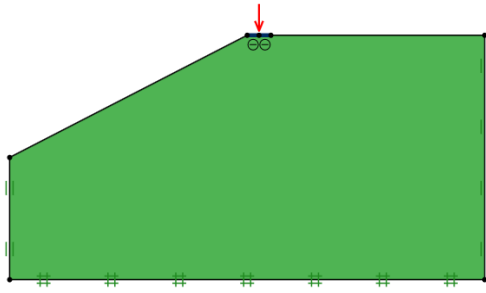


**a.2.** Surface horizontale avec  $\alpha = +5^\circ$ .

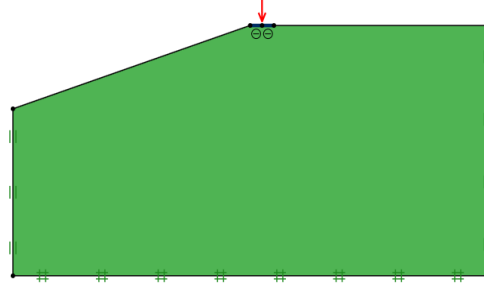


**a.3.** Surface horizontale avec  $\alpha = +10^\circ$ .

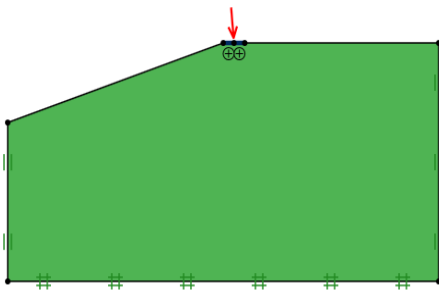
**Figure III.3:** La définition géométrique pour une surface horizontale.



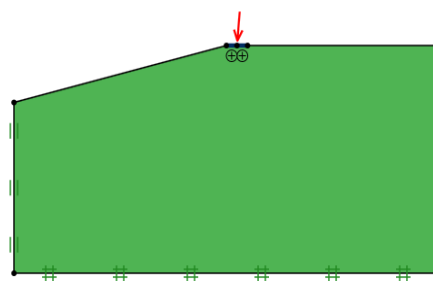
a) une pente avec  $\beta = 1/2$  et  $\alpha = 0$ .



b) une pente avec  $\beta = 1/3$  et  $\alpha = 0$ .



c) une pente avec  $\beta = 1/3$  et  $\alpha = -5^\circ$ .



d) une pente avec  $\beta = 1/4$  et  $\alpha = +5^\circ$ .

**Figure III.4:** La définition géométrique pour une pente.

### III.3. Caractéristiques générales :

La procédure d'entrée des caractéristiques générales se déroule en suivant les Étapes suivantes :

#### III.3.1. Géométrie :

Lorsqu'OPTUM G2 est lancé, l'onglet Géométrie est automatiquement sélectionné. Cet onglet propose une variété d'outils pour définir et manipuler la géométrie. Vous pouvez le visualiser sur la figure III.3. [10]



**Figure III.5:** Ruban de géométrie. [10]

### III.3.2. Conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont choisies comme suivant :

- Les déplacements horizontaux sont interdits le long des bords latéraux de la construction.
- La base de la construction ne doit subir aucun déplacement, ce qui signifie qu'elle doit être entièrement fixe dans cette région. [10]

### III.3.3. Caractéristiques des matériaux :

#### a) Caractéristiques de Sol

Le sol est régi par un critère élasto-plastique où la loi de comportement de Mohr - Coulomb Model est adoptée.

Les propriétés du sol sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau III 1:** Propriétés de sol.

Paramètres	Désignation	Valeurs
Poids volumique apparent	$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18
Poids volumique sature	$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20
Module de déformation	E (kN/m <sup>2</sup> )	30000
Coefficient de poisson	$\nu$	0.25
Cohésion	C (kN/m <sup>2</sup> )	5
Angle de frottement Interne	$\varphi$ (°)	25

#### b) Caractéristiques de la fondation

La fondation est traitée comme un élément poutre et pour que la fondation soit rigide, on a choisi une largeur égale à 1m et la hauteur = 0.2m.

### III.3.4. Génération du Maillage :

Ce type d'analyse est atypique dans le sens où il n'implique aucune physique mais génère uniquement un maillage.

#### Paramètre :

Cette catégorie contient un seul champ :

**Nombre d'éléments** : nombre approximatif d'éléments dans le maillage.

De plus, le maillage sera affecté par la présence éventuelle de tailles de maillage et de ventilateurs de maillage. Spécifié via les outils appropriés dans le ruban Fonctionnalités

#### Remarque :

Toutes les analyses impliquent la génération automatique d'un maillage. Ainsi, le type d'analyse Maillage est uniquement destiné à évaluer le maillage éventuel qui serait utilisé dans une analyse avec le même maillage paramètres

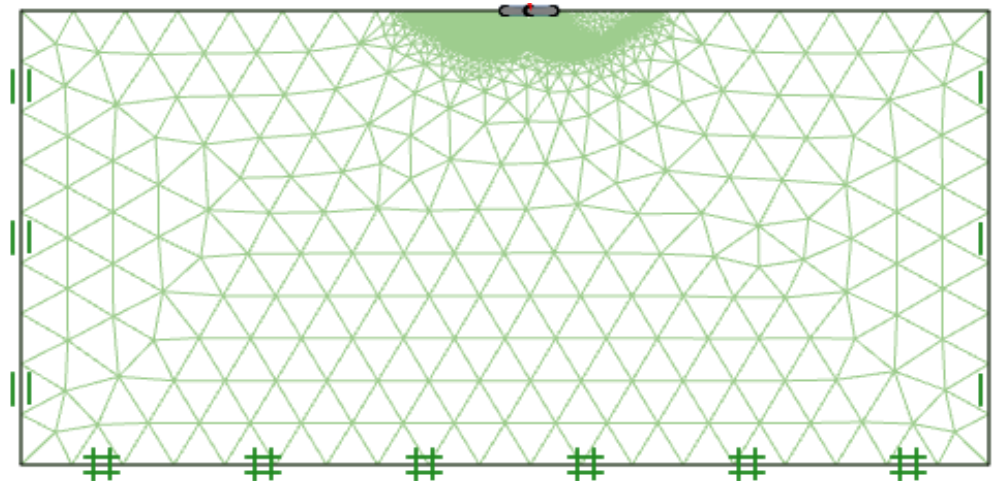


Figure III.6: Maillage après le calcul.

### III.3.5. Conditions initiales :

Après l'élaboration du modèle géométrique et la création du réseau d'éléments finis, il est impératif de définir l'état initial des contraintes ainsi que la disposition initiale. Les conditions de départ se déclinent en deux variantes : une destinée à la production des pressions interstitielles de départ (mode des conditions hydrogéologique) et l'autre pour déterminer la disposition géométrique de départ et élaborer le domaine des contraintes effectives de départ (mode de configuration géométrique). [10]

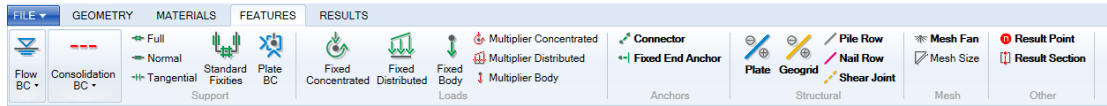


Figure III.7: conditions initiales [10]

### III.3.6. Calculs

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

#### a) Général :

Nous ouvrons la fenêtre du stage manager, puis saisissons les paramètres que nous souhaitons saisir, notamment :

##### Le premier cas :

- Element type =15-node Gauss
- No of elements=10000
- Start elements=2000

##### Le deuxième cas :

Element type =lower et upper

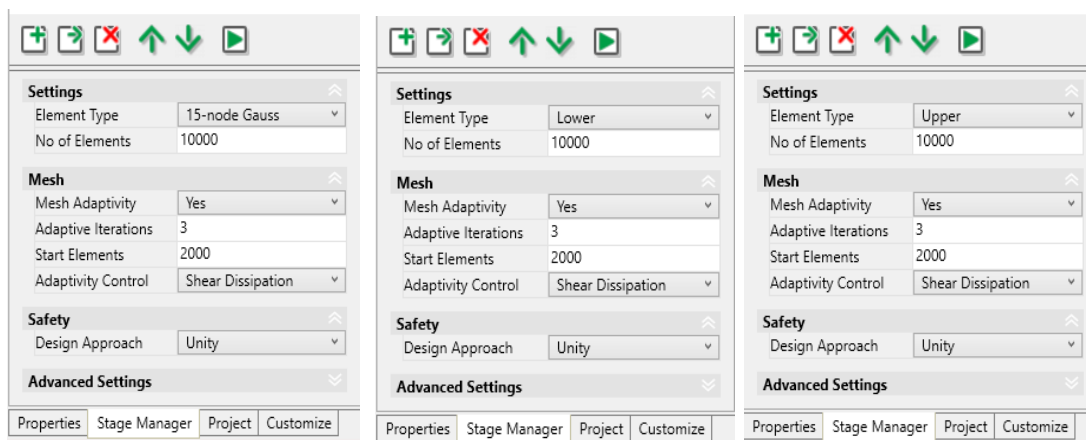


Figure III.8: Une vue de la fenêtre du gestionnaire de scène

Puis on appuie sur : Run analyse, Logiciel commence à calculer.

#### b) Calcul

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

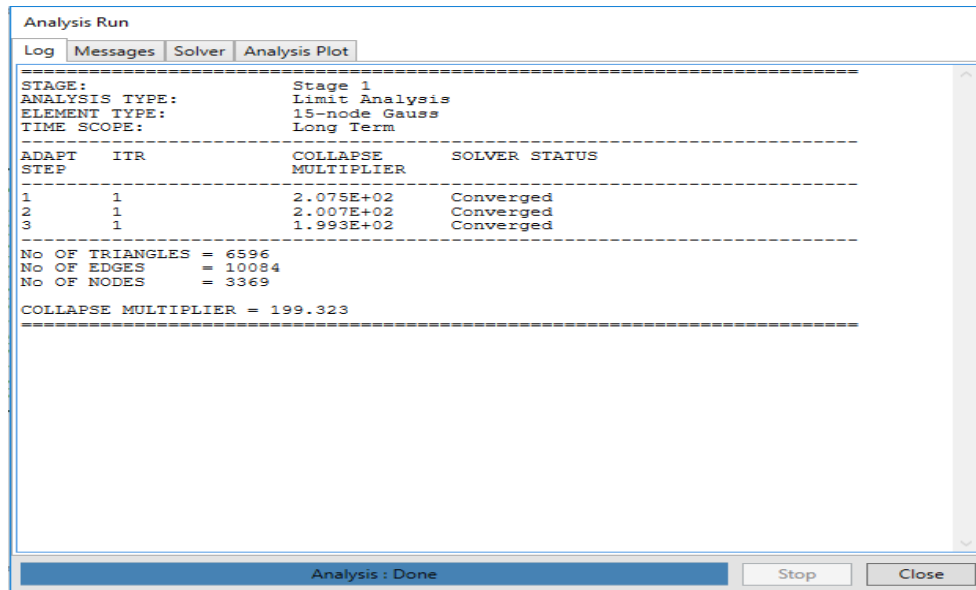


Figure III.9: Fenêtre l'évolution du calcul.

### III.3.7. Application numérique

#### 1) charge sur terrain horizontal

**Le premier cas :** Element type =15-node Gauss

$$q_u = \frac{F}{S} + \frac{\gamma_{\text{béton}} * h}{S}$$

$$q_u = \frac{199.251}{1 * 1}$$

$$q_u = 199.251 \text{ kN/m}^2$$

**Le deuxième cas :** Elément type =lower et upper

$$\frac{F_{\text{lower}} + F_{\text{upper}}}{2} = \frac{192.069 + 204.175}{2} = 198.122 \text{ kN}$$

$$q_u = \frac{F}{S} + \frac{\gamma_{\text{béton}} * h}{S}$$

$$q_u = \frac{198.122}{1 * 1}$$

$$q_u = 198.122 \text{ kN/m}^2$$

**2) Calcul théorique de la capacité portante (selon Terzaghi, Meyerhof et Hansen) On donne**

$$Q_u = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} + \gamma D N_q + c N_c$$

**D'après Terzaghi :**

On a :  $N\gamma = 8.34$  ;  $Nc = 25.13$  et  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^2$

Donc :

$$q_u = 1/2 * 18 * 1 * 8.34 + 5 * 25.13$$

$$= 200.71 \text{ kN/m}^2$$

**D'après Hansan :**

On a :  $N\gamma = 2.8$  ;  $Nc = 20.7$

$$q_u = 1/2 * 18 * 1 * 2.8 + 5 * 20.7$$

$$q_u = 128.7 \text{ kN/m}^2$$

**D'après Myhrof :**

On a :  $N\gamma = 6.77$  ;  $Nc = 20.72$

$$Q_u = 1/2 * 18 * 1 * 6.77 + 5 * 20.72$$

$$Q_u = 164.53 \text{ kN/m}^2$$

**Remarque :**

D'après les résultats obtenus, il est remarquable que la capacité portante calculée numériquement se rapproche des valeurs obtenues par différentes théories.

**III.4. RESULTATS :**

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

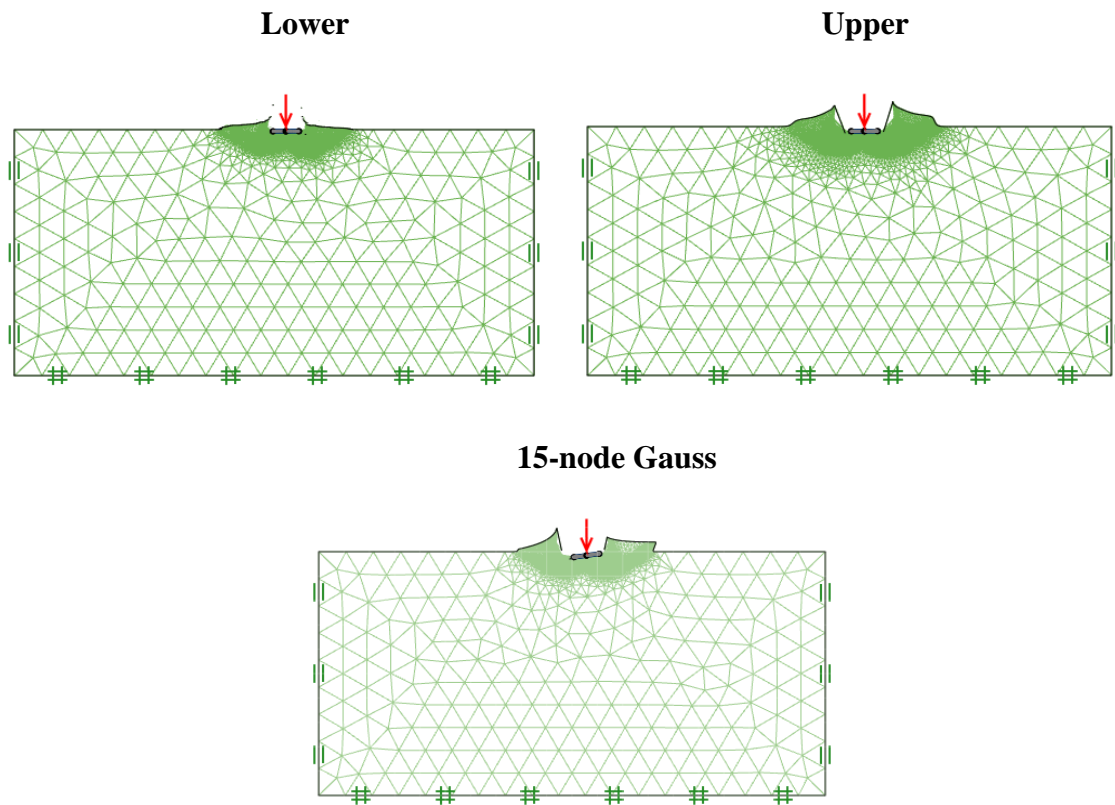


Figure III.10: Mécanismes de rupture "surface horizontale".

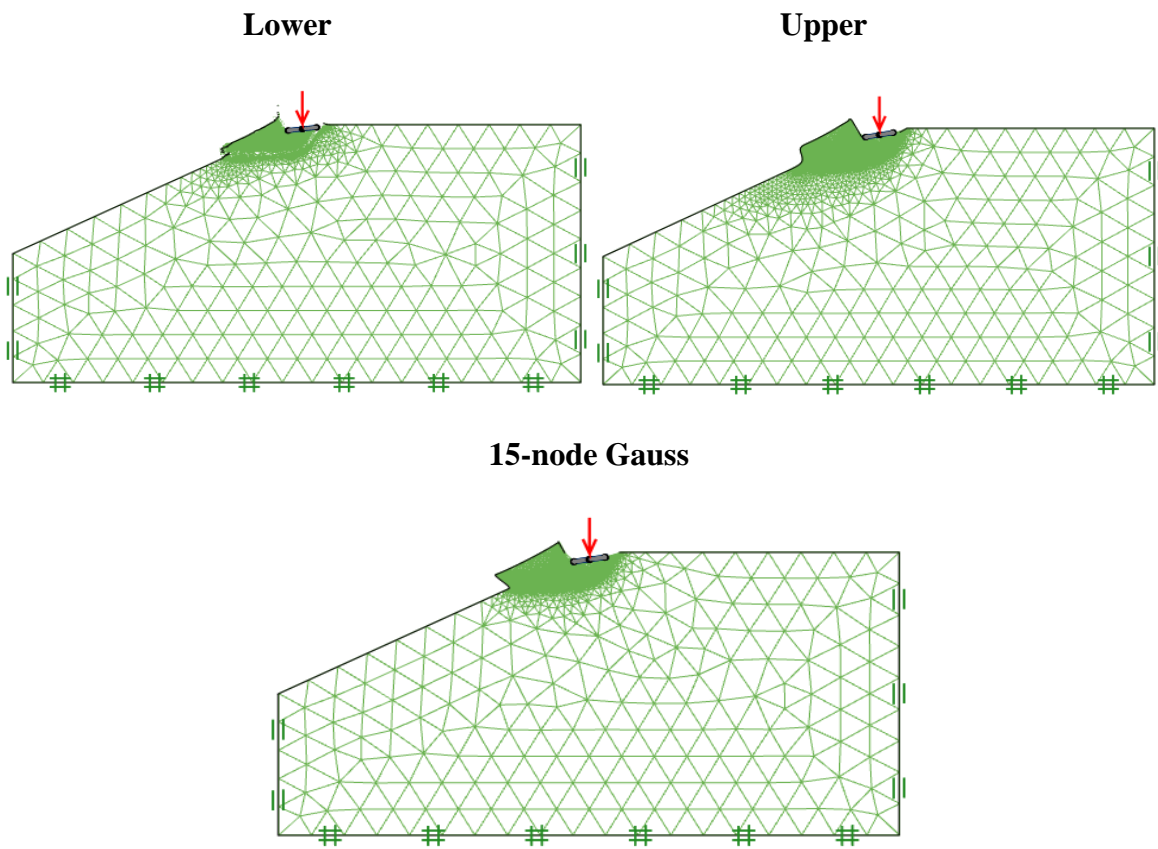


Figure III.11: Mécanismes de rupture "d'une pente (1/2)".

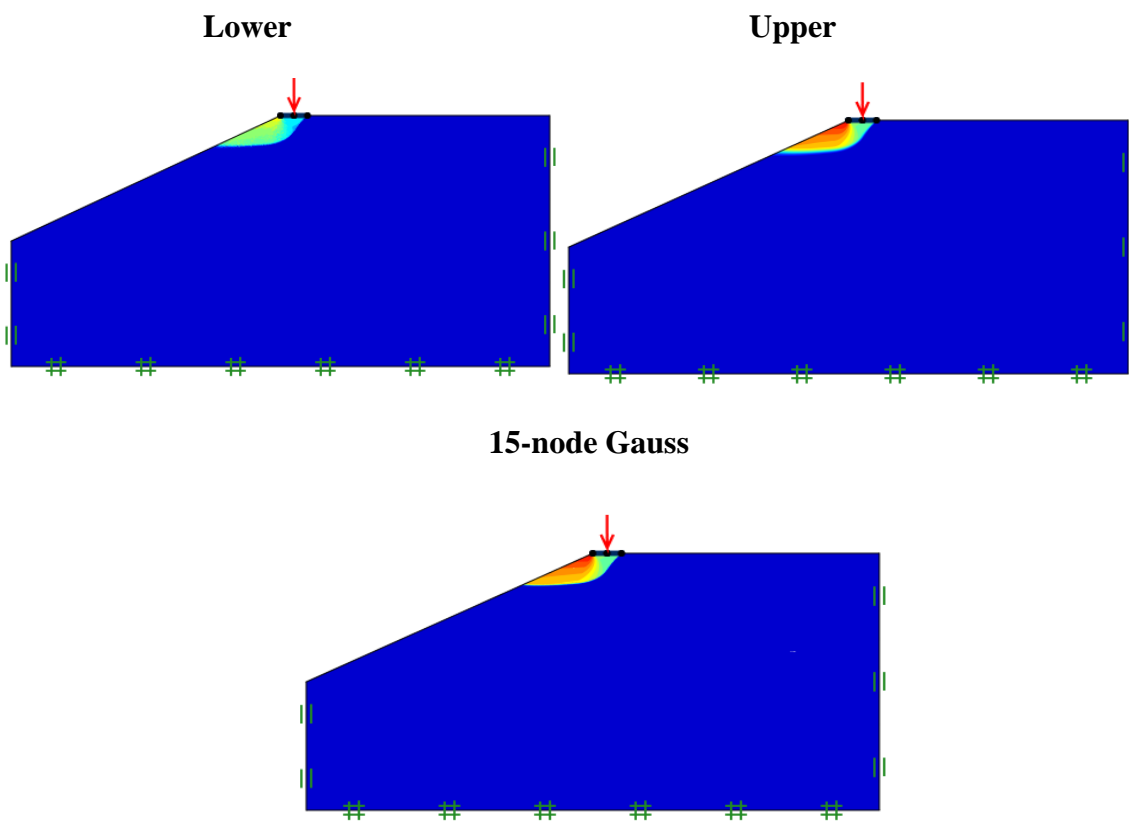
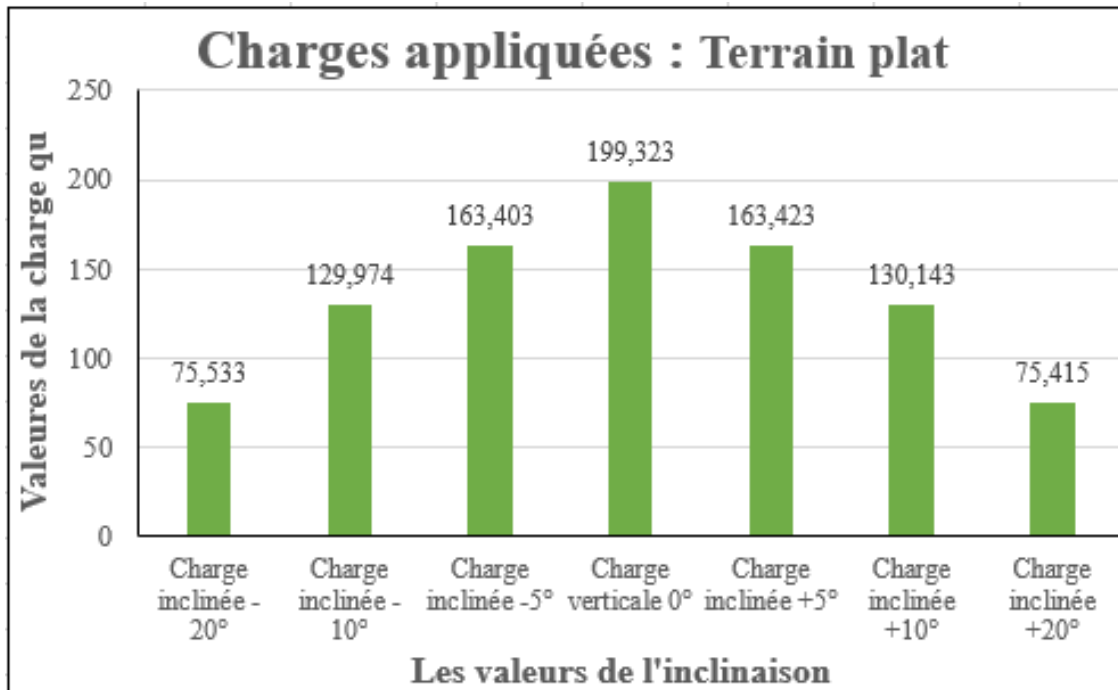


Figure III.12: Déplacements verticaux.

1) Sur terrain horizontal :

15-node Gauss



Lower et Upper

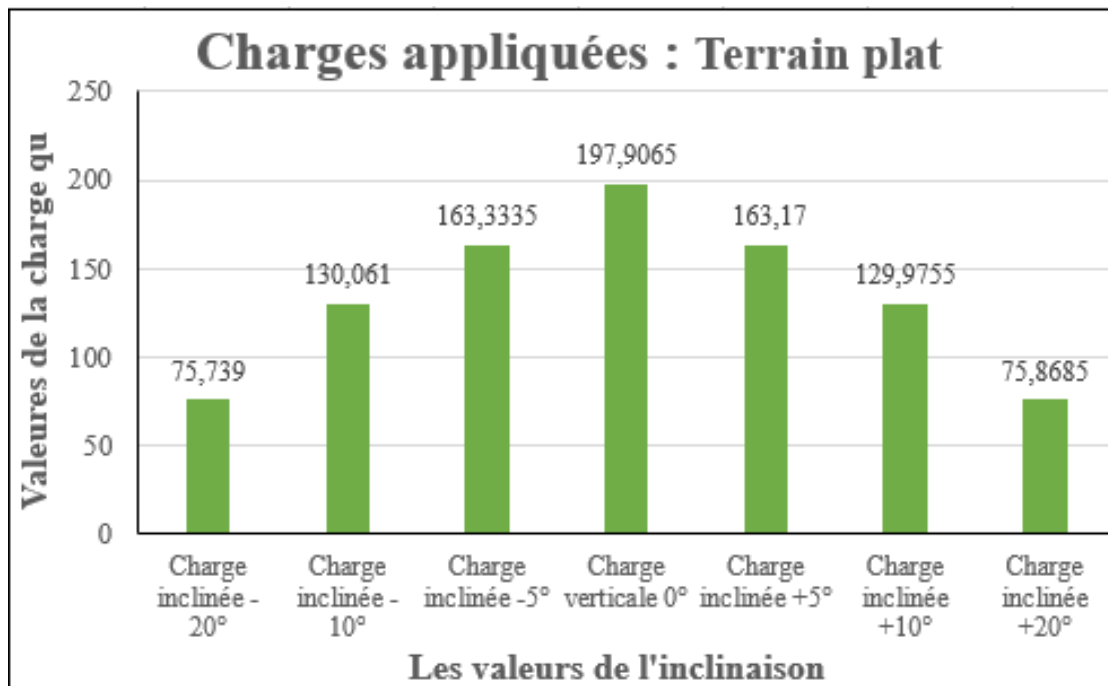
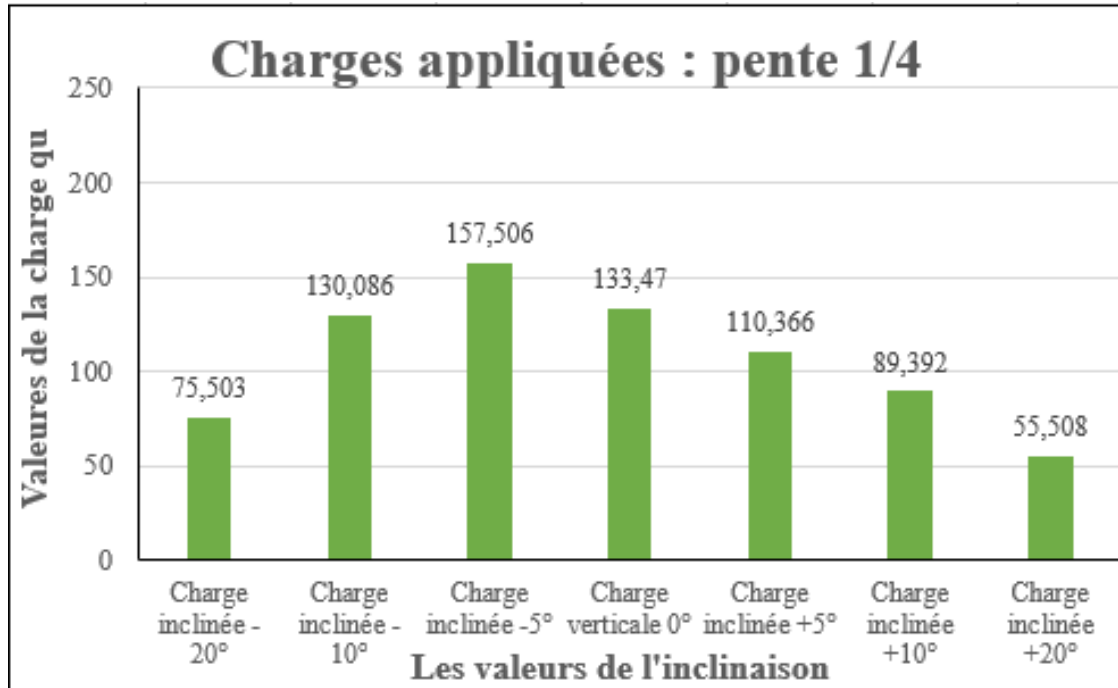


Figure III.13: Variation de l'influence de l'inclinaison de la charge sur la capacité portante : cas terrain horizontal.

2) Au bord d'une pente :

Pente 1/4 :

15-node Gauss



Lower et Upper

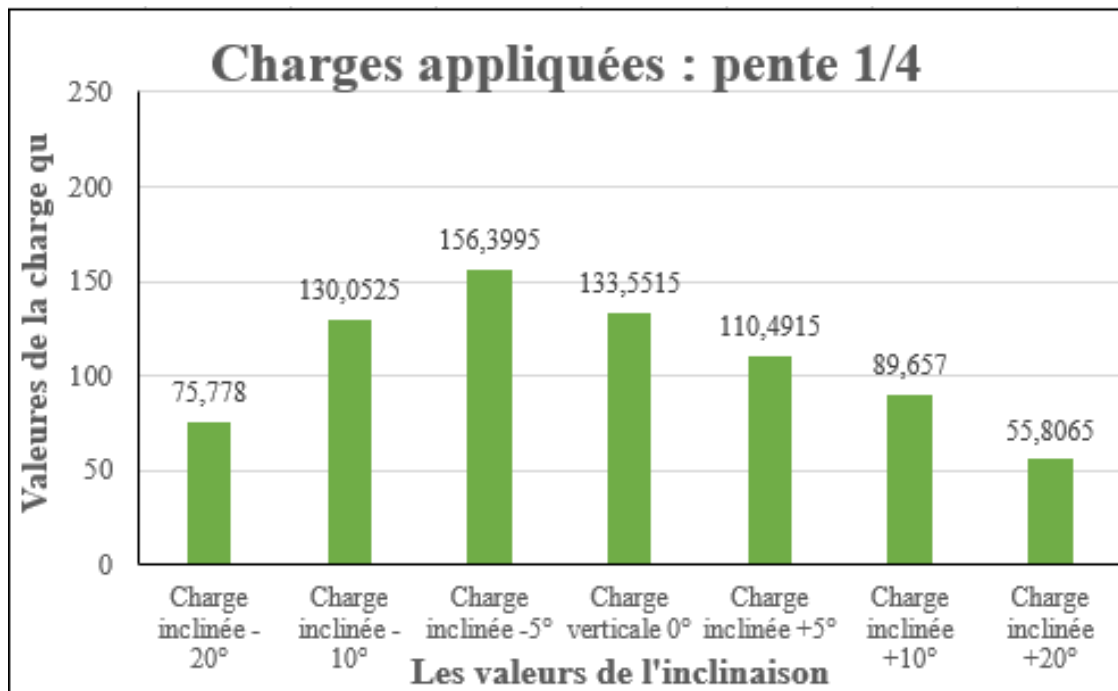
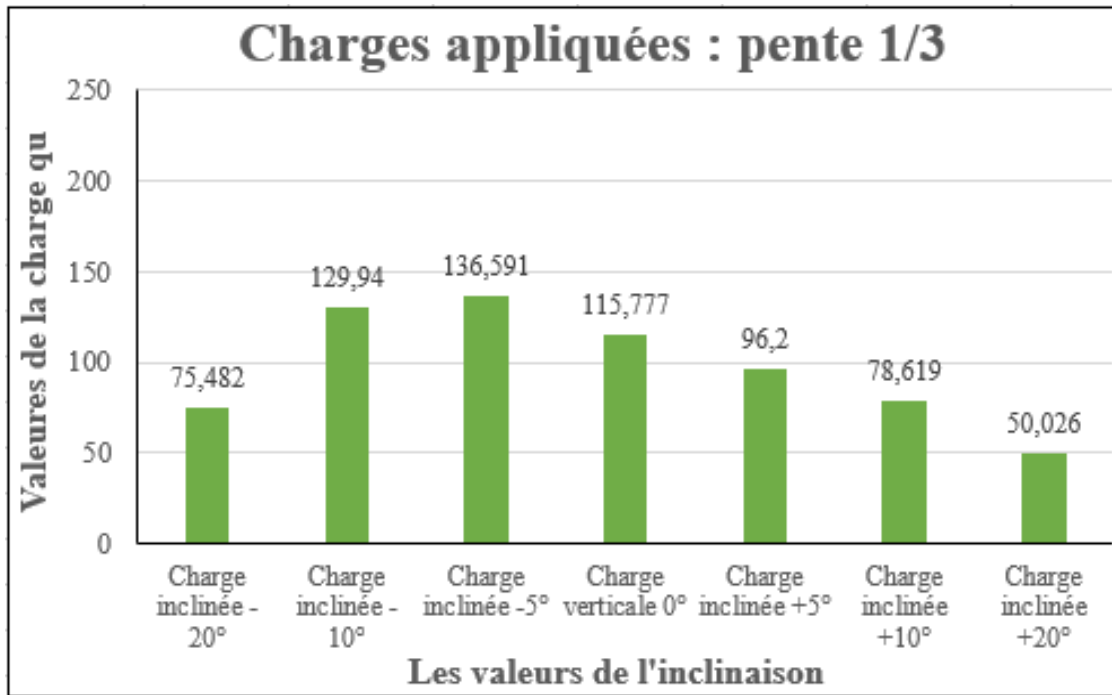


Figure III.14: Variation l'influence de l'inclinaison de la charge

Sur la capacité portante dans cas pente 1/4.

Pente 1/3 :

15-node Gauss



Lower et Upper

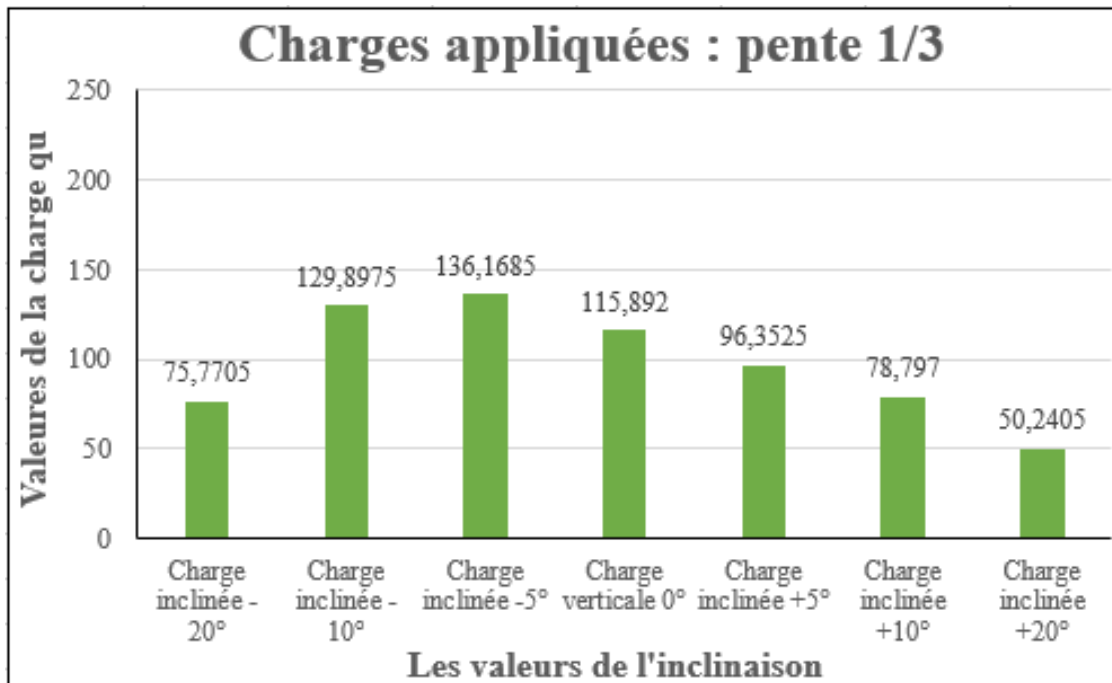
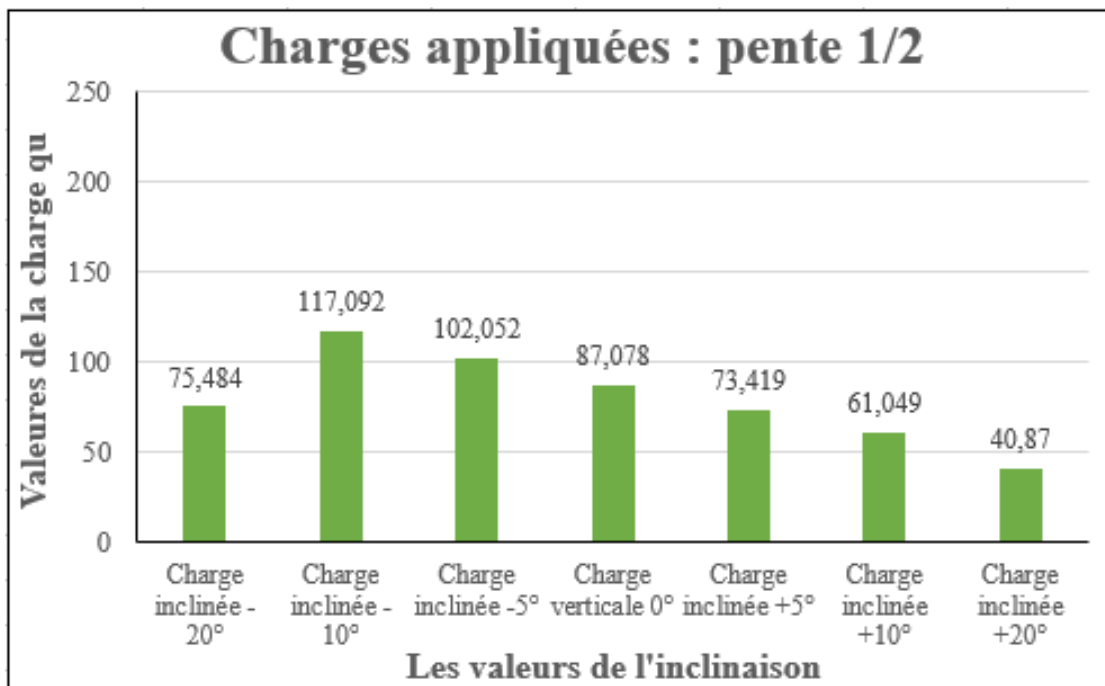


Figure III.15: Variation de l'influence de l'inclinaison de la charge Sur la capacité portante dans : pente 1/3.

Pente 1/2 :

15-node Gauss



Lower et Upper

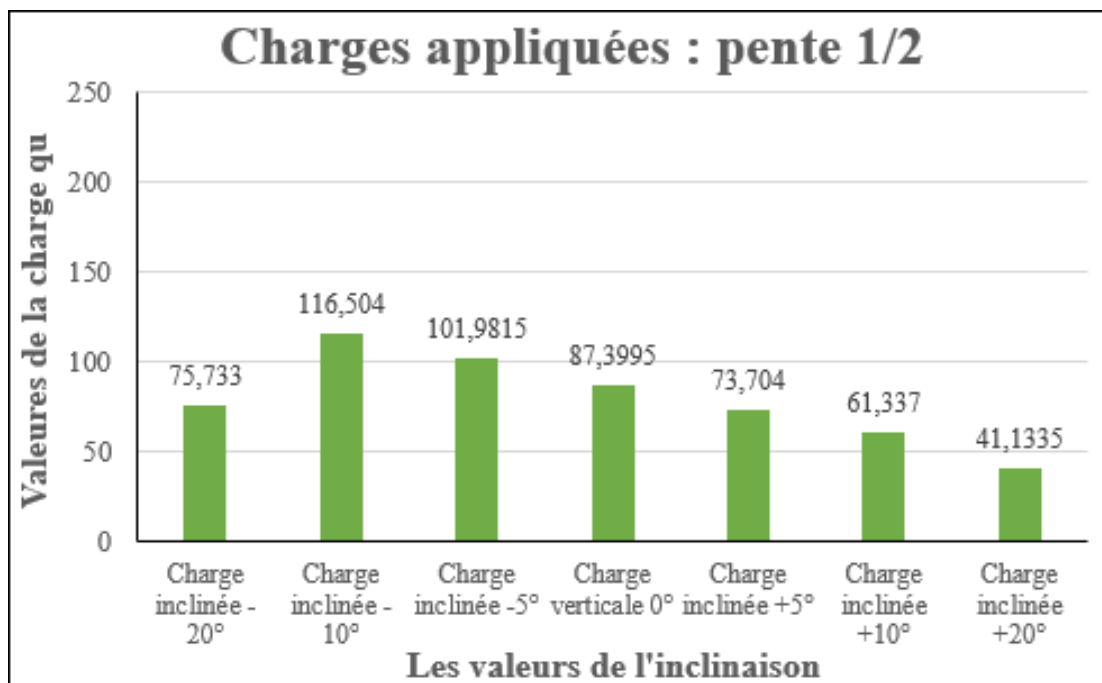


Figure III.16: Variation de l'influence de l'inclinaison de la charge

Sur la capacité portante : cas pente 1/2.

**Remarque :**

D'après les résultats obtenus, il est remarquable que la capacité portante calculée par type d'analyse " Lower et Upper" se rapproche des valeurs obtenues par le calcul type "15-node Gauss" Dans tous les cas étudiés.

**III.5. Comparaison :**

On peut observer les points suivants concernant la capacité portante :

- Lorsque la charge est verticale et centrée, et que le terrain est plat, la capacité portante atteint sa valeur maximale. En comparaison, les valeurs résultantes pour des charges inclinées vers la droite et la gauche sont presque égales, mais inférieures à la capacité portante pour une charge verticale centrée.
- Dans le cas d'une fondation située au bord d'une pente, les valeurs de la capacité portante diminuent par rapport à un terrain plat, à mesure que l'inclinaison de la pente augmente. De plus, la valeur maximale pour chaque pente se décale vers la gauche avec l'augmentation de l'inclinaison.

### III.6. Conclusion :

Cette étude numérique, réalisée à l'aide du code OPTUM G2 permet d'évaluer l'effet de la pente sur la capacité portante d'une fondation filante sous chargement incliné. L'analyse de cette étude nous conduit aux conclusions suivantes :

- L'angle d'inclinaison de la pente où la fondation est située à une grande influence sur la portance. Plus cet angle augmente, plus la capacité portante devient faible.
- La capacité portante de la fondation diminue à mesure que l'angle d'inclinaison de la charge augmente.

**Conclusion**

**générale**

### Conclusion générale

La capacité portante des fondations est un problème crucial en mécanique des sols. Différentes méthodes permettent de prédire la force portante des fondations établies sur un sol horizontal et soumises à une charge verticale centrée. Cependant, le comportement des fondations près d'une pente est moins bien étudié.

Une étude numérique a été menée en utilisant le logiciel OPTUM pour évaluer la capacité portante d'une fondation filante située au bord d'une pente, soumise à un chargement incliné et reposant sur un sol pulvérulent. Les résultats montrent une diminution de la capacité portante avec l'augmentation de la valeur de l'inclinaison, en particulier du côté droit.

# **Références bibliographiques**

### Références bibliographies

- [1] Abdedaim, K. (2020). Application de la méthode d'analyse limite pour l'étude de la poussée des terres sur les ouvrages de soutènement. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [2] Abdelali, Z. (2019). Analyse probabiliste de la consolidation des sols fins. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [3] Brahmi N. (2015). Modélisation numérique d'une fondation située à proximité d'une pente. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [4] Chennafi, S. (2019). Influence de l'excentricité de la charge sur la capacité portante d'une fondation au bord d'une pente. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [5] DTU 13.12 (1988). Règles pour le calcul des fondations superficielles. CSTB.
- [6] Frank, R. (1998). Fondations Superficielles - C 246. Ed. Techniques de l'Ingénieur. 31 pages.
- [7] Graham, J., Andrews, M., & Shields, D. H. (1988). Stress characteristics for shallow footings in cohesion less slopes. Canadian Geotechnical Journal, 25(2), 238-249.
- [8] Griffiths D. V. (1982). Computation of bearing capacity factors using finite elements. Géotechnique; 32:195-202.
- [9] Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute Bulletin, n° 28, 5-11.
- [10] Krabbenhoft, K., Lyamin, A., & Krabbenhoft, J. (2020). Optum computational engineering (OptumG2). 2015. Available on: [www.optumce.com](http://www.optumce.com).
- [11] Mansouri, T. (2019). Analyse numérique de la capacité portante des fondations superficielles soumises aux chargements excentré, incliné situées au bord d'une pente (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [12] Mehdaoui, A. (2018). Modélisation de l'interaction sol-fondation superficielle située à proximité d'une pente. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [13] Meyerhof, G. G. (1957). The ultimate bearing capacity of foundations on slopes." Proceedings of the 4th Int. conf. S.M.F.E., vol. 3, pp. 384–386.

## References bibliographies

---

- [14] Rostami, H. (2020). Finite Element Limit Analysis of Bearing Capacity Problem (Master's thesis, NTNU).
- [15] Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. John Wiley and sons Inc New York, 5th ed.