الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية
الشعبية

Republique Algerienne Democratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ
العربي التبسي -
تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

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

En : Génie civil

Spécialité : Géotechnique

Par : Delloul Djouhaina

Sujet

Modélisation d'un ouvrage de soutènement par plaxis et optimisation par la méthode des plans d'expériences

Présenté et soutenu publiquement, le 10 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

M/Boulares. Said	Grade	Président

M/Fernane Ali	Grade	Rapporteur
M/ Athamnia Ibrahim	Grade	Examinateur 1

Promotion : 2024/2025

Remercîment

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de mémoire, Monsieur Fernane Ali, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail.

*Je remercie également du fond du cœur mes chers parents, zine eddine et samira, pour leur présence constante et leur indéfectible soutien. Mes pensées reconnaissantes vont aussi à mes sœurs, belkisse et lina , ainsi qu'à mes frère saifeddine et abdel*nour, *pour leurs encouragements chaleureux , Je n'oublie pas ma moitie karim bendjebbar,et sur tout*

mon amie, zahia rebhi dont le soutien sans faille et les encouragements m'ont été d'une grande aide tout au long de ce parcours.

À toutes ces personnes, j'adresse mes plus sincères remerciements, ainsi que l'expression de mon profond respect et de ma gratitude.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Figure 1.1 : exemple de mur de soutènement	3
Figure 1.2 : Mur en (T renversé)	4
Figure 1.3: Mur en déblai.	5
Figure 1.4: Diverses dispositions de bêches	5
Figure1.5 : Mur à contreforts	6
Figure1.6 : ouvrage cellulaire	6
Figure1.7 : Mur en terre armée	7
Figure 1.8 : Mur de cantilever.	8
Figure1.9 : Murs en paroi moulée.	8
Figure 1.10: mur ancré.	9
Figure1.11 : Paroi moulée ancrée	9
Figure1.12 : Rideaux de palplanches.	10
Figure 1.13: glissement plan	11
Figure 1.14 : Glissement rotationnel simple	11
Figure 1.15 : Glissement rotationnel complexe	12
Figure 1.16 : les coulées	13
Figure 1.17 : Les écroulements.	14
Figure 1.18 : Surface de rupture	17
Figure 1.19: Schéma type d'une rupture plane.	19
Figure 1.20 : Schéma type d'une rupture circulaire.	20
Figure 1.21 : tranchées drainantes.	23
Figure 1.22 : Eperons drainantes.	23
Figure 1.23 : les drains subhorizontaux	24
Figure 1.24 : L'implantation des plantes dans un talus	25
Figure 1.25 : Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée.	26
Figure 1.26 : Mur poids	27
Figure 1.27 : Mur cantilever.	28
Figure 1.28 : Rideaux de palplanches ancrés par tirants passifs et actifs.	28
Figure 1.29 : Principe de réalisation d'une paroi moulée.	29
Figure 1.30 : Modes de rupture des ouvrages de soutènement.	29

Chapitre 2 : présentation de l'outil de simulation numérique	
Figure 2.1 Eléments à une dimension	30
Figure 2.2 : Eléments à deux dimensions	36
Figure 2.3 : Eléments à trois dimensions	36
Figure 2.4 : Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.	37
Figure 2.5 : Position des nœuds/ points de contrainte dans les éléments de sol.	39
Figure 2.6 : Distribution des nœuds/ points de contrainte dans les éléments D'interface et connexion avec les éléments de sol.	40
Chapitre 3 : modélisation numérique	
Figure 3.1 : géométrie du modèle à analyser par plaxis.	46
Figure 3.2: Menu « General settings ».	47
Figure 3.3: Maillage du model.	48
Figure 3.4 : contrainte effective.	49
Figues 3.5 : phases de calcul.	50
Figues 3.6 modélisation du modèle	50
Figure 3.7 : Déplacement totaux à travers le talus.	51
Figure 3.8: Déplacement horizontale	51
Figure 3.9: Déplacement verticale	52
Figure 3.10: contraintes moyenne	53
Figure 3.11: points plastiques	53
Figure 3.12: force axiale	53
Figure 3.13: moment fléchissant	54
Figure 3.14: effort tranchants	55
Figure 3.15: facteurs de sécurité	56
Chapitre 04 : Optimisation par la méthode d'expérience	
Figure 4.1 : Caractéristiques géométriques du mur	61
Figure 4.2 : Valeurs numériques et valeurs prédites du coefficient de sécurité Fs	65
Figure 4.3Comparaison Modèle prédit avec le modèle numérique	66
Figure 4 .4 Surfaces de réponse pour le coefficient de sécurité FS	67

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre3 : **MODELISATION NUMERIQUE**	
Tableau 3.1 : Caractéristiques mécanique de remblai	47
Tableau 3.2 : Caractéristiques mécanique de couche de sol (argile sableuse)	47
Chapitre4 : Optimisation par la méthode d'expérience	
Tableau 4.1: intervalle de variation des paramètres à optimiser	77
Tableau 4.2: plan d'expériences(3 facteurs , 2 niveaux)	78
Tableau 4.3: plan d'expériences L8 en valeurs des paramètres	80
Tableau 4.4: analyse de la variances ANOVA pour le coefficient de sécurité FS	80

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale……13

1. **Introduction générale sur les murs de soutènement ……**16
2. **Définition des murs de soutènement……..…**16
3. **Types de murs de soutènement selon le mode de reprise des poussées ……..…..**17
   - Mur poids……..…17
   - Mur en T renversé ……...…17
   - Mur à contreforts……..…18
   - Mur enterre armée……19
   - Paroi moulée…….21
   - Mur ancré……..…21
   - Rideaux de palplanches……22
4. **Les glissements de terrain ……**23
   - Glissement plan……23
   - Glissement rotationnel simple……..24
   - Glissement rotationnel complexe…….24
   - Coulées…….25
   - Écroulements……25
   - Fluage……...26
5. **Causes des glissements de terrain……..…26**
6. **Méthodes d'analyse de la stabilité des pentes ……**28
   - Analyse des surfaces de rupture**……..…**28
   - Méthode des tranches**……..**28
   - Facteur de sécurité (FS) **……..**28
   - Types de ruptures**……**29
   - Approches analytiques et numériques**……..…**30
7. **Systèmes de drainage et leur rôle : ……..…**33
   - Tranchées drainantes**……...…**34
   - Éperons drainants**……**36
   - Drains subhorizontaux et verticaux**……..…**40
   - Végétalisation des talus**……...**40

Chapitre 2 : Présentation de l'outil de simulation numérique……..…42

1. **Introduction à la modélisation numérique……..…**43
2. **Méthode des éléments finis (MEF) ……..…**44
    - Étapes de calcul……45
    - Types d'éléments (1D, 2D, 3D) ……..…46
    - Conditions aux limites et chargements……47
3. **Présentation du logiciel PLAXIS ……**48
    - Historique et développement……48
    - Environnement de travail : Input, Calculation, Output, Curves……...48
4. **Types d'éléments dans PLAXIS……**49
5. **Préparation de la modélisation ……**51
    - Propriétés des sols……52
    - Modèles de comportement (Mohr-Coulomb) …… ……53
    - Génération du maillage……54
    - Définition des conditions initiales……55

Chapitre 3 : Modélisation numérique……..56

1. **Introduction……..…**57
2. **Étude de cas : mur de soutènement en palplanches avec excavation……..**58
3. **Modélisation dans PLAXIS ……...…**59
    - Géométrie du modèle……..…61
    - Propriétés mécaniques des sols et matériaux……61
    - Conditions aux limites et chargement……62
    - Maillage et phases de calcul……...63
4. **Résultats obtenus ……**64
    - Déplacements horizontaux et verticaux……..…66
    - Contraintes dans le sol……...66
    - Facteur de sécurité……67
    - Analyse graphique……..…68

Conclusion Générale……..69

- Synthèse des résultats……69
- Recommandations……69

Chapitre 04 Optimisation Par La Methode Dexperience……...…70

1.Introduction……71

2.Définition d'un plan d'expérience……..71

3.Choix de la méthode d'expérimentation…….71

Facteurs……..…71

Niveau d'un facteur……...……72

Réponses……...…72

Principaux avantages des plans d'expériences……...72

Optimisation des Paramètres……..…73

Choix d'un plan d'expériences……...…74

Interprétation des résultats par la méthode des plans d'expérience……75

Analyse de la variance (ANOVA)…….75

Analyse de régression……...….77

Résultats (Tableaux et figures) ……..…79

Analyse de régression – modèle final……80

Références bibliographiques…….....81

Liste Des Symboles

$б_h$: Contrainte horizontale.

бv: Contrainte verticale.

бa: Contrainte de poussée.

бp : Contrainte de butée.

б: Contrainte principale.

τ: Contrainte tangentielle**.**

ε : Déformation.

γ : Poids volumique.

K0 : Coefficient de pression de terre au repos.

ka: Coefficient de poussée.

kp : Coefficient de butée.

kq : Coefficient de pression due à la surcharge.

k : Matrice de rigidité.

C : La cohésion.

ν : Coefficient de poison.

E: Module d'Young.

φ : Angle de frottement.

Ψ: Angle de dilatance.

Fa : Force de poussée.

Fp : Force de butée.

q : Surcharge uniformément répartie.

Fg : Coefficient de sécurité au glissement.

γd : Densité sèche.

γh : Densité humide.

EA : Rigidité axiale.

EI : Rigidité de flexion.

U: Déplacement totale

Uh : Déplacement horizontal.

Fs : Coefficient de sécurité

الملخص

يهدف هذا البحث إلى النمذجة العددية وتحسين المعلومات المؤثرة على استقرار الجدران الساندة باستخدام طريقة تصميم التجارب العددية. يتم تحليل حساب معامل الأمان واستقرار الجدار المدعم باستخدام برنامج العناصر المحدودة "Plaxis".

لتحقيق هذا الهدف، سيتم استخدام تصميم تجارب عددي جزئي كأساس للنمذجة. ستركز هذه الطريقة على المعلومات الهندسية الرئيسية للجدار، مثل عرض الكعب، عرض القدم، وعمق التثبيت.

سيتم إجراء تحليل إحصائي مفصل للنتائج، يعتمد على تحليل التباين (ANOVA) ومنهجية أسطح الاستجابة .(RSM) سيساعد ذلك في تحديد العناصر الأكثر تأثيرًا على سلوك الجدار وتطوير نماذج رياضية لتحسين هذه المعلومات في التطبيقات المستقبلية.

الكلمات المفتاحية :الجدران الساندة، الاستقرار، تصميم التجارب، التحسين

Résumé

Ce travail de fin d'études a pour objectif de modéliser numériquement et optimiser les paramètres influençant la stabilité des murs de soutènement cantilever, en utilisant la méthode des plans d’expériences numériques. Le calcul du coefficient de sécurité et la stabilité du mur renforcés est analysée à l'aide du logiciel d'éléments finis Plaxis.

Pour réaliser cet objectif, un plan d'expériences numérique fractionnel sera utilisé comme base pour la modélisation. Cette approche portera sur des paramètres géométriques clés de du mur , tels que la largeur du talon , la largeur du patin, et la profondeur d’encastrement.

Une étude statistique des résultats, basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM), sera effectuée. Cela permettra d’identifier les paramètres les plus influents sur le comportement du mur et de développer des modèles mathématiques pour optimiser ces paramètres dans des applications futures.

Mots-clés : Murs de soutènement, stabilité, plans d’expériences, optimisation

Abstract

This thesis aims to numerically model and optimize the parameters influencing the stability of cantilever retaining walls using the method of numerical design of experiments. The calculation of the safety factor and the stability of the reinforced wall is analyzed using the finite element software Plaxis.

To achieve this objective, a fractional numerical design of experiments will be employed as the basis for modeling. This approach will focus on key geometric parameters of the wall, such as the heel width, toe width, and embedment depth.

A detailed statistical analysis of the results, based on analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM), will be conducted. This will help identify the most influential parameters affecting wall behavior and develop mathematical models to optimize these parameters for future applications.

Keywords: Retaining walls, stability, design of experiments, optimization

Généralité

Les murs de soutènement sont des structures essentielles dans le domaine de l'ingénierie civile, conçues pour résister aux pressions exercées par les masses de sol, d'eau, ou d'autres matériaux. Leur fonction principale est de stabiliser des terrains en pente, de prévenir les glissements de terrain et de permettre l'aménagement d'espaces utiles dans des environnements contraignants, tels que les routes, les ponts, ou les constructions en terrains accidentés.

Ces murs, souvent construits en béton, en maçonnerie, ou en matériaux préfabriqués, se déclinent en plusieurs types en fonction des besoins spécifiques du projet : murs gravitaires, murs en porte-à-faux, murs ancrés, et murs de gabions, entre autres. Chaque type repose sur des principes distincts pour assurer la stabilité, qu'il s'agisse de leur propre poids, de contreventements ou d'éléments d'ancrage.

Dans les projets de génie géotechnique, la conception des murs de soutènement exige une analyse rigoureuse des conditions du sol, des charges appliquées et des facteurs environnementaux. Cette étude permet de garantir la sécurité, la durabilité et l'efficacité économique de ces structures vitales pour les infrastructures modernes.

Le but de ce travail est de présenter et d'appliquer la méthode des surfaces de réponse à travers les plans d'expériences, afin d'optimiser les paramètres géométriques d'un mur de soutènement cantilever. Ces paramètres incluent la largeur du talon (x1) , la largeur du patin (x2), et la profondeur d'encastrement (x3)

L'étude s'appuie sur des plans d'expériences numériques pour estimer le coefficient de sécurité, en cherchant à maximiser les informations obtenues tout en minimisant le nombre d'essais nécessaires. Cette démarche repose sur la modélisation d'un mur en béton arme cantilever à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis Plaxis. L'approche adoptée utilise un plan d'expérience L8 comme cadre de modélisation pour identifier les paramètres de comportement généralement employés dans ce type d'analyse.

Le mémoire est présenté en quatre chapitres :

Le premier chapitre est une revue bibliographique sur les ouvrages de soutènement. Il sera

Montrer dans ce chapitre : présentation générale des ouvrages de soutènement, les différents

Types des ouvrages de soutènement leurs fonctions, choix de type des murs de soutènement et

dimensi des soutènements.

Le deuxième chapitre sera réservé à l'outil utilise pour la simulation numérique des murs de soutènement

Le troisième chapitre nous présenterons la modélisation numérique d'un mur de soutènement et la présentation des étapes et phases de calcul du comportement des murs cantilevers et le calcul de coefficient de sécurité par la phase c/phi réduction

Le quatrième chapitre présente une étude statistique à travers l'analyse de variance (ANOVA)

D'une part et la procédure d'optimisation des paramètres influençant la valeur du coefficient de sécurité d'une autre part, en se basant sur les modèles numériques développés par la méthode des surfaces de réponses.

Enfin les conclusions principales tirées de cette étude, à la fin de ce mémoire une conclusion générale est présentée.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.Introduction :

Comme son titre l'indique, ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique, dans laquelle nous présentons quelques notions très importantes pour notre étude comme les murs des soutènements, les différents types de cette structure.

Les ouvrages de soutènement représentent des structures courantes en génie civil, largement utilisées pour divers besoins. La détermination des forces exercées entre le sol et ces structures constitue une étape importante en géotechnique. Cette section est consacrée une étude numérique des murs de soutènement, dont la conception requiert une compréhension approfondie des pressions de terre passive et active. Une présentation succincte des différents types de soutènements et de leurs caractéristiques respectives y est également incluse.

1.2. Définition des murs de soutènement :

Un ouvrage de soutènement est une construction destinée à prévenir l'éboulement ou le glissement d'un talus raide. Les ouvrages de soutènement sont essentiellement employés, soit en site montagneux pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches, soit en site urbain pour réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art. II existe deux grandes classes d'ouvrages de soutènement : ceux composés d'une paroi résistante et d'une semelle de fondation et ceux composés d'une paroi (palplanches).



Figure 1.1 exemple de mur de soutènement

1.3. Différents types des murs de soutènement :

La notion d'un mur de soutènement couvre l'ensemble des structures servant à retenir un massif de sol autour d'une excavation à l'aide d'élément de matériaux résistants à la poussée des terres. Dans la définition Euro code (EC7_1,2004), un ouvrage de soutènement retient des terrains (sols, roche ou remblai) et/ou de l'eau. L'effort de poussée exercé par le massif de terres retenu peut être repris de diverses manières, trois modes principaux peuvent être distingués :

1.3.1. La poussée : est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement :

1.3.1.1. Les murs en béton armé :

Les murs en béton armé peuvent avoir des formes diverses et être réalisés de façons multiples.

a) Mur en T renversé classique : C'est la forme fréquente pour un mur en béton armé, dite encore cantilever du fait du voile encastrer dans la semelle. Sans contreforts, il est économique pour des hauteurs jusqu'à 5 à 6 mètres et peut être érigé sur un sol de qualités mécaniques médiocres. Par rapport au mur-poids de même hauteur, à largeur égale de semelle il engendre des contraintes plus faibles sur le sol.

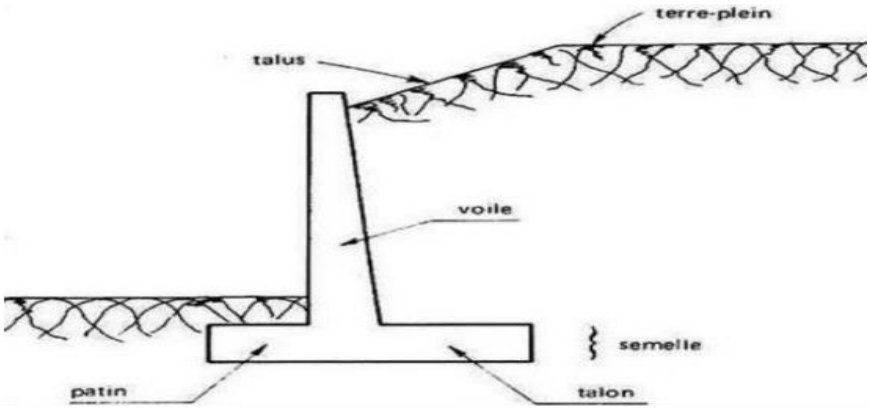


Figure 1.2: Mur en T renversé

b) Murs en déblai : Dans le cas de murs en déblai, c'est-à-dire réalisés en terrassant un talus [1], les limitations de volume de terrassement et les difficultés de tenue provisoire des fouilles obligent à réduire la longueur du talon et à augmenter celle du patin.

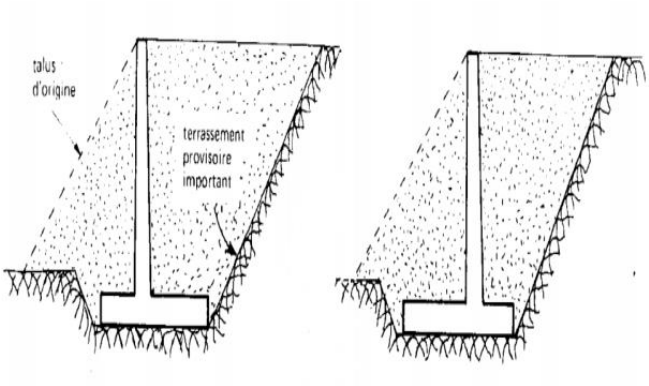


Figure 1.3 : Mur en déblai.

c) Murs avec bêches : pour éviter le glissement de la semelle, une bêche est placée a l'avant de la semelle ou à l'arrière, elle est coulée sur place en pleine fouille

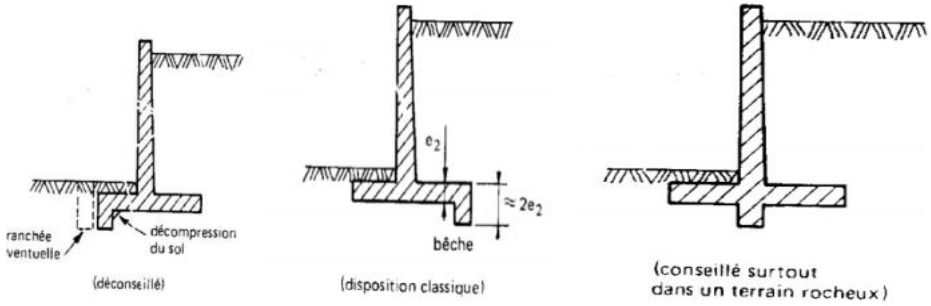


Figure 1.4 : murs avec bêches

d) Mur à contreforts : Lorsque la hauteur du mur devient importante ou que les coefficients de poussée sont élevés, le moment d'encastrement du voile sur la semelle devient grand. Une première solution consiste à disposer des contreforts ayant pour but de raidir le voile.

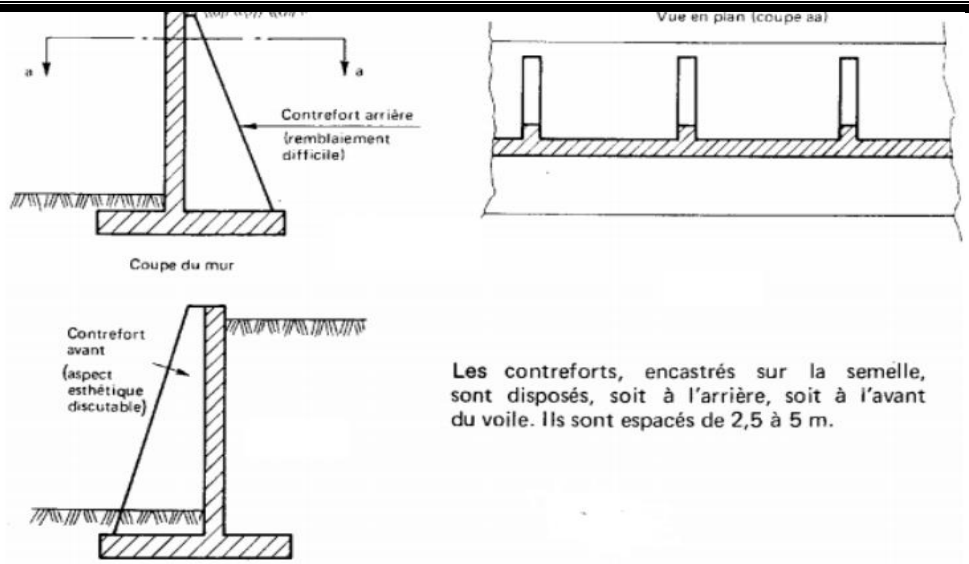


Figure 1.5 : Mur à contreforts

1.3.1.2. Des ouvrages cellulaires :

Sont très variés et le type le plus ancien est le mur caisson en élément préfabriqué. Dans les travaux maritimes par exemple, on utilise pour la construction des quais de grands batardeaux cellulaire en palplanches métallique ou de grands caissons en béton armé.

Dans un ouvrage cellulaire, la cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple.

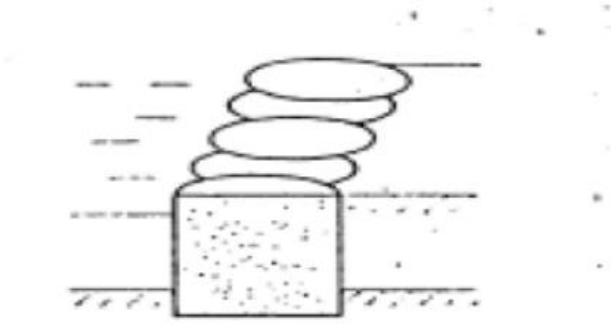


Figure 1.6 : ouvrage cellulaire

1.3.1.3. Le mur en terre armée :

Un massif en terre armée est constitué de trois composants :

- un remblai granulaire compacté en couche peu épaisses
- Les armatures disposées en lit dans le remblai qui peuvent être de deux natures :

A. Métallique en acier galvanise résistant a la corrosion

B. Géo synthétique qui ne présentent pas de problème de corrosion et qui tendent à remplace les premières. Un parement, faisant le lien entre les armatures et assurant l'esthétique du mur, il est généralement réalisé en élément de béton préfabriqué facile à assembler, en pneus ou autres éléments récupérés destinés à être couverts de végétaux. L'ensemble formes un massif stable assurant la retenu de la poussée du sol en place.

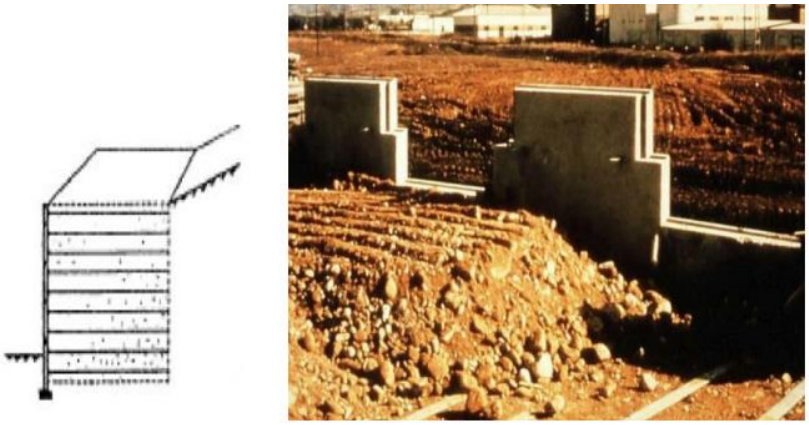


Figure 1.7: Mur en terre armée

1.3.2. La poussée : repris par l'encastrement

1.3.2.1. Les murs cantilevers : Un mur cantilever est la structure la plus commune pour retenir le sol ou un autre type de matériel. Ce sol appelé remblai, est maintenu dans des position qui ne serait pas normalement se trouver, et s'effluence de la gravité. Sans le mur de soutènement ou si la structure a échoué. Une paroi en porte à faux est construite à partir de béton armé et est construit avec une plaque de base et la tige qui est plus mince que dans les autre types de murs de soutènement la base est constituée d'un talon, qui se trouve au-dessous du sol et une pointe qui se trouve sur la partie extérieure de la paroi de base. La construction en

porte à faux est plus efficace lorsque les murs sont à moins de 25pieds (environ 7,6m) de hauteur, Un mur cantilever est constitué de semelles de construction, entrains et le béton, acier

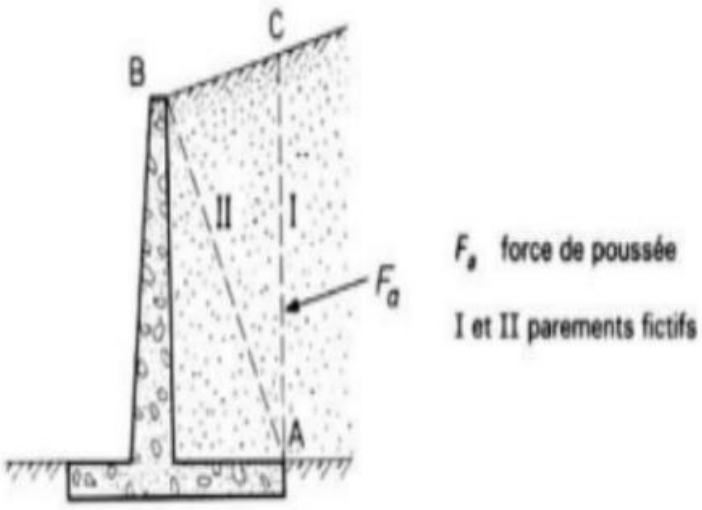


Figure 1.8 : Mur de cantilever.

1.3.2.2. La paroi moulée :

La technique de la paroi moulée est largement utilisée dans les milieux urbains, elle permet d'atteindre des profondeurs de l'ordre de 100 mètres. Une paroi moulée fonction par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation ou les déformations. Liées aux interactions sol-structure doivent être soigneusement analyses, afin de s'assurer que les déplacements horizontaux et verticaux du sol ne risquent pas d'endommager les constructions existant à proximité.

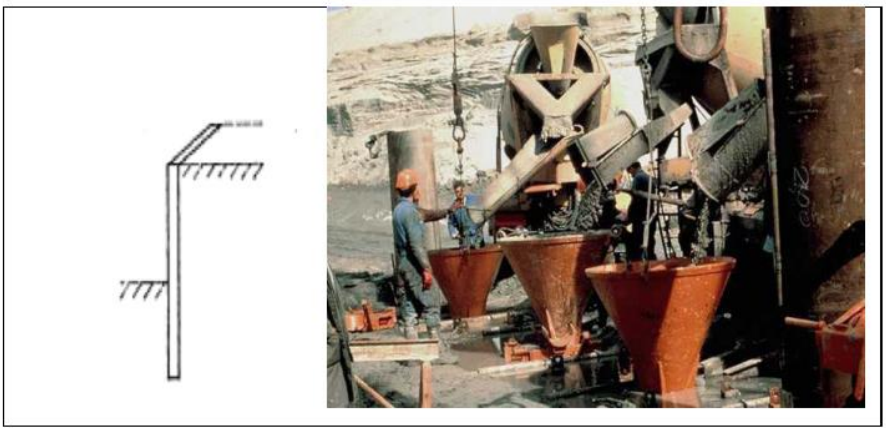


Figure 1.9 : Murs en paroi moulée.

1.3.3. La poussée : est reprise par des ancrages :

1.3.3.1. Les murs ancrés :

Le principe consiste à réduire les force actives du glissement et à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture.

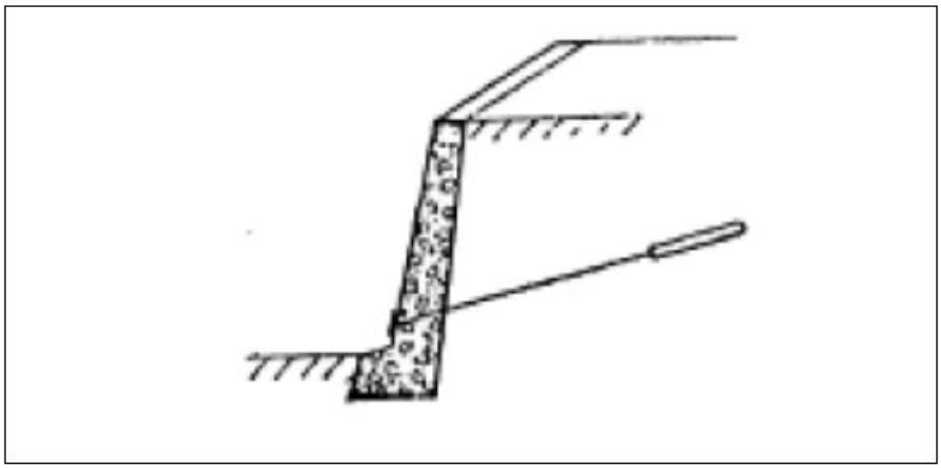


Figure 1.10 : mur ancré.

1.3.3.2. Les parois moulées :

Ancrées Dans le cas où les pressions exercées par le massif de terre à retenir ne peuvent être équilibrées par les force de butée mobilisées dans la partie en fiche, si la hauteur hors fiche est important. On a souvent recouru à un système d'ancrage rn tête au moyen de tirants.

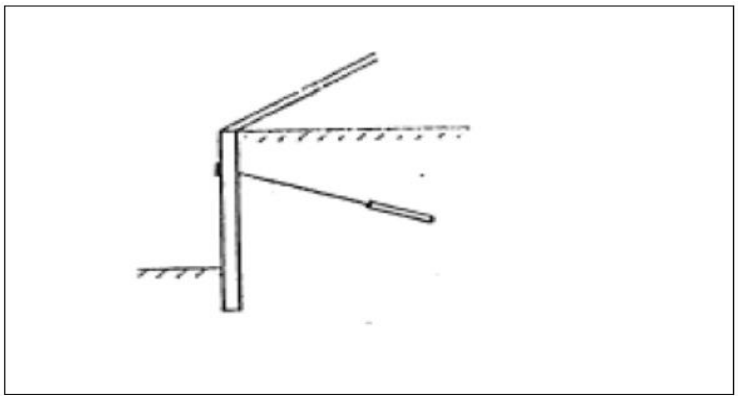


Figure 1.11 : Paroi moulée ancrée

1.3.2.3. Les rideaux de palplanches :

Les rideaux de palplanches Sont constitués de palplanches métalliques en général, emboitées les unes dans les autres et battues dans le sol de fondation, pour former un écran vertical, le plus souvent rectiligne, servant de soutènement à un massif de sol.

Les rideaux de palplanches Peuvent constituer des ouvrages provisoires ou définitifs. Leur caractéristique essentielle est que le soutènement ainsi formé est souple, ce qui nécessite une méthode spécifique de dimensionnement.



Figure 1.12 : Rideaux de palplanches.

2- Les glissements

Les glissements se manifestent par le déplacement latéral d'une masse de matériaux le long d'une surface de rupture bien définie. Ils surviennent principalement dans des terrains peu cohérents, tels que les marnes ou les argiles. Ce type de mouvement est l'un des plus courants dans les domaines du génie civil et du génie minier.

En fonction de la configuration de la surface de rupture, on distingue trois catégories principales de glissements.

2.1 Glissement plan

Ce type de glissement se produit le long d'un plan situé au niveau d'une discontinuité géologique, telle qu'une faille, un plan de stratification ou la limite entre deux matériaux de nature différente. La rupture se développe le long d'une fine couche de matériau aux faibles propriétés mécaniques, souvent influencée par la présence d'eau. Cette couche est communément appelée « couche savon ».

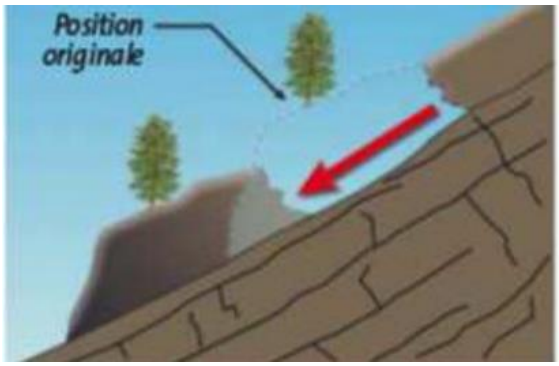


Figure 1.13 : glissement plan

2.2 Glissement rotationnel simple

Ce type de glissement est parmi les plus courants. Il se caractérise par une surface de rupture de forme simple, généralement assimilable à un cylindre. On observe, dans ce cas, des fissures de traction et un escarpement en haut de la pente, marquant le début du glissement, tandis qu'à la base, un bourrelet de matériaux déplacés se forme. Lorsque la surface de rupture adopte une forme circulaire, on parle alors de glissement circulaire**.**

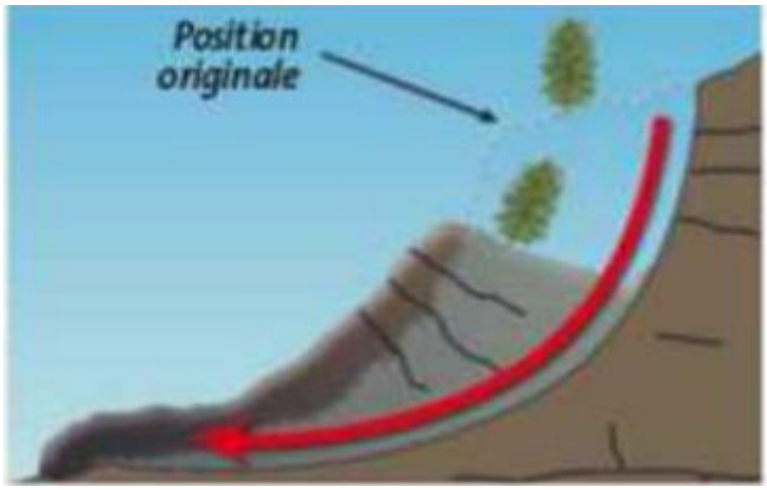


Figure 1.14 : Glissement rotationnel simple

2.3-Glissement rotationnel complexe :

Ce type de glissement, peu fréquent, résulte d'un enchaînement de glissements imbriqués les uns dans les autres. Il survient généralement lorsque la butée de retenue est affaiblie ou supprimée à la suite d'un glissement antérieur, entraînant ainsi une série de glissements successifs qui progressent vers l'amont.

2.3.1 Principales causes des glissements

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'un glissement de terrain, parmi lesquels les plus significatifs sont :

La nature des terrains : les sols argileux sont particulièrement sensibles aux phénomènes de glissement.

L'action de l'eau : l'eau joue souvent un rôle déterminant, voire principal, dans le déclenchement des mouvements de terrain.

Les causes mécaniques externes : ces causes incluent notamment les terrassements à la base d'un talus, les entailles réalisées dans des pentes auparavant stables, les surcharges (naturelles ou artificielles) appliquées sur une pente, ainsi que les vibrations d'origine naturelle (séismes) ou humaine (explosions, machines, etc.).

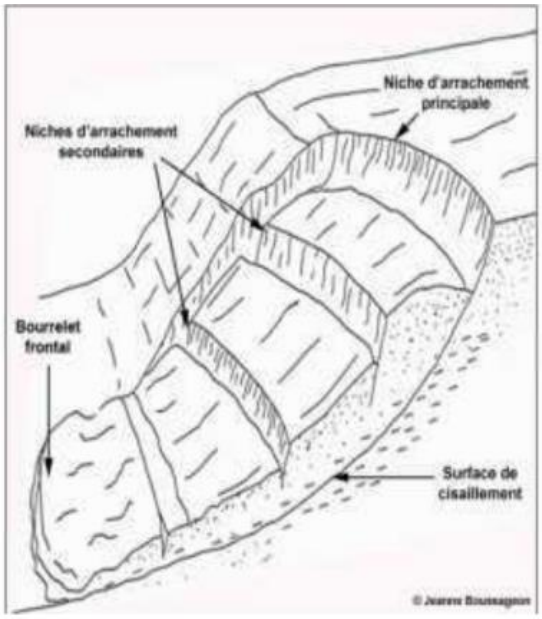


Figure 1.15 : Glissement rotationnel complexe

2.3.2 Les coulées

Les coulées se produisent à partir de matériaux meubles temporairement saturés en eau, ce qui leur confère une consistance visqueuse, parfois proche de celle d'un liquide. On distingue plusieurs types de coulées, parmi lesquelles :

- **Les coulées boueuses** : elles regroupent différents phénomènes tels que les coulées de blocs, de terre, de boue, les laves torrentielles ou encore les avalanches de débris. Ces événements surviennent principalement en milieu montagneux.

- **Les coulées de solifluxion** : elles correspondent à un déplacement lent des sols dans les régions périglaciaires. Ce phénomène est lié à l'instabilité de la couche superficielle du sol qui dégèle en été, entraînant un glissement progressif de la matière.

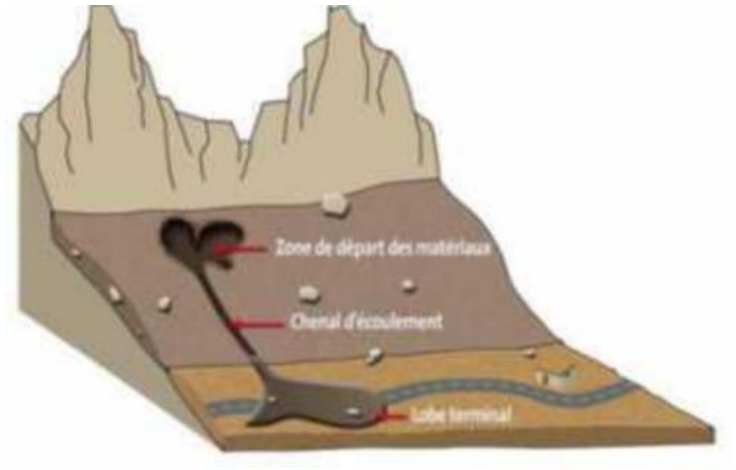


Figure 1.16 : les coulées

2.3.3 Les écroulements :

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses ou chute de blocs pour un volume supérieur. Le terme écroulement est utilisé quand il s'agit de la chute soudaine d'une masse rocheuse qui se détache d'une paroi en se désorganisant.

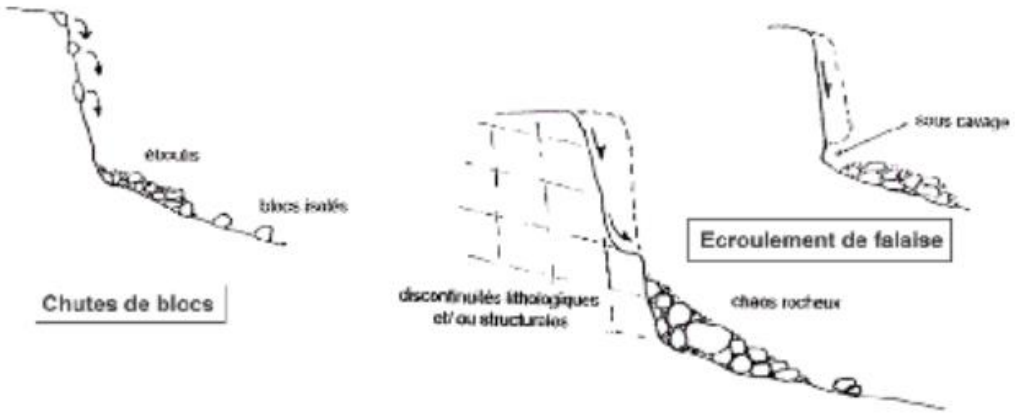


Figure 1.17 : Les écroulements.

2.3.4 Le fluage :

Le fluage est un mouvement lent des matériaux, se produisant sous l'effet de sollicitations proches du seuil de rupture, dans le domaine plastique. Par exemple, un banc de marne peut se déformer progressivement sous le poids d'une falaise calcaire.

Cette déformation lente peut entraîner la fissuration du banc calcaire, qui est peu déformable, augmentant ainsi le risque d'effondrement de la falaise.

2.3.5 Causes des glissements de terrain :

Les mouvements de terrain se sont les déplacements, de masses rocheuses compactes ou désagrégées, se produisant de l'amont vers l'aval. Ils peuvent etre soudaines et brutales, comme les chutes de pierres ou de blocs, les éboulements, les écroulements, les glissements soudains, les effondrements, ou au contraire évoluer de manière lente et progressive, comme le fluage ou les glissements permanents à faible vitesse.

Les mécanismes à l'origine de ces mouvements sont complexes et résultent rarement d'un seul facteur. Plusieurs paramètres fondamentaux — tels que la géologie, le relief et l'exposition — jouent un rôle clé dans la prédisposition naturelle d'un terrain à l'instabilité. Ces paramètres, relativement constants à long terme, influencent le comportement des matériaux dès la formation de la roche, en déterminant ses propriétés physiques et chimiques. Ces dernières régissent sa résistance à l'altération et à l'érosion.

Parmi tous les facteurs, l'eau joue un rôle central dans le déclenchement des mouvements de terrain. Elle agit de différentes façons :

En générant des pressions interstitielles (hydrostatiques) dans les pores, fissures ou failles ;

En exerçant des forces de percolation ;

À l'état de glace, en provoquant des mécanismes de rupture importants (cycle gel/dégel) ;

En favorisant le gonflement des minéraux argileux, ce qui induit des pressions supplémentaires dans le sol (pression de gonflement).

Ces effets peuvent réduire la stabilité de pentes déjà en équilibre critique. Le dépassement d'un seuil dans l'un de ces facteurs peut suffire à déclencher un mouvement de terrain.

Les précipitations intenses ou prolongées, la fonte des neiges et les cycles gel/dégel sont ainsi des déclencheurs fréquents.

Les activités humaines peuvent également aggraver le risque, en modifiant l'équilibre naturel du terrain. Cela inclut :

- La surcharge de pentes par des constructions ou remblais ;
- Les excavations sans protection adéquate ;

- L'élévation du niveau de la nappe phréatique ;
- L'utilisation d'explosifs ou de machines vibrantes ;
- L'exploitation non contrôlée de matériaux ou une occupation du sol inappropriée.
- En résumé, l'eau et la présence de fractions fines (argiles, limons, etc.) sont les deux facteurs dominants à l'origine des glissements de terrain dans la majorité des cas.

2.4 L'eau et les risques de glissements de terrain :

Les infiltrations eaux des surfaces et les eaux souterraines provoquent un déséquilibre dans les sols et les masses rocheuses, pouvant créer des phénomènes extrêmes tels que des glissements de terrain ou des chues et des éboulements rocheux.

Pour remédier ces risques, il est important de coupler l'hydromécanique et l'hydrogéologique avec des mesures de drainage suffisantes et une surveillance permanente du terrain.

Les nappes souterraines et leur rôle dans les mouvements de terrain

- **Augmentation du poids des sols :** l'élévation de la teneur en eau accroît le poids volumique des matériaux, bien que cet effet soit généralement secondaire.
- **Modification du comportement rhéologique :** l'eau peut transformer un sol initialement solide en un fluide visqueux, favorisant ainsi la formation de coulées de boue ou de laves torrentielles, suite à l'imbibition du sol.
- **Pressions interstitielles défavorables :** les pressions exercées par l'eau souterraine sur les structures internes du sol ou de la roche peuvent fragiliser l'ensemble et déclencher des ruptures.

La gestion de l'eau est donc l'un des leviers les plus efficaces pour prévenir, stabiliser ou ralentir les glissements de terrain. Pour agir efficacement, il est essentiel de bien comprendre le mode d'alimentation de la nappe phréatique.

Cela met en évidence l'importance cruciale de l'étude hydrogéologique dans l'analyse des glissements de terrain, non seulement pour en comprendre l'évolution, mais aussi pour anticiper et maîtriser les risques associés. Cette étude repose sur des observations de terrain, souvent accompagnées de l'installation de piézomètres, et doit être conduite sur une durée suffisante pour saisir les variations saisonnières ou annuelles des nappes.

2.4.1 Identification des dangers de glissement de terrain :

L'identification des risques associés aux mouvements de terrain repose sur une collecte rigoureuse et objective d'observations et de mesures liées au danger potentiel. Il est essentiel

de prendre en compte les différentes observations sur le terrain, ainsi que les relevés inclinométriques, en veillant à leur interprétation correcte.

L'intégration d'un modèle hydrogéologique dans les études de stabilité permet d'évaluer l'impact des eaux souterraines sur la stabilité des versants et de tester l'efficacité de solutions telles que le drainage.

2.4.2. Méthodes d'analyse de la stabilité des pentes :

Les méthodes de calcul de stabilité des terrains sont basées sur la constatation suivante :

Lorsqu'il y a glissement de terrain, il y a séparation d'une masse du sol du reste du massif et Son glissement se fait suivant une surface de rupture. Ayant défini une surface de rupture « S », on étudie la stabilité de la masse (1) mobile par rapport au massif (2) qui est fixe.

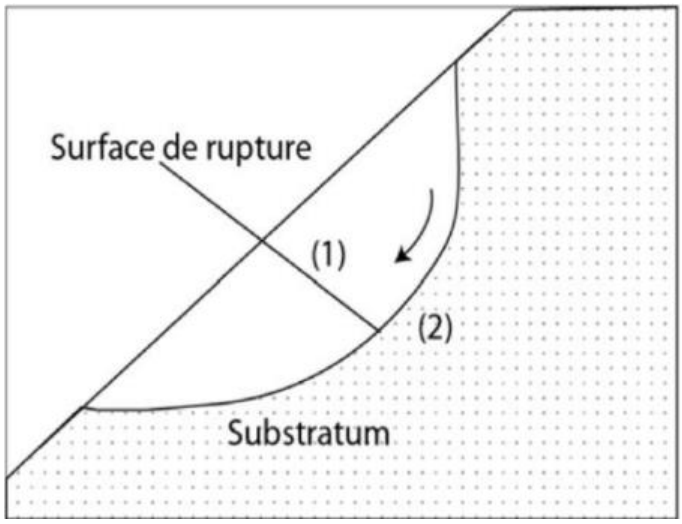


Figure 1.18 : Surface de rupture

2.4.3- Calculs de stabilité

L'étude de la stabilité des pentes est menée suite à un état de rupture, en appliquant la méthode des tranches. Le mécanisme de rupture détermine l'expression du coefficient de sécurité qui diffère selon le type et le mode de rupture plane, circulaire ou irrégulière. Quoi qu'il en soit, les calculs de stabilité envisage les contraintes totales à court terme et/ou les contraintes effectives à long terme.

2.1 Éléments de base du calcul de stabilité

Pour réaliser un calcul de stabilité fiable, plusieurs éléments fondamentaux doivent être connus, notamment :

- La géologie du site et la nature des terrains en place ;
- Les propriétés mécaniques des matériaux et/ou des discontinuités présentes ;
- Les caractéristiques du projet concerné ainsi que les risques associés (ex. : exploitation en mine à ciel ouvert, proximité d'habitations) ;
- La géométrie du talus, en deux ou trois dimensions ;
- Les conditions hydrodynamiques, telles que les hauteurs d'eau et les écoulements souterrains ou de surface.

2.4.4 Notion de facteur de sécurité :

La stabilité peut être évalué par les caractéristiques et les données géotechniques disponibles, la stabilité des pentes peut être évaluée à l'aide de méthodes de calcul reconnues. Le principe d'équilibre consiste à calculer le coefficient de sécurité (FS), défini comme le coefficient par lequel il faut faire le rapport de la résistance au glissement aux forces destabilatrices.

On distingue deux méthodes principales :

- ✓ **Première method:** après -glissement

Le glissement s'est déjà produit. Le facteur de sécurité est alors inférieur ou égal à 1.

La surface de rupture est connue, et le but est de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol correspondant à un état limite (FS = 1).

- ✓ **Deuxième méthode :** préventive (la plus courante)

Il s'agit d'évaluer la marge de sécurité disponible pour prévenir un glissement. Cette démarche permet de proposer des solutions de stabilisation adaptées en fonction des exigences de sécurité liées à l'usage prévu du talus.

Pour évaluer la stabilité, l'ingénieur peut choisir entre différentes formulations du facteur de sécurité, selon qu'il s'exprime comme un rapport de forces, un rapport de moments, ou d'autres grandeurs physiques comparées à leur valeur limite.

Définition	Formule
Rapport de contraintes	F=ƨ max /ƨ
Rapport de forces	F= E résistance /E moteur
Rapport de moments	F=M resistance /M moteur
Rapport de grandeurs	Par ex H/H max

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécanique de remblai

Les erreurs dues à l'exactitude des méthodes de calcul de la stabilité du bord.

- Les incertitudes expérimentales de la détermination des propriétés physico-mécaniques des Roches, comme par exemple la valeur moyenne du poids volumique des roches composant le massif.
- Les incertitudes de la détermination de l'influence de la fissure.
- L'influence des charges dynamiques provoquées par le tir, par le mouvement des moyens de transport et par les séismes.

- Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entoure.

FS	**Etat de l'ouvrage**
<1	**danger**
1.0- 1.25	**Sécurité contestable**
1.25- 1.4	**Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants**
>4	**Satisfaisante pour les barrages**

Tableau 3.2 : Caractéristiques mécanique de couche de sol (argile sableuse)

3.1 CAS DES RUPTURES PLANES

Ce type de rupture est rencontré lorsque le massif est constitué de plusieurs couches de Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques très différentes, ou lorsque la longueur de la Surface de glissement potentielle est très grande par rapport à l'épaisseur du terrain.

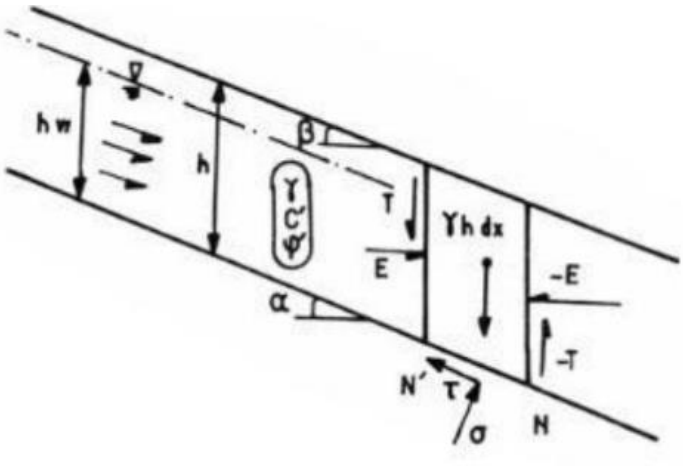


Figure 1.19: Schéma type d'une rupture plane

Le coefficient de sécurité est donné par l'expression suivante :

$$\mathbf{FS}= \frac{C'L+(W\cos\alpha - U)tg\varphi'}{W\sin\alpha}$$

Dans laquelle L désigne la longueur du talus, α sa pente, W le poids des terres en mouvement, U la résultante des pressions interstitielles éventuelles, c' la cohésion effective et φ' l'angle de frottement interne effectif**.**

3.2. CAS DES RUPTURES CIRCULAIRES :

Ce type de rupture se produit lorsque le massif du sol est homogène

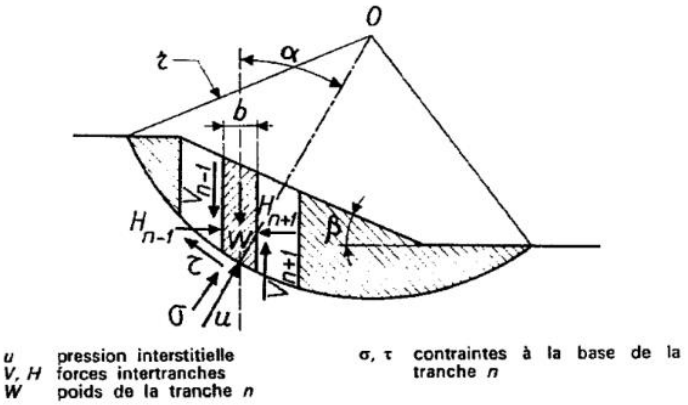


Figure 1.20 : Schéma type d'une rupture circulaire

Deux méthodes de calcul permettent de traiter ce problème :

- La méthode de Fellenius : dans laquelle on admet que les forces externes inter-tranches sont égales. L'expression de calcul du coefficient de sécurité est donnée par :

$$\text{FS}_{\text{Fellenius}} = \frac{\Sigma[c'b+(W\cos^2\alpha - u)tg\varphi']/\cos\varphi}{\Sigma W\sin\alpha}$$

-La méthode de Bishop : dans laquelle on admet que seules les composantes horizontales des Forces externes inter-tranches s'équilibrent. L'expression de calcul du coefficient de sécurité est donnée par :

$$\text{FS Bishop}= \frac{\Sigma[c'b+(W-ub)\tan\varphi']\cos\varphi+\frac{\sin\varphi\, tg\,\varphi'}{fs\ Fellenius}}{\Sigma W\sin\alpha}$$

3.3 Cas des ruptures quelconques (glissements non régulier) :

Les ruptures non s régulières apparaissent généralement en présence d'hétérogénéités dans les terrains. Pour étudier ce type de rupture, on utilise la méthode des perturbations, qui se distingue des méthodes classiques par hypothèse que la contrainte normale est variable le long de la ligne de rupture.

Cette approche, de conception s'applique à toute les glissements aléatoires. Elle s'appuie sur les conditions d'équilibres statique et la répartition des contraintes normales.

3.4 Méthodes à l'équilibre limite :

Le coefficient de sécurité est obtenu soit par un calcul manuel ou en utilisant des abaques dans le cadre de configurations simples ou d'études déterminer préliminaires, soit par un calcul numérique par des logiciels, dans le cas des situations complexes

L'équilibre d'une masse de sol peut être représente par une équation selon deux approches principales **:**

a-Méthode globale :

Elle consiste à étudier l'équilibre global de toute la structure, par hypothèse que la rupture est circulaire.

b-Méthode des tranches :

Cette approche consiste à diviser le talus en tranches verticales et à analyser l'équilibre de chaque tranche individuellement, avant d'agréger les résultats selon certaines hypothèses simplificatrices. Parmi les méthodes les plus connues de ce type figurent celles de Fellenius et Bishop.

c- Méthode de Janbu (1965) :

La méthode de Janbu est une méthode des tranches adaptée aux surfaces de rupture de forme quelconque, circulaires ou non. Elle se base uniquement sur l'équilibre des forces, sans tenir compte de l'équilibre des moments, ce qui peut limiter sa précision dans certains cas.

d- Méthode de Morgenstern et Price 1965 :

Aussi satisfaire à la fois les forces et les moments et suppose une fonction des forces inter-Tranches. (A. KOUDERY, 2005).

e- Méthode des perturbations :

cette méthode est applicable pour les différents types de rupture ,elle nous permet d'estimer la stabilité des pentes , qu'ils présentent une rupture irrégulière . Elle est caractérisée par le fait

qu'elle est la seule méthode à étudier l'équilibre , tranche par tranche, équilibre de translation horizontal, translation vertical, et équilibre de rotation Cela en fait une méthode particulièrement complète et efficace pour optimiser l'analyse de la stabilité des pentes.

3.5 Le Drainage et le glissement :

Dans la plupart des cas de glissements de terrain, l'eau joue un rôle déterminant en tant que déclencheur principal. Elle peut agir soit comme un facteur occasionnel, soit comme la cause directe du mouvement. Ainsi, l'installation d'un système de drainage est fortement conseillée dans de nombreuses situations.

Outre son efficacité, le drainage offre souvent l'avantage d'être plus économique par rapport à d'autres méthodes de stabilisation. Cependant, son rendement dépend largement de la nature et de l'hétérogénéité des sols concernés.

Les principaux objectifs des systèmes de drainage sont :

- Collecter les eaux de surface ;
- Empêcher le ruissellement et les infiltrations dans les zones instables ;
- Diminuer les pressions de l'eau en profondeur, notamment en abaissant le niveau de la nappe phréatique ;
- L'évacuation des eaux par des structures.
- Ces remèdes peuvent être atteints par plusieurs techniques

3.5.1 Tranchées drainantes :

Les tranchées drainantes sont des structures linéaires implantées perpendiculairement à la direction des écoulements souterrains, dans le but de rabaisser le niveau de la nappe phréatique.

Elles sont généralement réalisées en creusant des tranchées à la pelle mécanique, d'une profondeur comprise entre 4 et 6 mètres et d'une largeur variant entre 0,8 et 1,2 mètre.

Ces tranchées sont ensuite équipées de drains en PVC, remplis de matériaux filtrants et perméables, puis enveloppés d'un géotextile anti-contaminant afin d'éviter le colmatage par les particules fines.

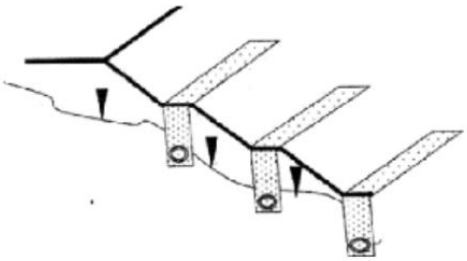


Figure 1.21 : tranchées drainantes.

3.5.2 Éperons drainants :

Les éperons drainants sont des types d'excavations,de largeur d'environ 1 mètre, pouvant dépasser 7 mètres de profondeur. Ils sont réalisés comme des tranchées parallèles à la pente du talus à l'aide moyens mecaniques. La distance entre les tranchées est est tres faible pour augmenter l'operation du drainage. Après excavation, des matériaux granulaires grossiers sont verses dans ces tranches pour faciliter l'écoulement des eaux

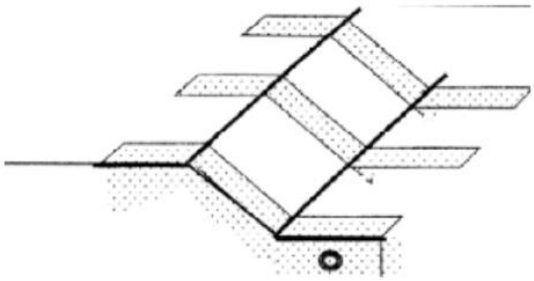


Figure 1.22 : Eperons drainantes.

3.5.3 Drains subhorizontaux :

Des tubes de petits diamètres et des puits sont installés , légèrement inclinés (environ 5 %), afin de faciliter l'écoulement des eaux à travers le sol. Cette technique est utilisée lorsque la nappe phréatique est située en profondeur.

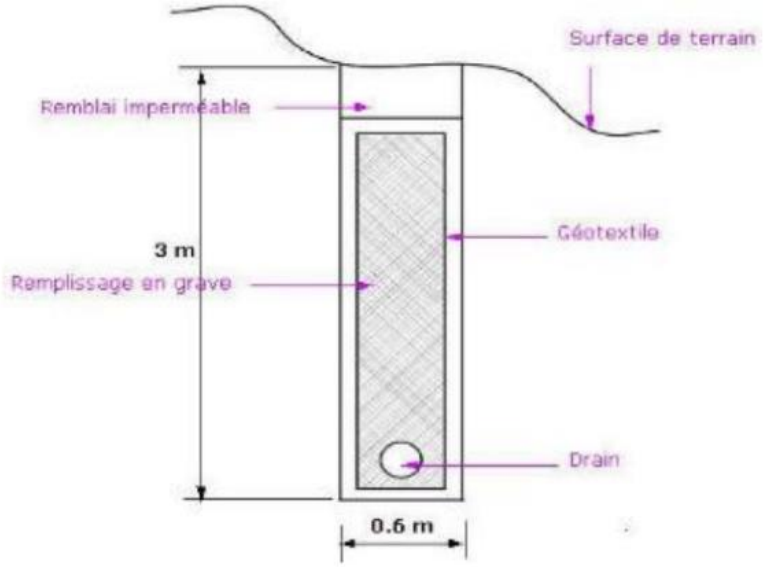


Figure 1.23 : les drains subhorizontaux

3.5.4 Drains verticaux :

Afin d'améliorer le drainage des sols saturés des drains verticaux sont places , dans des terrains silteux ou argileux. Cette méthode consiste à installer des drains préfabriqués de manière verticale dans le sol, suivant un maillage prédéterminé. Une fois en fonctionnement, ces drains évacuent l'eau du sol vers la surface. Généralement, la surcharge nécessaire est apportée par un remblai de pré chargement.

3.5.5 Végétalisation et le glissement :

La végétalisation joue un rôle stabilisateur mécanique en raison de l'enracinement des plantes dans le sol. Il s'agit d'une méthode à la fois écologique et économique, visant à stabiliser le sol grâce à des plantations adaptées aux caractéristiques du terrain et de l'environnement.



Figure 1.24 : Talus avec des plantes

4. Les soutènements et leurs types :

Le domaine de soutènement des sols est très vaste, il existe une grande variétés de types d'ouvrages de soutènement, qui ont été conçus pour assumer ses fonctions

On distingue principalement par :

• leur forme ;

• leur rôles et fonctionnement

• les matériaux qui les constituent ;

• leur mode de réalisation

• leur domaine d'application (urbain, montagneux, aquatique,)

Le tableau 1 montre les divers types d'ouvrages de soutènement classés d'après le mode de reprise de la Poussée, en séparant les ouvrages rigides des ouvrages souples ou semi-souples.

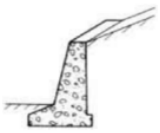
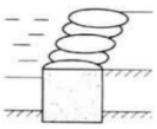
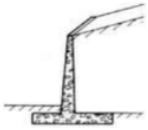
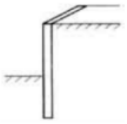
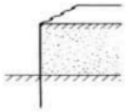
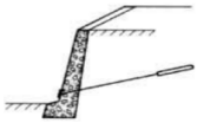
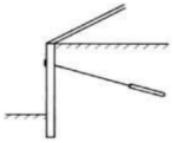
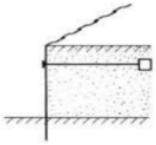
Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en Terre Armée	 Ouvrage cellulaire
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

Figure 1.25 : Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée

4.1 La poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement :

• Le mur poids en béton ou en maçonnerie. Ce sont des ouvrages rigides qui ne peuvent supporter sans dommages des tassements différentiels supérieurs à quelques pour-mille.

• Les murs en Terre Armée, dans lesquels le sol est renforcé par des inclusions souples résistant à la Traction, sont des ouvrages souples qui supportent les tassements différentiels du sol de fondation.

• Les ouvrages cellulaires sont très variés et le type le plus ancien est le mur caisson en éléments

Préfabriqués. Dans un ouvrage cellulaire, la cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple.

4.2 La poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement dans le sol de fondation :

Parmi les ouvrages de ce type, on citera :

• Le mur cantilever en béton armé qui, doté d'une base élargie et encastrée à la partie supérieure du Sol de fondation, fonctionne en faisant participer à l'action de soutènement une partie du poids du Remblai. Les murs cantilevers en béton armé sont également des ouvrages rigides ;

• Les murs en parois moulées, technique qui consiste à construire un mur au sein du sol en place, Avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité. Une paroi moulée fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation ;

• Les rideaux de palplanches, encastrés dans le sol de fondation : ce sont des ouvrages de

Soutènement flexibles, où l'interaction structure-remblai a une influence prépondérante sur le Comportement de l'ouvrage.

4.3 La poussée est reprise en totalité ou en partie par des ancrages :

Dans les ouvrages de soutènement en déblai, l'effort de poussée est fréquemment repris en partie ou en Totalité par des ancrages. C'est le cas notamment des rideaux des parois moulées et des parois berlinoises. Les murs de soutènement.

4.4 Quelques types des murs de soutènements :

1) Mur poids : Ce type de mur supporte la poussée par son poids propre .il est le plus ancien type de mur de soutènement leur réalisation est très simple. Ils sont bâtis en maçonnerie ou en béton non armé, sans armature. et son équilibre repose essentiellement sur son propre poids et sa grande épaisseur.



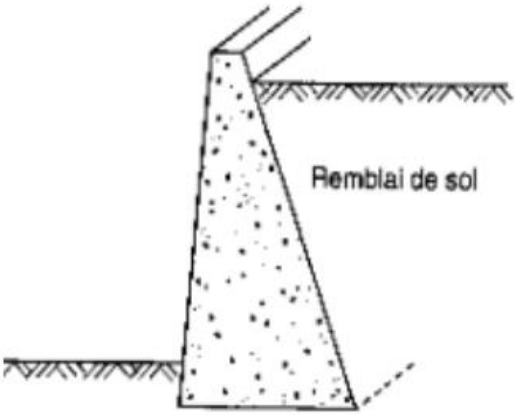


Figure 1.26 : Mur poids.

2) Mur cantilever ou en béton armé : Ce type de mur repose sur une large semelle continue. Relativement mince, il est renforcé par des armatures en acier. Sa stabilité est assurée à la fois par son propre poids et par celui du remblai situé sur la semelle côté amont. Le sol en appui contre le mur côté aval, ainsi qu'une éventuelle butée placée sous la semelle, contribuent à résister aux forces de glissement.

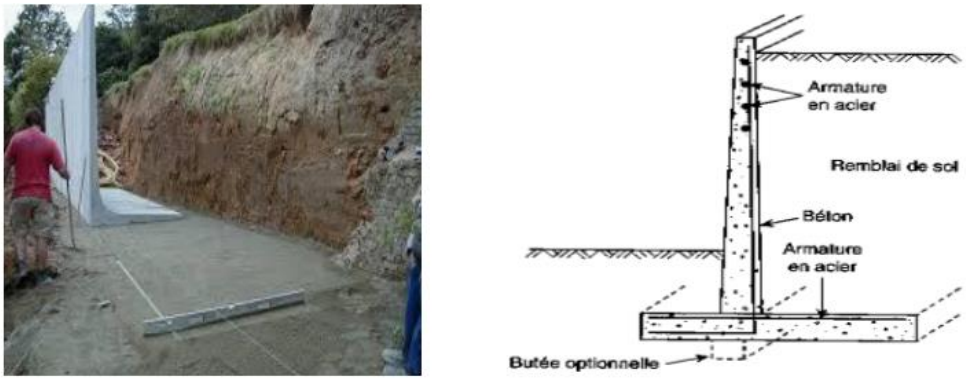


Figure 1.27 : Mur cantilever.

3) Mur à contreforts : Similaire au mur en porte-à-faux, le mur à contreforts s'en distingue par la présence de contreforts qui permettent de réduire son épaisseur. Ces éléments de renfort sont disposés à intervalles réguliers, généralement espacés d'une distance équivalente à la moitié de la hauteur du mur. La stabilité de ce type de mur repose sur le poids du remblai au-dessus de la semelle ainsi que sur le poids propre de la structure.

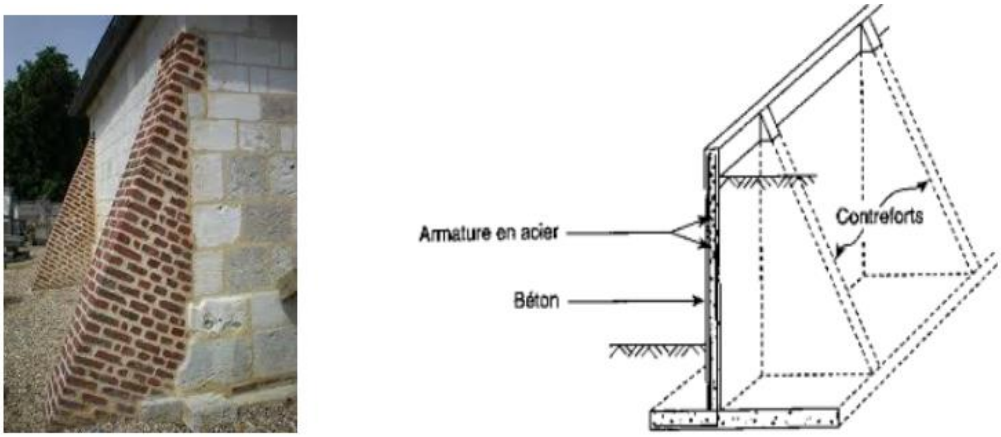


Figure 1.28: Mur à contrefort.

4) Rideaux de palplanches :

Ils sont constitués de palplanches, c'est-à-dire de profilés métalliques droits, mis en place par battage ou vibrofonçage. On distingue deux types de rideaux de palplanches :

- **Non ancrés** : les palplanches sont simplement enfoncées dans le sol sans dispositif de maintien supplémentaire.
- **Ancrés :** la stabilité est renforcée par des tirants, qui peuvent être soit passifs (a), soit actifs ou précontraints (b).

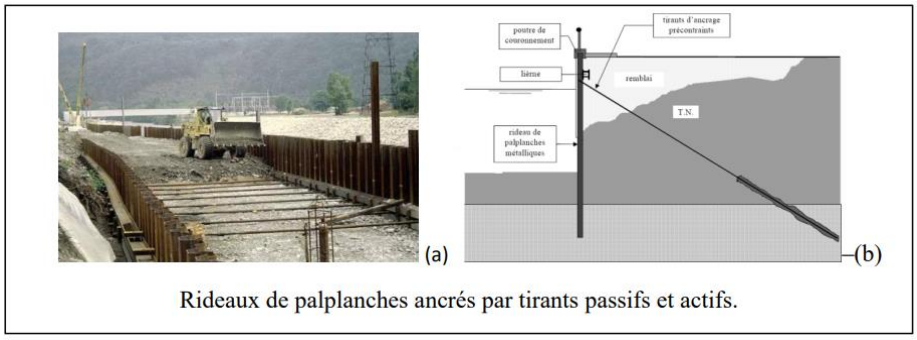


Figure 1.29 : Rideaux de palplanches ancrés par tirants passifs et actifs.

5) Paroi moulée ou préfabriquée :

Ce type de paroi est constitué de panneaux verticaux en béton armé disposés côte à côte. Sa réalisation s'effectue généralement en deux étapes principales :

Excavation d'une tranchée, stabilisée temporairement à l'aide de boue de bentonite,

Mise en place soit d'une cage d'armature suivie du bétonnage, soit de panneaux préfabriqués directement.

Lors du creusement à proximité de la paroi, des éléments de soutènement tels que des tirants actifs ou des butons peuvent être installés pour assurer sa stabilité.

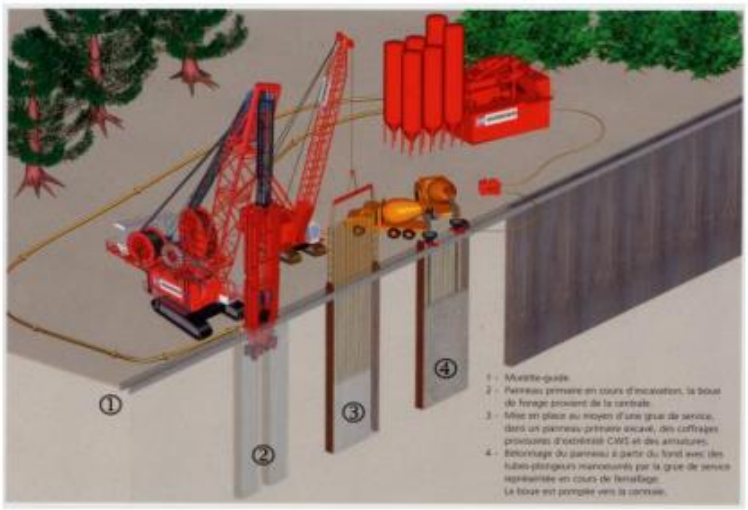


Figure 1.30 : Principe de réalisation d'une paroi moulée.

5.1 Stabilité externe et interne :

Le dimensionnement d'un ouvrage nécessite la vérification de deux aspects essentiels :

La stabilité externe, principalement vis-à-vis de la poussée exercée par les terrains ;

La stabilité interne, qui dépend du type de structure. Elle correspond à la résistance propre de l'ouvrage face aux efforts et aux déplacements qu'il subit.

Dans le cas des murs de poids, l'analyse de la stabilité interne repose sur les calculs classiques en béton. Pour les murs en béton armé (comme les murs en porte-à-faux), cette stabilité est vérifiée à l'aide de calculs spécifiques au béton armé.

Dans ce document, l'accent sera mis principalement sur la stabilité externe. La vérification de la stabilité interne, quant à elle, permet de déterminer le ferraillage adéquat nécessaire au bon dimensionnement d'un mur en béton armé.

Il y a cinq modes de rupture peuvent être rencontrés

Dans les ouvrages de soutènements, ils sont illustrés

À la figure ci –contre :

-Figure(a), Le glissement de l'ouvrage sur sa base ;

-Figure(b), Le renversement de l'ouvrage ;

-Figure(c), Le poinçonnement du sol de fondation ;

-Figure(d), Le grand glissement englobant l'ouvrage ;

- Figure(e), La rupture des éléments structuraux De l'ouvrage.

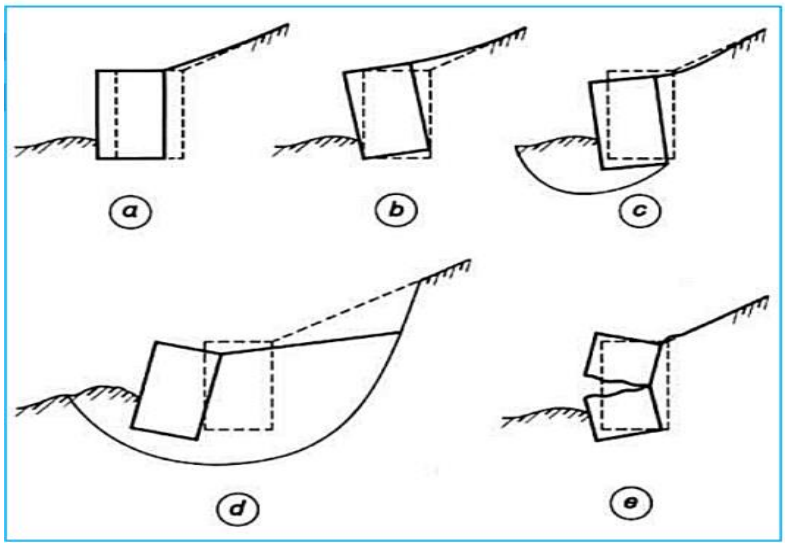


Figure 1.31 : Modes de rupture des ouvrages de soutènement.

-Les quatre premiers modes de rupture concernent l'instabilité externe de l'ouvrage, tandis que la rupture des éléments structuraux relève de l'instabilité interne.

L'analyse de la stabilité externe d'un ouvrage de soutènement repose sur des concepts et méthodes de calcul applicables à l'ensemble des types d'ouvrages. Cependant, dans ce document, ces méthodes ne seront détaillées que pour les murs en béton ou en maçonnerie.

CHAPITRE 2

PRESENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION NUMERIQUE

Introduction :

La conception et le dimensionnement constituent deux étapes essentielles que l'ingénieur ou le technicien du bureau d'études doit réaliser afin de permettre à l'entreprise chargée de l'exécution d'un projet technique de disposer des plans nécessaires à sa mise en œuvre. Pour ce faire, une méthode de calcul reposant sur un outil numérique a été développée depuis une vingtaine d'années : il s'agit de la méthode des éléments finis.

Cette méthode, mise en œuvre notamment à travers le logiciel PLAXIS, permet de modéliser les comportements mécaniques en divisant une structure en éléments discrets. Elle suppose que les grandeurs physiques, telles que les contraintes, les déplacements et leurs dérivées, varient au sein de chaque élément selon des fonctions spécifiques, régies par des paramètres déterminés.

2. Les Méthodes de calcul numérique :

Actuellement, les méthodes de calcul des ouvrages de soutènement se répartissent en trois grandes catégories :

Méthodes sans interaction sol-structure : le sol y est considéré à l'état d'équilibre limite, sans prise en compte de la structure.

Méthodes avec interaction sol-structure : elles modélisent l'interaction entre le sol, la paroi et les éléments de soutien (tirants ou butons) à l'aide de ressorts et de patins à l'interface, selon le principe des coefficients de réaction.

Méthode des éléments finis : cette approche considère la paroi (ou mur de soutènement) comme faisant partie intégrante du système sol-structure. Le calcul est généralement réalisé en déformation plane. De par sa précision et sa capacité à modéliser des comportements complexes, cette méthode complète connaît une adoption croissante, notamment dans les projets de grande envergure

Parmi les différentes méthodes numériques disponibles, la méthode des éléments finis revêt pour nous un intérêt tout particulier.

2.1. La Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est une approche de calcul numérique qui consiste à subdiviser un objet, ou une portion de celui-ci, en éléments finis, dans le but d'analyser certaines de ses propriétés physiques ou mécaniques.

Ces éléments sont reliés entre eux par des nœuds, et l'ensemble formé constitue le maillage de la structure. Cette discrétisation permet de représenter le comportement de l'objet à l'aide de fonctions locales définies sur chaque élément. Ces fonctions, généralement plus simples que celles requises pour décrire l'objet dans son ensemble, sont souvent des polynômes ou des fonctions harmoniques spécifiques. Ce procédé permet ainsi d'obtenir une approximation à la fois fiable et efficace du comportement global de la structure étudiée.

2.2. Calculs par la MEF

La méthode des éléments finis est, sur le plan théorique, la plus aboutie, car elle permet de discrétisé avec grande précision des problèmes de l'ingénierie du sol très complexes.

Elle nécessite :

- Définir la géométrie du problème, en veillant à ce que les limites du modèle n'aient pas d'influence sur les résultats du calcul.
- La loi de comportement adoptée pour le sol est le modèle de Mohr-Coulomb, Cam-Clay, ou tout autre adapté au contexte géotechnique.
- Préciser les caractéristiques des ouvrages et des interfaces, afin de modéliser correctement l'interaction entre le sol et les structures, ainsi que les conditions hydrauliques du système.
- Déterminer les propriétés des dispositifs de soutènement, comme les butons ou les tirants d'ancrage.
- Définir l'état initial des contraintes dans le sol ainsi que les pressions interstitielles existantes.

Elle permet :

- Réaliser les calculs d'écoulement dans le sol.
- Simuler toutes les étapes et les phases de construction ou de travaux.
- Implémenter tous les changements dans des caractéristiques, qu'il s'agisse des massifs des différentes couches de sol ou des niveaux d'implantation des butons et tirants d'ancrage.
- Calculer le coefficient de sécurité du système étudié.

Les sorties fournies pour les ouvrages sont :

- Les displacements des structures.
- Les sollicitations internes subies par les ouvrages.
- Les efforts transmis aux butons ou aux tirants d'ancrage.

Et pour le sol :

- Les displacements du sol.
- Les déformations subies par le sol.
- Les contraintes totales et les contraintes effectives dans le sol.
- Les pressions interstitielles.
- Le calcul du coefficient de sécurité.

2.2.1. L'analyse des déplacements par MEF

Le principe de la méthode des éléments finis (MEF) est de réaliser une procédure numérique afin d'obtenir une solution approximative à un problème aux valeurs limites. Les équations mathématiques du problème sont transformées en un système d'équations algébriques portant sur des quantités évaluées en points discrets situés dans la région étudiée.

Les équations des éléments finis sont formulées et résolues de manière à minimiser l'erreur de l'approximation. Cette section présente uniquement un aperçu fondamental de la méthode, limité aux points suivants :

- Elasticité linéaire et élasto-plasticité
- Déformation plane bidimensionnelle

La première étape dans toute analyse par la méthode des éléments finis (MEF) consiste à créer un maillage. Ce maillage est composé d'éléments connectés entre eux par des nœuds.

Les déplacements sont calcules aux nœuds qui représentent les points des valeurs des variables fondamentales. Dans le cas d'une approximation basée sur les déplacements, ces variables fondamentales correspondent aux déplacements nodaux.

Les déplacements mesurés aux nœuds sont ensuite interpolés à l'intérieur des éléments pour obtenir des expressions algébriques décrivant les déplacements et les déformations en tout point du maillage.

Une loi constitutive est ensuite appliquée pour relier ces déformations aux contraintes, ce qui permet de calculer les forces agissant aux nœuds de chaque élément. Ces forces nodales sont liées aux déplacements nodaux par un système d'équations qui est établi et résolu par le programme de la méthode des éléments finis afin de déterminer les valeurs des déplacements aux nœuds.

La méthode des éléments finis se déroule selon les étapes suivantes **:**

2.2.2 La discrétisation des éléments

Il s'agit de modéliser la géométrie du problème étudié en la décomposant en petites régions appelées éléments finis. Ces éléments sont définis par des nœuds situés sur leurs frontières ou à l'intérieur même des éléments.

Approximation des variables fondamentales

Une variable fondamentale doit être choisie (par exemple, les déplacements) et définie quant à sa variation au sein de chaque élément fini. Cette variation est exprimée à partir des valeurs nodales.

2.2.3. Les conditions aux limites

La formulation des conditions aux limites et l'adaptation des équations globales sont effectuées. Les charges P sont appliquées en fonction des déplacements U imposés.

Les équations globales forment un système de grande taille, qu'il faut résoudre pour déterminer les déplacements à tous les nœuds. À partir de ces déplacements nodaux, les contraintes et les déplacements dans l'ensemble du domaine peuvent ensuite être calculés.

3. Les types d'éléments

Pour diviser le domaine en element finis,le choix des types d'éléments utilisés une structure dépend de sa géométrie et de sa forme. Ces éléments peuvent être :

- Des éléments unidirectionnels.
- Des éléments bidimmensionnels.
- Des éléments tridimensionnels.

3.1. Les éléments unidimensionnels

Ce sont des éléments qui permettent de discrétiser (subdiviser) les structures unidimensionnelles.

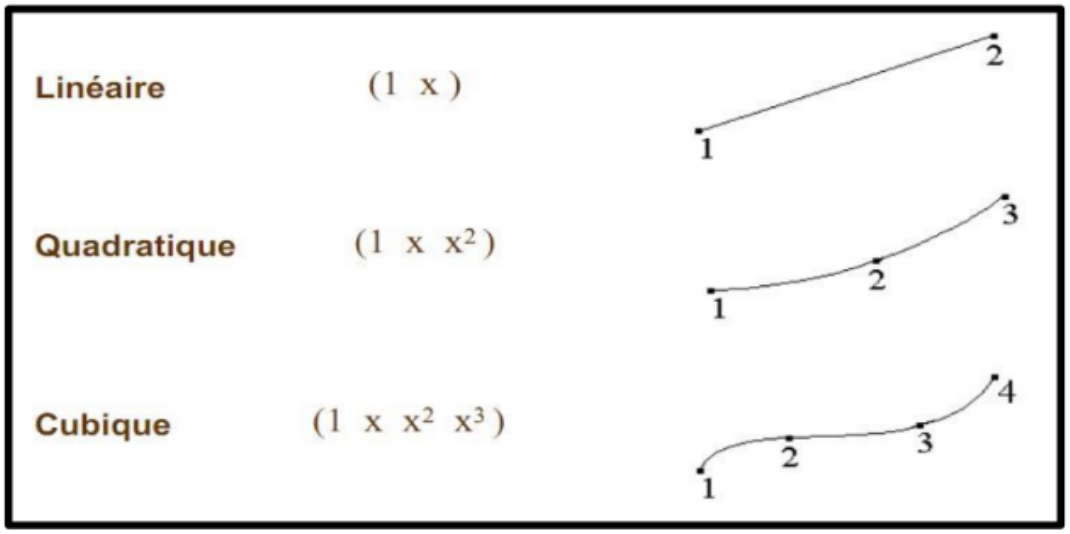


Figure 2.1 Eléments à une dimension

3.2. Les éléments bidimensionnels

Il s'agit d'une structure dont une dimension est beaucoup plus petite que les deux autres. Les éléments bidimensionnels sont utilisés pour discrétiser ce type de structures. Leur forme est généralement triangulaire, rectangulaire ou quadrilatérale.

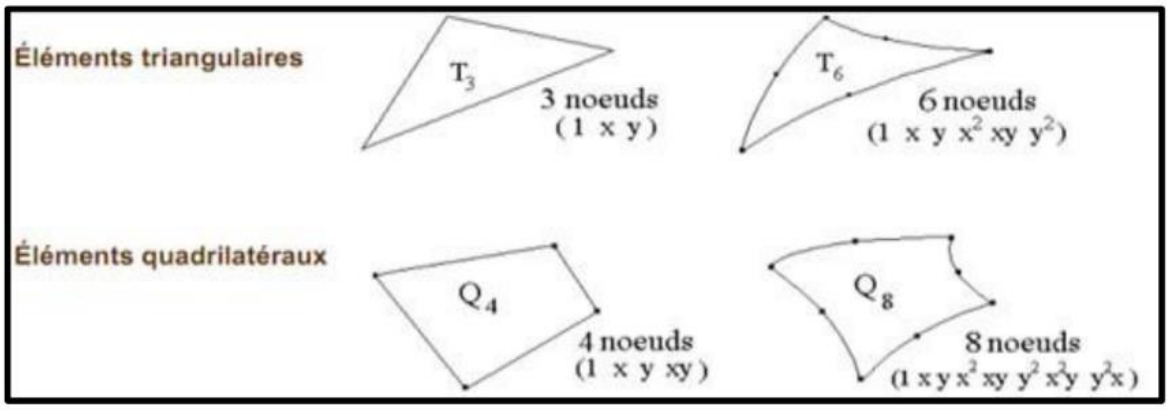


Figure 2.2. Eléments à deux dimensions

3.3. Les éléments tridimensionnels

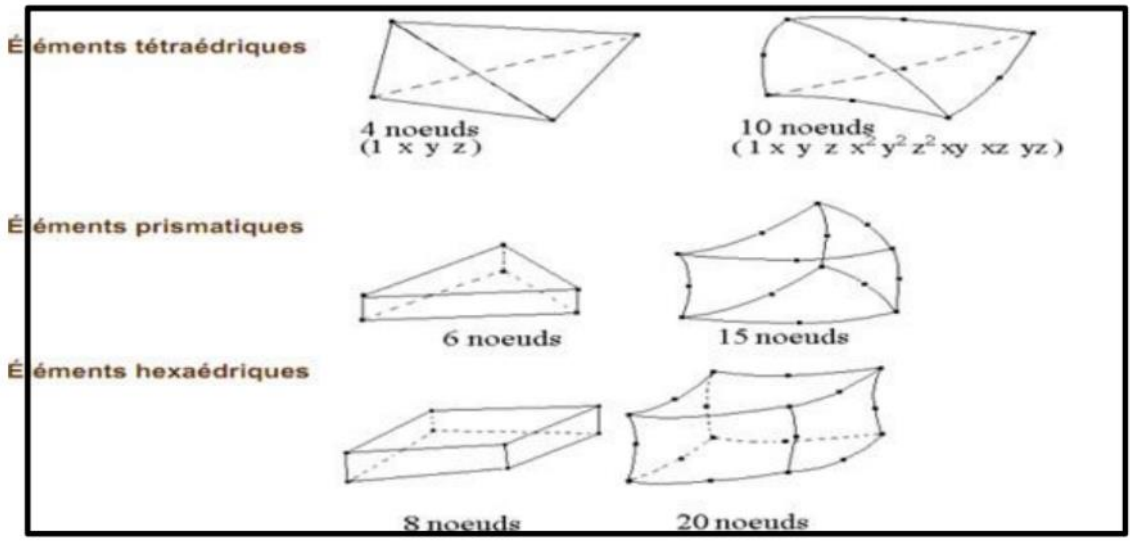


Figure 2.3. Eléments à trois dimensions

4.Le code PLAXIS version 8.2

4.1. Aperçu historique

Le développement du logiciel PLAXIS a débuté en 1987 à l'Université technique de Delft, sous l'impulsion du département allemand des travaux publics et de la gestion des eaux. Le projet initial visait à créer un logiciel d'éléments finis en 2D, facile à utiliser, destiné à analyser les talus en sols mous situés le long des rivières des plaines hollandaises.
Quelques années plus tard, PLAXIS a été étendu pour couvrir un spectre plus large d'applications géotechniques. En 1993, avec l'expansion des activités dans ce domaine, la société PLAXIS b.v. a été fondée. En 1998, la première version de PLAXIS pour Windows a été commercialisée, tandis que le développement du module Kernel pour les calculs en 3D débutait également. Après plusieurs années d'évolution, le programme Tunnel PLAXIS 3D a été lancé en 2001.

4.2. Présentation du logiciel

PLAXIS est un logiciel d'éléments finis en deux ou trois dimensions, spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité dans divers domaines géotechniques. Il permet de modéliser des situations réelles à l'aide de modèles plans ou axisymétriques.
Le programme dispose d'une interface graphique conviviale qui facilite la création rapided'un modèle géométrique ainsi que le maillage en éléments finis, généralement basé sur la Coupe verticale de l'ouvrage étudié. Les utilisateurs doivent être à l'aise avec un environnement Windows pour exploiter pleinement le logiciel.
Pour faciliter la prise en main, l'interface de PLAXIS est organisée en quatre modules principaux : Input (saisie des données), Calculation (exécution des calculs), Output (visualisation des résultats) et Curves (analyse graphique).

4.3. Le programme d'entrée de données (Input)

Le programme intègre tous les outils nécessaires pour créer et modifier un modèle géométrique, générer le maillage d'éléments finis associé, ainsi que définir les conditions initiales.

4.3.1. Le programme de calcul (Calculation)

Ce logiciel regroupe tous les éléments nécessaires pour configurer et lancer un calcul selon la méthode des éléments finis. Lors du démarrage, l'utilisateur doit sélectionner le projet sur lequel les calculs seront effectués.

4.3.2 Le programme de résultats (Output)

Ce logiciel comprend tous les outils nécessaires pour visualiser les résultats issus des données générées et des calculs par éléments finis. Au lancement du module de visualisation, l'utilisateur doit sélectionner le modèle ainsi que la phase de calcul ou l'itération correspondant(e) aux résultats à afficher.

4.3.3. Le programme courbe (Curves)

Ce logiciel offre tous les outils nécessaires pour produire des courbes charge-déplacement, des trajectoires de contraintes et des courbes contraintes-déformations**.**

4.4. Types d'éléments utilisé par PLAXIS

La version 8.2 de Plaxis permet d'elaborer des analyses par éléments finis bidimensionels. Les modèles peuvent être de type plan (deformation plane) ou axisymétrique (Axisymmetric), le paramètre par défaut étant configuré sur deformation planes.

Les modèles en déformation plane (deformation plane) s'appliquent aux structures possédant une section plus ou moins uniforme, avec un état de contraintes et un schéma de chargement constants sur une longueur suffisante perpendiculairement à cette section (direction z). Dans ce cas, les déplacements perpendiculaires à la section sont supposés nuls, tandis que les contraintes normales dans la direction z sont pleinement prises en compte.

Les modèles axisymétriques sont adaptés aux structures circulaires avec une section radiale relativement uniforme, soumises à un chargement réparti autour de l'axe central, où les états de contraintes et de déformations sont identiques dans toutes les directions radiales. Pour ces problèmes, la coordonnée x représente le rayon, tandis que la coordonnée y correspond à l'axe de symétrie. Il est important de ne pas utiliser de valeurs négatives pour la coordonnée x dans ce cas.

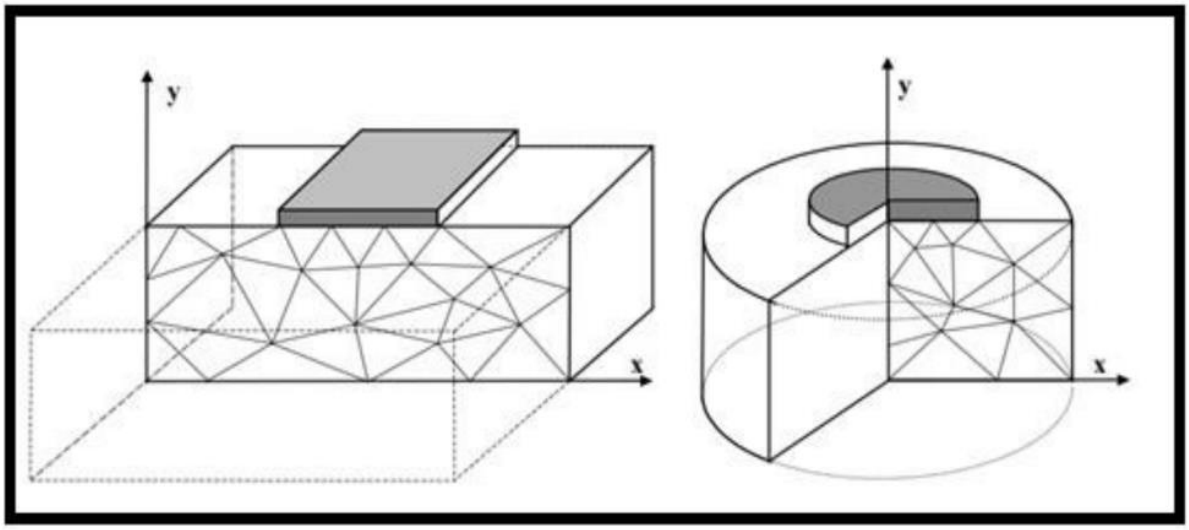


Figure 2.4. Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.

4.5. Les éléments

Dans PLAXIS, deux types d'éléments peuvent être utilisés : l'élément triangulaire à 6 nœuds et l'élément triangulaire à 15 nœuds. Ces éléments servent à modéliser les couches de sol ainsi que d'autres volumes.

L'élément à 15 nœuds offre une interpolation de quatrième ordre pour les déplacements, avec une intégration numérique réalisée sur douze points de Gauss (points de contrainte). Pour l'élément à 6 nœuds, l'interpolation est de second ordre et l'intégration numérique s'effectue sur trois points de Gauss.

L'élément triangulaire à 15 nœuds est particulièrement précis et fournit des résultats de haute qualité en termes de contraintes pour divers problèmes. En revanche, l'élément à 6 nœuds donne de bons résultats pour les analyses classiques de déformation, à condition que le maillage comporte un nombre suffisant d'éléments.

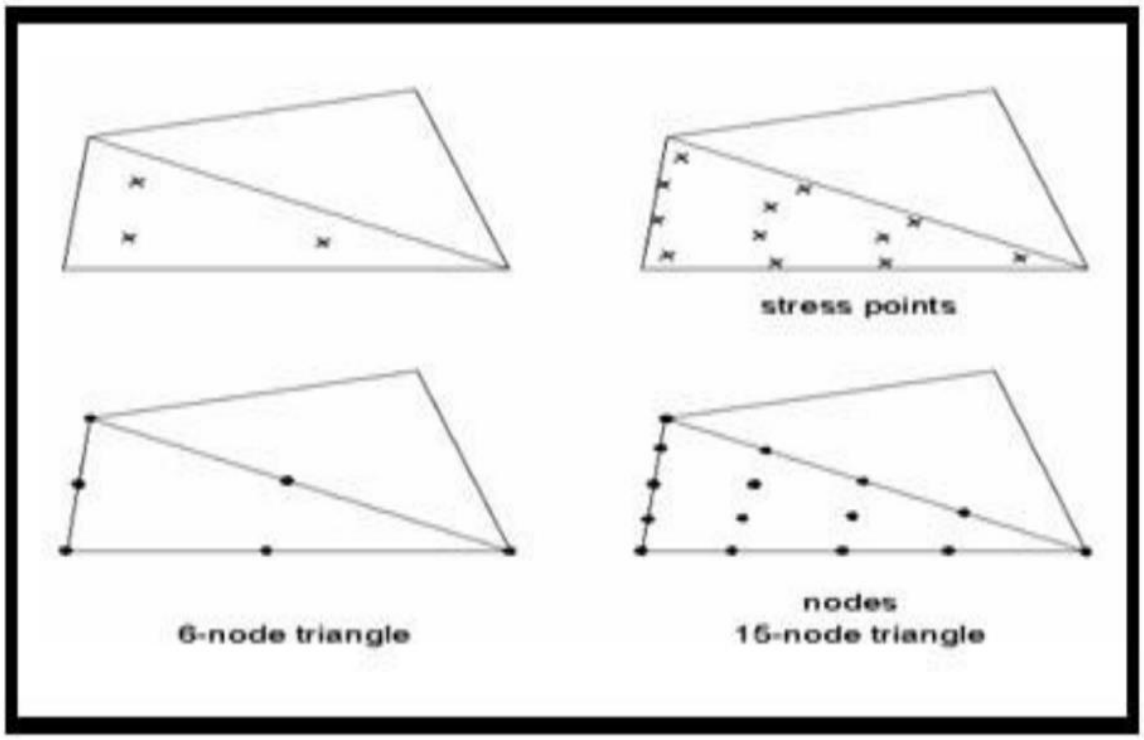


Figure 2.5. Position des nœuds / points de contrainte dans les éléments de sol.

En complément des éléments de sol, des éléments de plaque compatibles sont employés pour modéliser le comportement des murs, plaques et coques, tandis que des éléments de géo - grilles permettent de simuler les performances des géo grilles et treillis.

Par ailleurs, des éléments d'interface compatibles sont utilisés pour représenter l'interaction entre le sol et la structure. Enfin, le mode de création de la géométrie facilite l'intégration d'ancrages à tête fixe (butons) ainsi que d'ancrages connectés nœud-à-nœud.

4.5.1 Les éléments d'interface

Les interfaces sont constituées d'éléments d'interface. La figure 5.6 illustre la manière dont ces éléments sont connectés aux éléments de sol.

Pour les éléments de sol à 15 nœuds, chaque élément d'interface est défini par cinq paires de nœuds. En revanche, pour les éléments de sol à 6 nœuds, l'élément d'interface est défini par trois paires de nœuds.

Bien que les éléments d'interface soient représentés graphiquement avec une épaisseur finie, leur formulation dans le cadre de la méthode des éléments finis suppose que les coordonnées des paires de nœuds sont identiques, ce qui implique que l'épaisseur réelle de l'élément est nulle.

Chaque interface est associée à une épaisseur virtuelle, déterminée par le produit du facteur d'épaisseur virtuelle (Virtual Thickness Factor) et de la taille moyenne de l'élément.

La matrice de rigidité des éléments d'interface est calculée à l'aide de la méthode d'intégration de Newton-Cotes. Les points de contrainte de cette méthode correspondent aux paires de nœuds :

- Cinq points de contrainte sont utilisés pour les éléments d'interface associés aux éléments de sol à 15 nœuds,
- Trois points de contrainte sont utilisés pour ceux associés aux éléments de sol à 6 nœuds.

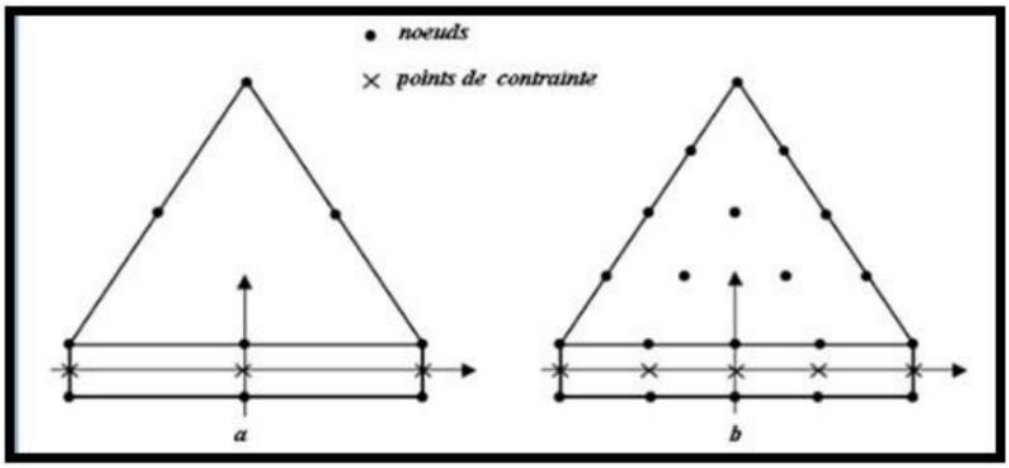


Figure 2.6. Distribution des nœuds/ points de contrainte dans les éléments D'interface et connexion avec les éléments de sol.

5. La démarche de Modélisation

Un aperçu des principales fonctionnalités est présenté ci-dessous :

5.1 Entrée des données

a. La géométrie du modèle

La définition des couches de sol, des structures, des phases de construction, des charges et des conditions aux limites repose sur des procédures graphiques conviviales, facilitant ainsi une

modélisation précise et détaillée des conditions réelles. Le maillage en éléments finis 2D est ensuite généré automatiquement à partir du modèle géométrique établi.

b. Conditions aux limites

Les fixités correspondent à des déplacements nuls imposés. Ces conditions aux limites peuvent être appliquées aussi bien aux lignes qu'aux points définissant la géométrie du modèle, selon les directions x et/ou y. Une option permet également d'appliquer des conditions d'appui standard, adaptées à la plupart des situations courantes.

c. Chargement

Deux systèmes de chargement indépendants sont disponibles pour appliquer soit des forces ponctuelles, soit des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie, tandis que les charges réparties peuvent être assignées à n'importe quelle ligne, y compris à l'intérieur du modèle, et non uniquement sur les frontières externes.

Les valeurs des charges peuvent être modifiées dans le mode "Construction par étapes" et/ou ajustées à l'aide de multiplicateurs.

d. Propriétés des Matériaux

Dans PLAXIS, les propriétés du sol ainsi que celles des matériaux des structures sont regroupées dans une base de données. Quatre types de matériaux y sont distingués :

Les quatre types de matériaux disponibles sont : les sols et interfaces, les plaques, les géo grilles et les ancrages. Pour chaque type, un modèle de comportement est sélectionné, accompagné des paramètres nécessaires à sa définition.

Concernant les sols, en plus des caractéristiques mécaniques, il est également possible de paramétrer les interfaces avec les autres éléments du modèle. Il est par ailleurs indispensable de définir le comportement hydraulique du sol, en précisant s'il est drainé, non drainé, ou non poreux.

e. Génération automatique du maillage

Plaxis permet la génération entièrement automatique de maillages non structurés en éléments finis, avec la possibilité d'effectuer un raffinement global ou local selon les besoins. Le maillage peut intégrer plusieurs milliers d'éléments.

f. Conditions initiales

Une fois le modèle géométrique défini et le maillage d'éléments finis généré, il est nécessaire de spécifier l'état initial des contraintes ainsi que la configuration initiale. Cette étape s'effectue dans la section dédiée aux conditions initiales du module d'entrée de données.
Les conditions initiales se présentent sous deux modes distincts :

- Le mode des conditions hydrauliques, utilisé pour générer les pressions interstitielles initiales,
- Le mode de configuration géométrique, qui permet de définir la configuration initiale du modèle et de générer le champ de contraintes effectives initiales.

5.2. Calculs

Le module de calcul permet de réaliser des analyses de déformation selon différentes approches : calcul plastique, calcul de consolidation ou calcul en grandes déformations. Il permet également d'évaluer le coefficient de sécurité. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies et paramétrées avant de lancer l'analyse.

5.3. Analyse des Résultats

Les résultats principaux d'un calcul par éléments finis comprennent les déplacements aux nœuds ainsi que les contraintes aux points de contrainte. Par ailleurs, lorsque le modèle intègre des éléments de structure, les efforts internes au sein de ces éléments sont également déterminés.

a. Déformations

Les déformations peuvent être représentées graphiquement sous différentes formes : maillage déformé, cartes de déplacements (totaux ou incrémentaux) ou cartes de déformations (totales ou incrémentales).

Formations.

b. Contraintes

Les contraintes peuvent être restituées sous différentes formes : contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles.

5.4. Les modèles de comportements intégrés dans Plaxis

PLAXIS intègre plusieurs modèles de comportement du sol, plus ou moins complexes, tels que le modèle élastique linéaire, le modèle de Mohr-Coulomb, ainsi que des modèles avancés prenant en compte l'écrouissage ou spécialement conçus pour les sols mous.

Pour l'analyse d'un ouvrage de soutènement (paroi moulée, palplanche, etc.), il est généralement pertinent de considérer le sol comme un matériau élastoplastique. Dans ce contexte, le modèle de Mohr-Coulomb s'avère particulièrement adapter, s'inscrivant dans une approche de calcul basée sur les méthodes élastoplastiques avec coefficients de raideur.

Ce modèle nécessite la définition de cinq paramètres fondamentaux.

Les deux premiers, E (module de Young) et ν (coefficient de Poisson), sont des paramètres d'élasticité.

Les deux suivants, c (cohésion) et φ (angle de frottement), sont des paramètres géotechniques classiques, généralement obtenus par des essais en laboratoire, et indispensables pour les calculs de déformation ou de stabilité.

Enfin, ce modèle étant non associé, il inclut également ψ, l'angle de dilatance.

a. Le module de Young (E)

Le choix du module de déformation constitue l'un des aspects les plus complexes en géotechnique. En réalité, ce module varie en fonction de la déformation et de la contrainte moyenne appliquée.

Dans le cadre du modèle de Mohr-Coulomb, le module est considéré comme constant, ce qui peut s'avérer peu réaliste. Il est notamment inapproprié d'adopter un module tangent à l'origine, correspondant au Gmax (module de cisaillement maximal) mesuré lors d'essais dynamiques ou à très faibles déformations.

b. Coefficient de Poisson (υ)

Il est généralement recommandé d'utiliser une valeur du coefficient de Poisson comprise entre 0,2 et 0,4, ce qui est considéré comme réaliste pour la prise en compte du poids propre des sols. Dans certains cas spécifiques, notamment en phase de décharge, des valeurs plus faibles peuvent être envisagées. En revanche, pour des sols quasi incompressibles, le coefficient de Poisson tend vers 0,5, bien que cette valeur ne soit pas directement exploitable dans les calculs.

PLAXIS ne permet pas de modéliser une variation de l'angle de frottement en fonction de la contrainte moyenne. L'utilisateur doit donc spécifier soit l'angle de frottement au pic, soit l'angle de frottement résiduel. Il convient de noter que des valeurs d'angle de frottement supérieures à 35° peuvent entraîner une augmentation significative du temps de calcul. Il est donc conseillé de débuter les simulations avec des valeurs modérées, puis de les ajuster progressivement si nécessaire.

L'angle de frottement peut également être estimé à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

c. Cohesion (c)

Il peut être pertinent d'attribuer une cohésion très faible, même à des matériaux purement frottant.

6. Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, il est important de souligner qu'il n'existe pas de différence fondamentale entre les paramètres géotechniques utilisés dans PLAXIS et ceux employés lors de calculs manuels, notamment en matière de tassement ou de stabilité. À partir des résultats d'essais, il est tout à fait possible de définir un modèle géotechnique représentatif du terrain. Cependant, certains paramètres spécifiques à PLAXIS peuvent différer dans leur formulation tout en restant étroitement liés aux paramètres géotechniques classiques.

CHAPITRE 3

MODELISATION NUMERIQUE

1. Introduction

Avant tout, il convient de souligner que, dans le cadre de cette étude, la modélisation constitue une étape essentielle, déterminante pour la qualité des analyses de diagnostic et de prévision du comportement des sols et des ouvrages.

En effet, un modèle ne se limite pas à un ensemble d'équations traduisant le comportement physique ou mécanique du sol ; il représente également une configuration géométrique de l'espace. Son rôle principal est de définir les limites et les volumes occupés par chaque type de matériau (sol, roche, eau, béton, métal, matériaux géo synthétiques, etc.).

Il précise la localisation des conditions aux limites ainsi que des interfaces, incluant leurs conditions de contact.

Dans ce chapitre, le logiciel PLAXIS 8.2 sera utilisé afin de modéliser le comportement d'un mur de soutènement constitué d'un mur palplanche (sheet pile wall) enfoui dans le sol.

Les résultats des simulations obtenus au cours de cette étude seront présentés sous forme de graphiques et feront l'objet d'une analyse approfondie.

2. Simulation Numérique

2.1. Présentation du Cas à étudié

L'étude porte sur l'analyse du comportement d'un mur de soutènement cantilever

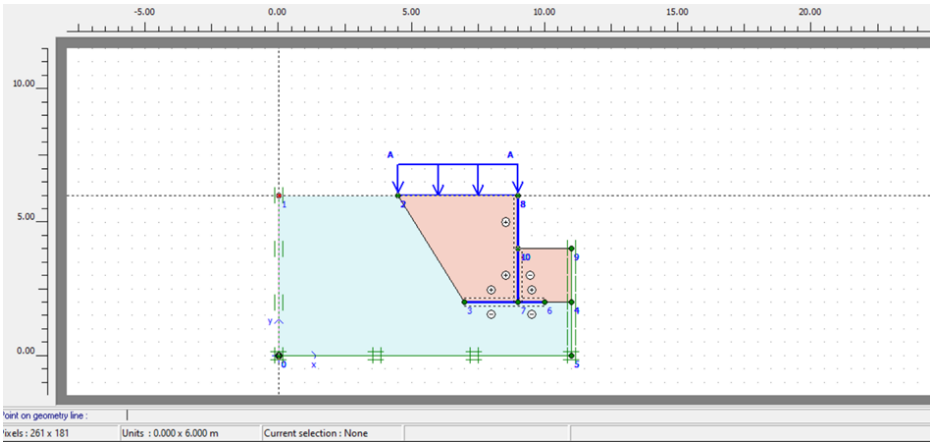


Figure 3.1 géométrie du modèle à analyser par plaxis.

2.2. Entrée des données

Données du problème :

Les données géométriques sont directement introduites par les coordonnées x et y lors de la construction du modèle. Les données géotechniques, sont regroupées dans le tableau ci-après pour chaque couche de sol.

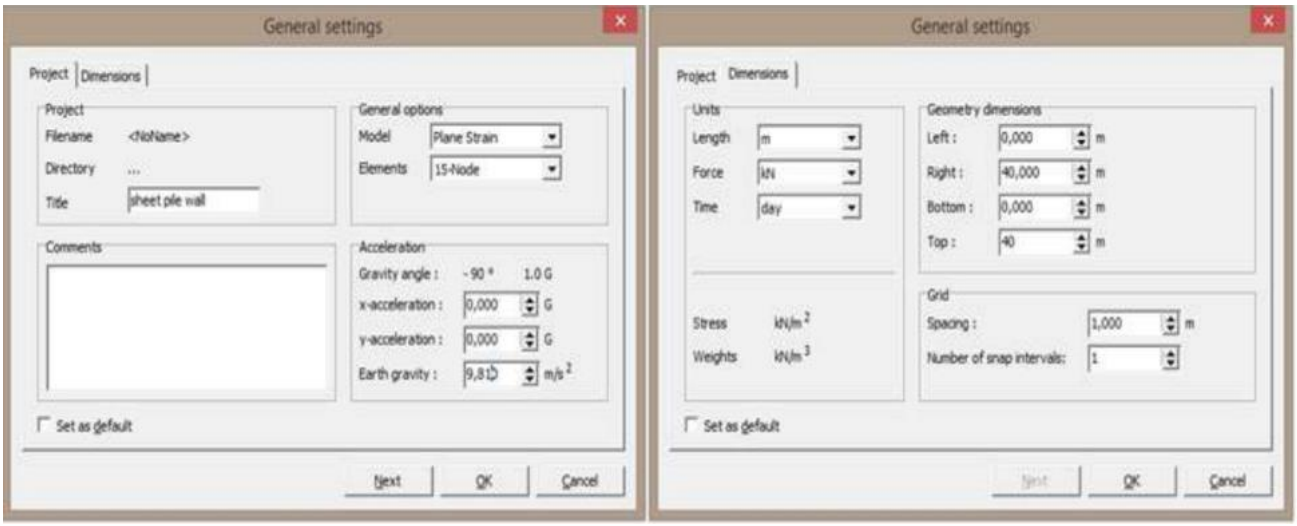


Figure 3.2. Menu « General settings ».

- Concernant le remblai sélectionné derrière le mur :

	$\varphi(°)$	C(KPa)	Ψ
Remblai	30	10	0

Tableau3.1 : Caractéristiques mécanique de remblai

2.

	Γ sat KN/(m^3)	**Γ unsat KN /(m^3)**	**C**(KPa)	**φ**(°)	**ц**	**E KN/(m^2)**
Argile sableuse	18	20	25	25	0.3	40000

Tableau3.2 : Caractéristiques mécanique de couche de sol (argile sableuse)

	E (kPa)	**ц**	**Φ(°)**	**C(kPa)**	**EA (KN)**	**EI(KN.m^2)**
Mur	40000	0.3	25	25	5*10-6	5*10-6
Semelle	20000	0.28	30	10	10-3	10-3

EA : Rigidité axiale.

EI : Rigidité flexionnelle

2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites appliquées dans ce calcul sont :

- Déplacements horizontaux bloqués dans la direction x sur les côtés du massif de sol.
- Déplacements verticaux et horizontaux annulés à la base du massif de sol.

2.4. Génération du maillage

Dans cette étude, la discrétisation du modèle a été réalisée à l'aide d'éléments triangulaires à 15 nœuds (Figure 3.4), totalisant 122 éléments triangulaires, nœuds et points de contrainte. Le niveau de finesse du maillage a été réglé sur l'option « coarse » (grossier).

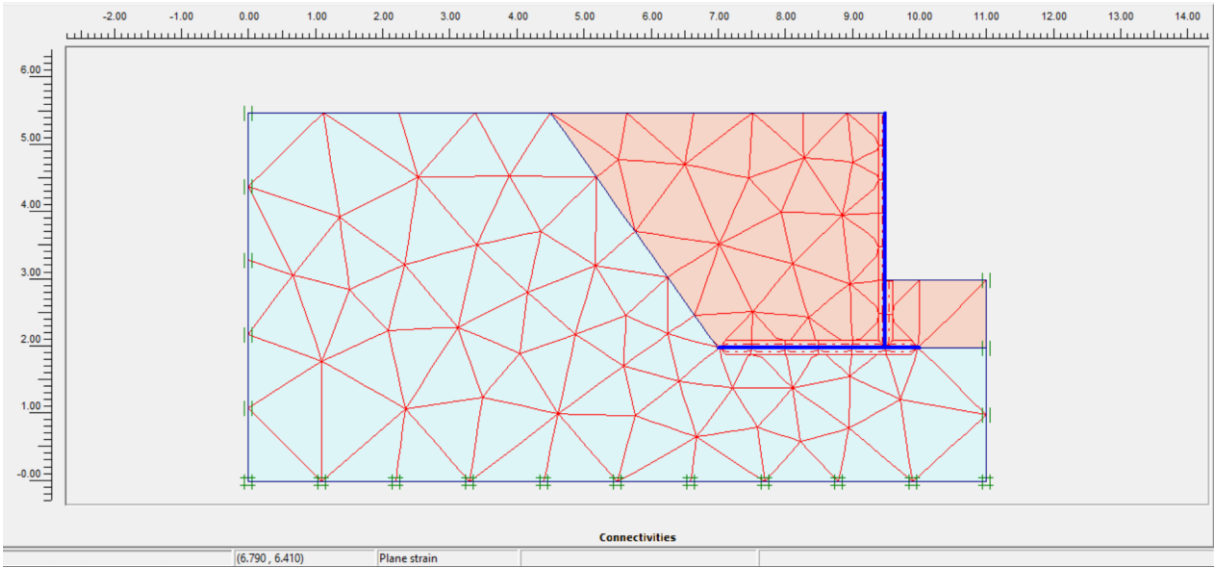


Figure 3.3 Maillage du model.

2.5. Les conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles

Ainsi que les contraintes initiales.

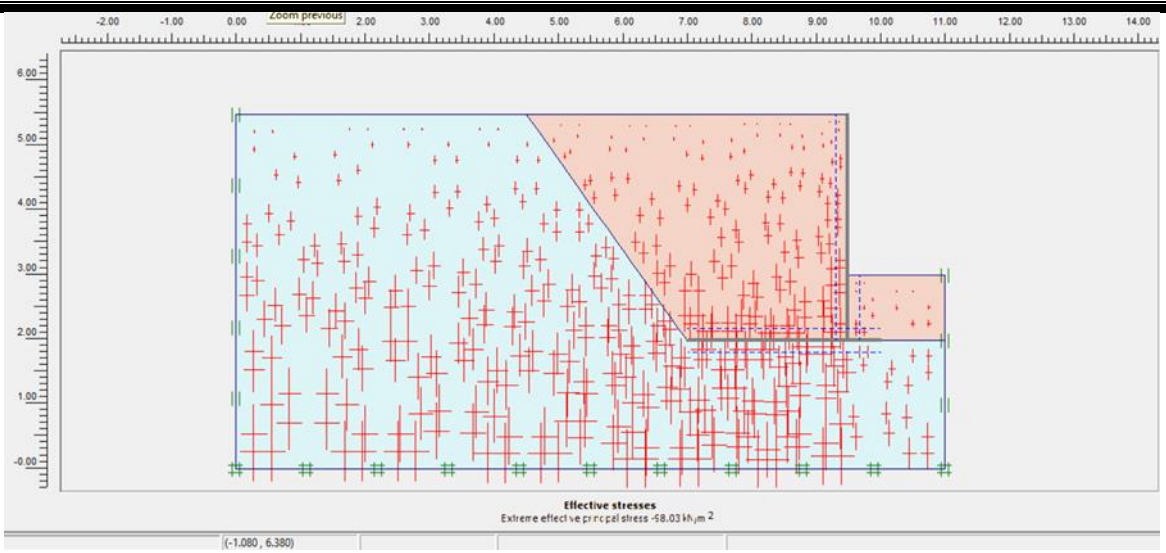
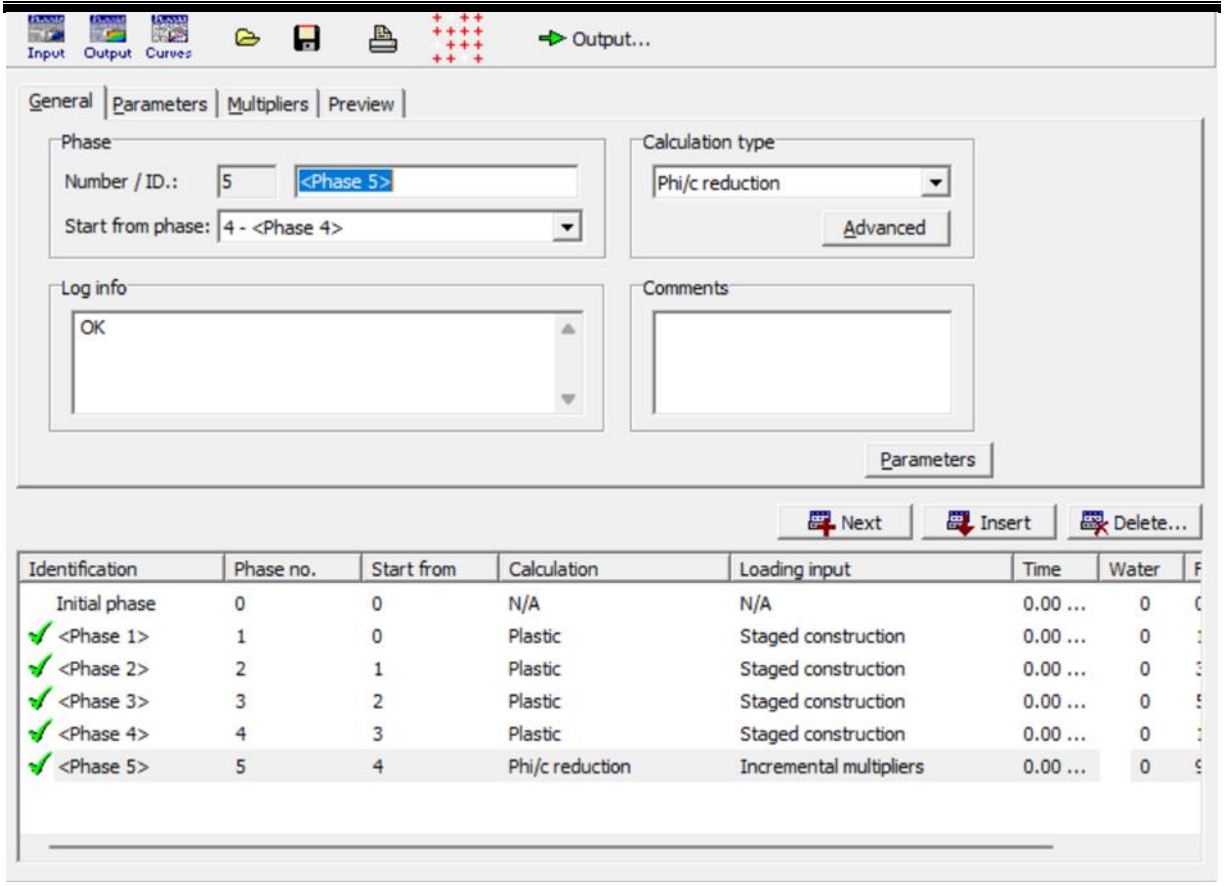


Figure 3.4 contrainte effective

2.6. Étape de calcul :

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer Selon le cas étudié, le calcul est fait en deux phases. Dans la première on applique la gravité, on prend en compte les conditions hydrauliques et comme type de calcul on choisit celui plastique, ce pendant dans la deuxième phase on fait le calcul du facteur des écrite, où les points choisis pour le calcul sont à la crête du talus, au centre, au pied.



Figues 3.5 phases de calcul

La modélisation a été réalisée en suivant les étapes ci-dessous :

1. Lancement d'un nouveau projet.

2. Définition des objets géométriques.

3. Création d'un modèle en déformation plane (Plane Strain).

4. Définition et attribution des propriétés du sol à l'aide du modèle de Mohr-Coulomb.

5. Modélisation du mur en beton arme à l'aide de la fonction « Plaque » (Plate).

6. Création et attribution des propriétés des matériaux pour les plaques.

8. Définition et affectation des caractéristiques matérielles du tirant.

9. Application des charges.

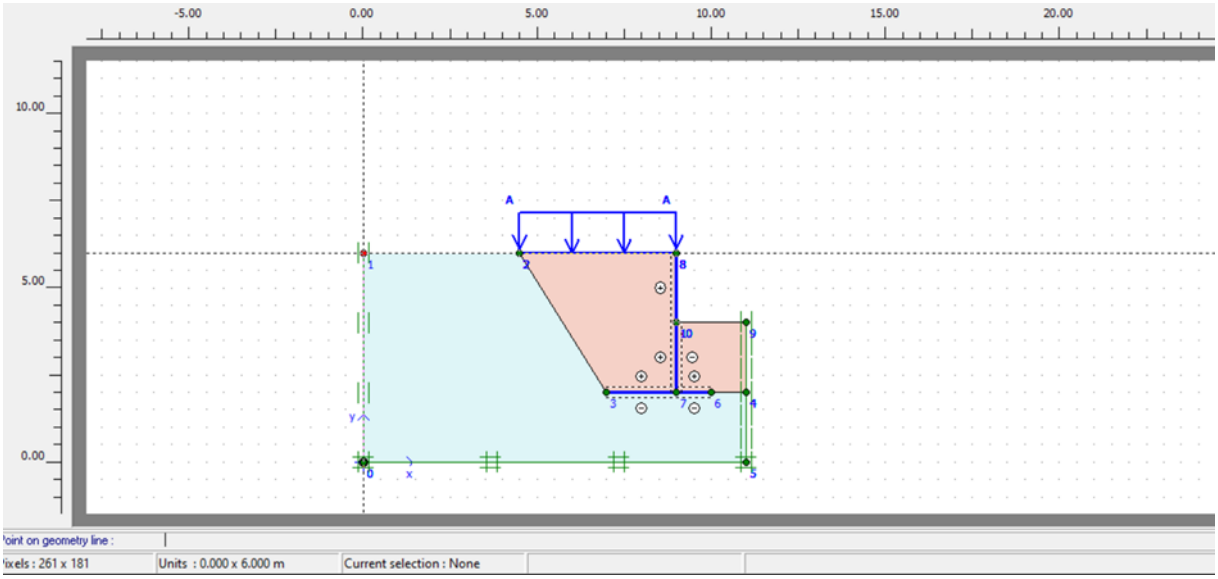
10. Génération du maillage.

11. Définition des paramètres de calcul.

12. Activation et ajustement des valeurs des charges dans les différentes phases de calcul.

13. Affichage et analyse des résultats obtenus.

14. Génération des courbes de résultats.



Figues 3.6 modélisation du modèle

3-1 Simulation avec le code Plaxis 2D :

Le logiciel Plaxis permet de modéliser au mieux les ouvrages géotechniques. Le critère de rupture de Mohr-Coulomb, est souvent adopté pour décrire le comportement de sol dans le domaine élasto-plastique. Ce modèle est caractérisé par cinq paramètres :

- **En élasticité ;** E : module d'élasticité ;

N : coefficient de Poisson,

- **En plasticité ;** c : cohésion du sol,

Φ : angle de frottement du sol,

Ψ : angle de dilatance du sol

Étape de calcul :

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer Selon le cas

étudié, le calcul est fait en deux phases. Dans la première on applique la gravité, on prend en compte les conditions hydrauliques et comme type de calcul on choisit celui plastique, ce pendant dans la deuxième phase on fait le calcul du facteur des écrite, où les points choisis pour le calcul sont à la crête du talus, au centre, au pied.

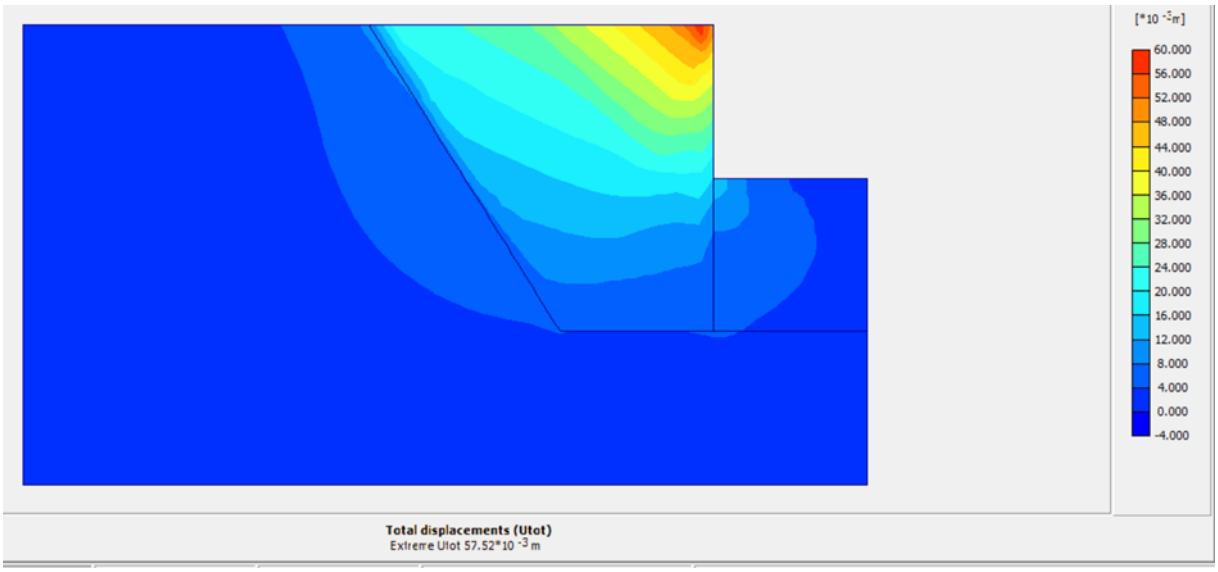


Figure 3.7 : Déplacement totaux à travers le talus.

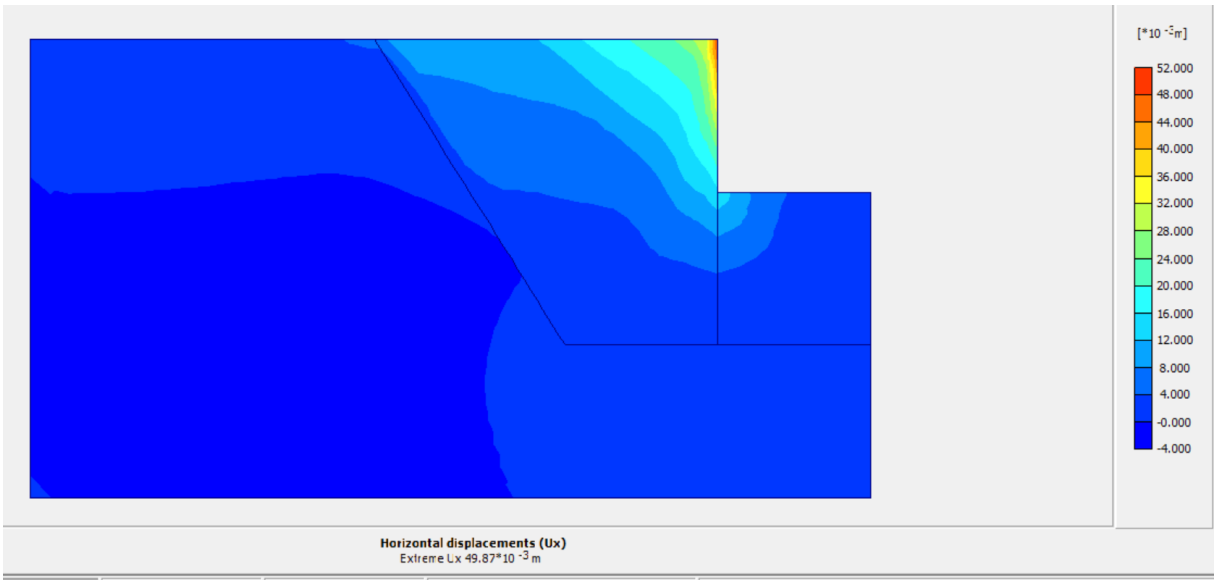


Figure 3.8: Déplacement horizontale

La géométrie actuelle présente une faiblesse mécanique au niveau de l'angle vif.
Une optimisation du design pourrait nécessiter un adoucissement des angles ou un renforcement local pour réduire les déformations.

La distribution du déplacement indique un comportement possiblement non linéaire dans la zone étudiée.

N'hésitez pas à me fournir des détails supplémentaires si vous souhaitez une analyse Plus approfondie (conditions de charge, propriétés des matériaux, etc.).

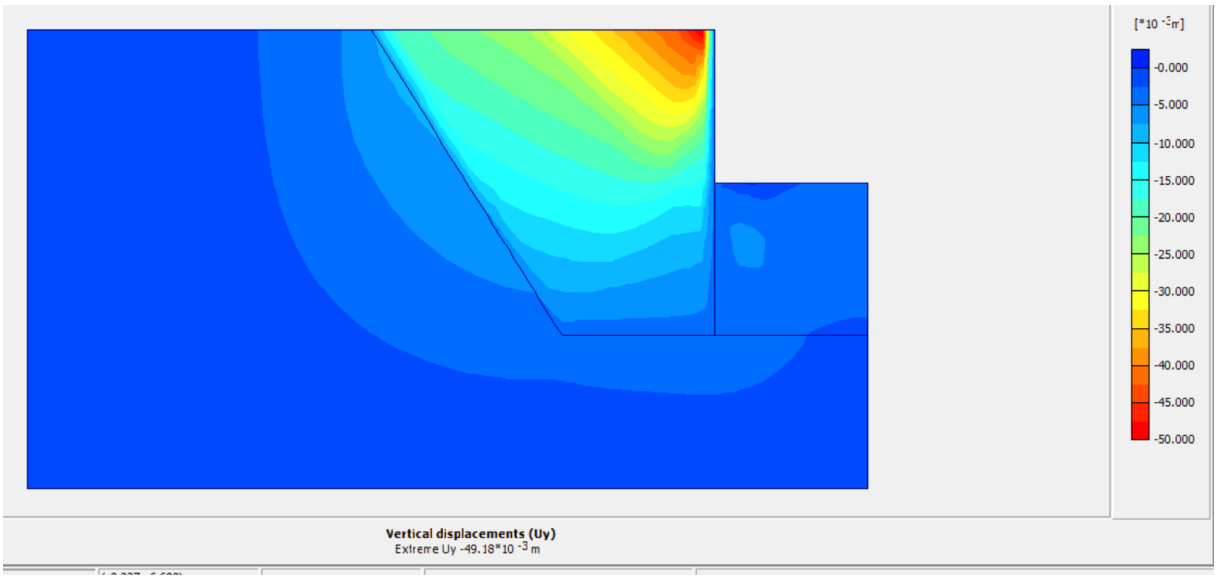


Figure 3.9: Variation des Déplacement verticale

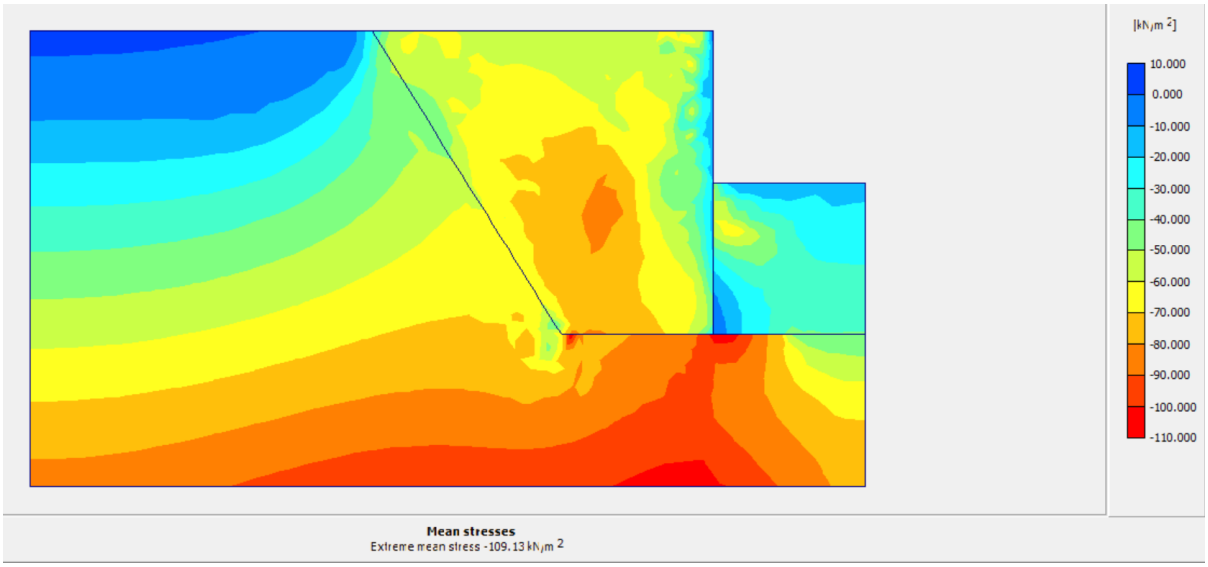


Figure 3.10: Variation des contraintes moyenne dans le sol

Discussion des résultats :

On remarque une forte concentration des contraintes dans la zone inferieure droite, ce qui peut représenter un point critique nécessitant un renforcement structurel ou une révision du design.

Des changement brusques de contraintes sont également visible aux intersections géométrique, indiquant une possible concentration des contraintes dues à des changements soudains de forme ou de charge.

Et au bas de l'image nous trouvons la contrainte moyenne maximale enregistrée est de -109.13 KN/ m², très proche de la valeur minimale sur l'échelle de couleurs, ce qui suggère que cette région est la plus soumise à la compression.

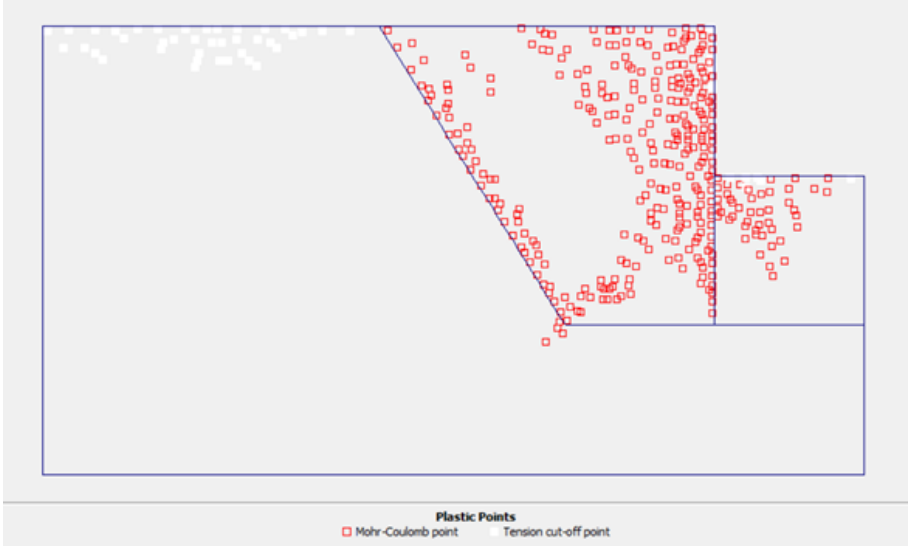


Figure 3.11: Répartition des points plastiques dans le sol

Observation principales

1- Concentration des points plastiques

On note une forte densité de points plastiques dans la zone centrale droite et le long de la frontière verticale intérieure du model.

- Cela correspond généralement aux zones de fortes contraintes identifiées dans l'image précédente (notamment les zones rouges sur la carte de contraintes moyennes).

2- Propagation de la plastification

-La plastification semble suivre des lignes de rupture potentielles ou de concentration d'efforts probablement induites par des discontinuités géométriques des changement brusques de rigidité ou des conditions aux limites contraignantes.

3- zone critique

L’angle inferieure droit du grand triangle à gauche montre un noyau de plastification intense. Suggérant un risque de ruine locale si les charges continuent d’augmenter ou si la fatigue entre en jeu.

Conclusion l’analyse des points plastique complète celle des contraintes elle confirme la localisation des zones critique et oriente les décisions d’optimisation structurelle. Cette information est essentielle pour la conception sécurisée d’éléments porteurs, en particulier dans les domaines du génie civil. Mécanique ou géotechnique.

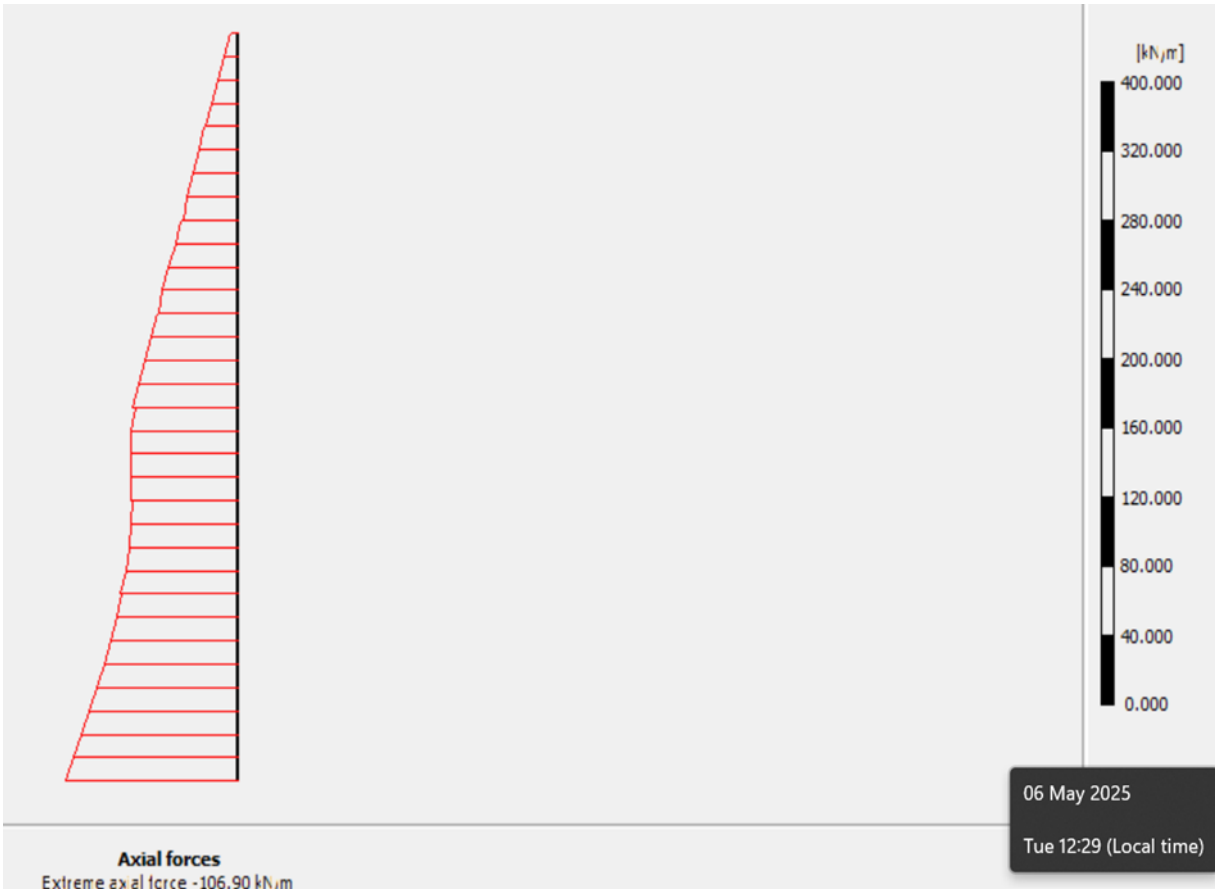


Figure 3.12: Force axiale dans le mur de soutènement

Le graphique présenté illustre la répartition des efforts axiaux (forces normales) le long d’un élément structurel vertical, vraisemblablement une colonne ou un pieu. L’axe horizontal indique l’intensité des efforts en kN/m, tandis que l’axe vertical représente la hauteur ou la profondeur de l’élément.

La courbe en rouge montre une variation progressive des efforts axiaux, avec une valeur maximale atteignant environ 400 kN/m, et une valeur extrême de traction de -106,90 kN/m, indiquée en bas du graphique. Cette répartition suggère une sollicitation non uniforme,

probablement due à des charges appliquées variables ou à des conditions aux limites différentes aux extrémités.

Ce type d'analyse est fondamental pour la vérification de la stabilité et de la résistance des éléments porteurs dans les structures, notamment dans le cadre des calculs de dimensionnement en ingénierie civile.

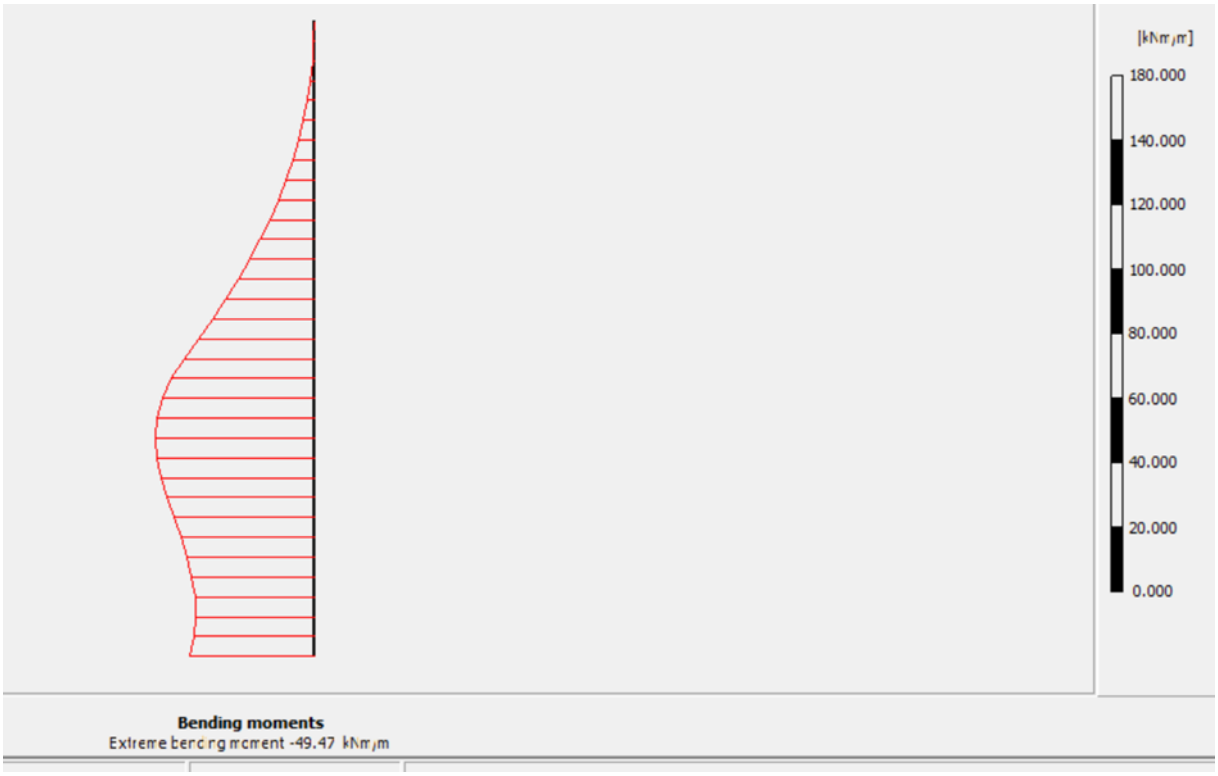


Figure 3.13: Variation du moment de flexion dans le mur de soutènement

L'image présente un diagramme des moments fléchissant résultant d'un courant externe de 49,47 kN /m. La courbe en rouge illustre la distribution des moments de flexion le long d'un élément structurel, probablement un mur ou une poutre soumise à des charges horizontales. On observe une augmentation progressive des moments vers la partie supérieure de l'élément, ce qui indique une sollicitation accrue à cette zone. Ce type d'analyse est essentiel pour le dimensionnement en ingénierie civile, car il permet de localiser les zones critiques où le renforcement est nécessaire.

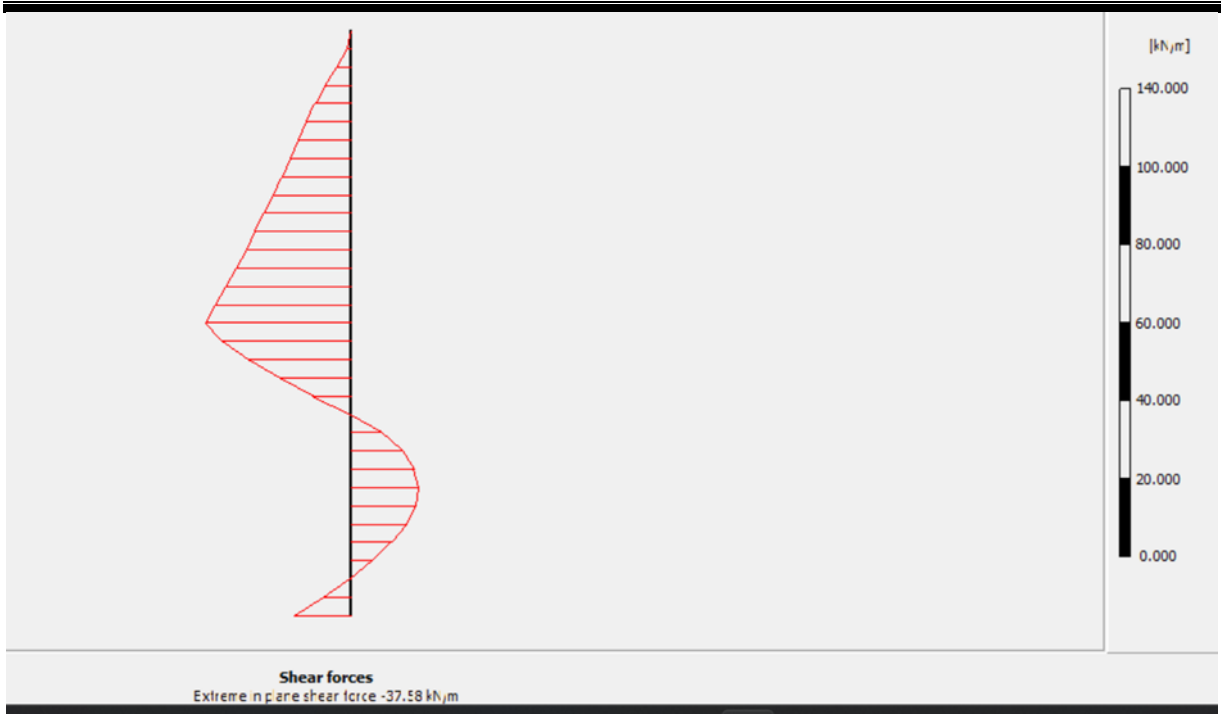


Figure 3.14: Variation de l'effort tranchant dans le murs de soutènement

L'image représente un diagramme des efforts tranchants (forces de cisaillement) dans une structure, probablement une poutre ou un mur de cisaillement, analysée sous charge. L'axe horizontal indique l'intensité des efforts tranchants en kN/m², tandis que l'axe vertical correspond à la hauteur de la structure.

La forme sinusoïdale de la courbe indique une distribution variable des efforts tranchants le long de la hauteur. On remarque un maximum d'efforts dans la partie supérieure et inférieure, avec une inversion du signe au centre, ce qui est typique dans des cas de flexion ou sous l'effet de charges latérales (comme le vent ou les séismes).

L'échelle de couleurs à droite illustre l'intensité des efforts tranchants, avec une valeur maximale proche de 140 kN/m². Le texte en bas mentionne que l'élément examiné est soumis à un effort tranchant supérieur à 37.1 kN/m, ce qui souligne un point critique à prendre en compte dans la conception ou la vérification structurelle.

Ce type de représentation est couramment utilisé dans les logiciels de calcul structurel pour évaluer la sécurité et la résistance des éléments porteurs d'un bâtiment.

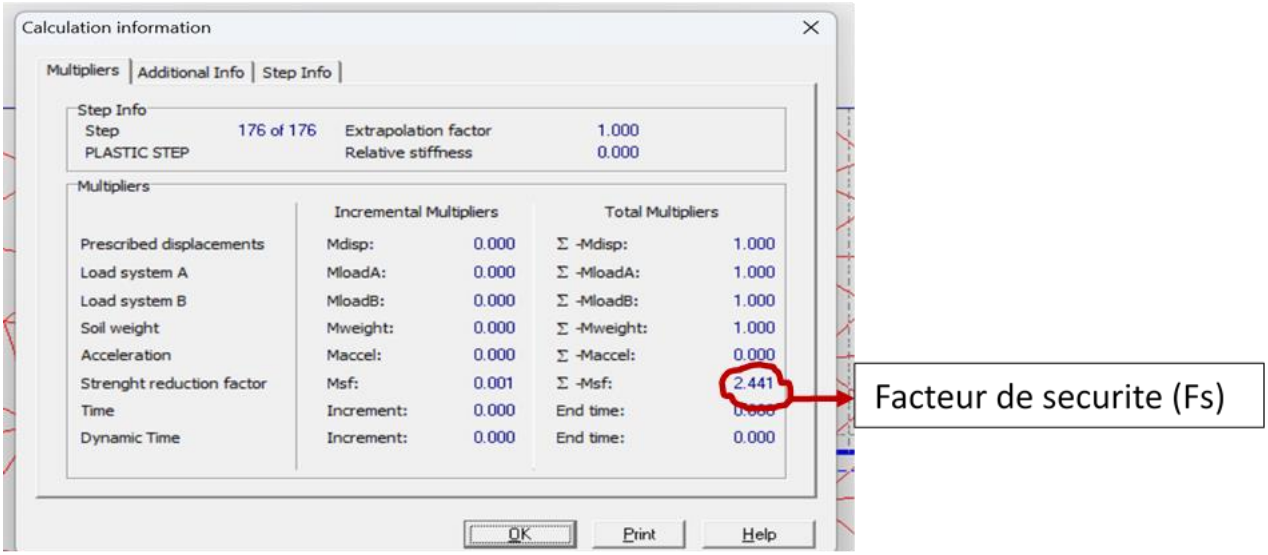


Figure 3.15 : Le facteur de sécurité obtenu par le processus c-φ réduction.

4. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, une simulation numérique a été réalisée, permettant l'analyse du comportement de mur de soutènement .de calculer le coefficient de sécurité. L'importance de cette étude réside dans le fait que la méthode et les paramètres pris en compte dans la modélisation sont aussi réalistes que possible, en effet, les étapes de la construction sont reproduites comme dans des conditions réelles.

CHAPITRE 4 :

OPTIMISATION PAR LA METHODE D'EXPERIENCE

4.1. Introduction:

Les plans d'expériences constituent une méthode optimale pour structurer les essais liés à une recherche scientifique ou à des études industrielles. Ils trouvent leur application dans une multitude de disciplines et secteurs industriels, dès lors que l'objectif est d'explorer la relation entre une grandeur d'intérêt y et des variables xi. Ces outils sont particulièrement utiles lorsqu'on cherche à analyser une fonction d'a forme suivante :

$$y = f(x_i) \quad (3.1)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum D'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche Rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un Expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revues

La méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'aboutir

Aux résultats escomptés et d'interpréter ces résultats avec un effort minimal sur le plan expérimental.

4.2. Définition d'un plan d'expérience:

Un plan d'expérience est une méthode systématique permettant de planifier et d'organiser des expériences scientifiques ou industrielles afin d'extraire des informations pertinentes en fonction des objectifs définis à l'avance. Son principal objectif est de maximiser les informations obtenues tout en minimisant le nombre d'expérimentations nécessaires.

Les plans d'expériences trouvent des applications dans divers domaines scientifiques et reposent sur deux concepts clés : l'espace expérimental et la modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

En termes généraux, un plan d'expérience vise à mettre en évidence et à quantifier l'influence entre deux types de variables :

- Le facteur
- La réponse

4.3. Choix de la méthode d'expérimentation :

La méthode d'expérimentation sélectionnée doit permettre une interprétation claire des résultats tout en réduisant le nombre d'essais nécessaires, sans compromettre leur qualité. La théorie des plans d'expériences garantit les conditions optimales pour obtenir une précision maximale avec un minimum d'essais. Cela assure ainsi une efficacité optimale, un nombre d'expérimentations réduit, et, par conséquent, un coût minimal.

4.3.1 Facteur

On désigne sous le nom de facteur les paramètres susceptibles d'influencer les réponses et que L'on peut faire varier, Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les Facteurs d'entrée et ils existent deux types :

4.3.1.1 Niveau d'un facteur

Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au Moins deux niveaux : un niveau supérieur (haut) et un niveau inférieur (bas) (figure III.3) Pour les facteurs quantitatifs la valeur est algébrique, donc classé numériquement. Pour les Facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables

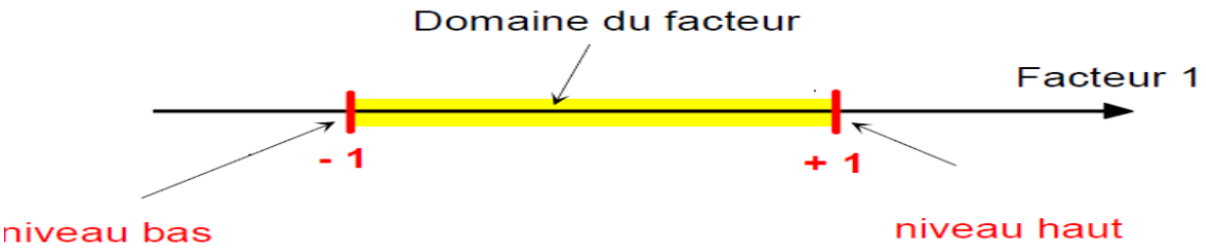


Figure 4.1 : Le domaine et les niveaux d'un facteur

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine D'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure III.4). Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une

représentation géométrique de l'étude

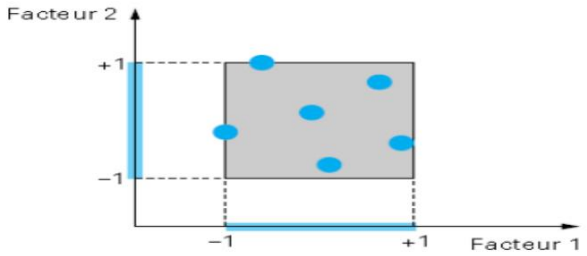


Figure 4.2 : La disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude

4.3.2 Réponses

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai, le plan vise à déterminer les facteurs Influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent Mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus mais elle peut Également être qualitative.

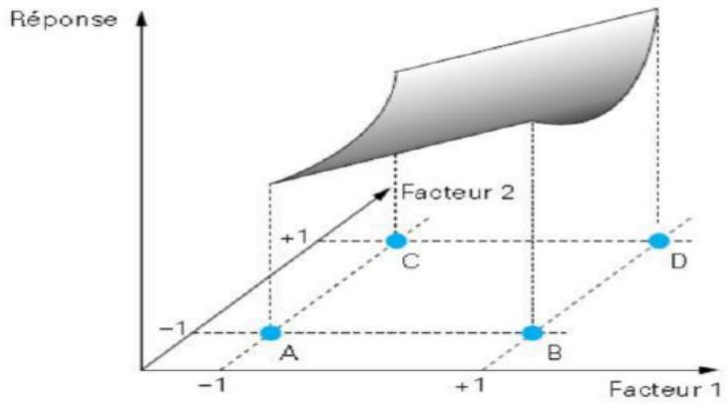


Figure 4.3 : La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.

4.3.3 Principaux avantages des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs
- Détection des interactions entre facteurs
- Modélisation des réponses étudiées
- Une précision optimum des résultats

4.4 Optimisation des Paramètres

la méthode d'optimisation proposée a pour objectif d'optimiser les paramètres géométriques influençant sur le comportement du mur, à savoir la valeur du coefficient de sécurité

(x1) la largeur du talon , (x2) la largeur du patin, et la profondeur d'encastrement (x3)

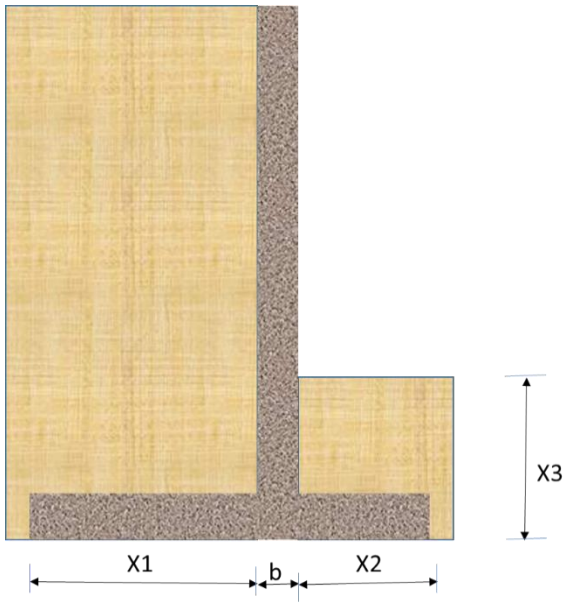


Figure 4.5 : Caractéristiques géométriques du mur

Nous considérons maintenant la mise en œuvre de la méthode des plans d'expériences de pour L'optimisation, la méthode consiste alors en premier de choisir, dans un recueil de tables, le plan d'expériences le plus adapté au modèle employé. Ce modèle comporte 3facteurs et chaque facteur possède deux niveaux, dont l'intervalle de variation de chaque paramètre est
Présenté dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Niveau de variation	
	Valeur minimale	Valeur maximale
X1	0.5	2.5
X2	0.5	1.5
X3	1	2

Tableau 4.1: Intervalle de variation des paramètres à optimiser

4.5 Choix d'un plan d'expériences

Il faut maintenant choisir un plan d'expériences, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais Permettant d'identifier les paramètres cherchés du problème. Dans ce cas d'étude, un plan Fractionnel sera adopté (voir tableau ci-dessous) :

N° d'essai	Facteurs		
	X1(m)	X2(m)	X3(m)
1	2.5	1.5	1
2	2.5	0.5	2
3	0.5	0.5	1
4	0.5	1.5	2
5	2.5	0.5	1
6	2.5	1.5	2
7	0.5	0.5	2
8	0.5	1.5	1

Tableau 4.2: Plan d'expérience (3 facteurs, 2 niveaux)

Dans ce tableau, chaque ligne corresponde à une modélisation à réaliser numériquement par le Logiciel Plaxis, donc il faut réaliser 8 modèles numériques conformément aux données du Tableau ci-dessus

4.6 Interprétation des résultats par la méthode des plans d'expérience

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant a déterminé une relation Entre les paramètres indépendants d'entrée et les données de sortie (réponse). Cette procédure Comprendre 5 étapes :

1) Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,

2) Adopter un plan de conception expérimentale,

3) Effectuer une analyse statistique de la variance (ANOVA) des variables d'entrées Indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,

4) Effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (MSR), et enfin

5) Optimiser, les paramètres d'entrée par rapport aux réponses adoptées.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y, dite variable de Réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X1, X2, …, Xk, permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse.

4.7 .1Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est un outil précieux pour évaluer l'impact des paramètres d'entrée sur les résultats expérimentaux en utilisant la méthode des plans d'expériences appliquée au modèle proposé. Elle permet également d'interpréter les données de sortie en décomposant la variation totale observée en contributions attribuées aux facteurs contrôlés et aux erreurs aléatoires. La pertinence statistique des modèles quadratiques de prédiction est déterminée à l'aide des valeurs P et F issues de l'ANOVA [13]. Dans le tableau d'ANOVA, la valeur P, comprise entre 0 et 1, représente la probabilité que les résultats observés (ou des résultats plus extrêmes) soient dus au hasard.

Si P > 0,05, le paramètre est insignifiant (Non signifiant);

Si P < 0,05, le paramètre est signifiant.

4.7.2Analyse de régression

La régression est une méthode statistique utilisée pour étudier la relation entre une variable dépendante spécifique et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette méthode permet de modéliser l'interaction entre les paramètres d'entrée, tels que la largeur du talon (x1), la largeur du patin(x2), et la profondeur d'encastrement (x3) et les paramètres de sortie, le coefficient de sécurité :

$$y=f\ (x1,\ x2,\ x3)$$

Où : Y est la fonction de réponse.

Dans notre cas le Y représente le coefficient de sécurité FS

Le coefficient de détermination $R^{2\ est}$ défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2}$$

yi : Valeur de la réponse calculée à la $ième$ expérience ;

$\bar{yi}$: Valeur mesurée à la $ième$ expérience ;

$\bar{y}$: Valeur moyenne des réponses mesurées.

Pour évaluer la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée afin de vérifier sa signification statistique et son adéquation. Le modèle est jugé approprié dans un intervalle de confiance de 95 %. Si les valeurs de P sont inférieures à 0,05, le modèle est considéré comme statistiquement significatif. Par ailleurs, plus le coefficient de détermination (R^2) se rapproche de 1, plus le modèle est en accord avec les valeurs expérimentales observées.

4.8 Résultats

Le Tableau VI.3 présente les résultats de la modélisation en termes de de facteur de securite du mur de soutènement cantilever, Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons conformément à la matrice de planification des

Expériences pour un plan fractionnel

N° d'essai	**Facteurs**			**Réponse**
	X1 (m)	**X2(m)**	**X3(m)**	**FS**
1	2.5	1.5	1	2.441
2	2.5	0.5	2	2.987
3	0.5	0.5	1	1.043
4	0.5	1.5	2	1.45
5	2.5	0.5	1	2.06
6	2.5	1.5	2	2.89
7	0.5	0.5	2	1.39
8	0.5	1.5	1	1.35

Tableau 4.3: Plan d'expériences L8 en valeurs des paramètres

Source	Somme Des carrés SS	df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
Model	3.78	3	1.26	27.81	0.0039	97.11	signifiant
X1	3.31	1	3.31	73.08	0.001	83.591	signifiant
X2	0.053	1	0.053	1.17	0.343	1.338	Non signifiant
X3	0.4154	1	0.4154	9.17	0.038	10.49	signifiant
résiduel	0.1811	4	0.045			2.324	
Total	3.96	7				100	

Tableau 4.4: Analyse de la variance ANOVA pour le coefficient de sécurité Fs

L'analyse de la variance (ANOVA) présentée dans le tableau VI.4 révèle que la largeur du talon (x1), la largeur du patin(x2), et la profondeur d'encastrement (x3) sont les facteurs prédominants influençant le coefficient de sécurité (Fs).

Leur contribution respective est de 83,59 % pour la largeur du talon (x1) et de 10,49 % pour la profondeur d'encastrement (x3) et 1,33% pour la largeur du patin (x2) considérée non significatif.

5. Analyse de régression

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (le coefficient de sécurité (Fs) et les variables d'entrées (x1, x2, et x3) a été exprimé avec un coefficient de détermination (R^2=95,42 %) correspondant à la précision de régression.

Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la sortie (FS) en fonction des facteurs étudiés.

Le modèle obtenu est présenté par l'équation

Fs= 0.140313 + 0.643125*X1 + 0.16275 * X2 + 0.45575 * X3

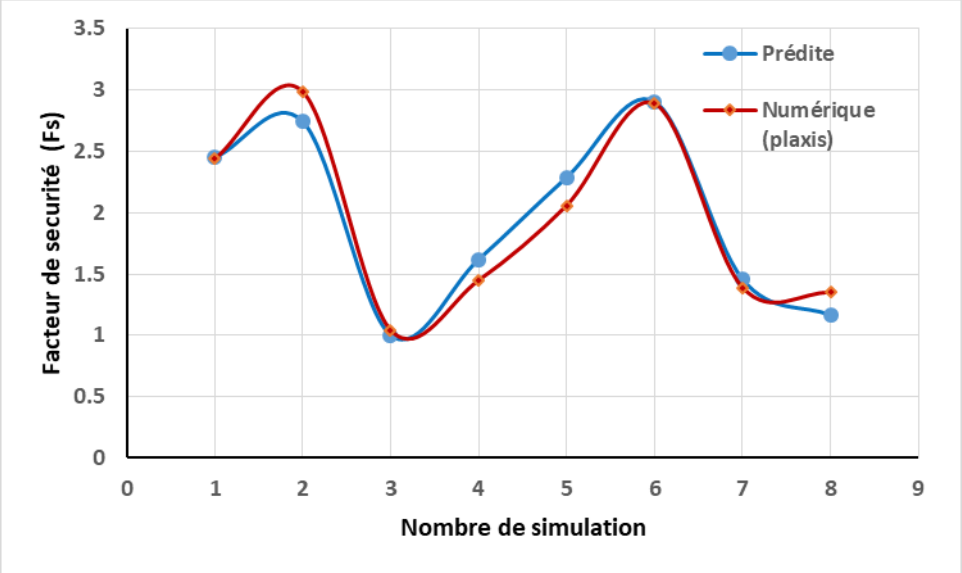


Figure 4.6 : Valeurs numériques et valeurs prédites du coefficient de sécurité FS

La figure VI.1 présente une comparaison entre les valeurs numériques et celles prédites. L'analyse des résultats révèle une forte proximité entre les deux, attestant de la précision du modèle établi.

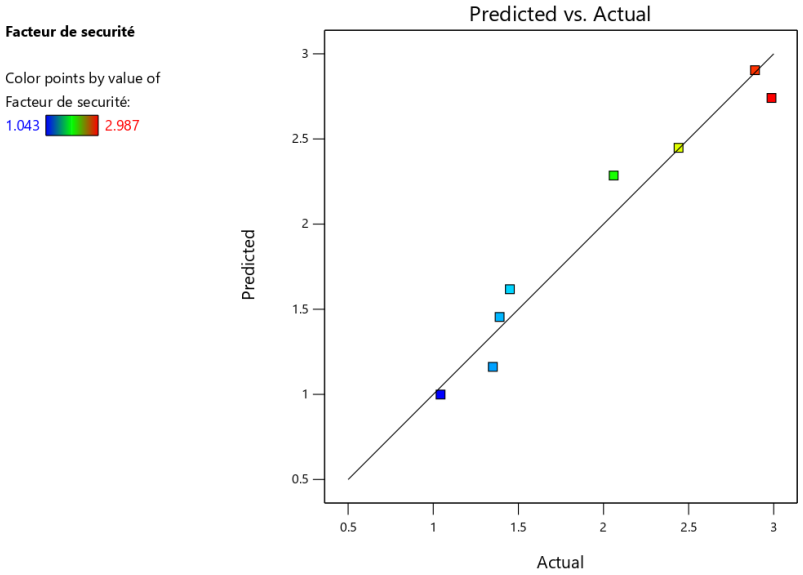
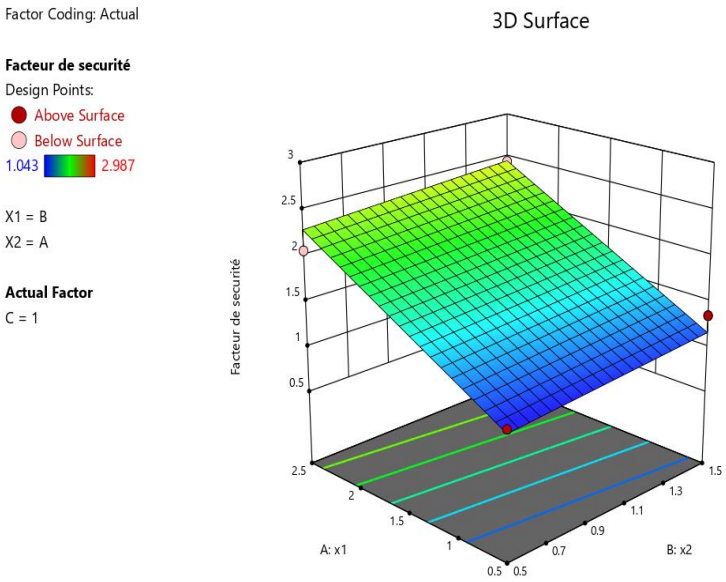


Figure 4.7 : Comparaison Modèle prédit avec le modèle numérique



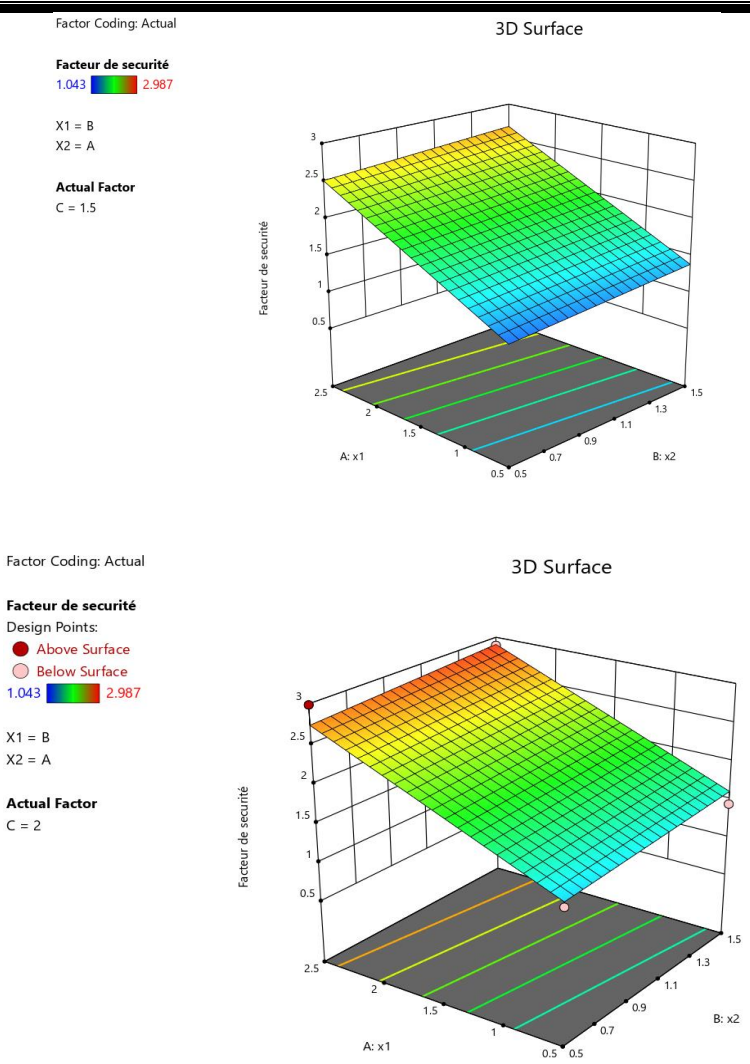


Figure 4.8 : surfaces de réponse pour le coefficient de sécurité FS

Conclusion Générale

Ce travail de recherche vise simuler un mur de soutènement cantilever et d'étudier les facteurs influençant la valeur du coefficient de sécurité et la stabilité de l'ouvrage et de faire une optimisation des paramètres qui influencent l'équilibre, par l'utilisation de la méthode des surfaces de réponses a travers les plans d'expériences numériques. Cette technique est tres utilisée, pour le calcul numérique par le logiciel en éléments finis.

Un plan d'expériences numériques est adopté comme support de modélisation du mur basé sur la géométrie du mur, (x1) la largeur du talon, (x2) la largeur du patin, et la profondeur d'encastrement (x3)

L'utilisation des plans d'expériences mène à établir un plan factoriel qui comporte le nombre d'essai, et avec le maximum de précision dans les résultats avec un minimum d'expériences.

La modélisation est réalisée numériquement par le logiciel Plaxis, (08 modèles numériques).

Le modèle mathématique postulé à travers ce plan est un modèle du premier degré sans interactions. A travers cette étude, on a tenté de modéliser un mur de soutènement et déduire l'importance de chaque paramètre choisi et montre qui

Sont les plus influencent sur la la valeur du coefficient de de sécurité.

Après, une analyse de la variance ANOVA est effectuée pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats numériques, et de fournir une interprétation des données de sortie. Ensuite on a passée à l'optimisation du coefficient de sécurité , Les valeurs des paramètres optimales sont obtenues en utilisant le logiciel «Design Expert v13».

Les efforts de développement ont porté sur la conception et l'application de stratégies d'optimisation, en s'appuyant exclusivement sur la méthode des plans d'expériences numériques, et plus précisément sur la méthode de surface de réponse.

Les résultats obtenus démontrent que l'application de cette méthode est aisée et qu'elle permet, dans les cas les plus simples, d'atteindre les valeurs souhaitées sans recourir à des techniques d'optimisation complexes.

Les références

[1] GOUPY Jacques, (2001), « Introduction aux Plans d'expériences ». Dunod. Paris. 303 p

[2] GOUPY, Jacques, (2006), « Les plans d'expériences ». Revues Modula, n°34

[3] LCPC (Laboratoirre central des ponts et chaussées) , (2003) , Technique et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées , Guide Technique , Bialec-Nancy (France).

[4] Monsieur J. Brinkgreve, (2003), Manuel de référence Plaxis V8 (Delft University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas).

[5] Abdelkader Abdelouhab, (2010), Comportement des murs en terrearmée modélisation physique,

[6] Analytiqueet numérique des renforcements extensibles, Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Civil et de l'Ingénierie Environnementale (LGCIE) del'INSA de Lyon (France).

[7] Fabrice ROJAT ,(2011/2012) , Ouvrages de soutènement , Cours mds 2 , Ecole nationale des travaux publics de l'etat (ENTPE) , Laboratoire de lyon (France) .

[8] DJABRI mohamed, (2013), Etude de la sensibilité de la réponse sismique à la disposition du renforcement des remblais d'accès de pont, Thèse de magister, Université mohamed khiderBiskra (algérie), Département de génie civil et hydrolyque.

[9] M. KHEMOUM Imad et M. GUIDOUM Nedjm Eddine, (2017), Université OEB.

"Etude paramétrique du comportement d'un mur de soutènement renforcé par la géogrille "

[10] M. ATTALLAOUI Samir, (2017), Université de Biskra, Analyse numérique du comportement des culées porteuses en sol renforcé