



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matériaux en génie civil

Présenté par :

1. SAHRAOUI Maroua
2. KADDOURI Amira
3. KHICHA Karima

Intitulé :

**Modélisation numérique et optimisation de la portance des
sols renforcés par géo synthétiques.**

Soutenue le : 29/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : ZERIG Tahar

Dr : MASMOUDI Fouzi

Dr : FARIK Ali

Dr. SEK Lakhdar

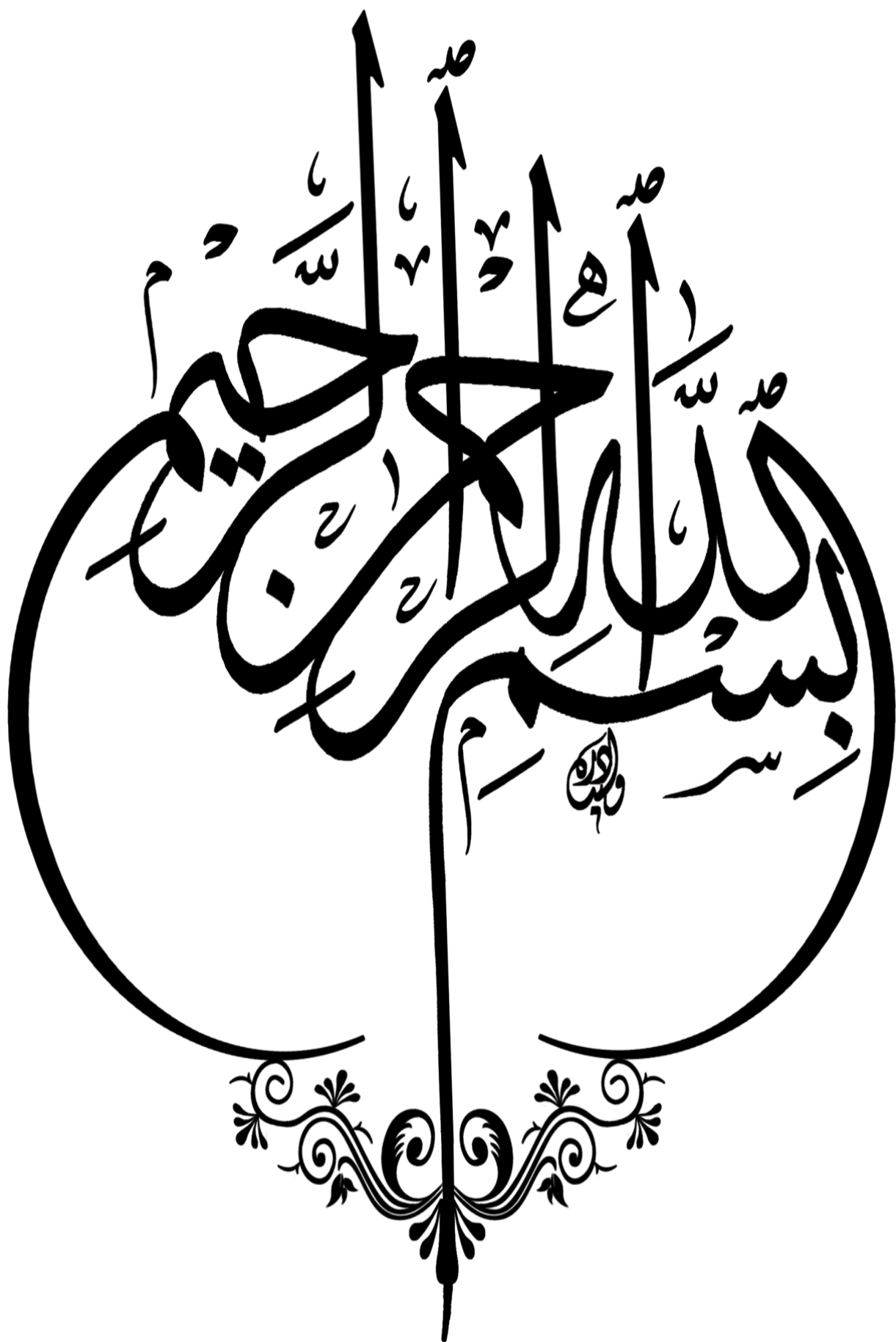
Président

Examineur

Encadreur

Co-encadreur

Année académique : 2024/2025



Résumé

Le domaine de la géotechnique connaît un développement significatif dans les techniques d'amélioration des sols, notamment à travers l'utilisation de matériaux géosynthétiques comme solution efficace pour améliorer la capacité portante des sols, en particulier ceux à faible portance. Ce mémoire vise à mettre en évidence la contribution des géosynthétiques à l'amélioration de la capacité portante des sols et à développer une approche combinant la modélisation numérique, en utilisant la méthode des éléments finis (à l'aide du logiciel PLAXIS 3D), et l'optimisation, en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) (à l'aide du logiciel Design-Expert), afin d'améliorer la portance des sols renforcés de manière plus efficace et économique.

Dans ce travail, la méthode des éléments finis a été utilisée pour réaliser le plan d'expériences élaboré selon la méthode RSM (type composite centré). Ensuite, une analyse statistique des résultats, basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie des surfaces de réponse, a été menée dans le but de déterminer les paramètres influençant la portance du sol renforcé et de proposer des modèles mathématiques reliant les paramètres de renforcement pour identifier les meilleures combinaisons des facteurs influents.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité du renforcement par géosynthétiques, soulignant l'importance de combiner la modélisation numérique et les méthodes d'optimisation pour améliorer les performances des fondations sur sols renforcés. De plus, un modèle mathématique reliant les paramètres de renforcement a été développé pour l'optimisation de ces paramètres et la prédiction de la portance des sols renforcés par des nappes géosynthétiques.

Mots-clés : Sol renforcé, géosynthétiques, capacité portante, modélisation numérique, RSM, optimisation.

Abstract

The field of geotechnical engineering is experiencing significant development in soil improvement techniques, particularly through the use of geosynthetic materials, which offer an effective solution to enhance the bearing capacity of soils, especially those with low strength. This thesis aims to highlight the contribution of geosynthetics to the improvement of soil bearing capacity and to develop an approach combining numerical modeling using the finite element method (with PLAXIS 3D software) and optimization using the Response Surface Methodology (RSM) (with Design-Expert software), in order to enhance the performance and cost-effectiveness of reinforced soils.

In this work, the finite element method was used to simulate the experimental design developed according to the RSM (Central Composite Design). A statistical analysis of the results, based on Analysis of Variance (ANOVA) and RSM, was then carried out to identify the key parameters influencing the bearing capacity of reinforced soil and to propose mathematical models linking the reinforcement parameters in order to determine the best combinations of influencing factors.

The results confirm the effectiveness of geosynthetic reinforcement, highlighting the importance of combining numerical modeling with optimization methods to improve the performance of shallow foundations on reinforced soils. Additionally, a mathematical model was developed to relate the reinforcement parameters for both optimization and prediction of the bearing capacity of soils reinforced with geosynthetic layers.

Keywords: reinforced soil, geosynthetics, bearing capacity, numerical modeling, RSM, optimization.

الملخص

يشهد مجال الهندسة الجيوتقنية تطوراً ملحوظاً في تقنيات تحسين التربة، خاصة من خلال استخدام المواد الجيوسنتيكية التي تُعدّ حلاً فعالاً لتحسين قدرة تحمل التربة، لا سيما في حال الترب ضعيفة التحمل. يهدف هذا البحث إلى إبراز مساهمة المواد الجيوسنتيكية في تحسين قدرة تحمل التربة، وتطوير منهجية تجمع بين النمذجة العددية باستخدام طريقة العناصر المحددة (من خلال برنامج PLAXIS 3D) وطرق التحسين باستخدام منهجية أسطح الاستجابة (RSM) (من خلال برنامج Design-Expert)، من أجل تحسين أداء الترب المدعّمة بطريقة أكثر كفاءة واقتصادية.

في هذا العمل، تم استخدام طريقة العناصر المحددة لمحاكاة الحالات التجريبية وفقاً لخطة تجارب تم إعدادها باستخدام منهجية RSM (بتصميم مركب مركزي). بعد ذلك، تم إجراء تحليل إحصائي للنتائج اعتماداً على تحليل التباين (ANOVA) ومنهجية أسطح الاستجابة، بهدف تحديد العوامل المؤثرة في قدرة تحمل التربة المدعّمة، واقتراح نماذج رياضية تربط بين متغيرات التدعيم لتحديد أفضل التركيبات الممكنة للعوامل المؤثرة.

أكدت النتائج فعالية التدعيم بالجيوسنتيكيك، كما أبرزت أهمية الجمع بين النمذجة العددية وطرق التحسين من أجل رفع كفاءة الأساسات السطحية على التربة المدعّمة. إضافة إلى ذلك، تم تطوير نموذج رياضي يربط بين معلمات التدعيم بهدف التحسين والتنبؤ بقدرة تحمل التربة المدعّمة بطبقات من الجيوسنتيكيك.

الكلمات المفتاحية: التربة المدعّمة، الجيوسنتيكيك، قدرة التحمل، النمذجة العددية، أسطح الاستجابة، التحسين.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien indéfectible à chaque étape de mon parcours. Grâce à eux, je suis devenue celle que je suis aujourd'hui. J'espère qu'un jour, je pourrai leur rendre ne serait-ce qu'une infime partie de tout ce qu'ils m'ont donné, même si aucun mot, aucun geste ne suffira jamais à leur exprimer toute ma gratitude.

À mes chères sœurs, piliers de mon cœur, merci pour votre tendresse, votre complicité et votre présence apaisante.

À mes précieuses amies, d'ici ou d'ailleurs, pour vos mots doux, vos encouragements sincères et vos rires partagés.

À toutes celles et ceux qui m'ont offert une lettre, une leçon, ou un regard bienveillant sur ce chemin.



REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur, Docteur FARIK Ali, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce travail. Son expertise et sa bienveillance nous ont été d'une grande aide pour orienter notre recherché.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Dr. SEK Lakhdar, maître de conférences, pour son soutien précieux et sa contribution active tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont également aux membres du jury : Dr. ZERIG Tahar et Dr. MASMOUDI Fouzi, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire, et pour leurs remarques constructives qui enrichiront sans aucun doute notre réflexion et notre travail futur.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble de nos enseignants du Département de Génie Civil à l'Université "Echahid Hamma Lakhdar" d'El Oued, pour les connaissances qu'ils nous ont transmises, leur encadrement et leur dévouement.

Nos pensées reconnaissantes vont aussi à nos camarades et amis avec qui nous avons partagé des moments de travail, de doute, mais aussi de joie. Merci pour leur soutien, leur gentillesse et leur présence.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à nos familles, en particulier nos parents, qui ont toujours cru en nous, nous ont encouragés et soutenus avec amour et patience. Que chacun d'eux trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

Résumé	I
Dédicace	IV
REMERCIEMENTS	V
SOMMAIRE	VI
LISTE DE FIGURES	IX
LISTE DE TABLEAUX	XII
LISTE DES NOTATIONS	XIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

CHAPITRE 01:Notions sur la portance et le renforcement des sols

I.1. Introduction	4
I.2. Les fondations superfisielles:.....	5
I.2.1. Avantages et inconvénients des fondations superficielles	6
I.2.2. Les différents types de fondations superficielles	7
I.2.3. Le rôle et l'importance de fondations dans ce sujet	7
I.3.Comportement des fondations superficielles	9
I.4. Méthodes de calcul de la capacité portante des fondation superfisielles	10
I.4.1. La théorie de Terzaghi (1943)	10
I.4.2. La théorie de Hansen (1970)	13
I.4.3. Calcul de la capacité portante pour des cas particuliers	14
I.5. Les techniques de renforcement des sols	18
I.5.1. Introduction aux techniques de renforcement des sols	18
I.5.2. Renforcement des sols par géosynthétique	19
I.5.2.1. Définition de géosynthétique.....	19
I.5.2.2. Notion sur les géosynthétiques	19
I.5.2.3. Fabrication	20
I.5.2.4. Classification des géosynthétiques	20

I.5.2.5. Différents types des géosynthétiques.....	22
I.5.2.6. Domaines d'application	24
I.5.2.7. Choix des éléments de renforcement géosynthétiques	30
I.5.2.8. Limites et défis de l'utilisation des géosynthétiques.....	30
I.6. Conclusion.....	32

CHAPITRE 02:plans d'expériences et méthodes d'optimisation

II.1. Introduction	34
II.2. Historique des plans d'expériences	35
II.3. But et domaine d'utilisation.....	35
II.4. Définition d'un plan d'expérience.....	36
II.4.1. Choix de la méthode d'expérimentation.....	36
II.4.2. Vocabulaire de base des plans d'expériences	36
II.5. Différents types des plans d'expériences	41
II.5.1. Plans de mélange	41
II.5.2. Plans de criblage.....	41
II.5.3. Plans factoriels complets à deux niveaux	41
II.5.4. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	45
II.5.5. Les plans de Plackett-Burman.....	48
II.5.6. Les tables de Taguchi.....	49
II.5.7. La méthode des surfaces de réponse	49
II.6. Principaux avantages des plans d'expériences	53
II.7. Choix d'une stratégie expérimentale	53
II.8. La méthodologie des surfaces de réponse	56
II.8.1. Les principes généraux	56
II.9. Conclusion	59

CHAPITRE 03 :Présentation des outils de modélisation numérique

III.1. Introduction.....	61
III.2 Aperçu général de la méthode des éléments finis (MEF)	62

III.2.1 Concepts de base	62
III.2.2 Calculs avec la méthode des éléments finis	62
III.3 Présentation de PLAXIS.....	63
III.3.1 Le code des éléments finis PLAXIS	63
III.3.2 Options par défaut et solutions approchées	65
III.3.3. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS	66
.III.4. Conclusion	73
CHAPITRE 04:Modélisation numérique et optimisation des paramètres	
IV.1 Introduction	76
IV.2 . Présentation du modèle de référence	77
IV.2.1 Géométrie	77
IV.2.2 Caractéristiques de sol de fondation et la semelle	77
IV.2.3. Processus de simulation numérique	78
IV.2.4. Maillage et conditions aux limites	80
IV.2.5. Présentation des résultats	80
VI.3 Optimisation par Méthodologie des Surfaces de Réponse des paramètres de renforcement des sols par nappes géosynthétiques	84
VI.3.1 Introduction.....	84
VI.3.2. Choix d'un plan d'expériences	85
VI.3.3 Interprétation des résultats par la méthode de surface de réponse	85
VI.3.4 Résultats	89
VI.3.5 Optimisation des paramètres de renforcement :	97
VI.4. Conclusion	99
CONCLUSION GENERALE	101
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	104

LISTE DE FIGURES

Chapitre 01:Notions sur la portance et le renforcement des sols		
Figure 1.1:	Fondation superficielle.....	5
Figure 1.2:	Rapport B/D définissant le type de fondation.....	6
Figure 1.3:	Types de fondations superficielles.....	7
Figure 1.4:	Schéma de rupture d'une semelle.....	9
Figure 1.5:	La surface de rupture dans le sol à charge ultime qui a supposé par Terzaghi.....	11
Figure 1.6:	Méthode de superposition de Terzaghi.....	12
Figure 1.7:	Mécanisme de rupture pour le calcul de $N\gamma$ d'après Lundgren et Mortensen (1953).....	14
Figure 1.8:	Inclinaison et excentrement d'une charge dans la direction parallèle à B.....	16
Figure 1.9:	Solution de Meyerhof pour une fondation filante sous charge excentrée.....	17
Figure 1.10:	Les principes types de géosynthétique (schéma).....	21
Figure 1.11:	Les principes types de géosynthétique.....	21
Figure 1.12:	Différents types de géosynthétique.....	22
Figure 1.13:	Exemple de géotextile non tissé.....	23
Figure 1.14:	Exemple de géotextile tricoté.....	23
Figure 1.15:	Exemple de géocomposite.....	24
Figure 1.16:	Un géosynthétique dans une construction routière.....	25
Figure 1.17:	un renforcement d'une pente par un géosynthétique.....	26
Figure 1.18:	ungeosynthetique sous-sol compressible.....	26
Figure 1.19:	une nappe géosynthétique pour une construction d'un remblai.....	27
Figure 1.20:	une nappe géosynthétique dans une construction une pente.....	27
Figure 1.21:	un mur de soutènement renforcé par géosynthétique.....	28
Figure 1.22:	à gauche contrôle d'érosion sur pente, à droite travaux achevés.....	28
Figure 1.23:	à gauche végétation à l'aide de géogrille, à droite un bassin couvé par géomembrane.....	29
Figure 1.24:	les géosynthétiques dans les bassins de traitement.....	29
Chapitre 02:plans d'expériences et méthodes d'optimisation		
Figure 2.1:	Schématisation d'un processus expérimental.....	37
Figure 2.2:	Les différents types de facteur.....	38

Figure 2.3:	Le domaine et les niveaux d'un facteur.....	39
Figure 2.4:	La disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude	39
Figure 2.5:	La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.....	40
Figure 2.6:	Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^2	42
Figure 2.7:	Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^3	43
Figure 2.8:	Disposition des quatre points expérimentaux d'un plan factoriel Fractionnaire $2^{(3-1)}$	46
Figure 2.9:	Surface de réponse.....	50
Figure 2.10:	Plan composite centré.....	51
Figure 2.11:	Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.....	52
Figure 2.12:	Démarche générale de la méthodologie expérimentale.....	54

Chapitre 03:Présentation des outils de modélisation numérique

Figure 3.1:	Vue de tous les panneaux de la fenêtre Phases.....	64
Figure 3.2:	Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.....	68
Figure 3.3:	Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.....	68
Figure 3.4:	Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.....	69
Figure 3.5:	Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb	69
Figure 3.6:	Représentation du critère de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes.....	70
Figure 3.7:	fenêtre des paramètres avancés du Mohr-Coulomb.....	70
Figure 3.8:	Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	71
Figure 3.9:	Définition du module à 50 % de la rupture.....	72

Chapitre 04: Modélisation numérique et optimisation des paramètres

Figure 4.1:	Présentation du cas étudié.....	77
Figure 4.2:	Modèle numérique de référence.....	79
Figure 4.3:	Génération du maillage.....	80
Figure 4.4:	Maillage déformé du modèle.....	81
Figure 4.5:	Déplacement vertical du sol (sans renforcement).....	81
Figure 4.6:	Évolution du tassement vertical au centre de semelle (sans renforcement).....	82
Figure 4.7:	Déplacement vertical du sol (avec renforcement).....	83
Figure 4.8:	Évolution du tassement vertical au centre de semelle (sans et avec renforcement).....	84
Figure 4.9:	Probabilités normales des résidus de la capacité portante q_l	94
Figure 4.10:	Surfaces de réponse des interactions $\phi \times b$ (AF) et $\phi \times L$ (BF) pour la capacité portante q_l	95

Figure 4.11:	Surfaces de réponse des interactions $b \times L$ (AB) et $b \times N$ (AH) pour la capacité portante q_l	96
Figure 4.12:	Représentation graphique de la procédure d'optimisation.....	98

LISTE DE TABLEAUX

Chapitre 01:Notions sur la portance et le renforcement des sols

Tableau 1.1:	Capacité portante Méthode de superposition de Terzaghi (méthode « $c-\phi$ »).....	13
Tableau 1.2:	Coefficients de forme. Valeurs de Terzaghi. (Conditions non drainées et drainées).....	14
Tableau 1.3:	Coefficients de forme. Projet d'Eurocode 7-1 (1994).....	15
Tableau 1.4:	Valeurs des coefficients de profondeur.....	15
Tableau 1.5:	Ordre de grandeur des valeurs des coefficients réducteurs sur N_{cq} (argiles) et N_{7q} (sables) (D'après Meyerhof).....	16

Chapitre 02:plans d'expériences et méthodes d'optimisation

Tableau 2.1:	N °de l'essai1	42
Tableau 2.2:	N °de l'essai2	44
Tableau 2.3:	N °de l'essai3.....	46
Tableau 2.4:	N de l'essai4.....	48
Tableau 2.5:	Étapes de l'expérimentation.....	55

Chapitre 04: Modélisation numérique et optimisation des paramètres

Tableau 4.1:	Caractéristiques de sol de fondation et de la semelle.....	78
Tableau 4.2:	Capacité portante calculées pour différentes méthodes.....	83
Tableau 4.3:	Intervalle de variation des paramètres à optimiser.....	85
Tableau 4.4:	Plan d'expériences en valeurs des paramètres.....	89
Tableau 4.5:	Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.....	97
Tableau 4.6:	Valeurs des paramètres à optimiser.....	98

LISTE DES NOTATIONS

- Q : Contrainte de rupture (capacité portante par unité de surface)
- Qa : Contrainte admissible
- S : Surface de la base de la semelle
- F : Coefficient de sécurité
- B : La largeur de la semelle
- L (L/B) : Dimensions de la couche de géogridde (rapport longueur sur largeur de la semelle)
- d : Distance verticale entre la semelle et la première couche de géogridde
- h : Espacement vertical entre les couches de géogridde
- N : Nombre de couches de géogridde
- Sy, Sq, Se : Coefficients de forme de la semelle
- Ny, Ng, Ne : Facteurs de portance (fonction de l'angle de frottement interne)
- Y_1 : Poids volumique du sol sous la base de la fondation
- Y_2 : Poids volumique du sol latéralement à la fondation
- Y : Poids volumique du sol
- Yd : Poids volumique sec du sol
- ysat : Poids volumique saturé du sol
- Φ' : Angle de frottement interne effectif du sol
- EA : Rigidité axiale de la géogridde (module axial $\times$ section transversale)
- E : Module d'Young.
- G : Module de cisaillement.
- ν : Coefficient de Poisson.
- c : Cohésion.
- Φ : Angle de frottement interne.
- Ψ : Angle de dilatance.
- Sv : Espacement vertical des renforcements.
- B : Largeur du remblai.
- L : Longueur du renforcement.
- U : Déformation du sol non renforcé.
- Ux : Déplacement horizontal.

N : Tension interne (ou nombre total d'expériences selon le contexte).

y : Variable de réponse (par exemple : capacité portante).

X_i : Variables de prédiction (facteurs d'entrée).

Y : Fonction de réponse.

R^2 : Coefficient de détermination statistique.

y_i : Valeur mesurée à l'expérience i .

$\bar{y}$: Moyenne des réponses mesurées.

$Y_{i,\min}$: Valeur en dessous de laquelle la réponse Y_i est jugée insatisfaisante.

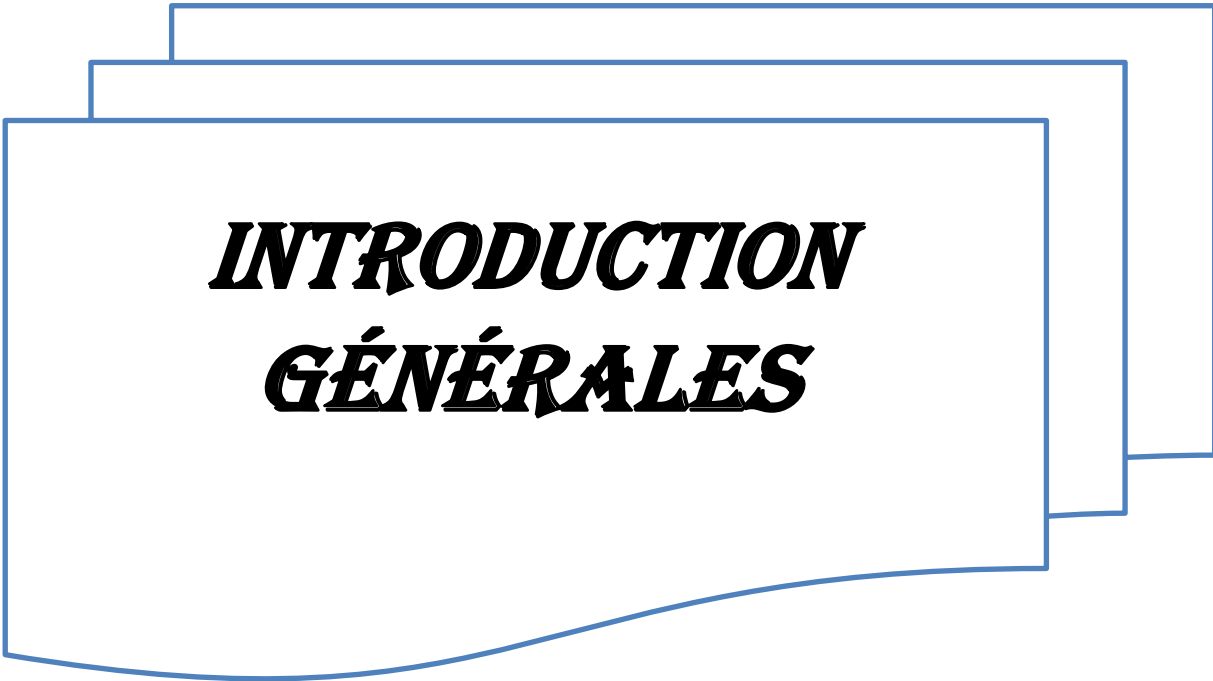
$Y_{i,\max}$: Valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y_i est jugée très satisfaisante.

SC:La somme des carrés

Cont%:Taux de cotisation

F_i :Rapport de variance

d_i :désirabilité individuelle



INTRODUCTION GÉNÉRALES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les fondations des bâtiments constituent l'un des problèmes géotechniques les plus anciens et les plus courants auxquels sont confrontés les humains. L'Ingénierie des fondations joue un rôle essentiel dans divers domaines de l'Ingénierie, car elle fait le lien entre les structures et le sol sur lequel elles reposent. Le type et la profondeur des fondations dépendent de la nature du sol et des charges transférées depuis la structure supérieure. Les fondations peuvent être peu profondes ou profondes, la partie inférieure étant chargée de transférer les charges vers les couches plus profondes du sol. Pour assurer la stabilité des ouvrages, le sol doit avoir une capacité portante suffisante pour limiter les affaissements inacceptables pouvant affecter l'installation ou les ouvrages avoisinants.

Au cours des dernières décennies, l'étude des sols et l'évaluation de leur comportement ont connu un développement significatif, conduisant à l'amélioration des méthodes utilisées en analyse et en conception. Diverses théories ont été développées pour calculer la capacité portante, telles que celles présentées par Rankine et Prandtl (1921) et Terzaghi (1943), qui ont ensuite été modifiées pour s'adapter à des cas plus complexes, tels que l'effet de la forme des fondations, l'inclinaison de la charge et le degré de flèche.

Dans de nombreux projets géotechniques, la faible capacité portante des sols pose un défi majeur. Cette contrainte pousse souvent à recourir à des fondations profondes, coûteuses en temps et en ressources, ou à envisager le déplacement du projet vers un autre site. Pour éviter ces solutions lourdes, il devient nécessaire d'explorer des techniques efficaces permettant d'améliorer la portance du sol.

Parmi les technologies modernes qui ont fait leurs preuves, on trouve le renforcement des sols à l'aide de matériaux géotechniques tels que les géosynthétiques, qui améliorent la capacité portante grâce à leur résistance à la traction et à leur interaction avec le sol par frottement.

Ce travail vise à examiner les facteurs les plus influents sur la capacité portante des fondations superficielles, en mettant l'accent sur l'effet du renforcement par nappes de géogrilles. Il commence par une présentation des principales approches théoriques utilisées pour estimer la capacité portante. Ensuite, il propose une approche qui combine la modélisation numérique par éléments finis, à l'aide du logiciel PLAXIS 3D, et les méthodes d'optimisation, notamment la méthodologie des surfaces de réponse (RSM), afin d'analyser et d'améliorer les performances des fondations superficielles sur sols renforcés par géogrilles.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous avons organisé ce mémoire en quatre chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique. Il présente les notions de base sur les fondations superficielles, les différentes méthodes développées pour le calcul de leur capacité portante, ainsi que les principes liés à la portance des sols et aux techniques de renforcement, notamment par géosynthétiques.
- Le deuxième chapitre introduit les concepts de plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse (RSM), en particulier le plan composite centré, utilisé dans notre étude.
- Le troisième chapitre présente l'outil de simulation numérique PLAXIS 3D, ainsi que ses fonctionnalités essentielles pour l'estimation numérique de la capacité portante des fondations.
- Le quatrième chapitre est dédié au développement d'un modèle numérique de référence sous PLAXIS 3D pour une fondation carrée reposant sur un sol frottant. Ce chapitre détaille également la méthode d'optimisation appliquée aux paramètres influents sur la portance du sol renforcé, à savoir : la largeur de la semelle (B), la longueur des géogrilles (L), le rapport L/B , la rigidité axiale des géogrilles (EA), l'espacement entre la première nappe et la base de la semelle (e/B), l'espacement entre les nappes (h/B), l'angle de frottement du sol (φ), la cohésion du sol (C) et le nombre de nappes de géogrilles (N). L'optimisation s'appuie sur les résultats numériques de capacité portante (q_l).

CHAPITRE 01

***NOTIONS SUR LA PORTANCE ET
LE RENFORCEMENT DES SOLS***

I.1. Introduction

Les fondations de surface, également appelées fondations peu profondes, sont des éléments structuraux utilisés pour transporter les bâtiments et les installations vers le sol près de la surface de la Terre. Ces fondations comprennent des espèces telles que des règles distinctes, des règles communes et des pierres (mouches). Il est préférable d'utiliser des fondations de surface lorsque le sol de surface est capable de résister aux charges imposées sans chute ou échec significative. Ces dernières années, les intérêts ont augmenté dans l'amélioration des performances du sol à l'aide de géochinthes, qui sont des matériaux industriels utilisés pour améliorer les propriétés du sol. Geosinxx est utilisé dans plusieurs applications, notamment le renforcement du sol sous les fondations de surface pour augmenter l'endurance et réduire les gouttes. La modélisation numérique est un outil dynamique pour analyser et concevoir des fondations de surface sur le sol améliorées par Geosensex. En utilisant des programmes informatiques avancés, les ingénieurs peuvent simuler le comportement du sol et les fondations sous l'influence de diverses charges, permettant l'efficacité de l'efficacité des techniques d'amélioration avec la géophysique et de déterminer la conception optimale. Des études indiquent que l'utilisation de GeosenXx peut entraîner une augmentation notable de l'endurance et réduire les baisses des fondations de surface. Par exemple, les chercheurs ont constaté que l'introduction de couches de géographie sous les fondations de surface peut augmenter la capacité d'endurance allant jusqu'à 50% et réduire la baisse jusqu'à 40% .

De plus, la modélisation numérique a montré que la disposition, le nombre de geyphthes et les propriétés mécaniques ont un effet significatif sur les performances générales du sol amélioré. Grâce à la modélisation, la composition optimale du géosenthx peut être déterminée pour obtenir les meilleures performances des fondations de surface. En conclusion, la combinaison de GeosenXx en fondations de surface, tout en profitant de la modélisation numérique, est une approche efficace pour améliorer l'endurance et la réduction des baisses, ce qui conduit à des conceptions plus sûres et coûteuses. [1]

I.2. Les fondations superficielles

Les fondations superficielles sont un type de fondation utilisé lors d'une construction sur un terrain stable et qui, contrairement aux fondations profondes et semi-profondes, ne s'enfonce que légèrement dans le sol. Elles prennent le plus souvent la forme de plots de fondation ou d'une semelle.

Une fondation superficielle est définie par des caractéristiques géométriques.

L: longueur de la semelle ou plus grand côté d'une semelle.

B: largeur de la semelle ou plus petit côté de la semelle.

❖ **Semelle circulaire:** $B=2R$

❖ **Semelle carrée:** $B=L$

❖ **Semelle rectangulaire:** $B < L < 5$

❖ **Semelle continue ou filante:** $L > 5B$

D: hauteur d'encastrement de la semelle. Hauteur minimum au-dessus du niveau de la fondation.

Si un dallage ou une chaussée surmonte la fondation ceux-ci sont pris en considération dans la hauteur d'encastrement.

H: ancrage de la semelle. Il correspond à la hauteur de pénétration de la semelle dans la couche porteuse.

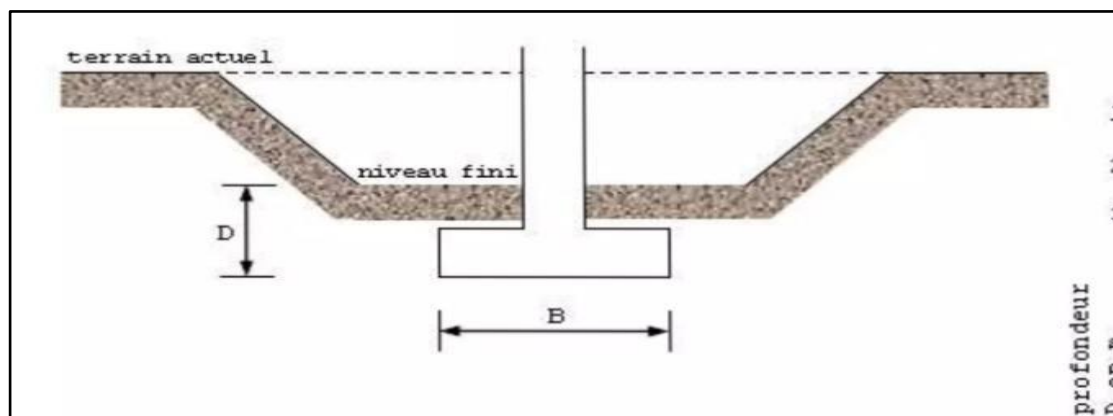


Figure 1.1: Fondation superficielle[2]

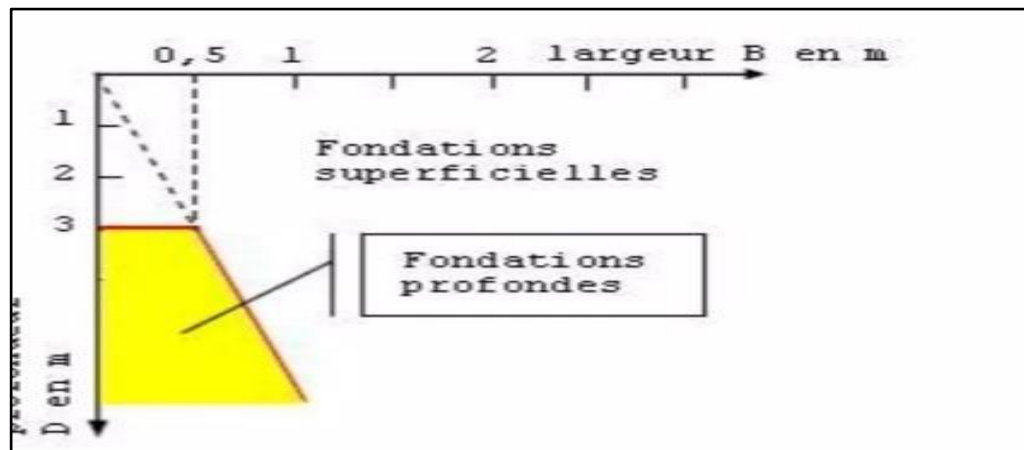


Figure 1.2: Rapport B/D définissant le type de fondation [1]

I.2.1. Avantages et inconvénients des fondations superficielles:

- **Les avantages:**

1. Coût réduit : Elles nécessitent moins de matériaux et de main-d'œuvre que les fondations profondes.
2. Exécution rapide : La mise en place est plus simple et rapide, ce qui réduit le temps de construction.
3. Facilité de conception : Moins de complexité technique comparée aux fondations profondes.
4. Adaptabilité : Convient aux structures légères et aux sols de bonne portance.
5. Moins d'impact environnemental : Moins de terrassement et d'utilisation de machines lourdes par rapport aux fondations profondes.

- **Les inconvénients:**

1. Sensibilité aux variations du sol : Les sols argileux, sujets au retrait et au gonflement, peuvent provoquer des désordres structurels.
2. Portée limitée : Elles ne conviennent pas aux charges élevées ou aux bâtiments de grande hauteur.
3. Vulnérabilité aux charges dynamiques : Moins efficaces pour résister aux vibrations et aux charges dynamiques, comme celles des machines ou du trafic intense.
4. Influence des conditions climatiques : Le gel et le dégel peuvent affecter la stabilité des fondations superficielles.
5. Adaptation aux terrains en pente difficile : Nécessite parfois des travaux de nivellement ou de soutènement supplémentaires.[3]

I.2.2. Les différents types de fondations superficielles:

- Les semelles filantes, généralement de largeur B modeste (au plus quelques mètres) et de grande longueur L ($L/B > 10$ pour fixer les idées) ;
- Les semelles isolées, don't les dimensions en plan B et L sont toutes deux au plus de quelques mètres ; cette catégorie inclut les semelles carrées ($B/L = 1$) et les semelles circulaires (de diamètre B) ;
- Les radiers ou dallages, de dimensions B et L importantes ; cette catégorie inclut les radiers généraux. [4]

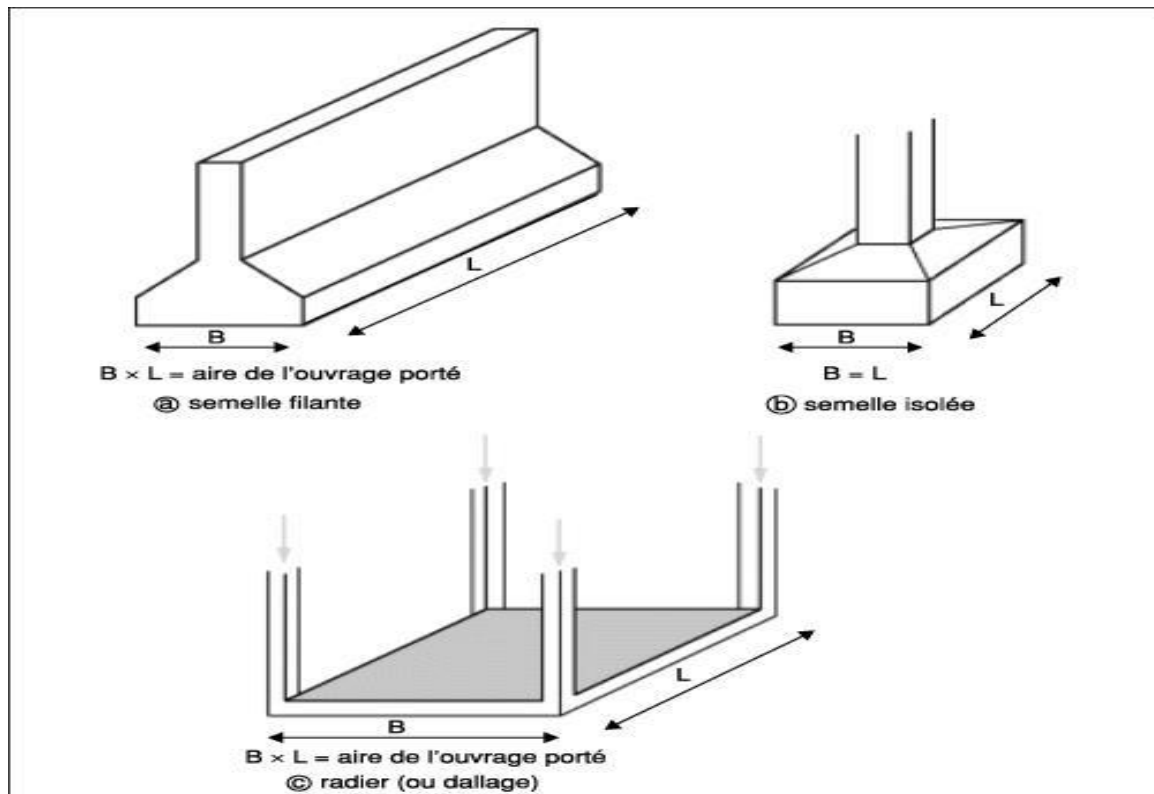


Figure 1 .3: Types de fondations superficielles [3]

I.2.3. Le rôle et l'importance de fondations dans ce sujet:

a). Améliorer la stabilité du sol :

Les fondations aident à répartir les charges uniformément sur le sol, réduisant ainsi le risque d'effondrement et de déformation.

Grâce à l'utilisation de géosynthétiques, la capacité du sol à supporter des charges s'améliore, réduisant ainsi les affaissements irréguliers.

b). Augmenter l'endurance :

Les fondations contribuent à améliorer la capacité du sol à soutenir les structures, en particulier lorsqu'elles sont renforcées par des géosynthétiques tels qu'une géogridde et un géotextile.

Cela contribue à améliorer les performances globales de l'infrastructure et réduit le besoin d'assainissement supplémentaire des sols fragiles.

c). Réduire les affaissements et les distorsions :

Sans fondations solides, le sol peut subir des tassements différentiels qui affectent la stabilité des bâtiments et des routes.

L'utilisation de géosynthétiques dans les fondations répartit mieux les contraintes, réduisant ainsi la possibilité de déformations excessives.

d). Améliorer les performances des fondations superficielles :

Dans les sols faibles, les fondations traditionnelles peuvent ne pas suffire, c'est pourquoi les géosynthétiques sont utilisés pour améliorer leurs performances et leur réponse aux charges.

e). Réduire les coûts et améliorer la durabilité :

Réduire le besoin de remplacement ou de renforcement des sols avec des matériaux traditionnels, ce qui entraîne une réduction des coûts et une plus grande durabilité des projets d'ingénierie.

- **Résultat :**

Les fondations jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la stabilité des sols et l'augmentation de leur capacité portante, notamment lorsqu'elles sont associées à des géosynthétiques, contribuant ainsi au développement de solutions d'ingénierie efficaces et durables.

I.3.Comportement des fondations superficielles

Des études sur des modèles réduits ont permis de définir 3 zones de sol dans lesquelles le comportement est différent en phase de rupture.

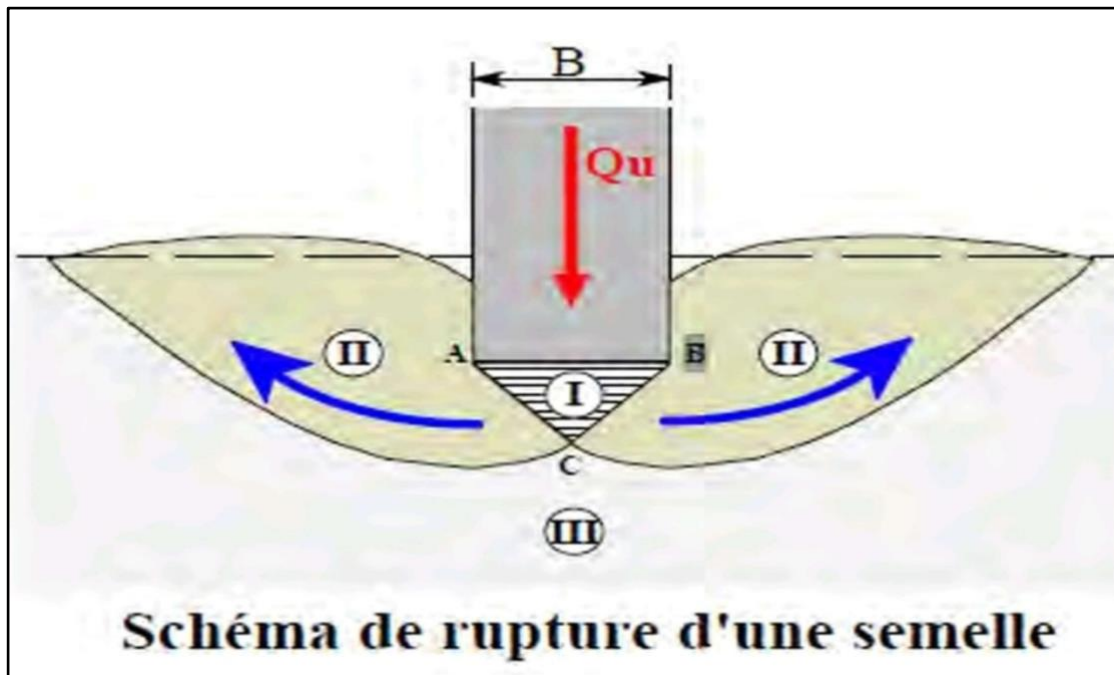


Figure 1.4: Schéma de rupture d'une semelle

- ✓ Zone I: située directement sous la semelle, cette zone, formée d'un coin délimité par les points A, B, et C est fortement comprimée. Cette zone se déplace avec la semelle.
- ✓ Zone II: Le sol est refoulé vers la surface; les déplacements et cisaillements sont très importants. Il s'y produit une rupture généralisée.
- ✓ Zone III: le sol est peu ou pas perturbé par la rupture. (sol dans le domaine élastique).

Voyons comment se comporte une semelle de fondation don't fait croître le chargement jusqu'à la rupture du sol.

Au fur et à mesure de l'application de la charge croissante, le sol tasse de façon quasi linéaire au début, pour augmenter rapidement de façon asymptotique à la valeur Q_u . Cette valeur limite n'est pas très précise; elle est conventionnellement définie pour $S = B/10$

Q_u est la charge limite ou capacité portante de la semelle. C'est la charge maximale que peut supporter celle-ci et qui entraîne la rupture du sol.

q_u est la contrainte limite ultime ou contrainte de rupture. $q_u = Q_u/A$ avec A aire de la Semelle

NB : le sol dans les Zone I et Zone II en rupture.

Comme une charge est appliquée sur une certaine surface d'un sol, elle provoque un tassement.

Une fondation superficielle et une fondation dont l'encastrement D dans le sol n'excède pas quatre fois la largeur B . Le mécanisme de rupture et la distribution des contraintes sous la fondation dépendent généralement de la nature du sol. Un projet de fondation superficielle adéquate doit répondre aux préoccupations suivantes :

La fondation doit appliquer une contrainte adaptée à sa résistance à la rupture sur la fondation, c'est le problème de la capacité portante.

Le tassement des fondations doit être limité pour éviter le basculement ou l'effondrement .[1]

I.4. Méthodes de calcul de la capacité portante des fondations superficielles

La détermination de la capacité portante d'une fondation représente l'un des sujets les plus fondamentaux et les plus anciens du génie géotechnique. La capacité portante ultime d'une fondation superficielle correspond à la charge maximale que le sol de fondation peut supporter sans entraîner de rupture. Tant que la charge appliquée demeure dans des limites raisonnables, le sol subit un tassement progressif et admissible. Toutefois, dès que cette charge atteint la capacité portante ultime, une rupture soudaine se produit dans la zone située immédiatement sous la fondation ainsi que dans les terrains adjacents.

Deux grandes approches permettent d'évaluer cette capacité : la première repose sur les paramètres mécaniques du sol obtenus en laboratoire, tels que la cohésion « C » et l'angle de frottement interne « ϕ », selon les principes de la théorie de la plasticité ; la seconde est fondée sur les essais in situ, comme la pression limite « p_1 » mesurée au pressiomètre Ménard, ou la résistance à la pointe « q_e » issue de l'essai de pénétration standard (SPT).[5]

I.4.1. La théorie de Terzaghi (1943) :

Méthode de Terzaghi pour l'estimation de la capacité portante des fondations superficielles

La méthode de Terzaghi (1943) constitue l'un des modèles analytiques les plus fondamentaux et les plus largement utilisés en mécanique des sols pour l'évaluation de la capacité portante ultime des fondations superficielles. Elle repose sur une modélisation du sol comme un matériau homogène, isotrope et semi-infini, soumis à la rupture suivant la théorie des états limites plastiques.

Il a basé sa théorie sur les conditions suivantes:

- Il a assumé que le coin au-dessous de la semelle est en équilibre élastique,
- Terzaghi a assumé que l'angle des surfaces du coin de rupture est supérieur à $45^\circ + \phi/2$

Qui résulte d'une prétention des coins actifs de Rankine.

- La résistance au cisaillement du sol au-dessus du niveau de fondation D_f a été ignorée et contribue seulement comme une surcharge.
- On assume que la semelle est rugueuse. [4]

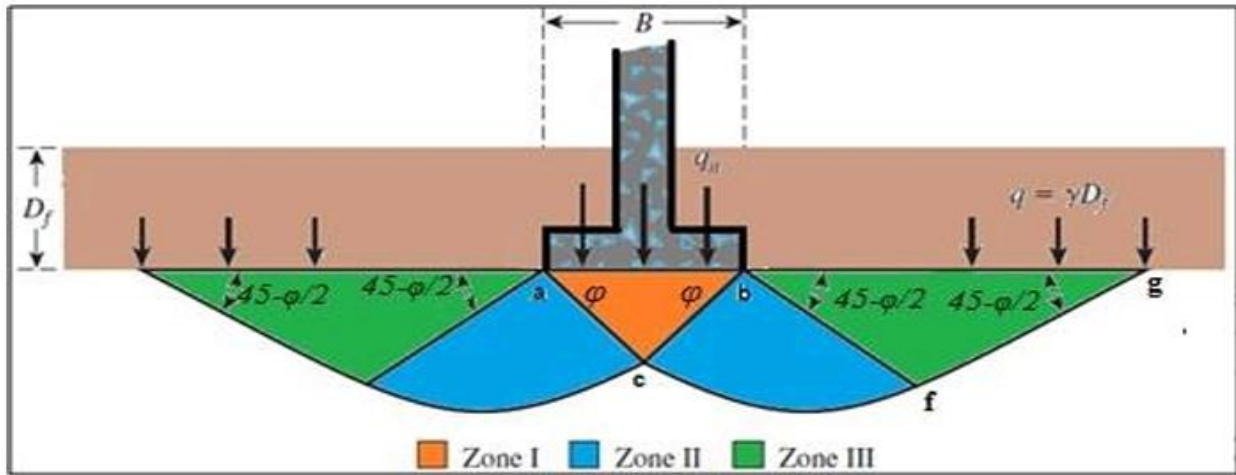


Figure 1.5: La surface de rupture dans le sol à charge ultime qui a supposé par Terzaghi[4].

En règle générale, la semelle de fondation est placée, après creusement, à une profondeur D_f dans un sol de poids spécifique γ à surface horizontale. La base de la semelle est alors choisie comme plan de référence sur lequel s'exercent des contraintes de compression égale q_u/B à l'emplacement de la semelle et à $q = \gamma D_f$ à l'extérieur)

- Une zone triangulaire ACB immédiatement sous la fondation ou le sol fortement comprimé est en équilibre surabondant et se déplace avec la fondation, il forme un coin limite par les points A, B, C avec les angles BAC et ABC sont égaux à l'angle de frottement interne du sol ϕ .
- Une zone de cisaillement radial BCF où CF est un arc spirale logarithmique.
- Une zone passive de Rankine triangulaire BFD.

Dans les zones de cisaillement radial et passif, les déplacements et les cisaillements sont très importants et il en résulte ainsi une rupture généralisée au-dessous de ces trois zones, le sol est peu ou non perturbé par la rupture (Salençon 1974). [3]

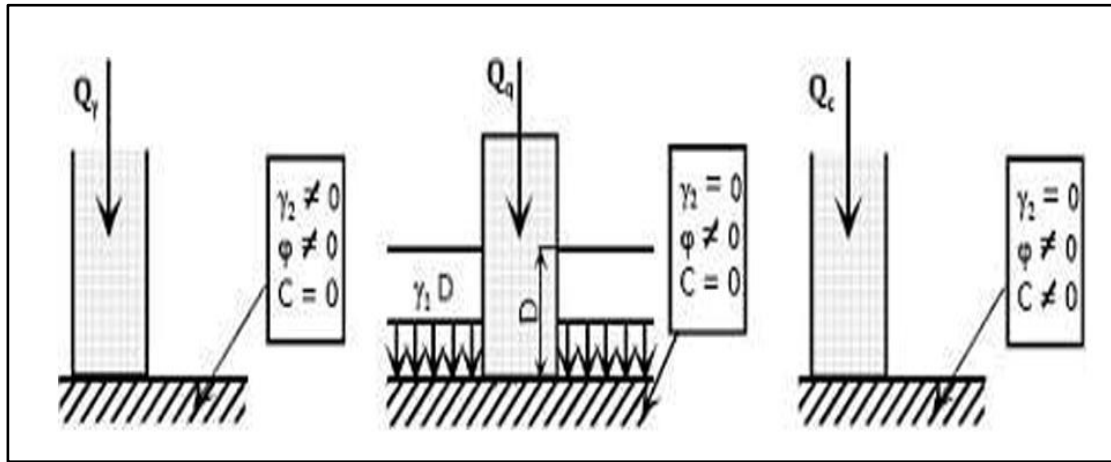


Figure 1.6: Méthode de superposition de Terzaghi [4]

Utilisant l'analyse d'équilibre, Terzaghi a exprimé la capacité portante ultime sous la forme:

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

c. est la cohésion du sol (kPa),

q. $\gamma \cdot D$ est la pression de surcharge à la base de la fondation,

γ . est le poids volumique du sol (kN/m³),

D . est la profondeur d'encastrement de la fondation (m),

B. est la largeur de la semelle (m)

• **N_c, N_q, N_γ** Sont des coefficients de capacité portante dépendant de l'angle de frottement interne du sol.

Ces coefficients sont généralement obtenus à partir de tables empiriques ou de formules dérivées des analyses de rupture en coin. La méthode suppose également que le sol sous-jacent est drainé et qu'il n'y a pas d'effet significatif de la nappe phréatique, sauf si des corrections sont appliquées.

En pratique, la capacité portante admissible est obtenue en appliquant un coefficient de sécurité (généralement entre 2.5 et 3) :

$$Q_{adm} = q_{ult} / FS$$

Bien que cette méthode soit développée initialement pour les semelles filantes, elle peut être adaptée à d'autres formes de fondations (carrées, circulaires) moyennant des facteurs correctifs. En raison de sa simplicité et de sa robustesse, la méthode de Terzaghi reste une référence incontournable dans l'ingénierie géotechnique.[4]

**Tableau 1.1: Capacité portante Méthode de superposition de Terzaghi
(méthode « c- ϕ »)[2]**

Tableau 1 - Valeurs de $N_c(\phi')$, $N_\gamma(\phi')$ $N_q(\phi')$ (DTU 13.12, 1988)			
ϕ'	N_c	N_γ	N_q
0°	5,14	0	1,00
5°	6,50	0,10	1,60
10°	8,40	0,50	2,50
15°	11,00	1,40	4,00
20°	14,80	3,50	6,40
25°	20,70	8,10	10,70
30°	30,00	18,10	18,40
35°	46,00	41,10	33,30
40°	75,30	100,00	64,20
45°	134,00	254,00	135,00

I.4.2. La théorie de Hansen (1970) :

Hansen a proposé de nouvelles expressions pour les trois facteurs de portance , intégrant divers coefficients correctifs afin de mieux représenter les conditions réelles du sol et de la fondation .L'une des principales différences réside dans l'utilisation de la largeur réelle de la fondation, notée(B au lieu de 2B), comme dans le modèle de Terzaghi.. En particulier, l'expression empirique du facteur , s'accorde bien avec les résultats expérimentaux obtenus par Lundgren et Mortensen (1953), basés sur une analyse du mécanisme de rupture.

Les trois facteurs de portance ont pour expressions :

- $N_c = (N_q - 1) \cdot \cot(\phi)$
- $N_q = \exp(\pi \cdot \tan(\phi)) \cdot \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$
- $N_\gamma = 1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\phi)$

Cependant, la superposition directe des trois termes de capacité portante. et peut mener à une légère sous-estimation de la capacité portante globale de la fondation, estimée généralement à moins de 20 % (Lundgren & Mortensen, 1953). En réponse à cette limitation, Hansen a proposé en 1961 une nouvelle formulation du facteur , visant à améliorer la précision des résultats :

$$N_\gamma = 1.8 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\phi) \quad [4]$$

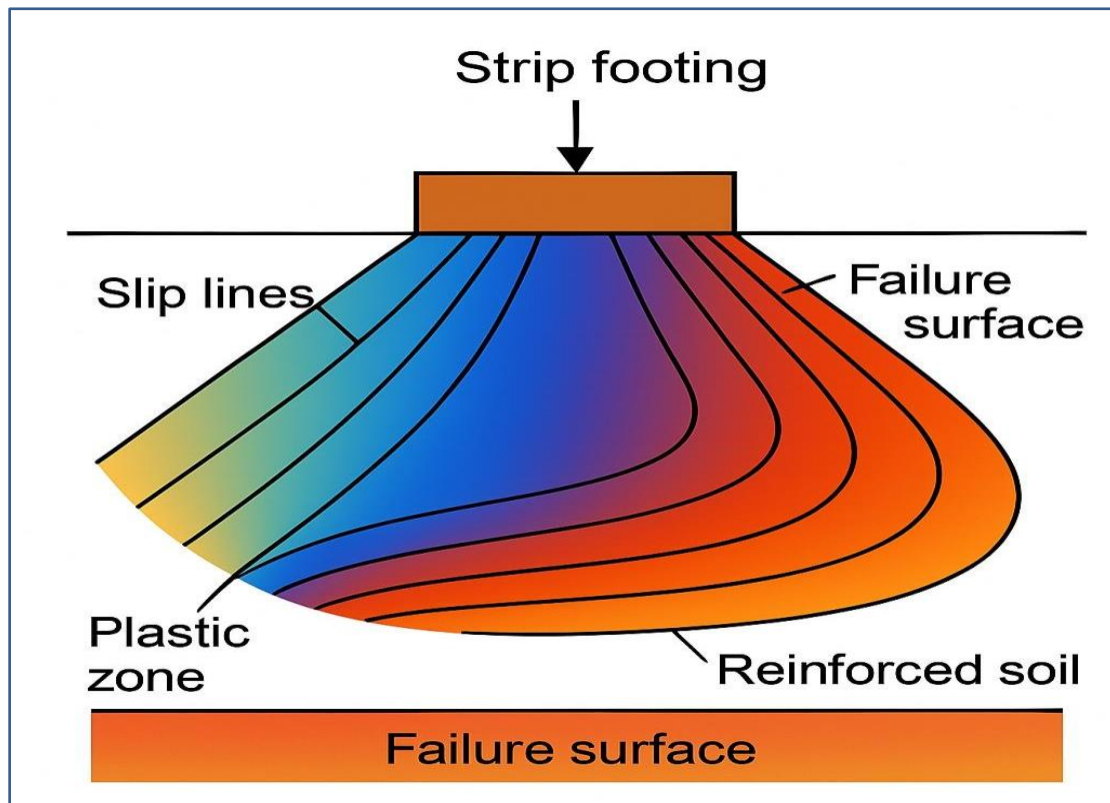


Figure 1.7: Mécanisme de rupture pour le calcul de N_γ d'après Lundgren et Mortensen (1953).

I.4.3. Calcul de la capacité portante pour des cas particuliers:

I.4.3.1. Influence de la forme avec une charge verticale et centrée:

Pour les fondations circulaires et rectangulaires de dimensions B et L , Terzaghi a proposé des facteurs de correction pour les sols argileux, en se basant sur une interpolation entre les cas des semelles filantes et des semelles circulaires. La relation résultante est la suivante

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

Tableau 1.2: Coefficients de forme. Valeurs de Terzaghi. (Conditions non drainées et drainées)[6]

Fondation	Rectangulaires ou carrées ($\frac{B}{L} = 1$)		Circulaires
$S_\gamma(1)$	$1 - 0,2 \frac{B}{L}$	0,8	0,6
S_c	$1 + 0,2 \frac{B}{L}$	1,2	1,3
S_q	1	1	1
(1) Conditions drainées, seulement			

Tableau1.3: Coefficients de forme. Projet d'Eurocode 7-1 (1994)

Fondations	Conditions non drainées		Conditions drainées	
	Rectangulaires	Carrées ou circulaires (B/L=1)	Rectangulaires	Carrées ou circulaires (B/L=1)
S_γ			$1 - 0,3 \frac{B}{L}$	0,7
S_c	$1 + 0,2 \frac{B}{L}$	1,2	$\frac{(1 + \frac{B}{L} \sin \varphi') N_q - 1}{N_q - 1}$	$\frac{(1 + \sin \varphi') N_q - 1}{N_q - 1}$
S_q	1	1	$1 + \frac{B}{L} \sin \varphi'$	$1 + \sin \varphi'$

Pour tenir compte de la résistance du sol au-dessus de la fondation et lorsque la profondeur de la fondation est supérieure à sa largeur, d'autres coefficients partiels sont utilisés :

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

Tableau 1.4: Valeurs des coefficients de profondeur.

Fondations	Coefficients de profondeur	Conditions drainées et non drainées
$D > B$	$d_c = 1 + 0,4 \tan^{-1}(\frac{D}{B})$ $d_q = d_\gamma = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \tan^{-1}(\frac{B}{D})$ $d_\gamma = d_q = 1,0$	$\varphi > 10^\circ$ $\varphi = 0$
$D \leq B$	$d_c = 1 + 0,4(\frac{D}{B})$ $d_q = d_\gamma = 1 + 2 \tan(\varphi'(1 - \sin \varphi')^2 (\frac{B}{D}))$ $d_\gamma = d_q = 1,0$	$\varphi > 10^\circ$ $\varphi = 0$

I.4.3.2. Influence de l'inclinaison de la charge :

Lorsque la charge appliquée à la fondation est inclinée par rapport à la verticale, il y a lieu d'appliquer la relation suivante:

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

Avec : i_γ , i_c et i_q : Coefficients minorateurs (inférieurs à 1).

Dans le cas d'une inclinaison causée par une charge horizontale parallèle à B avec un angle « δ » par rapport à la verticale, propose les relations suivantes pour les coefficients i_y , i_c et i_q selon Meyerhof. Pour un sol entièrement cohérent comme l'argile, ainsi que pour un sol purement frottant tel que le sable, Meyerhof a fourni des solutions concernant les fondations filantes. Ces solutions utilisent les facteurs de portance N_{cq} (qui combinent N_c et N_q) et N_{yq} (qui combinent N_y et N_q). Ces facteurs dépendent de l'angle de frottement φ de l'inclinaison δ et du rapport d'encastrement D/B (voir Figure 1.8). Les résultats peuvent être résumés à l'aide des coefficients de réduction présentés dans le Tableau 1.3

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{\delta}{\varphi_f}\right)^2$$

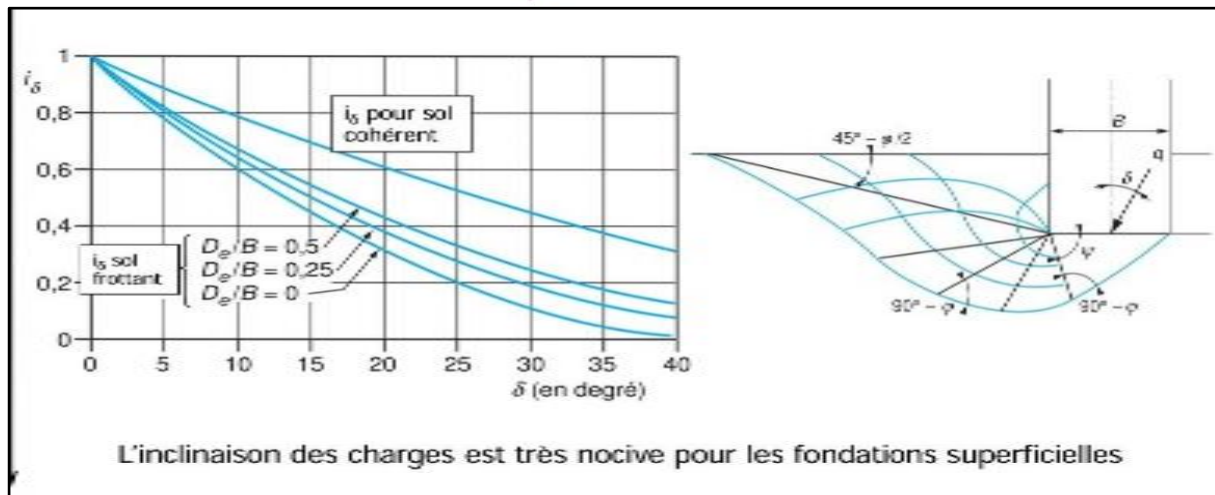


Figure 1.8 Inclinaison et excentrement d'une charge dans la direction parallèle à B[4].

Tableau 1.5: Ordre de grandeur des valeurs des coefficients réducteurs sur N_{cq} (argiles) et N_{yq} (sables) (D'après Meyerhof).

Sol	D / B	Inclinaison de la charge δ						
		0°	10°	20°	30°	45°	60°	90°
Argiles $N_{cq}(\delta)/N_{cq}(0)$	0 à 1	1,0	0,8	0,6	0,4	0,25	0,15	0
Sables $N_{yq}(\delta)/N_{yq}(0)$	0	1,0	0,5	0,2		0 pour $\delta = \varphi$		
	1	1,0	0,6	0,4	0,25	0,15	0,05	0

I.4.3.3. Influence de l'excentrement e d'une charge vertical :

Meyerhof a également souligné que pour les charges excentriques, la pratique consiste à calculer la capacité portante d'une fondation en bande de largeur réduite B' : (Figure 2.6)

$$B' = B - 2e$$

ce qui équivaut à placer la fondation au centre de la charge. Si l'excentricité " e " est parallèle à la dimension " L ", la même procédure est suivie pour cette dimension

$$L' = L - 2e'$$

La capacité portante totale est alors obtenue par la formule suivante

Pour une semelle rectangulaire ou carrée, $Ql = q_i B' L'$

Pour une semelle circulaire, $Ql = q_i \pi B' B/4$

Avec:

q_i La contrainte de rupture est la même que ci-dessus, y compris tous les facteurs de correction possibles, B' est la largeur ou le diamètre réduit (ou effectif) en cas d'excentricité, et L' est la longueur réduite (ou effective) en cas d'excentricité[6].

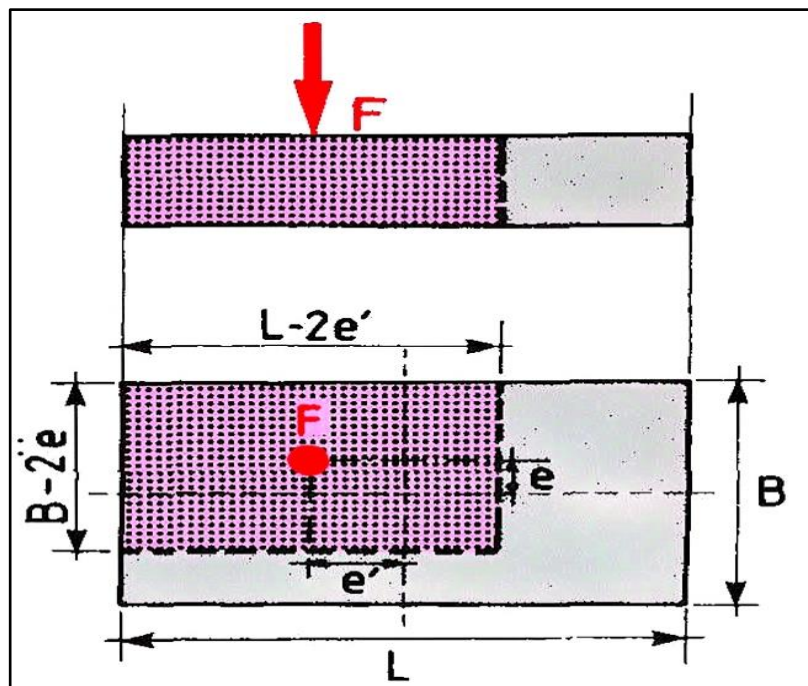


Figure1.9: Solution de Meyerhof pour une fondation filante sous charge excentrée.[6]

Ou encore calculer la charge limite par la formule suivante :

$$q_l = (1 - 2e^*)^2 \gamma \frac{1}{2} B N_\gamma(\phi) + (1 - 2e^*)(\gamma D) N_q(\phi) + C N_c(\phi)$$

$e^* = e/B$ excentricité relative

Meyerhof attire l'attention du lecteur sur le lien entre résistance et déplacement ; sous des charges inclinées et excentriques, fondation peu profonde peut se déplacer horizontalement de 20 % de la largeur de la fondation et pivoter de 1 à 5 degrés, selon la densité ou la rigidité du sol et la profondeur d'encastrement de la fondation. Ces mouvements sont nécessaires pour mobiliser la résistance du sol et peuvent avoir un impact important sur la structure qu'il supporte. Pour limiter le mouvement de la fondation, celle-ci doit être élargie ou encastree plus profondément. En revanche, si la rigidité de la fondation est faible par rapport à la rigidité du sol, une approche différente doit être adoptée, comme l'utilisation de coefficients de réaction.[6]

I.5. Les techniques de renforcement des sols

I.5.1. Introduction aux techniques de renforcement des sols:

Les techniques d'amélioration des sols constituent un domaine essentiel en génie géotechnique, visant principalement à améliorer les propriétés physiques et mécaniques des couches terrestres afin d'augmenter leur efficacité à supporter les charges et de réduire les tassements ainsi que les déformations du sol. Parmi les méthodes traditionnelles les plus répandues, on compte le compactage mécanique qui augmente la densité sèche du sol, les traitements chimiques utilisant des matériaux tels que la chaux ou le ciment pour améliorer la résistance au cisaillement et réduire la compressibilité, ainsi que les techniques de remplacement et de stabilisation par des pieux profonds ou des géomembranes en béton.

Avec le développement important des matériaux d'ingénierie, l'utilisation des géosynthétiques est apparue comme une solution efficace et innovante pour le renforcement des sols. Le terme géosynthétique englobe un ensemble de matériaux synthétiques (tels que le géotextile, la géogrid, la géomembrane et le géocellulaire) intégrés dans le sol pour améliorer ses performances géotechniques. Les mécanismes d'action de ces matériaux varient selon leur type et leur usage : certains permettent une meilleure répartition des contraintes et une réduction des déformations, d'autres servent comme élément de renforcement pour

augmenter la résistance au cisaillement, ou encore comme barrière hydraulique pour réduire la perméabilité.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse de l'effet de l'intégration des géosynthétiques dans l'amélioration de la capacité portante du sol, à travers une approche méthodique combinant la modélisation numérique avec des logiciels avancés (tels que PLAXIS) et des techniques d'optimisation basées sur les plans d'expériences. Cette recherche vise à fournir une vision précise de l'efficacité de ce type de renforcement et de sa faisabilité comme alternative durable et performante dans les projets d'infrastructure.[11]

I.5.2. Renforcement des sols par géosynthétique:

I.5.2.1. Définition de géosynthétique:

Un géosynthétique est le terme générique désignant un produit dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande, ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique ou du génie civil.

Les géosynthétiques sont classés en deux grandes familles :

1. Les produits perméables : géotextiles et produits apparentés aux géotextiles,
2. Les produits essentiellement imperméables : géomembranes et produits apparentés aux géomembranes.

Les géotextiles sont des produits issus de l'industrie textile, d'origines naturelles (fibres de Coton et de jute) ou synthétiques (polyester, polyéthylène, polypropylène, rarement le Polyamide). Les produits apparentés aux géotextiles sont principalement les géogrilles, les Geobags, les geotubes, les géoconteneurs en polymères. Les géomembranes sont des nappes continues imperméables qui sont le plus souvent à base de polymère ou de bitume. Les produits apparentés aux géomembranes sont principalement Les géosynthétiques bentonitiques (GSB).[10]

I.5.2.2. Notion sur les géosynthétiques:

Un géosynthétique se caractérise par une composition plane constituée d'un matériau polymère utilisé en association avec du sol, de la roche, de la terre ou un autre matériau géotechnique dans le cadre d'un projet, d'une structure ou d'un système de génie civil (ASTM, 1997). Les polymères les plus couramment utilisés dans la création de géosynthétiques sont listés ci-dessous :

Le polyéthylène (PE), le polyamide (PA) et le polyester (PET) sont également appelés polyéthylène haute densité.

Ces polymères présentent des caractéristiques différentes, et le choix d'un géosynthétique dépend souvent du type de polymère. (Laurent BRIANÇON, 2017). Il existe plusieurs types de géosynthèse. Pour des raisons pratiques, ces géosynthétiques sont généralement divisés en deux grandes familles, selon leur méthode de fabrication et leur rôle dans une structure. Ces dernières comprennent:

- Les Produits perméables :

Ces produits ont pour attribut commun d'être perméables aux fluides ou d'avoir une fonction principale qui n'est pas l'imperméabilisation, comme les géotextiles et les produits apparentés, qui sont principalement composés de géogrilles, de géofilets, de géofilets et de conteneurs.

- Les produits imperméables :

Les produits imperméables ont pour fonction principale l'étanchéité aux fluides. On distingue dans cette catégorie, les géomembranes et Les produits apparentés aux géomembranes (les géosynthétiques bentonitiques) (BORDES, 1995). L'association de ces deux familles de produits forme les Géocomposites [7].

I.5.2.3. Fabrication:

La plupart des géosynthétiques sont fabriqués à partir de polymères géosynthétiques tels que le polypropylène, le polyéthylène, le polyalide (nylon), le chlorure de polyvinylidène, Et la fibre de verre.

Ces matériaux sont fortement résistants à la dégradation biologique et chimique; les filaments peuvent être des fibres continues ou des géotextiles courts et des produits tels que filets et des grilles peuvent être combinés avec des géomembranes d'autres synthétiques pour tirer de meilleurs fibres. Les strands peuvent également être produites en fondant une feuille ou un fil en plastique extrudé pour produire les bandes minces [8].

I.5.2.4. Classification des géosynthétiques:

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon leur mode de fabrication. Ils sont essentiellement fabriqués pour une utilisation dans les Domaines du génie civil et de la protection de l'environnement ainsi que dans les ouvrages hydrauliques et de transport. On distingue commandement quelques types principaux de Géosynthétiques, chacun ayant sa propre fonction ; Les principes types de géosynthétiques sont présentés dans (Figure 2.1) [8].

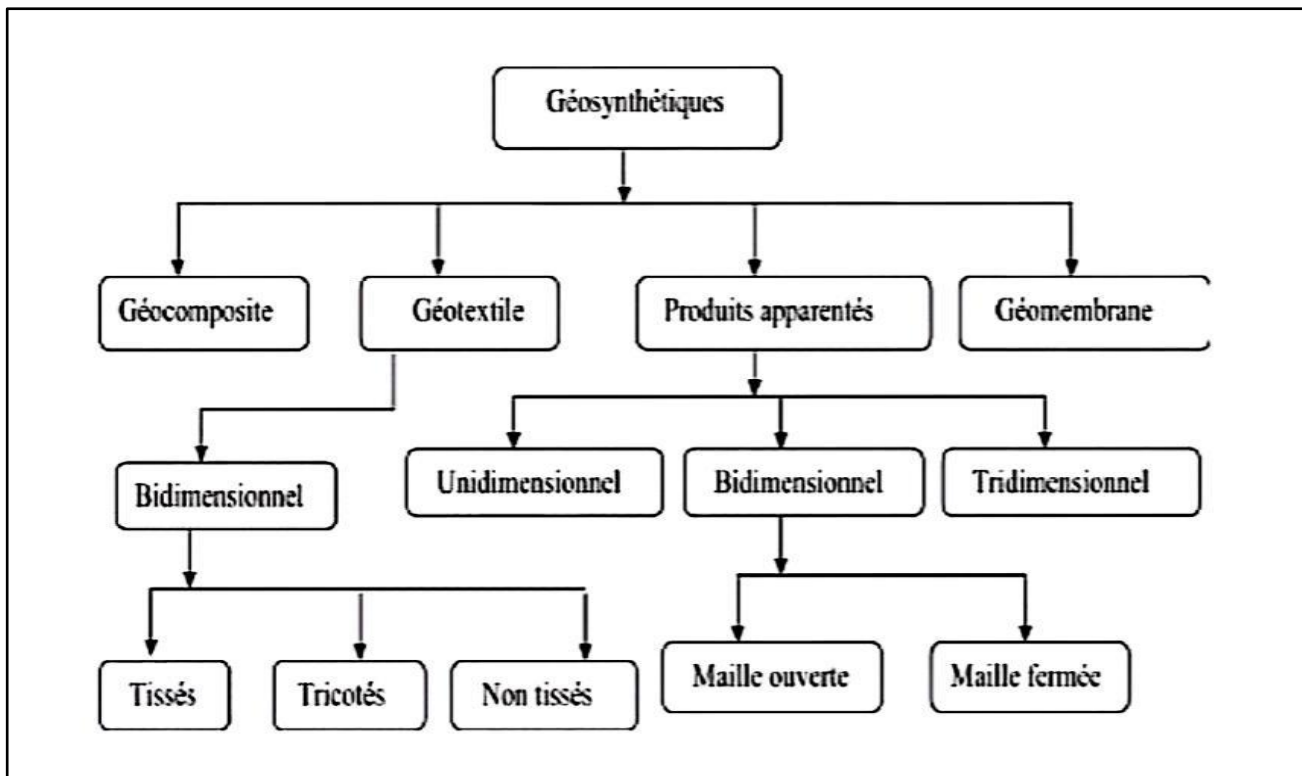


Figure 1.10: Les principes types de géosynthétique (schéma)[8].

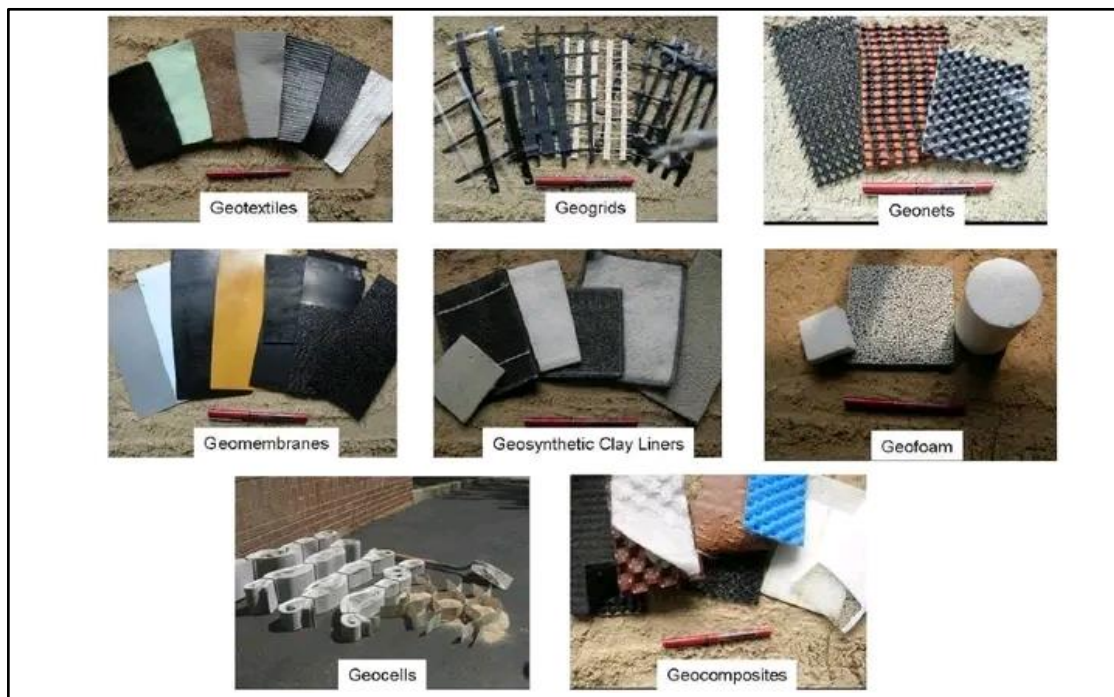


Figure 1.11 : Les principes types de géosynthétique

I.5.2.5. Différents types des géosynthétiques:

Les géosynthétiques sont produits sous différentes formes à partir de matières synthétiques Sur la base de divers polymères provenant de l'industrie chimique (polyéthylène Polypropylène, polyester, fibres de verre, , végétales...). Les centaines de produits Géosynthétiques existant actuellement sur le marché peuvent être classés en 6 groupes, d'aprèsLes matières premières utilisées, les modes de fabrication et les domaines d'utilisation.



Figure 1.12 : Différents types de géosynthétique[3]

- **Géotextiles:**

Les géotextiles sont des produits tissés, pastissés, ou tricotés, qui laissent passer l'eau; ils sont faits avec un type de plastique et utilisés en sol et construction civile. Leur usage très large touche aussi, la géotechnique routière centres de stockage déchets, aménagements hydrauliques ; la stabilisation des sols que renforcement des fondations.

Les géotextiles ont trois types:

Un non tissé est un géotextile qu'on trouve sous la forme d'une feuille faite par des machines, formée d'un tissu ou d'une couche de fibres, orientés dans un sens ou mis au hasard.

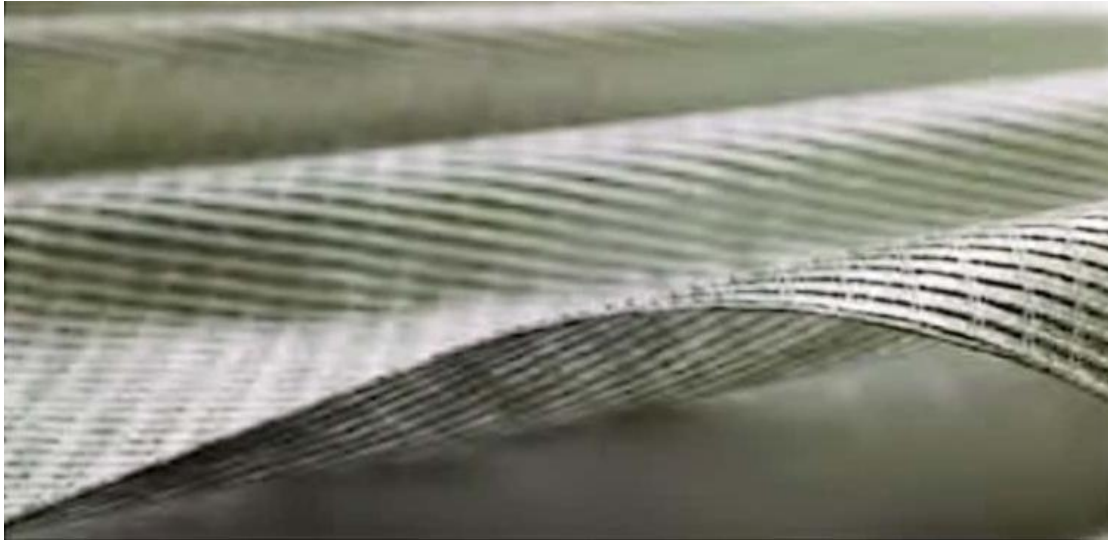


Figure 1.13: Exemple de géotextile non tissé [8].

- Un tissé est un tissu fait d'ensembles de fils qui se croisent à angle droit et réunis d'une manière structurée (par exemple : les tissus pour chemises, voiles de bateaux, bâches).
- Un tricoté est un textile fait en mettant ensemble deux couches de fils parallèles avec un fil qui relie, pour obtenir la forme voulue.



Figure 1.14: Exemple de géotextile tricoté [8].

- **Géocomposite:**

Un géocomposite est une composition de matériaux comprenant au moins un composant géosynthétique, par exemple une géogrille associée à un géotextile non tissé. Il est adapté à une utilisation en géotechnique ou dans l'enseignement. Les géocomposites inhibent simultanément la formation et l'agrandissement des fissures, grâce à leur capacité à absorber les forces horizontales. Ils facilitent également l'ajout d'asphalte aux nouveaux projets, ainsi que l'entretien et la réparation des projets existants. Limiter la taille et le nombre de fissures augmente également la durée de vie des chaussées.[9]



Figure 1.15: Exemple de géocomposite [8]

I.5.2.6. Domaines d'application:

- **Les remblais routiers et ferroviaires**

Les routes et autoroutes sont de la plus haute importance pour le développement D'un pays. Le trafic répété de véhicules lourdement chargés, les conditions Climatiques et les propriétés mécaniques des matériaux employés dans ces Constructions peuvent entraîner une durabilité bien moindre des chaussées Routières que ce qui était attendu. Bien que cet aspect soit plus largement développé Au chapitre II. La présence du géosynthétique dans ce domaine peut apporter les Bénéfices suivants :

- Réduction de l'épaisseur du remblai.
- Réduction du déplacement latéral du barrage .
- Amélioration de la répartition des contraintes .
- Augmentation de la force de propagation verticale .

- Diminution de la distorsion verticale due à l'effet de membrane .
- Prolongation de la durée de vie des véhicules ;
- Réduction des temps d'arrêt .
- Réduction des coûts liés à la construction et à l'entretien des routes.



Figure 1.16: Un géosynthétique dans une construction routière

- Stabilisation des talus

Lorsqu'il existe un risque potentiel de rupture profonde, des géosynthétiques renforcés sont utilisés en couches horizontales pour stabiliser les pentes. Les parcelles renforcées peuvent s'inscrire dans le cadre de réhabilitations de talus et/ou renforcer les berges de remblais en terre. La couche de renfort permet de construire la pente Plus raides que les pentes non renforcées. Il peut être nécessaire de stabiliser la surface de la pente (en particulier lors de la mise en place et du compactage du remblai) en utilisant des renforts secondaires relativement courts et rapprochés et/ou en ramenant la couche de renfort à la surface. Cela peut nécessiter l'utilisation , géosynthétiques pour retenir une fine couche de sol Par exemple, des géocellules ou géomats relativement légers sont souvent utilisés pour sécuriser temporairement la végétation. La figure ci-dessous montre un exemple de réhabilitation de pente à l'aide d'une structure de sol renforcé par géosynthétique.



Figure 1.17: un renforcement d'une pente par un géosynthétique [9]

- Les remblais:

La construction des remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géosynthétiques pour améliorer la stabilité De ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus Efficaces et largement éprouvée. Pour ces problèmes, les géosynthétiques peuvent Être efficacement utilisés pour :

- réduire les déplacements des sols compressibles causés par leurs faibles Portances (figure ci-dessous) [9]:

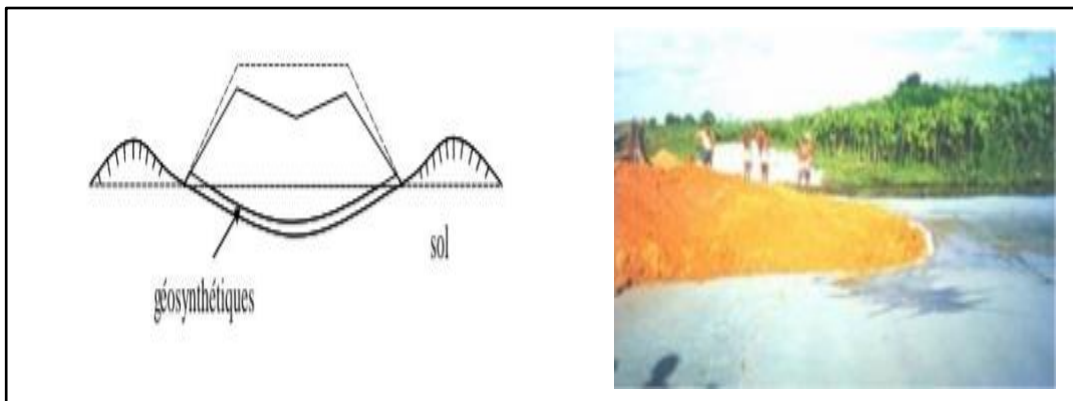


Figure 1.18: ungeosynthétique sous-sol compressible[7]

- prévenir une rupture *d'ensemble* du remblai et du sol de fondation



Figure 1.19: une nappe géosynthétique pour une construction d'un remblai [7][9]

- prévenir une rupture par glissement le long de la nappe géosynthétique

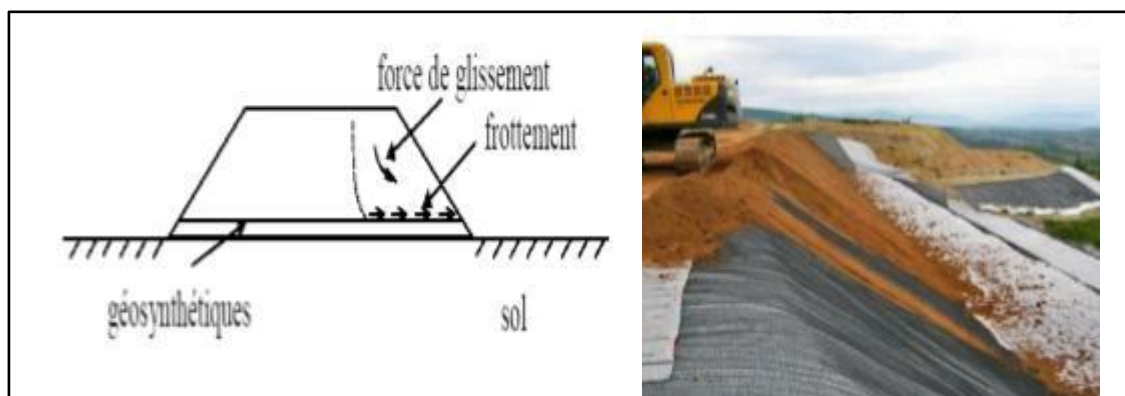


Figure 1.20: une nappe géosynthétique dans une construction une pente[9] [7]

- Les murs de soutènement:

Des nappes horizontales de géosynthétiques peuvent être associées à un massif de remblai à parement vertical ou sub-vertical pour constituer un massif en sol Renforcé équivalent à un mur poids susceptible de résister à la poussée des terres à l'arrière de l'ouvrage. Les différents types des géosynthétiques habituellement utilisés sont des nappes de géogrilles ou de géotextiles tissés ou des bandes polymères. La stabilité locale du talus renforcé en parement est assurée par liaison des nappes ou bandes de renforcement aux éléments de parement. Ces parements ont des formes et des constituants très variés (polymère, béton, bois, etc.)

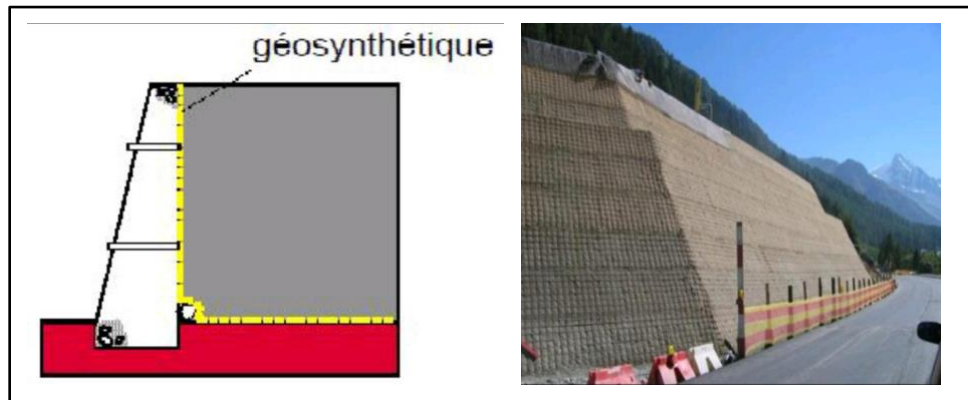


Figure 1.21: un mur de soutènement renforcé par géosynthétique [7] [9]

- Le contrôle de l'érosion:

L'érosion est un processus naturel causé par l'action de l'eau et du vent. Ce processus est influencé par nombreux facteurs tels que la nature du sol, de la Végétation et la topographie et il peut être accéléré par l'activité humaine. L'absence de contrôle du processus d'érosion peut causer des dommages importants à L'environnement et aux infrastructures.[7]

Selon le projet et les caractéristiques du site, un ouvrage de maîtrise de l'érosion peut impliquer l'utilisation d'un ou plusieurs produits géosynthétiques tels que Géotextiles, géomatelas, géogrille, géocellules, géotubes. Quelques exemples d'application de géosynthétiques dans des travaux de lutte Contre l'érosion sont présentés dans les figures suivantes [9].



Figure 1.22 : à gauche contrôle d'érosion sur pente, à droite travaux achevés[7].

- En agriculture:

Le secteur agricole est celui qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Les premières utilisations étaient principalement destinées aux exploitations agricoles, et plusieurs des premières spécifications visaient spécifiquement à empêcher l'eau de pénétrer dans les lacs agricoles. Ces premières utilisations concernaient l'imperméabilisation des ravines,

contribuant ainsi à la conservation des ressources en eau, ainsi que l'imperméabilisation des lacs agricoles et le stockage des eaux de pluie dans les régions arides du monde. Aujourd'hui, il existe un large éventail d'utilisations, allant de l'imperméabilisation des canaux couverts et non couverts à la protection des eaux souterraines et de surface contre la pollution par les déjections animales.



Figure 1.23 : à gauche végétation à l'aide de géogrille, à droite un bassin couvé par géomembrane [9]

- Traitement des eaux usées:

Les géosynthétiques sont fréquemment utilisés dans le traitement des eaux usées. Leur utilisation la plus courante est le traitement des bactéries aérobies et anaérobies. L'utilisation de géotubes géotextiles perméables permet d'augmenter l'évaporation des eaux usées et de dessicher les boues. Dans ces bassins, les géosynthétiques servent principalement de barrière de fond et de couverture flottante, mais de nombreuses variantes peuvent être choisies selon la situation : barrières de fond, couvertures, amélioration de l'évaporation et dessiccation des boues.[7]



Figure 1.24: les géosynthétiques dans les bassins de traitement[7][9]

I.5.2.7. Choix des éléments de renforcement géosynthétiques:

L'approche recommandée pour concevoir, choisir et indiquer le géosynthétique n'est pas différente de ce qui est généralement pratiqué dans n'importe quelle conception Géotechnique et d'ingénierie.

D'abord, la conception devrait être faite sans géosynthétiques pour voir s'ils sont vraiment nécessaires. Si les solutions conventionnelles sont impraticables ou peu Économiques, concevoir alors les calculs employant des évaluations d'ingénierie des Propriétés géosynthétiques requise.

Les géosynthétiques qui jouent un rôle essentiel dans la stabilité des ouvrages, sont choisis en fonction de plusieurs critères :

Leur résistance à la traction à long terme tenant compte des effets du fluage, du vieillissement et de l'endommagement.

Le coefficient d'interaction par frottement à l'interface avec le matériau de remblai ou le sol.

La nature du polymère dont ils sont constitués, qui doit être compatible en termes de vieillissement avec le matériau de remblai et le cas échéant avec le parement en pente.[7]

I.5.2.8. Limites et défis de l'utilisation des géosynthétiques:

- Les géosynthétiques sont sensibles à la dégradation sous l'effet des rayons ultraviolets, notamment si la lumière n'est pas suffisamment occultée.
- Des dommages mécaniques sont possibles lors de la manipulation ou de l'installation d'une pièce, tels qu'une perforation, une déchirure ou un étirement excessif.
- Des panneaux mal construits ou sous-dimensionnés peuvent nuire à l'efficacité globale du système.
- Des conditions météorologiques défavorables (vent, pluie et températures extrêmes) peuvent nuire à l'installation et entraîner une mauvaise mise en place.
- La performance des géosynthétiques dépend principalement de leur association avec le sol, notamment en ce qui concerne les paramètres de frottement et d'adhérence, difficiles à modéliser avec précision.
- Les variations des propriétés du sol au fil du temps, telles que le compactage ou la saturation, peuvent avoir un effet à long terme sur l'efficacité des géosynthétiques.
- Le coût initial des géosynthétiques haute performance, ainsi que la difficulté technique associée à leur installation, peuvent constituer un obstacle à certains projets.
- L'absence de cohérence totale entre les normes internationales (ASTM, ISO, EN) peut poser des problèmes d'intégration de projets transnationaux.

Stratégies pour surmonter les obstacles liés aux géosynthétiques

- Choisir le matériau approprié:

Choisir le type de géosynthétique adapté aux conditions spécifiques du projet (type de sol, composition chimique, températures, exposition aux UV) afin de garantir sa durabilité et son efficacité.

-  **Contrôle qualité rigoureux de l'installation:** Former les formateurs à l'application d'engrais synthétiques et inspecter visuellement et mécaniquement les géosynthétiques avant, pendant et après l'installation afin de prévenir les dommages mécaniques (déchirures, plis, perforations).
-  **Amélioration de l'interaction sol-géosynthétique :** Réaliser des expériences en laboratoire pour évaluer les effets directs du cisaillement et de la tension sur les propriétés adhésives du sol afin de garantir la stabilité de la structure.
-  **Prévenir le vieillissement et l'épuisement des ressources :** Utiliser des matériaux synthétiques contenant des composants bloquant les ultraviolets et anti-vieillissement, et prévoir des couches de couverture (terre, sable ou géotextile de protection) limitant l'exposition directe du matériau.
-  **Évaluation économique efficace :** Appliquer une analyse coûts-avantages à long terme prenant en compte les économies de maintenance, la longévité du produit et la diminution du risque de défaillance.
-  **Mise en œuvre des normes et réglementations internationales :** S'assurer que les produits et les méthodes utilisés sont reconnus comme appropriés (ISO, ASTM, EN) et utiliser les méthodes les plus efficaces en géotechnique et en génie civil..[11]

I.6. Conclusion:

Ce chapitre a présenté les fondements théoriques indispensables à la compréhension de la problématique. Il a permis de définir les types et les principes de fonctionnement des fondations superficielles, d'examiner les principales méthodes de calcul de leur capacité portante, et d'introduire les techniques d'amélioration des sols, en particulier le renforcement par géosynthétiques, largement utilisé pour améliorer les performances mécaniques des sols à faible portance.

Cette base théorique est essentielle pour justifier le recours à des approches combinant modélisation et optimisation dans l'étude. Elle prépare à aborder les sections suivantes du mémoire, qui s'appuieront sur des outils statistiques pour structurer l'analyse et sur la simulation numérique pour évaluer et améliorer l'efficacité des sols renforcés par des nappes de géogrilles.

CHAPITRE 02

PLANS D'EXPÉRIENCES ET

MÉTHODES D'OPTIMISATION

II.1. Introduction[12]

Les plans d'expériences constituent une méthode structurée pour organiser et optimiser les essais expérimentaux ou numériques dans le cadre de recherches scientifiques ou d'études techniques. Ils permettent d'explorer les relations entre une variable de réponse Y et un ensemble de facteurs x_i ($Y = f(x_i)$), selon une approche systématique fondée sur des règles mathématiques.

L'objectif principal est d'obtenir un maximum d'informations à partir d'un nombre limité d'essais, tout en assurant la fiabilité des résultats. Cette méthode repose sur deux concepts fondamentaux : l'espace expérimental, qui définit les combinaisons possibles des facteurs étudiés, et la modélisation mathématique, qui permet de représenter la réponse du système en fonction de ces facteurs.

Plusieurs types de plans sont disponibles selon la nature de l'étude. La maîtrise de ces outils permet de planifier efficacement les campagnes de simulation, de modéliser les effets des paramètres et d'optimiser les performances d'un système avec un minimum d'efforts expérimentaux.

Ce chapitre présente les principes essentiels des plans d'expériences ainsi que les concepts clés de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM), qui seront utilisés pour modéliser et optimiser les performances des fondations sur sols renforcés par géogrilles.

II.2. Historique des plans d'expériences

- Dans le secteur Industriel, procédure restée confidentielle jusqu'après la deuxième Guerre mondiale ; développement au Japon entre les années 1950 et 1960 grâce Notamment à TAGUCHI ; ses travaux sont diffusés aux Etats Unis et appliqués à grande Échelle vers les années 1970.
- En Europe, les grandes Entreprises industrielles utilisent les plans experiential àPartir des années 1980. Actuellement cette méthode d'expérimentation est utilisée standardL'ensemble des Industriels, petits et grands.La méthode est maintenant considérée comme un outil de la qualité, vital.
- au stade de la conception des produits pour permettre de fixer les paramètres de développement du produit de façon optimale.
- au cours de la generation, comme complément crucial des méthodes de maîtrise des procédés.

II.3. But et domaine d'utilisation

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement.Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer:

- Businesses chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- Businesses mécaniques et automobiles
- Businesses métallurgiques

Leur usage tight clamp aux buts suivants :

- Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé.
- Enhancement des réglages d'un procédé de manufacture ou d'un appareil de mesure.
- Prédiction standard modélisation du comportement d'un procédé

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité [12]

II.4. Définition d'un plan d'expérience

Un plan d'expérience est une méthode pour planifier ou organiser les expériences Scientifiques et industrielles dans le but de retirer l'information correspondante à l'objectif fixé préalablement. Leur but est d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum d'expérimentations par rapport à l'objectif que l'on s'est fixé. Les plans d'expériences sont appliqués dans différents domaines des sciences. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

D'une manière générale, un plan d'expérience consiste à évaluer et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables :

- Le facteur
- La réponse

❖ Condition 1:

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle alter de valeur

❖ Condition 2:

La réponse doit être homoscedastique pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

II.4.1. Choix de la méthode d'expérimentation:

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences garantit les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision concevable avec le least d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le least d'expériences et standard conséquent le coût least.

II.4.2. Vocabulaire de base des plans d'expériences:

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs parmi les facteurs on

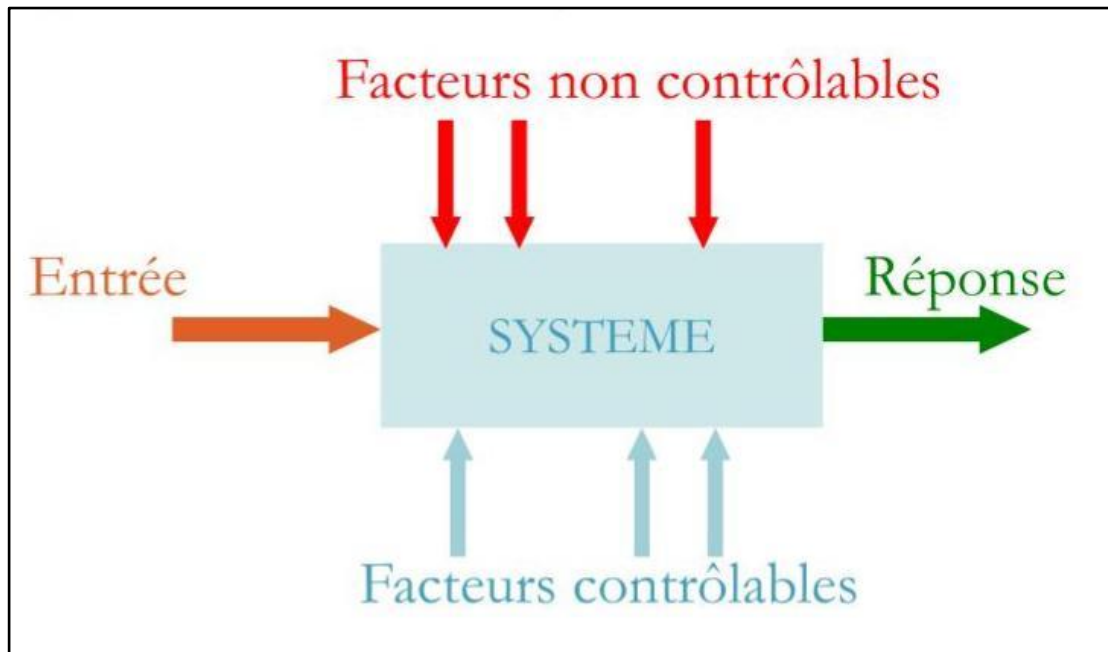


Figure 2.1: Schématisation d'un processus expérimental.

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau ...)
- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- Les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température, rendement ...)

II.4.2.1. 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 arrangement d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée et ils existent deux types :

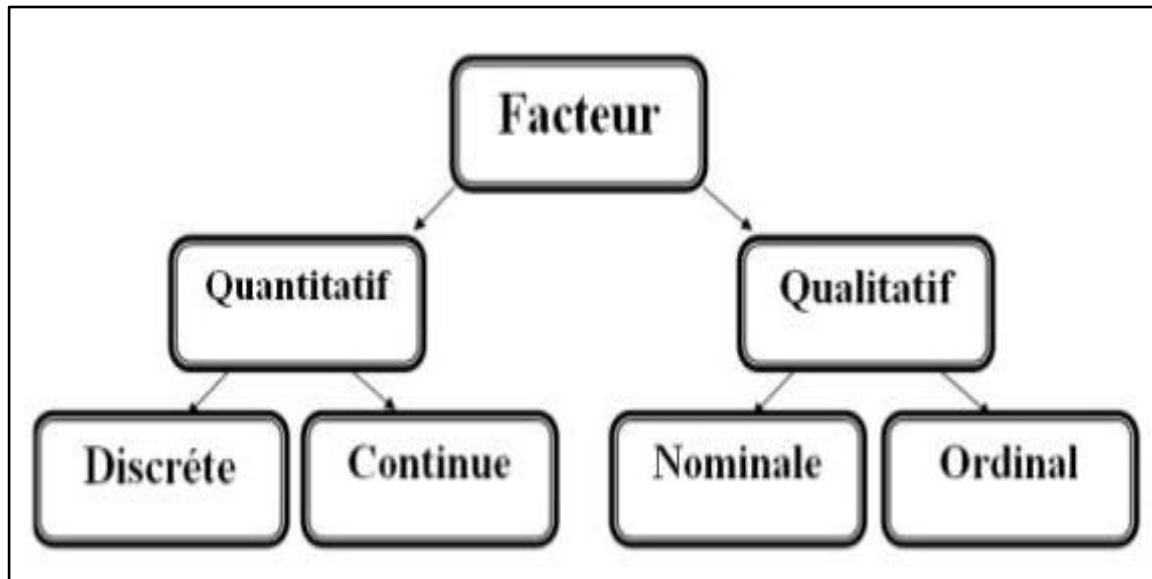


Figure 2.2: Les différents types de facteur.

a) Facteur quantitatif:

Un facteur quantitatif est un facteur mesurable, souvent à variation continue ou discrète.

- **Variable continue**
- **Variable discrète**

b) Facteur qualitatif:

Un facteur qualitatif est un facteur non mesurable, on distingue des variables qualitatives ordinales et nominales

- **Variable ordinale**
- **Variable nominale**

II.4.2.2. 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 lesFacteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables.

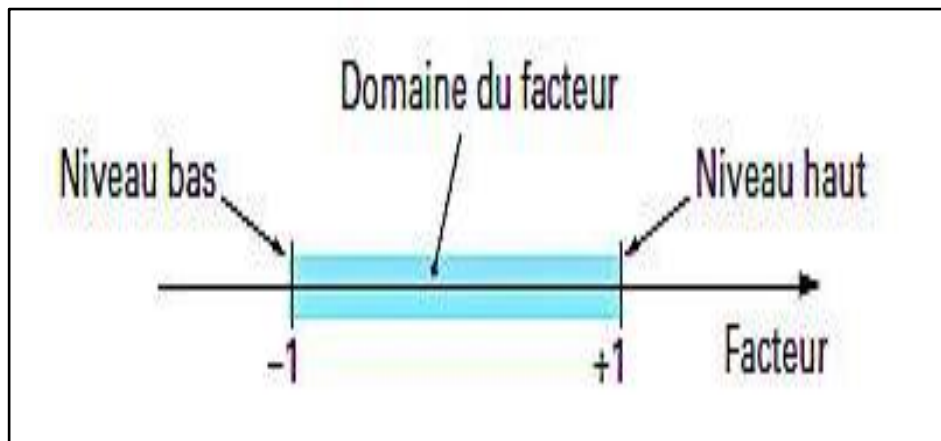


Figure 2.3: Le domaine et les niveaux d'un facteur.

II.4.2.3. Domaine d'étude et surface de réponse:

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu standard l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un outfit d'expériences bien définies, est représentée standard une série de focuses disposés dans le domaine d'étude. Cette manière deReprésenter une experimentation standard un gathering de focuses dans un espace cartésien est une , géométrique de l'étude.

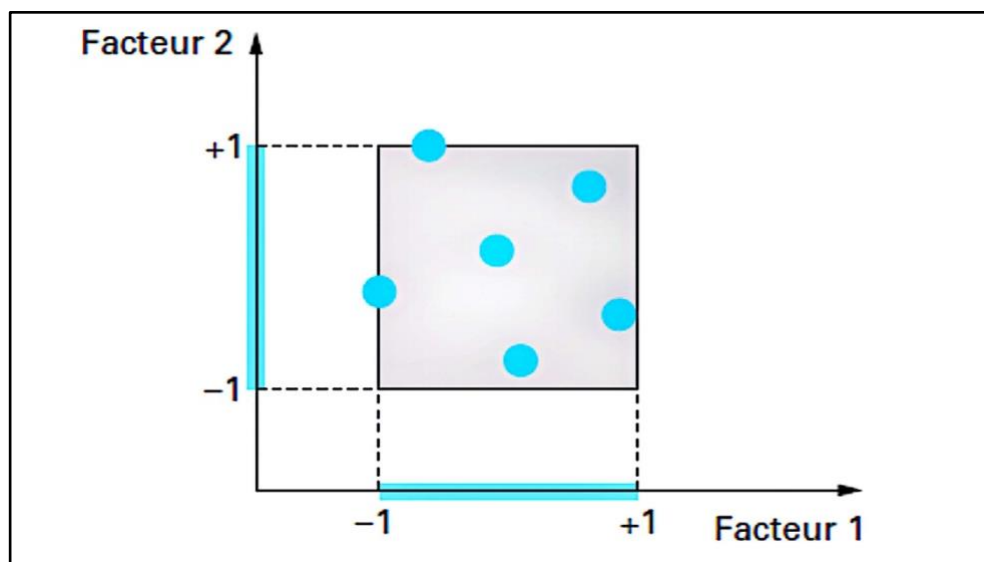


Figure 2.4: La disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude.

II.4.2.4. Valeurs centrées réduites ou codées:

L'utilisation des facteurs centrés réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie. Des plans d'expériences quelque soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les facteurs naturels standard les facteurs codés va permettre d'avoir pour chaque

Facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (- 1) alors que le niveau haut est codé (+ 1). [12]

. II.4.2.5. Réponse:

La réponse est la greatness mesurée à chaque essai ; le arrange tight clamp à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette glory est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus mais elle peut également être subjective, standard exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface. [12]

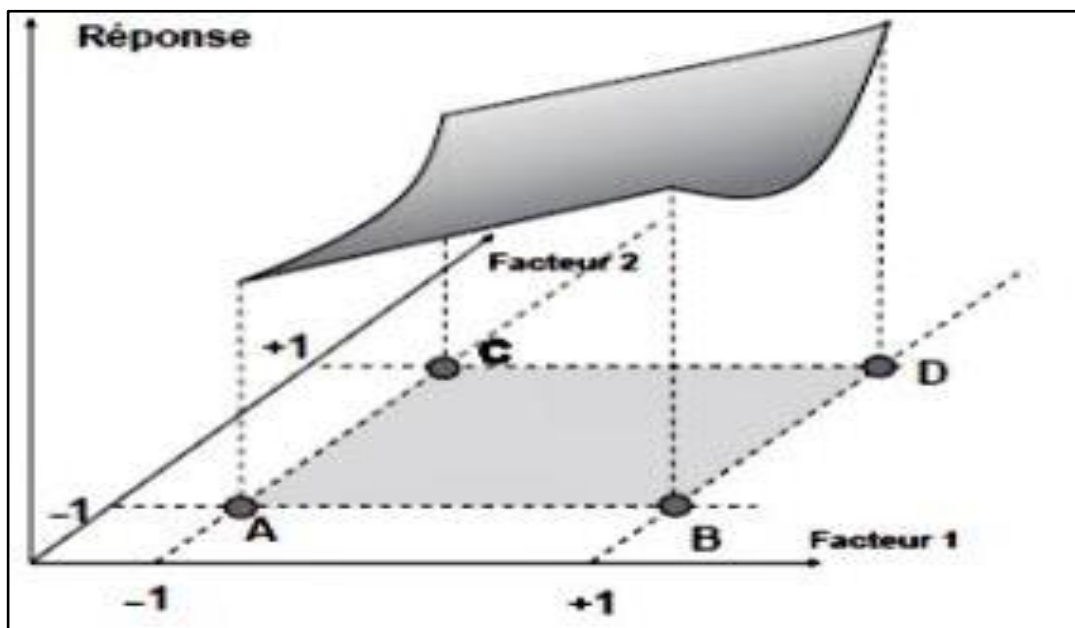


Figure 2.5: La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude

- *Choix des Réponses :*

Le choix des réponses est une étape capitale. Toute l'analyse et toutes les conclusions dépendent de ce choix. Une réponse mal adaptée au problème rendra l'expérimentation inutilisable ou conduira à des conclusions sans intérêt. La réponse sélectionnée doit permettre de répondre sans ambiguïté à la question posée. Ce choix n'est pas aussi simple que l'on pourrait le croire et c'est parfois la principale difficulté à laquelle on se heurte.

II.5. Différents types des plans d'expériences

L'objectif des plans d'expériences est de choisir au mieux les expériences à réaliser pour découvrir les règles d'évolution d'une grandeur d'intérêt en fonction de variables opératoires. Ces règles se traduisent le plus souvent par une formule mathématique ou par des consignes d'utilisation. Les formules trouvées sont essentiellement pratiques c'est-à-dire qu'elles donnent une représentation mathématique approchée du phénomène dans une région limitée de l'espace expérimental.

II.5.1. Plans de mélange: [13]

Une conception mixte est une conception spéciale adaptée à l'étude de facteurs connexes. Ils sont principalement utilisés pour étudier l'effet du rapport des ingrédients d'un produit sur une réponse donnée.

II.5.2. Plans de criblage:

L'objectif de ces programmes est de découvrir les facteurs qui ont le plus grand impact sur une réponse donnée. Aucune relation précise n'est établie entre les changements dans les facteurs et les changements dans la réponse. Les modèles proposés comprennent un plan factoriel complet à deux niveaux, un plan factoriel fractionnaire et un plan Plackett-Burman.

II.5.3. Plans factoriels complets à deux niveaux :

Un plan factoriel complet à deux niveaux est une méthode expérimentale largement utilisée dans le domaine de la recherche scientifique et industrielle. Il consiste à étudier simultanément l'effet de plusieurs facteurs, chacun pris à seulement deux niveaux, ce qui permet d'identifier rapidement les influences principales et les interactions éventuelles. Ce type de plan est particulièrement efficace car il offre une structure optimale permettant de tester toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs étudiés. Parmi ses avantages, on peut citer la simplicité de mise en œuvre des essais, la réduction des risques d'erreurs, et la possibilité d'obtenir une modélisation mathématique directe. Les résultats obtenus peuvent ensuite être exploités pour affiner l'étude ou pour construire un modèle plus complexe. Toutefois, ce type de plan exige un grand nombre d'essais lorsque le nombre de facteurs augmente, ce qui peut devenir contraignant. Pour pallier cette limite, des plans factoriels fractionnaires ont été développés afin de réduire le nombre d'expériences tout en conservant une pertinence statistique.

Points expérimentaux:

S'il y a deux facteurs, l'espace expérimental sera un plan. Les points expérimentaux seront placés de manière à ce que leurs coordonnées soient au niveau bas et au niveau haut de chaque facteur. La figure 6 indique la disposition des points expérimentaux pour un plan

factoriel 2^2 (la signification de cette notation est la suivante : le 2 en exposant indique le nombre de facteurs, l'autre 2 indique

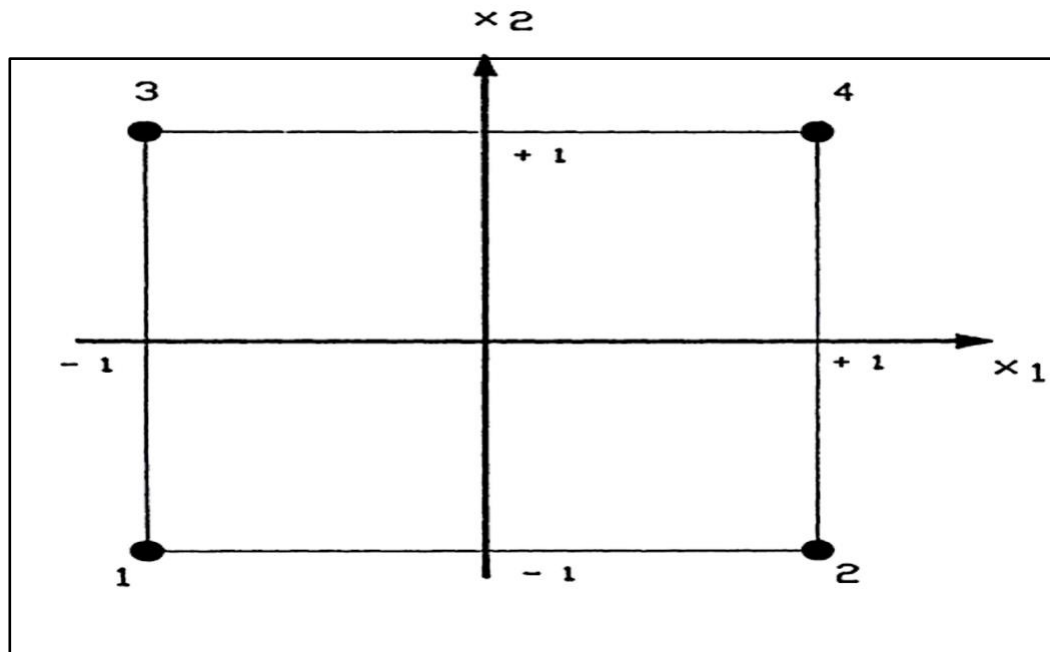


Figure 2.6: Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^2

La matrice d'expériences équivalente à la représentation géométrique de la figure 6 est donnée par le tableau III dans lequel nous n'avons fait figurer que les signes + et - au lieu de +1 et -1.

Tableau 2. 1: N° de l'essai

N de l'essai	Facteur 1	Facteur 2
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Pour trois facteurs, les points expérimentaux seront aux sommets d'un cube (figure 7) et la matrice d'expériences sera un tableau traduisant l'emplacement de ces points en indiquant leurs trois coordonnées en variables centrées réduites (tableau 1).

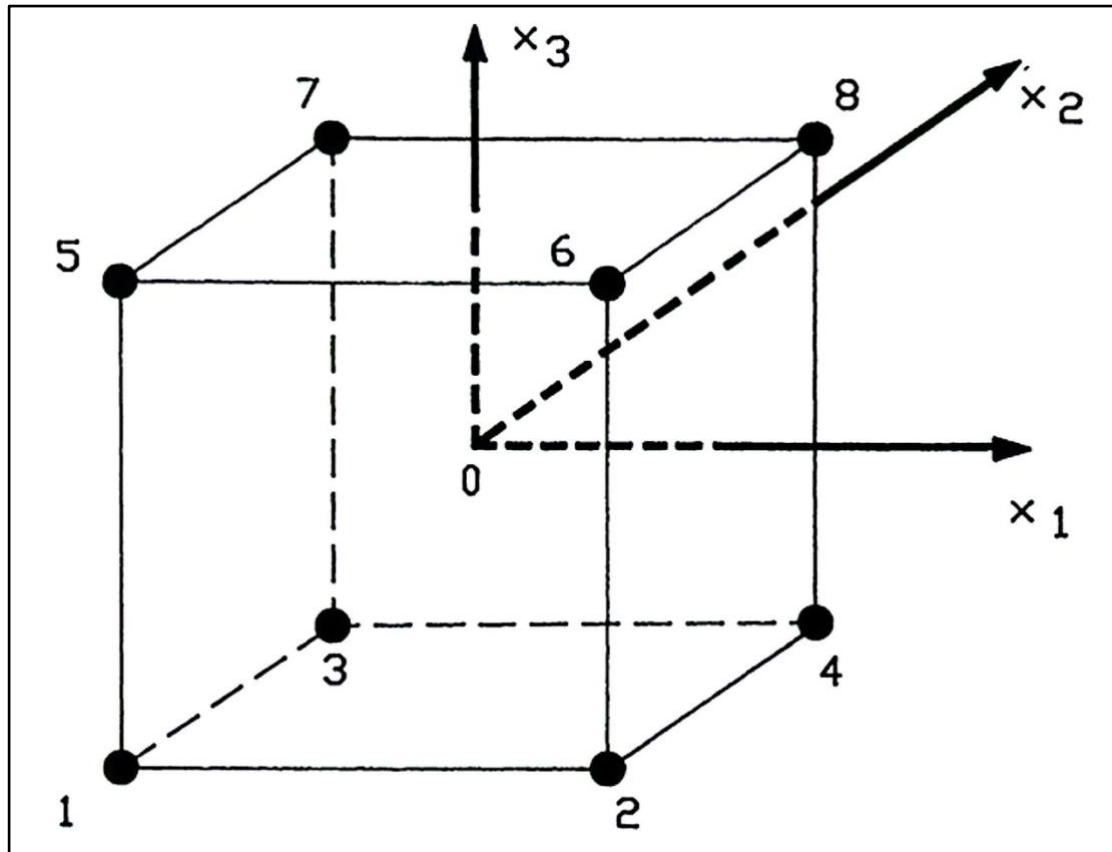


Figure 2.7: Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^3

On s'est arrangé pour numéroté les points expérimentaux de telle manière que la matrice d'expériences se présente selon une disposition particulière que nous appellerons «disposition classique» la colonne du facteur 1 est une suite alternée des signes et commençant par un signe, la colonne du deuxième facteur est une suite alternée de deux signes suivis de deux signes +, la colonne du troisième facteur est une suite de quatre signes suivis de quatre signes +. Il faut bien voir que chaque ligne est constituée par les trois coordonnées de chaque point expérimental.

Tableau2.2: N °de l'essai2

N °de l'essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

❖ **Modèle mathématique**

La représentation mathématique des plans factoriels complets est un polynôme du premier degré pour chaque variable. On suppose que les effets des composantes sont complémentaires et qu'il peut y avoir des interactions entre elles. La formule est la suivante : pour un plan à 3 facteurs, le modèle est composé de

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3$$

Où:

a_0 est la valeur de la réponse au point central du domaine expérimental.

a_1 est l'effet du facteur 1

a_2 2

a_3 3

a_{12} est l'interaction entre les facteurs 1 et 2

a_{13} 1 et 3

a_{23} 2 et 3

a_{123} 1, 2 et 3

Pour un tel plan, l'expérimentateur exécute huit essais. Il obtient donc un système de huit équations à huit inconnues:

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 - a_3 + a_{12} + a_{13} + a_{23} - a_{123}$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_3 - a_{12} - a_{13} + a_{23} + a_{123}$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_3 - a_{12} + a_{13} - a_{23} + a_{123}$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 - a_3 + a_{12} - a_{13} - a_{23} - a_{123}$$

$$y_5 = a_0 - a_1 - a_2 + a_3 + a_{12} - a_{13} - a_{23} + a_{123}$$

$$y_6 = a_0 + a_1 - a_2 + a_3 - a_{12} + a_{13} - a_{23} - a_{123}$$

$$y_7 = a_0 - a_1 + a_2 + a_3 - a_{12} - a_{13} + a_{23} - a_{123}$$

$$y_8 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_{12} + a_{13} + a_{23} + a_{123}$$

II.5.4. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux:

Les plans factoriels fractionnaires explorent tous les facteurs, mais avec un nombre d'expériences inférieur à celui des plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire comporte 2 fois moins, 4 fois moins ou 2^q fois moins d'essais que le plan factoriel complet correspondant.

À la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on obtient un système de n équations avec p paramètres inconnus, où p est supérieur à n . Ce système est impossible à traiter. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut réduire le nombre d'inconnues. Pour ce faire, on utilise une illusion : on regroupe les coefficients en un seul groupe, et on obtient alors n inconnues. On traite ainsi un système de n équations avec n groupes de paramètres. On appelle ces groupes de coefficients, des contrastes ou des aliases et on dit que les coefficients sont aliasés dans les contrastes .

❖ Points expérimentaux

Nous utiliserons le Plan 2^3 comme exemple, qui réalisera quatre expériences au lieu de huit. Les points choisis ne sont pas choisis au hasard. Nous avons essayé de faire en sorte qu'ils soient aussi informatifs que possible, c'est-à-dire qu'ils nous permettent de calculer la réponse au point central du domaine expérimental et les principaux effets des facteurs étudiés. Ce résultat peut être atteint si les points sont choisis comme indiqué dans la figure 8. La matrice expérimentale correspondante est donnée dans le tableau 1.1. Lorsqu'il y a plus de trois facteurs, il est impossible de donner un schéma indiquant les emplacements des points expérimentaux à retenir. D'autre part, il est toujours possible d'utiliser des matrices. Par conséquent, le reste de ce paragraphe sera consacré à la discussion des plans factoriels fractionnaires, et des expériences seront réalisées en utilisant uniquement cette représentation.

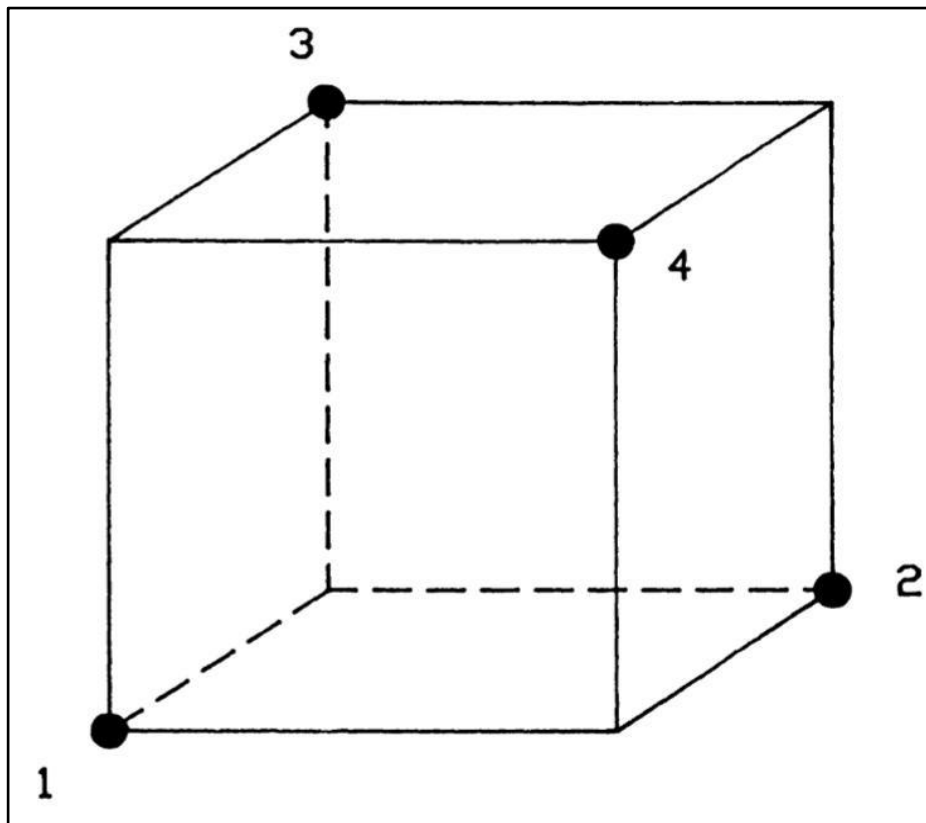


FIGURE 2.8: Disposition des quatre points expérimentaux d'un plan factoriel fractionnaire 2^{3-1}

Tableau 2.3: N° de l'essai

N° de l'essai	X1	X2	X3
1	-	-	-
2	+	+	-
3	-	+	+
4	+	-	+

Les plans fractionnaires sont utiles lorsqu'il y a de nombreux facteurs à étudier. Le nombre d'expériences peut être considérablement réduit sans réduire le nombre de facteurs. L'exemple que nous venons de donner, consistant à réaliser quatre expériences au lieu de huit, peut être étendu à n'importe quel plan factoriel complet. En fonction du nombre de tests prévus dans le plan initial complet, le nombre de tests peut être divisé non seulement par 2, mais également par 4, 8, ..., 2. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre la théorie des alias pour interpréter correctement les résultats expérimentaux. Nous n'avons pas besoin d'entrer dans les détails de cette théorie, qui peut être trouvée dans le livre Méthodes de

planification expérimentale. Voyons comment les expérimentateurs peuvent réduire le nombre de ces tests. Considérez une étude qui examine quatre facteurs .

Un programme complet nécessite seize expériences. Si l'expérimentateur décide de n'exécuter que la moitié des essais, il exécutera $16/2$ ou $2^{(4-1)}$. La dernière façon de l'écrire est pratique et a été choisie comme plan factoriel fractionnaire. 2 signifie que chaque facteur a deux niveaux, 4 signifie que quatre facteurs sont étudiés et 1 signifie qu'il y a un facteur supplémentaire par rapport au nombre de facteurs dans l'ensemble du plan. On remarque également que le symbole représente le nombre d'essais à réaliser : $2^{(4-1)} = 8$. Le problème est de savoir quels sont les huit essais à éliminer et quels sont les huit essais à conserver pour étude. Comme nous l'avons déjà mentionné, ce choix ne peut être fait correctement que si vous comprenez la théorie de l'aliasing. .

Un programme complet nécessite seize expériences. Si l'expérimentateur décide de n'exécuter que la moitié des essais, il exécutera $16/2$ ou $2^{(4-1)}$. La dernière façon de l'écrire est pratique et a été choisie comme plan factoriel fractionnaire. 2 signifie que chaque facteur a deux niveaux, 4 signifie que quatre facteurs sont étudiés et 1 signifie qu'il y a un facteur supplémentaire par rapport au nombre de facteurs dans l'ensemble du plan. On remarque également que le symbole représente le nombre d'essais à réaliserp $2^{(4-1)} = 8$. Le problème est de savoir quels sont les huit essais à éliminer et quels sont les huit essais à conserver pour étude. Comme nous l'avons déjà mentionné, ce choix ne peut être fait correctement que si vous comprenez la théorie de l'aliasing.

La matrice d'expériences du plan $2^{(4-1)}$ est donnée par le tableau 4. On remarque qu'un plan $2^{(4-1)}$ est représenté par une matrice d'Hadamard. C'est le secret du choix des expériences à conserver: on s'arrange pour que les matrices soient toujours des matrices d'Hadamard, ce qui correspond à une répartition bien particulière des points expérimentaux dans l'espace expérimental.

Tableau 2.4: N de l'essai4

	1	2	3	4=123
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

❖ Modèle mathématique

Ayant moins de points expérimentaux que ce que nous pouvons utiliser, nous avons également moins d'équations. Le nombre d'inconnues étant inchangé, on pourrait penser qu'il n'y a pas de solution. Cependant, on peut échapper à ce dilemme en émettant des hypothèses, la plus courante étant de négliger les inconnues considérées comme les moins significatives. Par exemple, dans le cas de 2^3 , on suppose que les interactions de second et troisième ordres sont négligeables, c'est-à-dire que le modèle utilisé devient.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

✓ Comparaison

Remarquez que le plan factoriel complet contient deux fois plus de points que le plan en fraction. La réponse est mesurée seulement pour quatre des huit points possibles des sommets de la partie factorielle du plan. Dans ce plan, les principaux effets seront toutefois confondus avec les interactions à deux facteurs.

II.5.5. Les plans de Plackett-Burman:

En 1946, R.L. Plackett et J.P. Burman ont publié une étude dans la revue *Biometrika*, où ils ont exposé une méthode permettant de concevoir des plans expérimentaux pour examiner un grand nombre de facteurs en réalisant un nombre réduit d'essais. Leur approche repose sur l'attribution de deux niveaux à chaque facteur, tout en supposant que les interactions entre facteurs sont négligeables par rapport aux effets principaux.

Le plan de Plackett-Burman est basé sur la matrice de Hadamard, qui présente les caractéristiques suivantes :

- Les éléments de la matrice sont soit +1, soit -1.
- Les matrices sont carrées et orthogonales.

Les plans de Plackett et Burman utilisent comme modèle mathématique des polynômes du premier degré sans interaction.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n$$

II.5.6. Les tables de Taguchi:

Les tableaux de Taguchi sont en réalité des plans de Plackett-Burman modifiés, où le +1 est remplacé par 1 et le -1 par 2. Les noms des plans ont également été changés : le plan devient le tableau L8, et le plan devient le tableau L16. Quant au plan de 12 essais, connu sous le nom de tableau L12, il s'agit à l'origine d'un plan de Plackett-Burman. Initialement, ces plans étaient utilisés sans tenir compte des interactions entre les facteurs. Cependant, de nos jours, certains appliquent les principes de l'analyse classique à ces plans.

En ce qui concerne les plans de Box-Behnken, ils sont conçus pour élaborer des modèles de second degré. Tous les facteurs y sont étudiés à trois niveaux : -1, 0 et +1. Ces plans sont appréciés pour leur simplicité d'exécution et leur caractère séquentiel, permettant d'ajouter de nouveaux facteurs sans perdre les résultats des essais précédents. Par exemple, le plan Box-Behnken pour trois facteurs est représenté par un cube, tandis que pour quatre facteurs, il est construit sur un hypercube à quatre dimensions. On place les points

Expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hyper cube, mais au milieu des arêtes ou au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de Répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur Une sphère ou sur une hyper sphère suivant le nombre de dimensions. On ajoute des points au Centre du domaine d'étude.

II.5.7. La méthode des surfaces de réponse :

Les programmes examinés précédemment ne comportaient que deux niveaux de recherche par facteur, et Le modèle mathématique utilisé était du premier ordre (avec ou sans interactions) Rapport à chaque facteur. Ces programmes sont les plus couramment utilisés car ils permettent le dépistage facteurs, conduisant parfois à des modèles simples mais adéquats. Pourtant, cela existe Dans de nombreux cas, une bonne modélisation du phénomène étudié est nécessaire Nous devons nous tourner vers des modèles mathématiques du second ordre. Nous appelons donc à Planification de la surface de réponse. Ces plans utilisent le deuxième modèle polynomial degré. Nous examinerons trois des plus importants de ces programmes : les programmes complets, Le plan Box-Behnken et le plan Doehlert.

Le modèle mathématique supposé utilisé dans la conception de la surface de réponse est
Fonction du second ordre avec interactions du second ordre :

Il y a deux facteurs:

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + e$$

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + e$$

Pour trois facteurs :

Ce type de modèle permet l'estimation d'une surface de réponse pour étudier les effets linéaires, les effets quadratiques et les effets d'interaction.

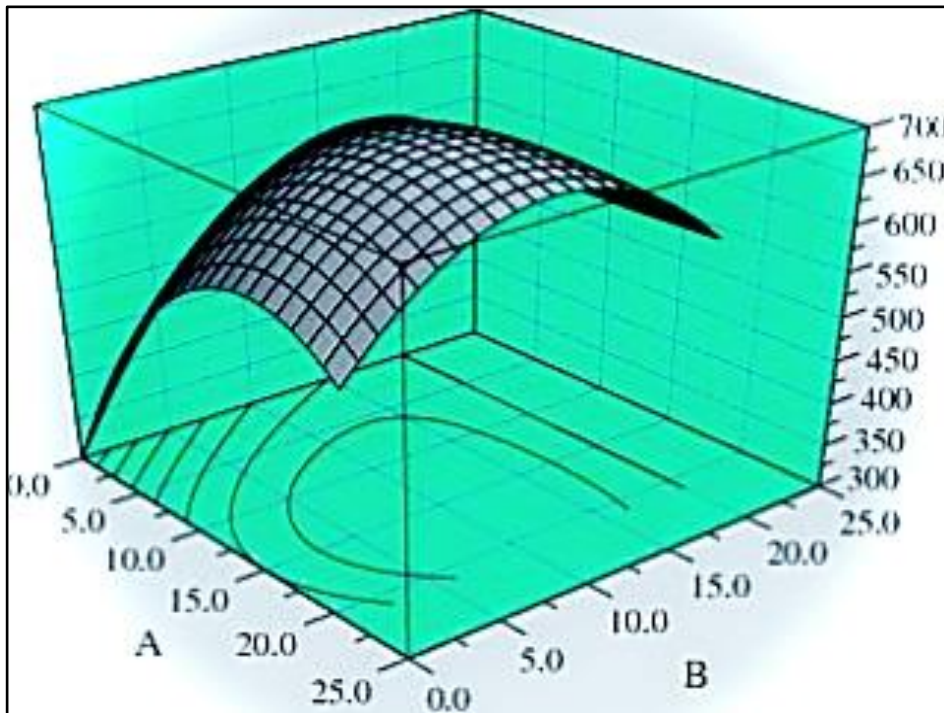


Figure 2.9: Surface de réponse

Il existe plusieurs types de plans du second ordre et les plu employés sont :

- ✓ Les plans composites centrés
- ✓ Les plans de Box-Behnken

II.5.7.1 Les plans composites centrés :

Les plans composites sont utiles pour mener des études successives. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou partiel, complété par des points centraux afin de vérifier la validité du modèle. Si les tests de validation sont concluants (la réponse au centre du domaine est identique à la réponse au même endroit), l'étude est généralement terminée.

En cas d'échec, des tests supplémentaires sont réalisés pour créer un modèle du second ordre. Ces tests supplémentaires sont représentés par des points expérimentaux sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Ces points sur les axes de coordonnées sont appelés points étoiles. Par conséquent, les plans composites comportent trois parties constitutives (Figure 10).

- Le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d'étude.
- Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.
- Les points au centre du domaine d'étude : on prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (n_f), des essais du plan en étoile (n_α) et des essais au centre (n_0). Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation : $n = n_f + n_\alpha + n_0$ [12]

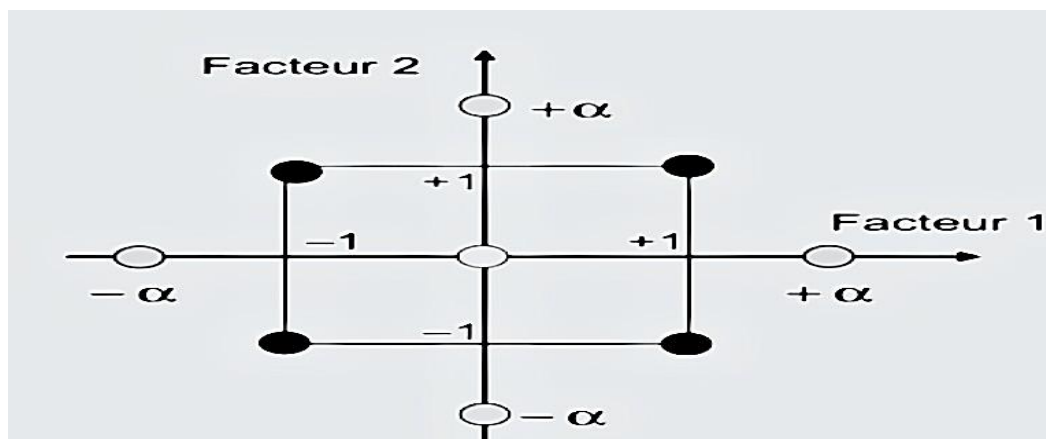


Figure 2.10: Plan composite centré.

II.5.7.2. Les plans de Box-Behnken :

Box et Behnken (1960) ont proposé un type différent de conception expérimentale. Permet l'estimation de modèles du second ordre pour certaines interactions. Étant donné que le plan Box-Behnken comporte moins de points, il coûte moins cher que des plans globaux centrés sur le même nombre de facteurs. La conception Box-Behnken est une conception de

surface de réponse qui n'inclut pas Plan factoriel fractionnaire ou plan factoriel fractionnaire . Une conception Box-Behnken à 3 facteurs implique trois blocs, avec une conception Factorielle 2^2 Est représenté par chaque paire de traitement, tandis que le troisième facteur Fixé à 0. Par conséquent, une conception Box-Behnken à 3 facteurs comporte 15 exécutions (12 étapes et 3 Point central – Figure11) . [14]

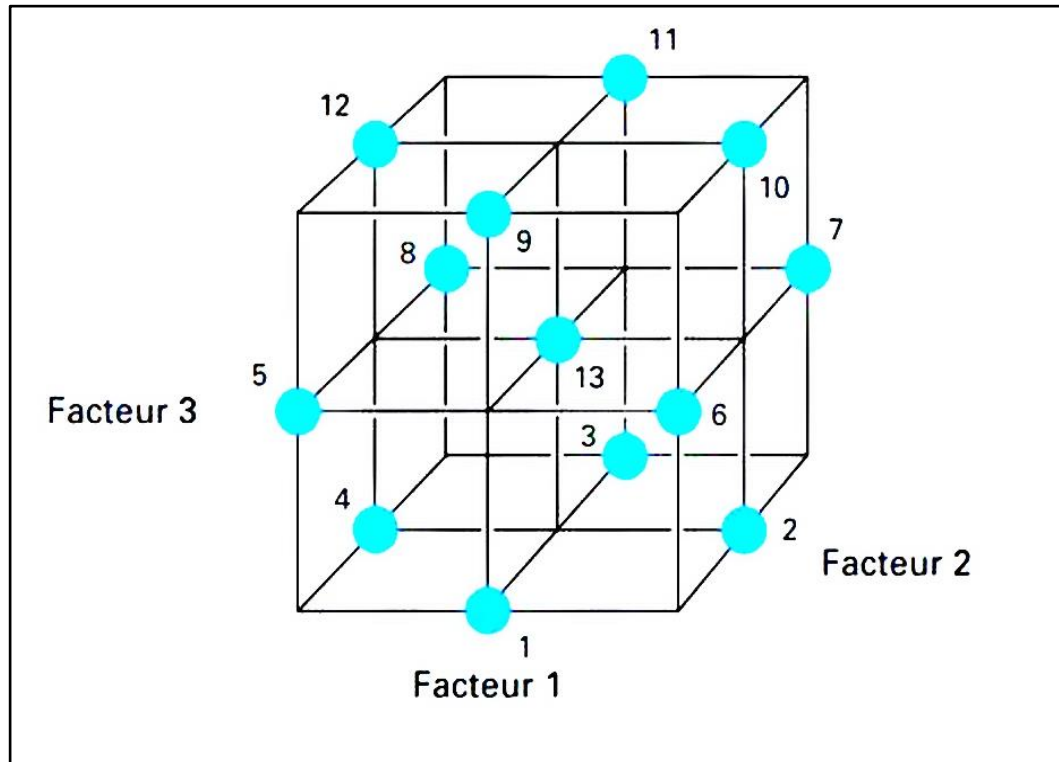


Figure 2.11: Plan de Box-Behnken pour trois facteurs

a). Propriétés des plans de Box-Behnken

Les plans de Box-Behnken possèdent les propriétés suivantes :

- ✚ Ils nécessitent 3 niveaux pour chacun des facteurs ; -1, 0 et +1 pour assurer la condition d'orthogonalité.
- ✚ Ils possèdent la propriété de séquentialité
- ✚ Les erreurs de prédiction sur les réponses calculées sont plus faibles que les erreurs expérimentales. (KIMOUCHE ,2008). [14]

II.6. Principaux avantages des plans d'expériences[12]

Les principaux avantages de cette approche sont:

- La réduction du nombre d'expériences
- La capacité à étudier de multiples aspects
- La reconnaissance des interactions entre les composants
- La modélisation des réponses observées
- La précision optimale est obtenue lorsque les résultats sont exacts.
- La méthode de conception expérimentale facilite une interprétation rapide et sans ambiguïté en fournissant une description précise du modèle expérimental du système.

II.7. Choix d'une stratégie expérimentale

Dans le cadre d'une expérimentation, deux stratégies expérimentales principales peuvent être envisagées :

a. Le maillage du domaine expérimental

Cette méthode consiste à réaliser des expériences en couvrant l'ensemble du domaine expérimental avec un réseau de points. Chaque point représente une combinaison spécifique des facteurs étudiés. Bien que cette approche soit exhaustive et permette d'obtenir une vision complète des effets des facteurs, elle est coûteuse en temps et en ressources car le nombre d'expériences augmente rapidement avec le nombre de facteurs et leurs niveaux.

b. La méthode du « un facteur à la fois »

Cette méthode est plus simple et moins coûteuse que le maillage. Elle consiste à faire varier un seul facteur tout en maintenant les autres constants. Bien qu'elle soit plus économique, elle présente le risque de manquer les interactions entre les facteurs, ce qui peut conduire à des interprétations erronées.

Pour surmonter les limites de ces deux approches, il est essentiel d'adopter une planification expérimentale structurée permettant d'obtenir des informations fiables tout en réduisant le nombre d'expériences nécessaires.

• Démarche expérimentale

Si un système dont la réponse y est une variable dépendant de p facteurs $X_1 \dots X_p$, l'objectif est d'établir un modèle permettant de prédire la réponse y en fonction des facteurs influents. Le modèle prend la forme suivante :

$$y = f\beta(X_1, X_2, \dots, X_p) + \varepsilon$$

où :

β : représente les paramètres à estimer.

ε : terme d'erreur qui exprime la différence entre la réponse observée et celle prédite.

La démarche expérimentale consiste donc à planifier et à réaliser des expériences permettant d'estimer les paramètres β tout en minimisant l'erreur ε .

β : est un ensemble de paramètres caractérisant la forme de la fonction.

ε : terme d'erreur

L'objectif est d'estimer les paramètres du modèle en minimisant l'erreur ε . La méthodologie expérimentale doit être conçue comme un processus itératif entre le modèle et le plan expérimental. Elle permet de planifier les expériences pertinentes pour ajuster un modèle aux données et le valider.

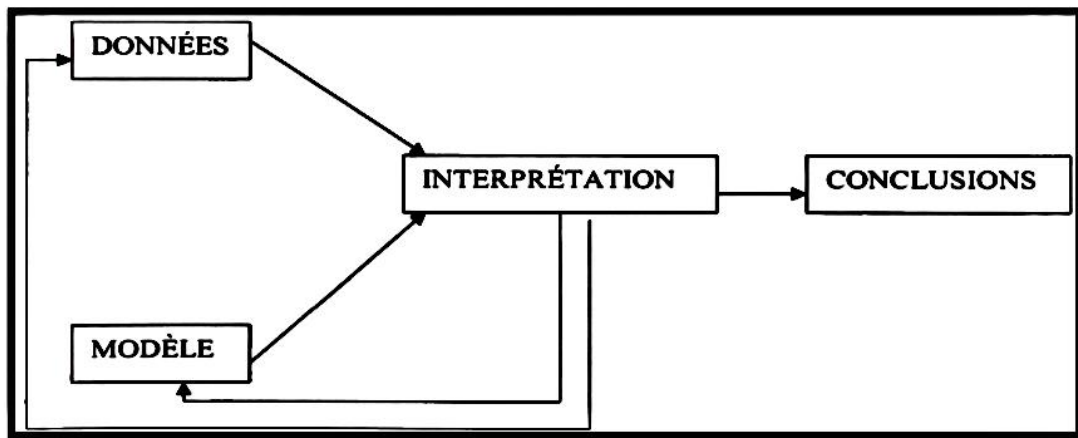


Figure 2.12: Démarche générale de la méthodologie expérimentale.

L'expérimentation implique l'exécution séquentielle d'un plan expérimental, permettant pour estimer au mieux les paramètres du modèle souhaité. Des tests sont effectués à chaque étape. Ajuster le modèle et si l'analyse montre qu'il n'est pas adéquat, nous affinerons ce dernier. Décrivez efficacement les données expérimentales. Modification du modèle d'hypothèses Bien entendu, cela doit s'accompagner de l'élaboration d'un nouveau plan expérimental optimal Pour ce modèle.

- **Les étapes de l'expérimentation :**

Le Tableau 5 présente les différentes étapes à suivre pour mener à bien une Expérimentation.

Tableau 2.5: Étapes de l'expérimentation.

Phases	Etapes
Planification	1. Définir PROBLEME / PROCESSUS – objectifs. 2. Choisir les variables de REPONSE (S) Y à mesure. 3. Choisir les VARIABLES facteurs X et l'espace de variation. 4. Définir & comparer des DESIGNS EXPERIMENTAUX.
Exécution	5. PREPARER l'expérience. 6. CONDUIRE l'expérience
Analyse	7. ANALYSE statistique des résultats. 8. AGIR en fonction des conclusions de l'analyse.

a. Phase de planification:

Cette phase consiste à définir le problème à résoudre avec ses réponses et les facteurs qui Influencent sur ces dernières. L'élaboration d'un design expérimental approprié conduit à L'obtention d'une matrice d'expérience. Cette matrice d'expérience est un ensemble D'expériences supposées homogènes, effectuées consécutivement, don't l'exploitation ne peut Être faite que lorsque la totalité des résultats expérimentaux est obtenue. Elle doit apporter des Réponses aux questions ou aux hypothèses du chercheur et est définie par :

- Le nombre d'expérience à effectuer
- La nature des expériences (niveaux des variables codées)
- L'organisation des expériences dans le temps (par lots ou séquentielles)

b. Phase d'exécution:

Cette phase consiste à mener à bien les différentes expériences indiquées par la matrice d'expérience.

c. Phase d'analyse:

Il s'agit d'une phase d'analyse statistique des résultats consistant à modéliser les réponses et à vérifier la validité des modèles obtenus.

II.8. La méthodologie des surfaces de réponse

II.8.1. Les principes généraux:

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser les procédés. Elle est également largement employée dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'optimisation des produits existants.

L'objectif principal de cette méthode n'est pas seulement de classer l'impact des différents facteurs, mais surtout de décrire avec précision le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.

Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative.

Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présupposé s'avère inadéquat.

Les étapes de la RSM sont les suivantes :

a. Planification expérimentale:

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences Effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les Coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces De réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus Approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème.

Les plans utilisés dans le cadre d'une étude de RSM sont des plans quadratiques tels que les Plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de Box-Behnken. Le plan central Composite (CCD) est le plus souvent employé. Mais d'autres types de plan quadratique S'offrent à l'expérimentateur.

b. Modélisation:

Lorsqu'on utilise la Méthodologie des Surfaces de Réponse (RSM), on cherche à relier une réponse continue à des facteurs continus à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire comme suit :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon$$

Même si la fonction est inconnue, elle peut être approximée par un polynôme. Dans le cas de deux facteurs, le modèle le plus simple est exprimé comme suit :

Si ce modèle est insuffisant pour représenter correctement le phénomène étudié, on utilise alors un modèle du second degré incluant les effets quadratiques, considéré généralement comme adéquat

Où :

X_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ϵ : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la Réponse. Dans la phase d'expérimentation de RSM, il convient de transformer les variables de Conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les Facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des Variables courantes aux variables codées est :

$$X_i = \frac{2R_i - [R_{\max} + R_{\min}]}{[R_{\max} - R_{\min}]}$$

c. Validation des modèles:

Une fois la modélisation effectuée, il est essentiel de valider les modèles à l'aide de certains indicateurs statistiques :

1. Le coefficient de détermination : mesure la qualité d'ajustement du modèle aux données.
2. Le coefficient de détermination ajusté : ajuste en tenant compte du nombre de variables.
3. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) : évalue l'écart moyen entre les valeurs observées et prédites.

❖ Partition de l'erreur totale (SST)

L'erreur totale est divisée en deux composantes :

SSR (erreur systématique) : représente la part expliquée par le modèle.

SSE (erreur accidentelle) : représente la part non expliquée par le modèle.

La relation s'exprime ainsi :

$$SST = SSR + SSE$$

La moyenne des réponses est donnée par :

$$\hat{y} = \frac{\sum y_i}{n}$$

- Le coefficient de détermination:

Il mesure la proportion de la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être expliquée par le modèle.

Sa valeur est comprise entre 0 et 1 :

Indique une correspondance parfaite entre les valeurs prédites et les valeurs réelles .

Signifie que le modèle n'a aucune capacité prédictive.

1. La formule est donnée par :

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

2. Le coefficient de détermination ajusté :

C'est une version améliorée de R^2 qui prend en compte le nombre de paramètres du modèle. Contrairement à R^2 , il n'augmente pas avec l'ajout de variables redondantes. Sa formule est :

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2)$$

d. La RSM pour l'optimisation en ingénierie

Une fois la modélisation terminée, le problème à l'étude doit être optimisé. Plusieurs méthodes d'optimisation peuvent permettre d'optimiser simultanément les différentes réponses découlant de l'emploi de la méthode des surfaces de réponses.

e. Méthode graphique

La première méthode de résolution est l'approche graphique. Pour cela, il suffit de tracer des courbes d'iso réponses pour chaque critère en fonction des variables, puis d'hachurer les zones intéressantes suivant les objectifs retenus. Enfin, par superposition des graphes, on fait apparaître les zones de compromis. Malheureusement, si cette méthode semble très attractive pour des cas simples avec 2 ou 3 variables, elle devient très lourde pour des problèmes plus complexes. Parce que, l'utilisateur doit jongler avec un grand nombre de graphiques pour découvrir le meilleur compromis.

f. Méthodes numériques**- Le quadrillage**

Cette méthode numérique présente le double avantage d'une conception simple et d'une recherche systématique. Pour réaliser cette recherche, il suffit de quadriller la zone expérimentale, et de calculer en chacun des nœuds les valeurs obtenues pour les différentes réponses. On obtient ainsi les différents points présentant des valeurs obtenues pour tous les critères. L'inconvénient majeur vient essentiellement de la difficulté d'obtenir à la fois une grande précision et un temps de calcul raisonnable :

- Un maillage trop fin augmente le temps calcul.
- Un maillage trop large risque de ne pas signaler des zones solutions qui seraient intéressante.[7]

II.9. Conclusion:

L'approche des plans d'expériences permet de structurer méthodiquement le processus expérimental et l'analyse décisionnelle à l'aide d'outils et de tests statistiques appropriés, visant ainsi à obtenir des résultats précis avec un nombre minimal d'expériences.

Ce chapitre a posé les fondements méthodologiques utiles pour la suite du travail. Il a introduit les principes des plans d'expériences, employés pour organiser de manière structurée les campagnes de simulation et analyser l'influence des paramètres sur une réponse cible.

La méthode des surfaces de réponse (RSM) a été présentée comme une approche d'optimisation efficace, capable de modéliser les relations entre plusieurs facteurs et une variable de sortie. Le plan composite centré, brièvement évoqué, servira de cadre expérimental pour les analyses développées ultérieurement.

Les notions traitées dans ce chapitre forment la base indispensable à la mise en place du plan de simulation numérique, à la formulation des modèles de réponse et à l'interprétation des résultats. Elles permettront d'appliquer une démarche rigoureuse d'analyse et d'optimisation adaptée au contexte du renforcement des sols par géogrilles.

CHAPITRE 03
***PRÉSENTATION DES OUTILS DE
MODÉLISATION NUMÉRIQUE***

III.1. Introduction

Avec l'évolution constante de la technologie, les ingénieurs sont confrontés à des défis de plus en plus complexes lors de la réalisation de projets exigeants en termes de précision, de coûts et de conformité aux normes de sécurité. Pour garantir le succès de ces projets, ils s'appuient sur des techniques avancées permettant d'analyser la résistance des matériaux et de comprendre le comportement des systèmes physiques complexes. Parmi ces techniques, la méthode des éléments finis se distingue comme l'une des plus performantes en raison de sa large gamme d'applications. Elle est largement utilisée dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, le nucléaire, le génie civil, la construction navale et la fabrication de machines.

III.2 Aperçu général de la méthode des éléments finis (MEF)[1]

La méthode des éléments finis est une approche moderne et interdisciplinaire basée sur trois domaines clés :

Mécanique des matériaux: implique des concepts tels que l'élasticité, la résistance des matériaux, la dynamique et la plasticité.

Analyse numérique : Elle permet d'approximer des solutions et de résoudre des systèmes d'équations, qu'ils soient linéaires ou non linéaires.

Informatique appliquée : joue un rôle important dans le développement et la gestion des logiciels d'ingénierie

III.2.1 Concepts de base:

La méthode des éléments finis repose sur la division de la structure physique en plusieurs petits éléments interconnectés par des nœuds. Le comportement complexe de la structure réelle est remplacé par un ensemble de comportements simples, facilitant l'analyse des contraintes et des déformations dues aux charges appliquées.

III.2.2 Calculs avec la méthode des éléments finis:

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

❖ Elle nécessite:

- Définissez précisément la géométrie du modèle afin que les limitations du domaine de calcul n'affectent pas les résultats.
- En fonction de la nature du sol et des objectifs de l'étude, choisissez une loi de comportement du sol appropriée, telle que Mohr-Coulomb, Duncan ou Cam-Clay.
- Déterminer les propriétés des éléments structuraux et d'interface pour simuler les interactions sol-structure ainsi que les conditions hydrauliques.
- Précisez les propriétés de l'ancrage ou de la tige : emplacement, longueur et force de précontrainte.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

❖ Elle permet :

- Des calculs d'écoulement sont effectués pour évaluer le comportement hydraulique du sol.
- Différentes phases de construction ont été simulées pour analyser l'évolution des forces et des mouvements.
- Tenez compte des variations dans les propriétés de la structure, des couches de sol et des niveaux de support ou de tirants.

- Calculez le facteur de sécurité pour évaluer la stabilité globale du système.

❖ **Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :**

- Analyser les déplacements subis par les ouvrages au cours du temps.
- Évaluer les sollicitations internes auxquelles les structures sont soumises.
- Déterminer les efforts transmis aux boutons ou aux tirants d'ancrage.

❖ **Et pour le sol :**

- Suivre les mouvements du sol au fil du temps et tout au long des phases de travaux.
- Analyser la déformation subie par le sol en fonction des conditions de chargement.
- Évaluer les contraintes totales et effectives dans différentes couches du sol.
- La pression interstitielle est mesurée pour comprendre le comportement des pores des sols.
- Calculez le facteur de sécurité pour évaluer la stabilité globale de la structure.

III.3 Présentation de PLAXIS

Différents modèles d'éléments finis peuvent être utilisés pour analyser l'ingénierie géotechnique. Les ingénieurs expérimentés dans ce domaine savent que le poids des hypothèses qui facilitent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Ils comprennent également que la terminologie des éléments finis n'est pas toujours mise en œuvre – elle ne doit pas interférer avec la numérotation des nœuds, ni avec certains éléments utilisés pour les enregistreurs numériques. L'ingénieur doit installer des codes numériques sur l'ordinateur pour gérer ses tâches de bureau et ses techniques quotidiennes d'études paramétriques de problèmes microscopiques. Plus important encore, il doit disposer d'outils qui réduisent la saisie fastidieuse des données et l'interprétation des documents.

III.3.1 Le code des éléments finis PLAXIS :

Le code d'éléments finis PLAXIS représente désormais une solution moderne et efficace pour l'ingénierie géotechnique numérique. Il s'appuie sur une base scientifique solide et permet une analyse mécanique non linéaire en pseudo-3D, intégrant des paramètres variables ainsi que des pressions interstitielles basées sur les principes de la mécanique des sols. Grâce à des méthodes avancées, des algorithmes puissants et des procédures de sélection automatique, PLAXIS peut être facilement utilisé même par des opérateurs inexpérimentés, évitant ainsi des sélections complexes. Le logiciel est connu pour ses méthodes numériques fiables, utilisant des éléments finis de haute précision (triangles à 10 nœuds) et des méthodes analytiques modernes (appelées longueur d'arc). Son ergonomie repose sur un système de menu intuitif en forme d'arborescence qui limite la surcharge cognitive et rend le manuel d'instructions (désormais concis) presque redondant.

De plus, des options par défaut intelligemment configurées (notamment les conditions aux limites) permettent une saisie rapide et efficace des données, tandis que des procédures simplifiées (initialisation des contraintes et des pressions interstitielles) permettent un accès direct aux résultats tout en conservant la possibilité d'améliorer ultérieurement les calculs sans modifier l'environnement de travail. L'utilisation de PLAXIS s'articule autour de quatre modules principaux :

Entrée : utilisée pour créer et modifier des modèles géométriques, générer des maillages et définir les conditions initiales ;

❖ Le programme d'entrée de données (Input):

Le programme offre toutes les fonctionnalités nécessaires pour créer et modifier un modèle géométrique, générer le maillage en éléments finis adapté, ainsi que définir les conditions initiales du calcul.

❖ Le programme de calcul (Calculations)

Le programme rassemble tous les outils dont vous avez besoin pour préparer et démarrer des calculs en utilisant la méthode des éléments finis. Au démarrage, l'utilisateur.

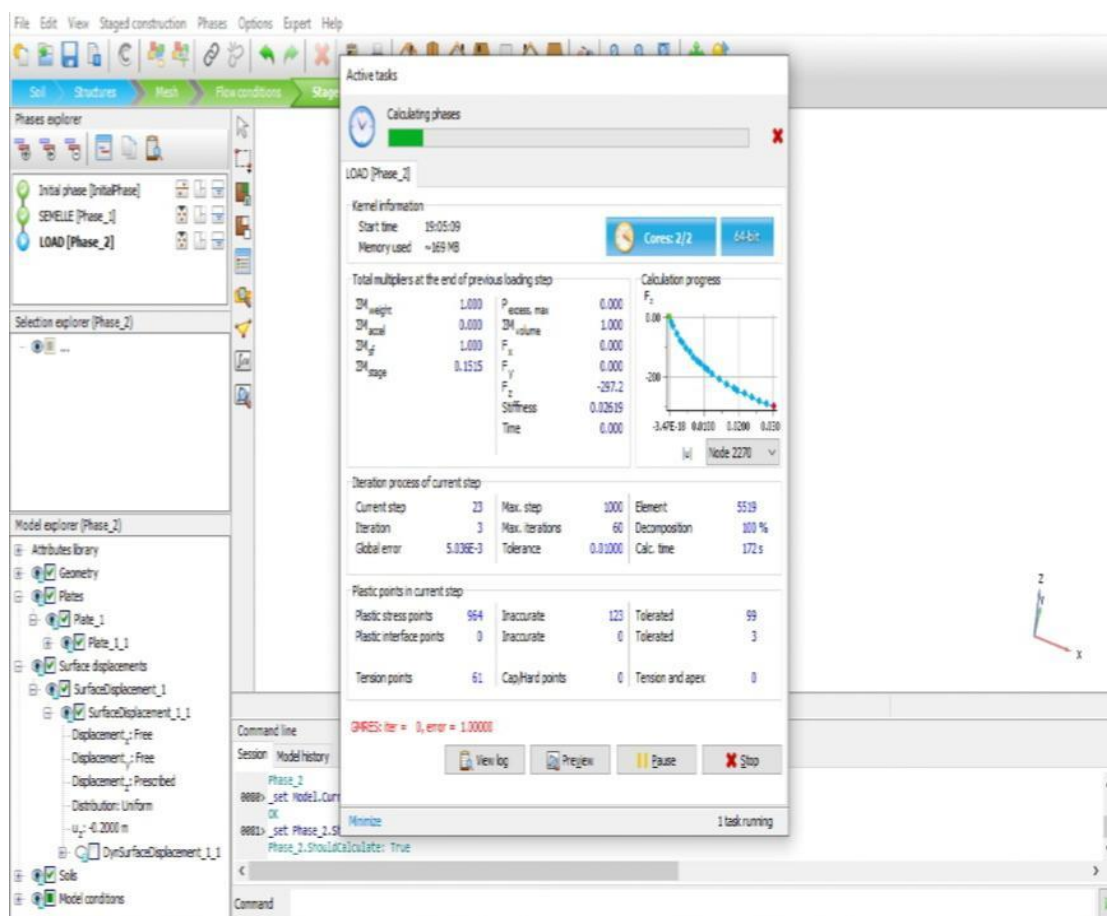


Figure 3.1 : Vue de tous les panneaux de la fenêtre Phases.

doit sélectionner le projet concerné pour commencer la configuration du calcul.

❖ **Le programme de résultats (Output) :**

- Le programme fournit tous les outils dont vous avez besoin pour visualiser les données et les résultats des calculs par éléments finis. Au démarrage, l'utilisateur doit sélectionner le modèle et la phase de calcul ou le numéro d'étape correspondant afin d'afficher les résultats souhaités.

❖ **Le programme courbe (Curves) :**

- Ce programme fournit tous les outils nécessaires pour générer des courbes charge-déplacement, des trajectoires de contraintes ainsi que des courbes contrainte-déformation.

III.3.2 Options par défaut et solutions approchées :

Les options par défaut et le système de solutions approximatives de PLAXIS sont l'un des outils pionniers de l'ingénierie géotechnique. Conçu pour optimiser le temps utilisateur, réduire les tâches répétitives et améliorer la convivialité globale du logiciel, il s'intègre parfaitement dans une structure de menu arborescente où chaque branche correspond à une tâche spécifique tout en offrant une grande flexibilité d'utilisation. L'application des options par défaut commence dès la phase de maillage :

L'utilisateur peut, selon ses besoins, générer un maillage très précis ou laisser PLAXIS créer automatiquement un maillage optimal en se basant sur un nombre limité de nœuds clés, tout en offrant un contrôle visuel en temps réel. Ce procédé est constamment perfectionné pour améliorer son efficacité.

Concernant les conditions aux limites :

Lorsque celles-ci sont complexes, une définition rigoureuse par l'utilisateur est requise pour garantir la fiabilité de la modélisation. En revanche, pour des cas standards — déplacement vertical nul à la base et déplacement horizontal nul sur les côtés —, le logiciel propose une application automatique via une simple commande du menu, avec une vérification immédiate à l'écran.

En ce qui concerne l'application des contraintes initiales dues au poids propre du sol, PLAXIS permet une modélisation précise grâce à l'activation d'un facteur multiplicatif spécifique. Toutefois, en géotechnique, il est courant de définir directement l'état de contrainte initial. Cette option, bien qu'elle puisse engendrer un léger déséquilibre, est compensée par un rééquilibrage automatique, suivi d'une remise à zéro du champ de déplacement, considérant ainsi l'état après gravité comme la nouvelle référence. L'approche est

particulièrement adaptée aux structures telles que les parois moulées dans des terrains meubles.

Pour la prise en compte de la pression interstitielle, PLAXIS impose une rigueur particulière :

Il est possible de simuler des états d'écoulement permanents ou transitoires à travers des modules spécialisés, bien que cela puisse entraîner des temps de calcul importants. Lorsque la nappe phréatique est proche de la surface, une approche simplifiée, basée sur une pression hydrostatique, est proposée afin d'accélérer les calculs sans compromettre la précision.

En matière d'analyse non linéaire, PLAXIS offre une flexibilité remarquable :

L'utilisateur peut définir manuellement des paramètres tels que la taille des incréments de charge, le nombre d'étapes de calcul, la rigidité des interfaces et la méthode de résolution. Toutefois, pour simplifier l'utilisation, le logiciel peut aussi ajuster automatiquement ces paramètres en s'appuyant sur des critères numériques éprouvés.

Pour les calculs de consolidation, qui s'effectuent selon la méthode des différences finies explicites en fonction du temps, l'utilisateur peut choisir de définir lui-même le pas de temps ou de laisser PLAXIS l'ajuster automatiquement selon des critères de stabilité numérique établis.

Le facteur de sécurité est un paramètre clé en ingénierie géotechnique, bien qu'il rassemble de nombreuses données en un seul indicateur. PLAXIS utilise une approche similaire à la méthode classique de l'équilibre limite en réduisant progressivement la résistance des matériaux pour évaluer la stabilité. Toutefois, l'identification de la rupture reste qualitative, dépendant du jugement de l'utilisateur, qui s'appuie principalement sur le suivi des déplacements d'un point de contrôle spécifique, générant ainsi un champ de déplacement fictif pour analyser la stabilité globale.

Enfin, le processus de calcul dans PLAXIS génère une quantité importante de résultats, allant des déplacements et contraintes exploitables directement pour la conception, aux résultats plus mathématiques destinés à analyser l'évolution du comportement global du système sous charge.

Grâce à une navigation intuitive via le menu arborescent, l'utilisateur peut sélectionner précisément les informations souhaitées, en fonction de ses besoins d'analyse.

III.3.3. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS:[15]

Il existe aujourd'hui une grande variété de modèles de comportement des sols, allant du modèle élastoplastique classique de Mohr-Coulomb aux lois de comportement de pointe capables de reproduire en détail la réponse élastoplastique-viscoplastique des sols sous

contraintes monotones ou cycliques. Développés pour les calculs par éléments finis, ces modèles prennent en compte la réalité physique des sols en adoptant des lois de comportement appropriées, permettant ainsi la résolution de problèmes aux limites. Cependant, deux difficultés majeures ont empêché l'adoption généralisée de cette approche :

La première difficulté concerne la complexité des lois comportementales elles-mêmes, qui nécessitent des études expérimentales intensives pour déterminer précisément leurs paramètres. Ces recherches dépassent souvent le cadre des projets d'ingénierie, y compris les plus ambitieux. De plus, dans les années 1980, plusieurs ateliers de recherche ont été organisés pour comparer les performances de différents modèles sous différents scénarios de stress afin d'évaluer leur pertinence et leur applicabilité.

Une deuxième difficulté réside dans l'intégration pratique de ces lois complexes dans des codes de calcul par éléments finis bidimensionnels ou tridimensionnels. Aujourd'hui, peu de logiciels peuvent fonctionner efficacement selon des lois avancées, notamment parce qu'elles impliquent des coûts de calcul élevés. Cependant, deux difficultés majeures ont empêché cette approche d'être largement adoptée.

La première difficulté concerne la complexité de la loi de comportement elle-même, la détermination précise de ses paramètres nécessitera des recherches expérimentales intensives. Ces recherches dépassent souvent le cadre des projets d'ingénierie, même les plus ambitieux. En outre, plusieurs ateliers de recherche ont été organisés dans les années 1980 pour comparer les performances de différents modèles dans divers scénarios de stress et pour évaluer leur pertinence et leur applicabilité.

La deuxième difficulté réside dans l'intégration pratique de ces lois complexes dans des codes de calcul par éléments finis bidimensionnels ou tridimensionnels. Aujourd'hui, il existe très peu de logiciels capables de suivre des lois sophistiquées et de s'exécuter efficacement. Notamment en raison de son coût de calcul élevé. En fin de compte, la modélisation numérique n'apporte pas de nouvelles vérités mais reformule simplement les données de la question posée sous une autre forme. Il reste un outil d'analyse pour les ingénieurs, et son utilisation nécessite perspicacité et expertise.

III.3.3.1. Elastoplasticité:

Un comportement élastique linéaire isotrope ne constitue qu'une première approximation, car il ne permet pas de prendre en compte les déformations irréversibles. En réalité, la majorité des matériaux présentent un comportement élastoplastique. Cela signifie qu'ils subissent à la fois des déformations élastiques — réversibles — et des déformations plastiques — permanentes. Ainsi, la déformation totale d'un matériau est composée de deux

parties : la déformation élastique (ϵ^e) et la déformation plastique (ϵ^p). Cette relation se traduit par l'équation suivante :

III.3.3.2 Comportement élastoplastique:

Le comportement élastoplastique peut être illustré à l'aide d'un modèle unidimensionnel simple. Ce modèle associe en série un ressort, caractérisé par une raideur K , pour représenter la partie élastique du matériau, à un patin de seuil S_0 (voir figure ci-dessous). La courbe effort déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée figure 3.2

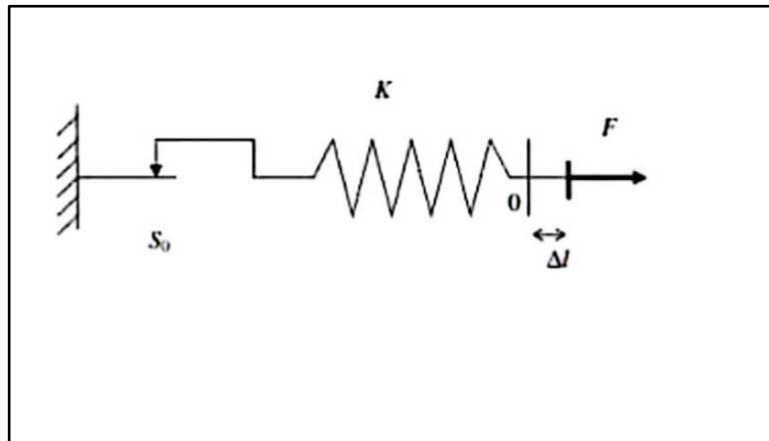


Figure 3.2 : Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique

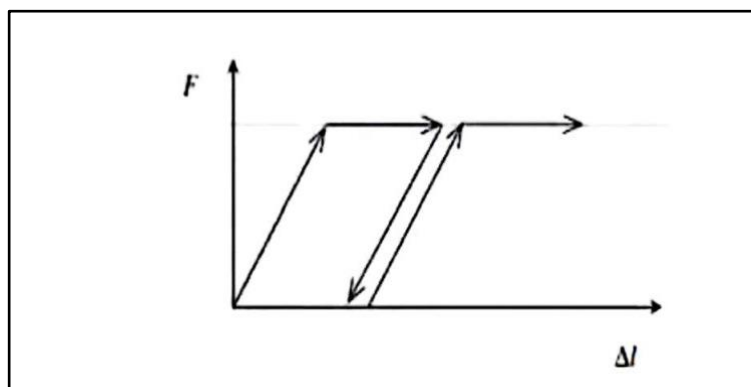


Figure 3.3 : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée.

Le type de comportement représenté par les figures 3.2 et 3.3 est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. La figure 3.4 représente un comportement élastique plastique avec écrouissage .

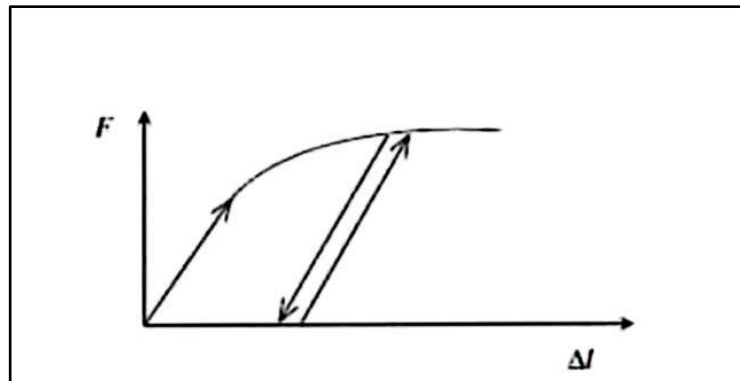


Figure 3.4 : Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage

III.3.3.3 Modèle de Mohr-Coulomb:

Le modèle de Mohr-Coulomb suppose que le matériau se déforme de manière élastique, puis plastiquement sans durcissement. Sur le plan de Mohr, ce comportement est représenté par une droite appelée droite intrinsèque par:

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

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (voir figure 3.5) .

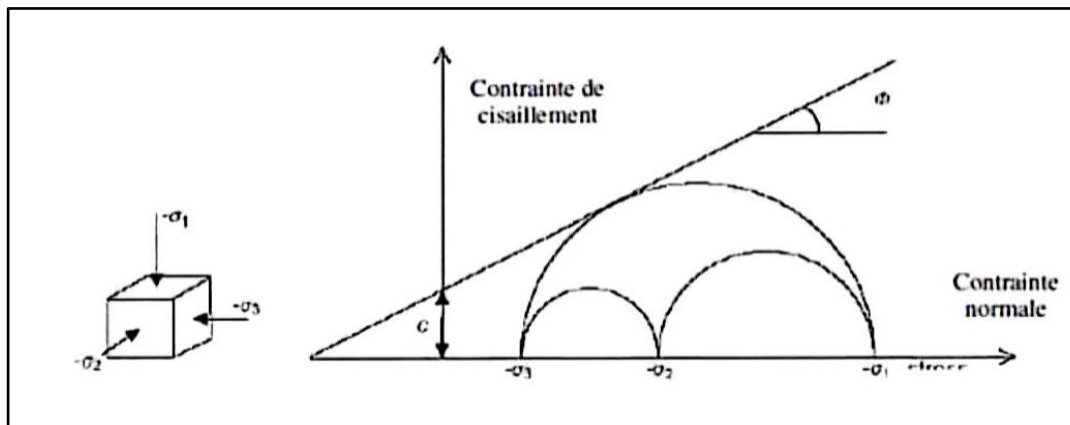


Figure 3.5 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire N n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (voir figure 3.6) sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb.

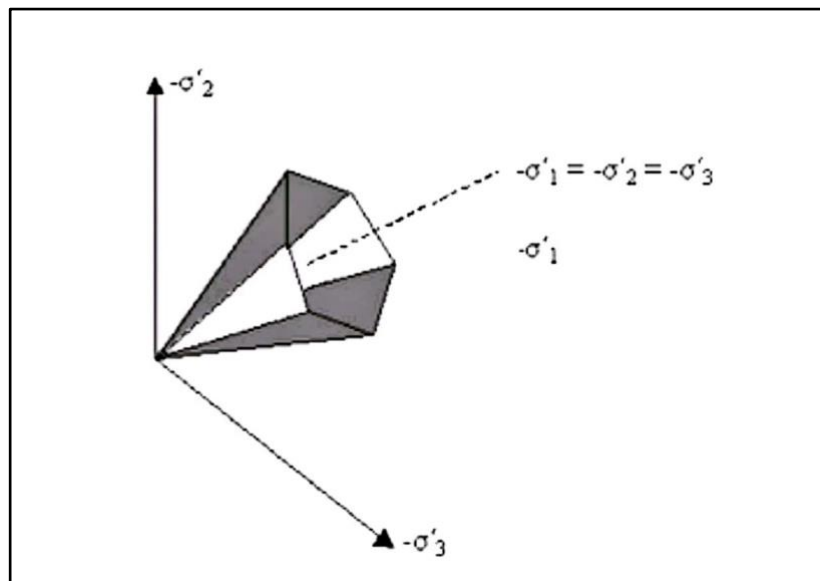


Figure 3.6 : Représentation du critère de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes

III.3.3.4. Paramètres avancés :

Les paramètres avancés de Mohr – Coulomb concernent l'augmentation de la rigidité et de la cohésion avec la profondeur, ainsi que la suppression des tractions.

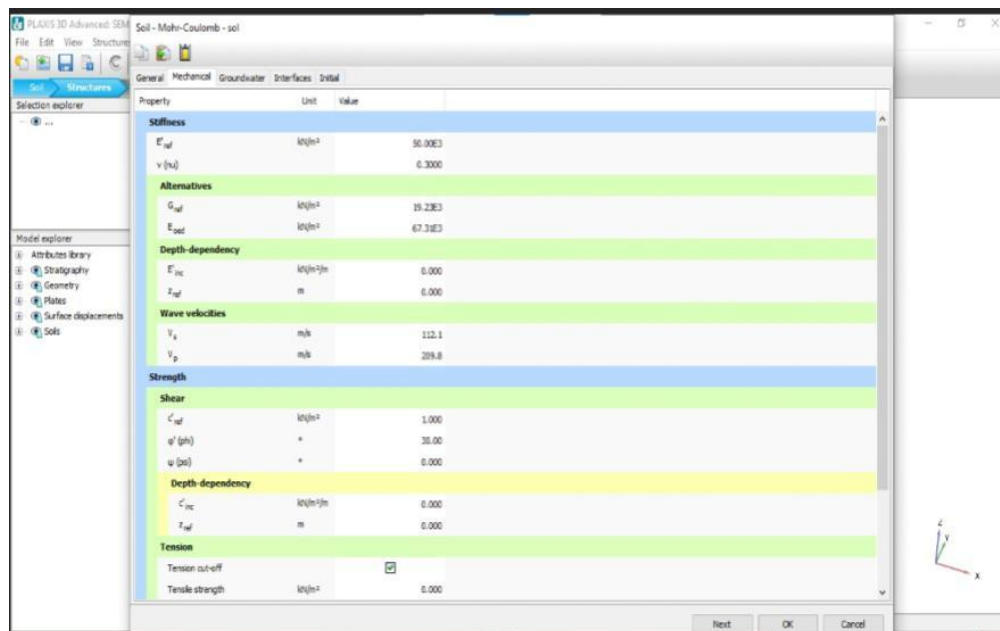


Figure 3.7: fenêtre des paramètres avancés du Mohr-Coulomb.

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres (figure 3.8)

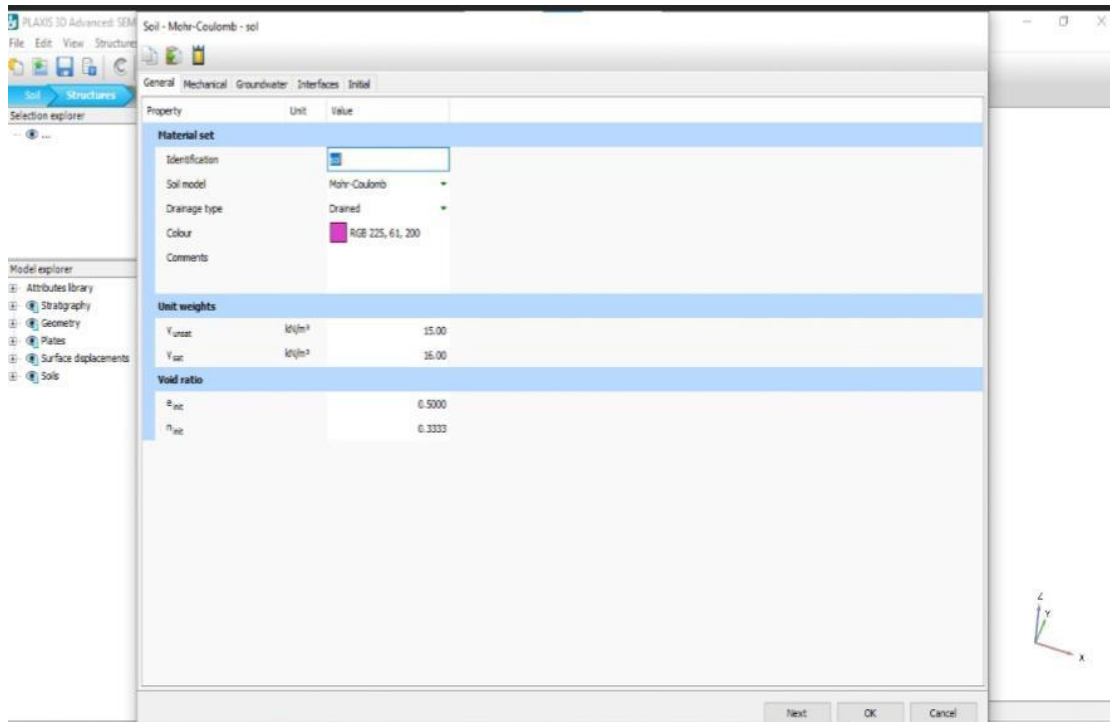


Figure 3.8 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

a) Module d'Young :

Plaxis utilise le module d'Young comme de Dans Plaxis, le module de Young est utilisé comme module de déformation de référence, à la fois dans le modèle élastique et dans le modèle de Mohr-Coulomb. Cependant, d'autres modules de déformation sont également envisagés. Ces modules ont les mêmes dimensions que les contraintes (force par unité de surface) et doivent être choisis avec soin. En fait, la plupart des géomatériaux présentent un comportement non linéaire dès le début du chargement. En mécanique des sols, la pente initiale de la courbe contrainte-déformation est appelée , tandis que le module sécant mesuré à 50 % de résistance à la compression est . Il convient à une utilisation sur des argiles fortement consolidées et certaines roches à large plage élastique. En revanche, pour les sables et argiles normalement consolidés, il est plus judicieux d'utiliser.

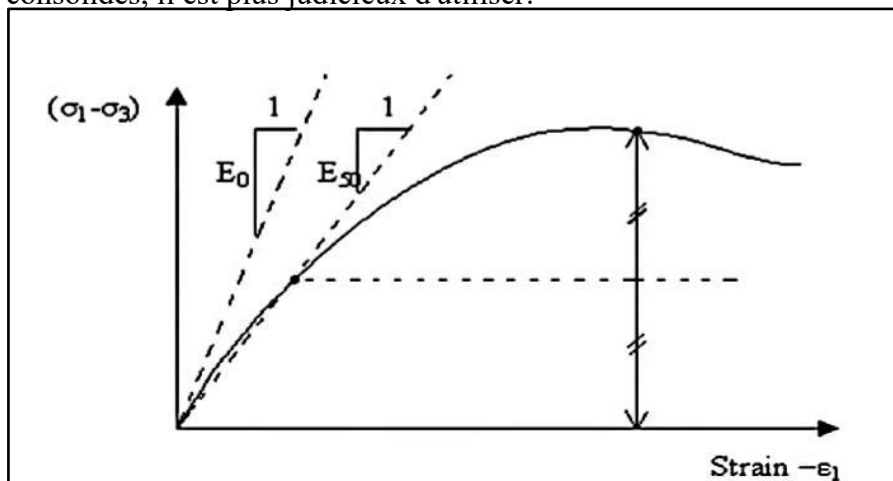


Figure 3.9 : Définition du module à 50 % de la rupture

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

b) Coefficient de Poisson :

Des valeurs du coefficient de Poisson comprises entre 0,2 et 0,4 sont généralement recommandées et conviennent à la modélisation du poids propre, notamment dans les analyses de type K ou de chargement gravitaire. Toutefois, dans certains cas, comme dans les décharges, des valeurs inférieures peuvent être utilisées. Pour les sols légèrement compressibles, le coefficient tend vers 0,5, bien que cette valeur ne puisse pas être utilisée dans les calculs pratiques.[1] [16]

c) Angle de frottement :

L'angle de frottement est exprimé en degrés. Lorsqu'elle est élevée - comme c'est parfois le cas avec du sable très dense - elle complique grandement les calculs de plasticité au niveau numérique. C'est pourquoi il est préférable d'éviter les angles supérieurs à 35° lors des recherches préliminaires sur un projet. Cet angle peut être déterminé à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

d) Cohésion :

PLAXIS est capable de modéliser des sables sans cohésion ($c = 0$), mais cela peut entraîner des difficultés avec certaines fonctions du logiciel. Pour éviter ces problèmes, il est recommandé aux utilisateurs débutants d'entrer une valeur minimale de cohésion, par exemple supérieure à 0,02 kPa. Par ailleurs, PLAXIS permet de faire varier la cohésion non drainée en fonction de la profondeur, ce qui peut améliorer la précision du modèle.

e) Angle de dilatance :

L'extensibilité, notée ψ , est exprimée en degrés. Il s'agit d'un paramètre moins courant, mais qui peut être estimé approximativement à l'aide de la règle suivante :

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

$$\text{Si } \varphi < 30^\circ, \text{ alors } \psi = 0^\circ.$$

Lorsque ψ est inférieur à 0°, cela indique généralement que le sable est très meuble et est généralement associé au risque de liquéfaction métastable ou statique. La valeur de $\psi = 0^\circ$ correspond à un comportement complètement plastique-élastique sans expansion lors de l'entrée en plasticité. Cette condition est typique des argiles ou des sables de faible à moyenne densité soumis à des contraintes élevées.

III.3.3.5 Autres modèles disponibles dans le Plaxis:

PLAXIS propose également des modèles de sol plus avancés pour mieux représenter le comportement réel des géomatériaux. Parmi eux, on trouve le modèle Hardening Soil (HSM), conçu pour améliorer les limites du modèle de Mohr-Coulomb. Ce modèle permet notamment de prendre en compte l'évolution du module de déformation avec l'augmentation des contraintes, la non-linéarité du module de cisaillement, la distinction entre chargement et déchargement, ainsi qu'une représentation plus réaliste de la dilatance, qui n'est pas illimitée. Un autre modèle proposé est le Soft Soil Model (SSM), inspiré du modèle Cam-Clay, développé dans les années 60 à Cambridge par Roscoe et Schofield. Ce modèle vise à représenter l'effet d'écrouissage causé par la pression moyenne dans les argiles : sous cette pression, l'eau contenue dans le sol diminue, rendant l'argile plus résistante. Le SSM repose sur une approche élastoplastique avec une surface de charge, définissant la frontière entre le comportement élastique et plastique.

Enfin, le Soft Soil Creep Model (SSCM) permet d'aller plus loin en intégrant l'effet du temps sur les argiles molles, notamment à travers la consolidation secondaire. Celle-ci se manifeste par une déformation continue même après la fin de la consolidation primaire, évoluant généralement en fonction du logarithme du temps. Ce phénomène est quantifié par le paramètre ψ , et permet de représenter la quasi préconsolidation observée dans les sols déposés depuis longtemps.[15]

.III.4. Conclusion

L'objectif de la modélisation géotechnique, dans son sens le plus large, est de répondre à des problématiques complexes et spécifiques. La modélisation numérique, outil puissant en constante évolution depuis les années 1950, est aujourd'hui présente dans tous les domaines, sans exception.

En géotechnique, les méthodes numériques permettent de décrire, d'expliquer ou de prévoir le comportement de structures naturelles ou artificielles, en s'appuyant sur des lois physiques reliant les variations de contraintes aux déformations et aux déplacements.

C'est dans ce cadre que le logiciel PLAXIS se distingue, en offrant la possibilité de simuler de manière réaliste le comportement du sol et de prédire, par exemple, la rupture des fondations, grâce à des lois de comportement avancées.

Le choix du modèle de comportement dépend directement de la nature du problème géotechnique étudié : soutènement, tassement d'un remblai, fondation sur pente, creusement

de tunnel, etc. La question du modèle à adopter pour chaque situation n'a pas de réponse unique, car aucun modèle n'est universel.

Il existe ainsi plusieurs modèles de comportement des sols, plus ou moins complexes, selon la précision souhaitée et la nature des phénomènes à simuler. Ces modèles requièrent un nombre variable de paramètres, dont l'identification peut s'avérer plus ou moins difficile et essentielle. Plus un modèle est sophistiqué, plus il exige des données précises pour une simulation fiable.

CHAPITRE 04

***MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET
OPTIMISATION DES PARAMÈTRES***

IV.1 Introduction

Ce chapitre traite de l'optimisation des paramètres influençant l'amélioration de la capacité portante des sols renforcés par géogrilles, en combinant des simulations par éléments finis et une modélisation par la méthode des surfaces de réponse (RSM). L'étude se structure en deux parties principales :

Dans la première partie, nous développons un modèle numérique de référence sous Plaxis3D pour une fondation carrée reposant sur un sol frottant, dans les configurations renforcée et non renforcée par géogrilles.

La seconde partie présente et valide notre méthode d'optimisation des paramètres clés influençant sur la portance du sol renforcé, à savoir : la largeur de la semelle B , la longueur de géogrilles L (le rapport entre la longueur de géogrilles et la largeur de la semelle L/B), la rigidité axiale de géogrilles EA , l'espacement entre la 1ère nappe et la base de la semelle e (e/B), l'espacement entre les nappes géogrilles h (h/B), l'angle de frottement du sol φ , la cohésion du sol C , et le nombre de géogrilles N .

L'optimisation s'appuie sur les résultats de capacité portante (q_l) obtenus numériquement, permettant d'identifier les combinaisons paramétriques optimales. [17]

IV.2 . Présentation du modèle de référence

IV.2.1 Géométrie:

Pour le cas de référence on a considéré une semelle carrée a un côté $b = 2 \text{ m}$ et a une épaisseur $0,5\text{m}$ repose sur une couche de sol sableux. Du fait de la symétrie du problème, seule un quart du modèle est pris en considération ($1\text{m} \times 1\text{m}$) Le modèle (un quart du modèle) a une hauteur $H = 20\text{m}$ ($H = 10b$), une longueur $L = 10\text{m}$ ($L = 10b$) et a une largeur de $B = 10\text{m}$ ($B = 10b$). Le fond et les limites latérales du modèle ont été placés loin de la zone de fondation. Comme le montre la figure IV.1

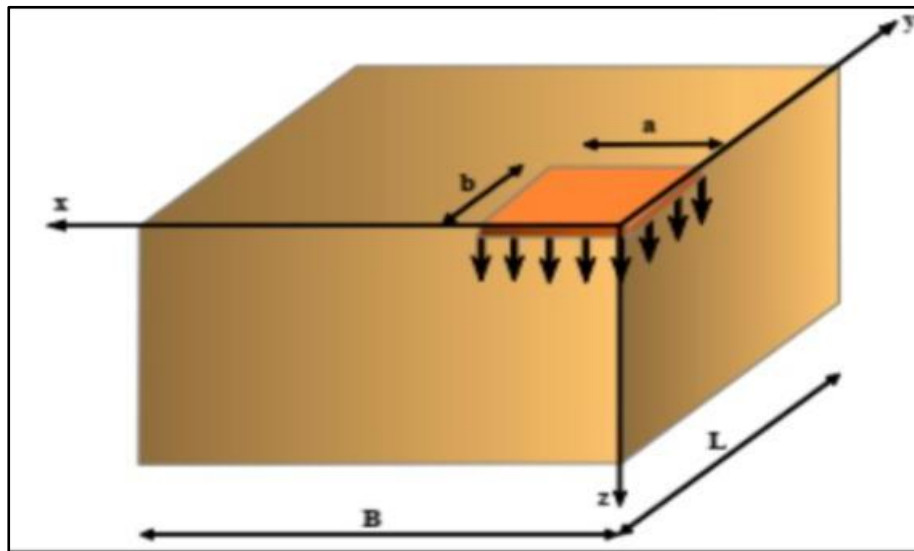


Figure 4.1: Présentation du cas étudié

IV.2.2 Caractéristiques de sol de fondation et la semelle:

Le comportement du sol est représenté à l'aide d'un modèle élastique parfaitement plastique, fondé sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb. Ce modèle suppose que le sol réagit de manière élastique sous de faibles sollicitations, puis développe un comportement plastique irréversible dès que la contrainte dépasse un certain seuil.

Les paramètres géotechniques adoptés pour le sol correspondent à ceux d'un sable. Ces caractéristiques ont été déterminées en se basant sur les classifications des sols proposées par Bowles (1997).

Les caractéristiques des éléments utilisés dans notre modèle sont présentées dans le tableau.

Tableau 4.1: Caractéristiques de sol de fondation et de la semelle

Élément	Sol de fondation (solcohésive)	Semelle (Plates)
Modèle de comportement	Mohr coulomb	Élastique Linéaire
Type	Drained	Non-porous
Epaisseur (m)		0.5
Angle de frottement (degrés)	30	
Cohésion, c (kPa)	1	
Angle de dilatance, Ψ(degrés)	0	
Poids spécifique γ (kN/m³)	15.1	24
Poids spécifique saturé (kN/m³)	16.1	
Module de rigidité E (kPa)	50000	23500000
Coefficient de Poisson ν	0.3	0.2

IV.2.3. Processus de simulation numérique

Dans ce travail, nous étudions une semelle superficielle isolée de forme carrée de côté, reposant directement sur un sol sableux. Cette semelle est soumise à un déplacement vertical imposé correspondant à $0.1B$ (10% de la largeur de la semelle).

La simulation numérique est réalisée à l'aide du logiciel PLAXIS 3D en suivant une démarche claire et structurée. Le processus commence par la définition du modèle géométrique, où la semelle et le sol environnant sont modélisés avec précision. Ensuite, les propriétés mécaniques des matériaux sont attribuées en fonction des caractéristiques du sol et de la fondation.

Une fois le modèle défini, un maillage adapté est généré pour assurer une bonne qualité de la simulation. Par la suite, les conditions aux limites ainsi que les charges appliquées, notamment le déplacement imposé, sont intégrées au modèle. Finalement, l'analyse numérique est lancée pour évaluer la réponse du système aux sollicitations.

Chaque étape est essentielle pour obtenir des résultats fiables et représentatifs, permettant ainsi une meilleure compréhension du comportement de la fondation sous l'effet du déplacement imposé.

- Génération du maillage ;
- Frontières et conditions initiales ;
- Chargement et séquence de modélisation ;
- Interprétation des résultats.

Dans cette simulation, la fondation est modélisée par une semelle rigide. Le chargement est donc appliqué sous la forme d'un déplacement vertical imposé au niveau de la zone de contact entre la semelle et le sol.

Un tassement vertical de 0,2 mètre, correspondant à environ $0,1B$, est prescrit pour représenter l'enfoncement progressif de la fondation.

Au fur et à mesure de ce déplacement, la charge transmise au sol est déterminée en calculant la résultante des forces nodales verticales exercées sur l'ensemble des nœuds situés sous la semelle.

Cette méthode permet d'établir la relation entre le déplacement imposé et la charge correspondante, ce qui est fondamental pour analyser la capacité portante de la fondation reposant sur un sol sableux.

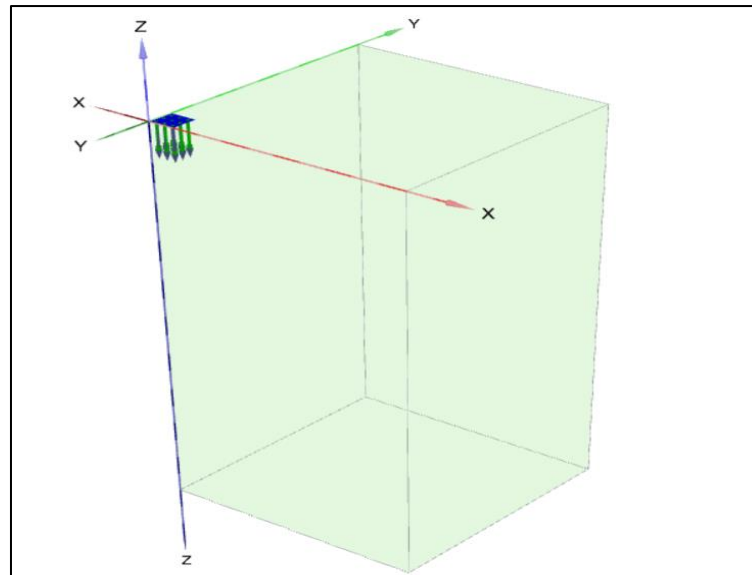


Figure 4.2: Modèle numérique de référence

IV.2.4. Maillage et conditions aux limites:

La construction du modèle 3D repose sur un compromis entre une représentation aussi fidèle que possible de la géométrie, des résultats fiables et des temps de calcul raisonnables.

Pour la discrétisation, des éléments finis tétraédriques à 10 nœuds ont été utilisés. Le maillage complet comprend 5519 éléments tétraédriques et 9200 nœuds.

Les conditions aux limites ont été définies de la manière suivante : les déplacements horizontaux sont bloqués sur les faces verticales, tandis que les déplacements, aussi bien horizontaux que verticaux, sont totalement empêchés à la base du modèle.

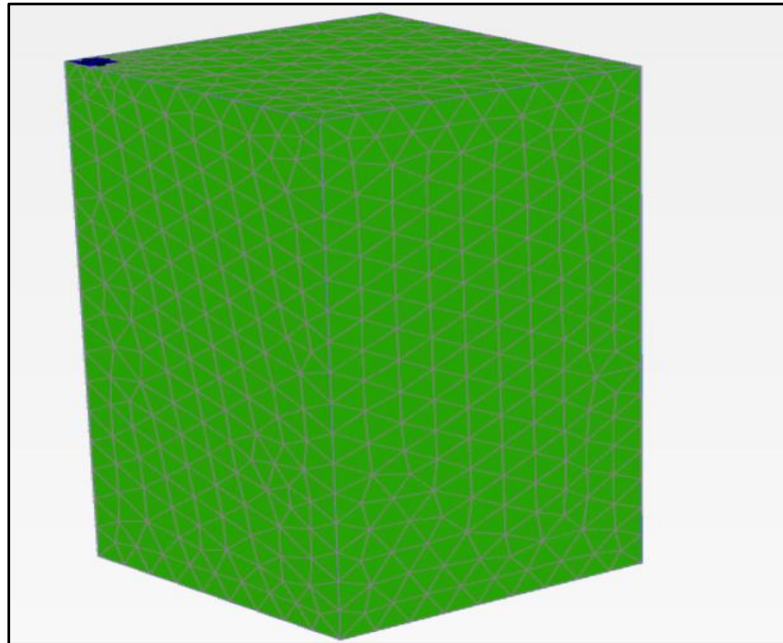


Figure 4.3: Génération du maillage

IV.2.5. Présentation des résultats :**IV.2.5.1. Déformation :**

Les figures IV.4 et IV.5 montrent Maillage déformé et Déplacement vertical du sol respectivement pour le cas du modèle de référence sans renforcement.

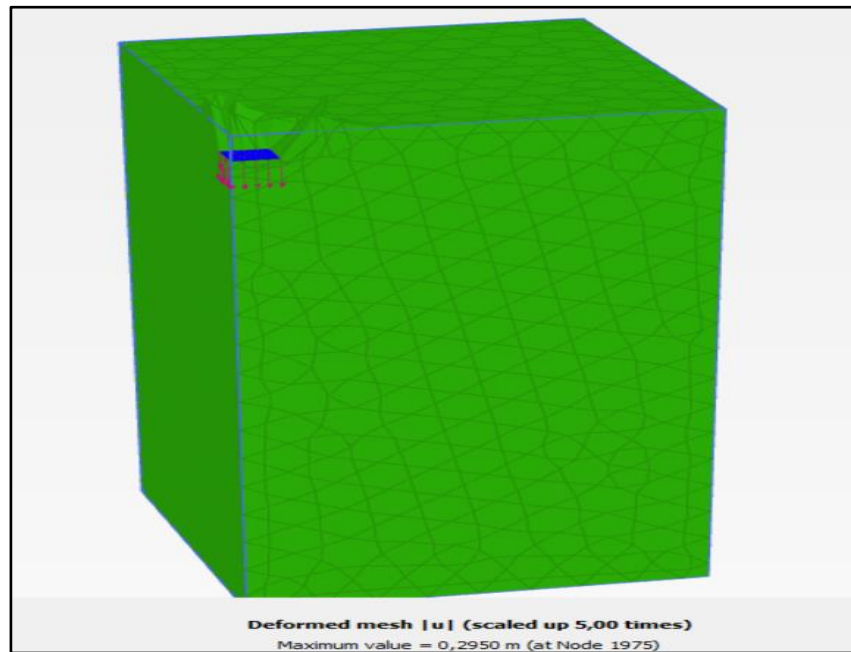


Figure 4.4: Maillage déformé du modèle

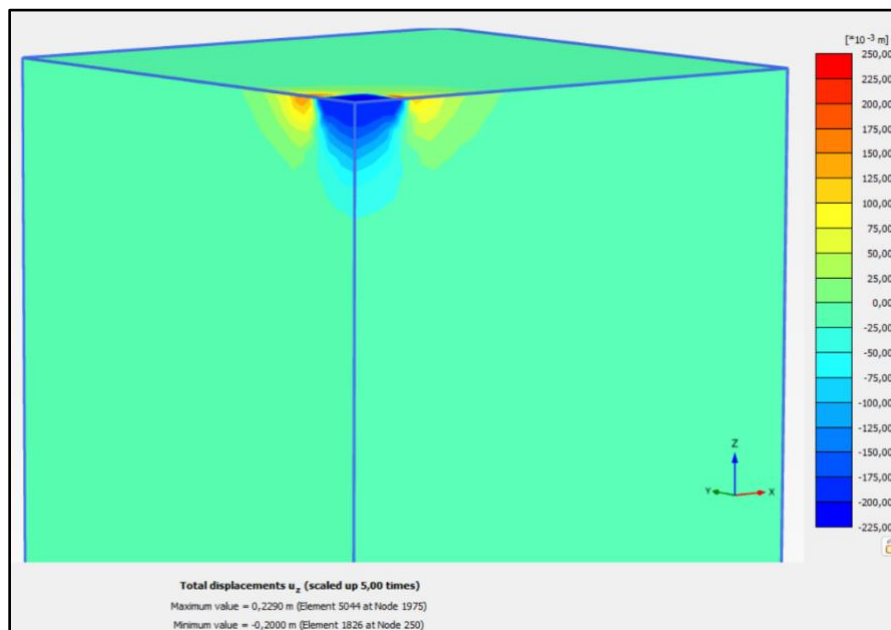


Figure 4.5: Déplacement vertical du sol (sans renforcement)

IV.2.5.2. Capacité portante :

La figure IV.6 montre la courbe de variation de charge avec le tassement des fondations. À partir de cette courbe, on peut estimer que la capacité portante du sol (sans renforcement) est d'environ 420.1kPa.

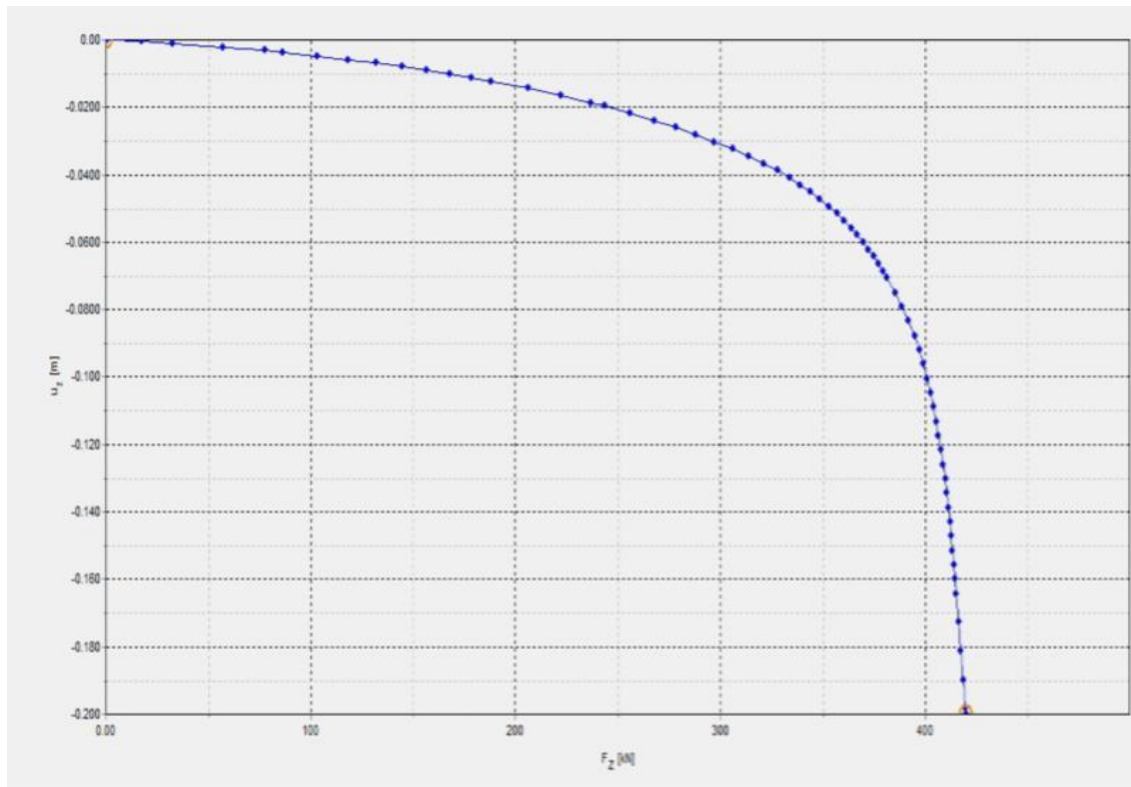


Figure 4.6: Évolution du tassement vertical au centre de semelle (sans renforcement)

IV.2.5.3. Validation du modèle de référence :

Dans le souci de vérifier la fiabilité de notre modèle de référence, une comparaison a été menée entre les résultats obtenus par la simulation numérique et ceux issus des approches théoriques classiques (méthode analytique de Terzaghi).

La valeur de la capacité portante calculée par la méthode analytique de Terzaghi est calculée par la formule suivante :

$$q_l = (1/2) \times \gamma_2 \times B \times N_\gamma \times S_\gamma + (\gamma_1 \times D + q) \times N_q \times S_q + C_2 \times N_c \times S_c$$

Pour notre cas: $S_\gamma=0.8$ et $S_c=1.2$ (semelle carrée), et $D=0$ (semelle en surface)

Le tableau IV.2 présente la comparaison entre les valeurs de capacité portante calculées pour différentes méthodes.

Le tableau IV.2 montre que les résultats obtenus par notre modèle (420.1KPa) sont proches de ceux calculés par la méthode analytique de Terzaghi (306.76 KPa).

Tableau 4.2: Capacité portante calculées pour différentes méthodes

Méthode	Largeur B (m)	Poids spécifique γ (kN/m ³)	Angle de Frottement ϕ (°)	Cohésion c (kPa)	$N\gamma$	NC	ql (kPa)
Terzaghi , 1943 [23]	2	15.1	30	1	22.4	30.14	306.76
Plaxis 3D	2	15.1	30	1	/	/	420.1

IV.2.5.4. L'effet de renforcement par des nappes géosynthétiques sur la Capacité portante:

Pour avoir l'influence de renforcement par des nappes géosynthétiques sur la capacité portante du sol, on a ajouté deux nappes géogrilles (ont une rigidité axiale de 2000 KN/m). La longueur des nappes est 8m ($L= 4B$) et l'espacement entre les nappes est égal à 0.2m ($h=0.1 B$) et la distance entre la base de la semelle et la 1ere nappe est égal à 0.2m ($e=0.1B$) .

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes.

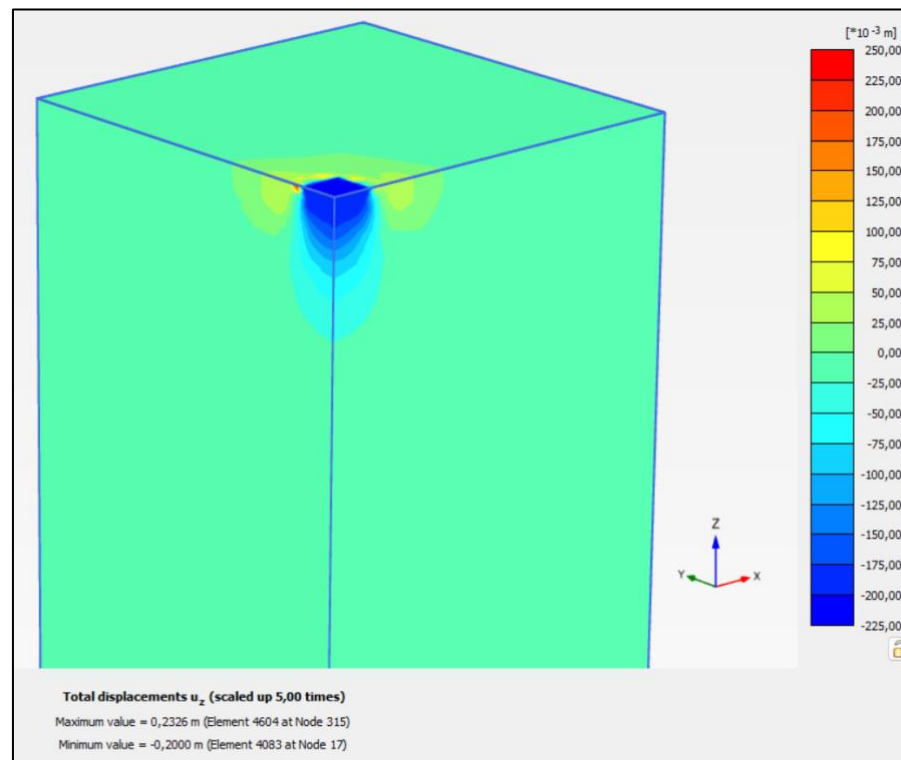


Figure 4.7: Déplacement vertical du sol (avec renforcement)

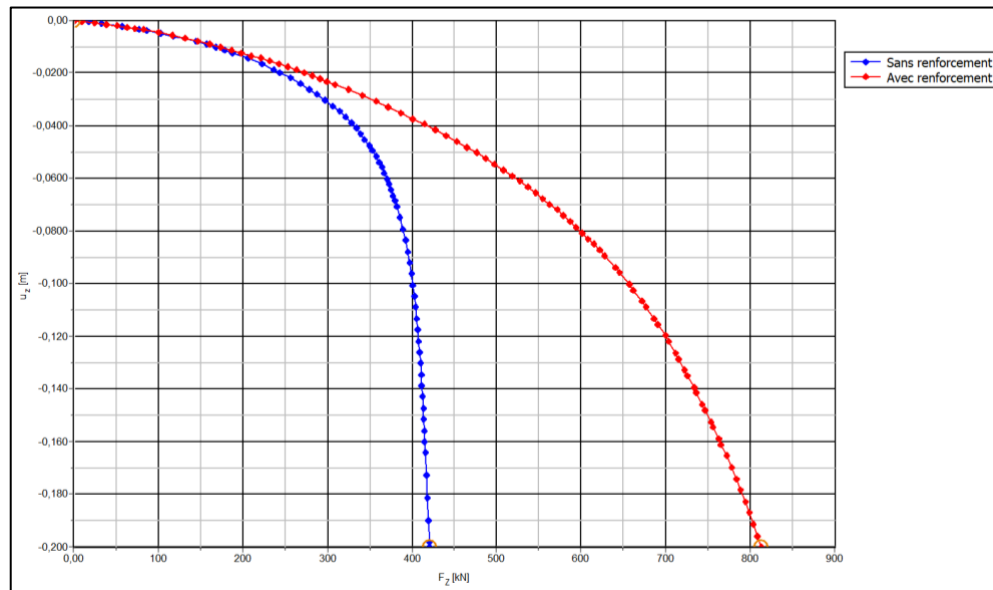


Figure 4.8: Évolution du tassement vertical au centre de semelle (sans et avec renforcement)

À partir des résultats obtenus, il ressort que le renforcement du sol par des nappes géogrilles améliore significativement sa capacité portante. Dans le cas étudié (2 nappes de longueur $4b$, soit 8 m), la portance passe de 420,1 kPa à 812,9 kPa, soit une augmentation de 93,5 % (voir Figure 4.8).

La partie suivante sera consacré à l'optimisation des paramètres de renforcement du sol par des nappes géosynthétiques.

VI.3 Optimisation par Méthodologie des Surfaces de Réponse des paramètres de renforcement des sols par nappes géosynthétiques

VI.3.1 Introduction:

Dans cette section, nous présentons la méthodologie adoptée pour identifier les combinaisons optimales de paramètres à l'aide de la Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR).

Les huit paramètres étudiés incluent:

1. La largeur de la semelle (**B**),
2. La longueur des géogrilles (**L**), exprimée par le rapport (L/B).
3. La rigidité axiale des géogrilles (**EA**),
4. L'espacement entre la première nappe et la base de la semelle (**d**), normalisé par (e/B),
5. L'espacement vertical entre nappes (**h**), sous forme adimensionnelle (h/B),
6. L'angle de frottement du sol (ϕ),
7. La cohésion du sol (**C**),
8. Le nombre de nappes de géogrilles (**N**).

9. La seule réponse optimisée est la capacité portante du sol renforcé (q_l).

Nous considérons maintenant la mise en œuvre de la méthode de surface de réponse pour L'optimisation, la méthode consiste alors en premier à sélectionner, parmi les plans d'expériences standards, celui qui est le plus adapté à notre modèle. Ce dernier comporte **8 facteurs** et chaque facteur possède trois niveaux. Il faut noter que le choix de l'intervalle de variation de chaque paramètre a été fait selon les travaux de recherche précédents et le domaine physique réel. L'intervalle de variation de chaque paramètre est Présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.3: Intervalle de variation des paramètres à optimiser.

Paramètre	Niveaux de variation		
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
B	1	2	3
L /B	1B	4B	7B
EA	500	2000	3500
d	0.1B	0.35B	0.6B
h	0.1B	0.35B	0.6B
q	30	40	50
c	1	8	15
N	1	4	7

VI.3.2. Choix d'un plan d'expériences:

Vous devez maintenant choisir un plan expérimental, c'est-à-dire choisir une liste ordonnée de tests afin d'identifier les paramètres souhaités du problème. Le système de score de type composite Centré sera utilisé dans cette étude ("Comme l'illustre le tableau des résultats présenté ci-après.").

Pour cette étude, on utilise un plan composite centré ($\alpha=1$) fractionnaire ($1/4$ de la matrice complète) afin de limiter le nombre d'essais en raison de contrainte de temps tout en conservant la validité statistique. Le logiciel Design-Expert v13 a été employé pour générer ce plan (le plan expérimental de notre étude est présenté dans le Tableau 4.4).

VI.3.3 Interprétation des résultats par la méthode de surface de réponse:

La méthodologie de surface de réponse est une méthode qui permet d'établir la relation entre les paramètres d'entrée (indépendants) et les données de sortie (appelées réponses). Il est particulièrement utile pour modéliser et optimiser des processus complexes où plusieurs facteurs influencent le résultat final.

La méthode est généralement divisée en cinq étapes principales :

1. Identification des variables : Nous sélectionnons les facteurs d'influence (paramètres d'entrée) et la réponse à analyser.
2. Conception du plan expérimental : Choisissez un plan expérimental approprié, tel que le type composite centré, pour construire le test efficacement.
3. Mener des expériences : exécuter des tests selon un plan planifié et mesurer les réponses.
4. Analyse et modélisation des données : Les résultats sont traités à l'aide de modèles mathématiques (généralement polynômes) pour décrire le comportement du système.
5. Optimisation et interprétation : Utiliser le modèle obtenu pour déterminer les conditions optimales et mieux comprendre l'impact des facteurs étudiés.

VI.3.3.1 Analyse de la variance ANOVA:

L'analyse de la variance (ANOVA) est un outil statistique utilisé pour évaluer les effets des facteurs d'entrée sur les résultats d'une série d'expériences, en particulier dans le contexte des méthodes de conception expérimentale appliquées à un modèle donné. Il permet également l'interprétation des données de sortie en décomposant la variation totale observée en contributions dues aux facteurs de contrôle et à l'erreur expérimentale.

L'objectif principal est de déterminer dans quelle mesure chaque facteur contribue à la variation des résultats. Pour les modèles prédictifs, en particulier les modèles quadratiques, la signification statistique est évaluée à l'aide de deux indicateurs clés :

- La valeur de P (P-value) : elle indique la probabilité que l'effet observé soit dû au hasard. Une valeur de P inférieure à 0,05 indique généralement un effet statistiquement significatif.[12]
- La valeur de F (F-value) : elle permet de comparer la variance expliquée par le modèle à la variance due à l'erreur. Une valeur de F élevée témoigne de la pertinence du modèle.

Ainsi, l'ANOVA constitue une étape essentielle pour valider les modèles et identifier les facteurs ayant un impact significatif sur les réponses mesurées value d'ANOVA.

Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant (Non significiant);
- Si $P < 0,05$, le paramètre est significiant.

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale.

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6.1)$$

$$\text{Où } \bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i : \text{La moyenne des réponses,}$$

$\bar{y}_i$: la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau,

N : nombre total d'expériences,

N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté. Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice de Fisher F-value est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table. Avec : MCe les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (Contribution en %), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat .

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100$$

VI.3.3.2 Analyse de régression:

La régression est une méthode statistique utilisée pour analyser la relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes, dans le but de comprendre comment ces dernières influencent les résultats observés. Dans cette étude, elle a été utilisée pour évaluer l'impact de différents paramètres sur la capacité portante (q_l) du sol renforcé. Les variables considérées incluent : la largeur de la semelle B , la longueur de géogrilles L (le rapport entre la longueur de géogrilles et la largeur de la semelle L/B), la rigidité axiale de géogrilles EA , l'espacement entre la 1^{ère} nappe et la base de la semelle e (e/B), l'espacement entre les nappes géogrilles h (h/B), l'angle de frottement du sol ϕ , la cohésion du sol C , et le nombre de géogrilles N , à savoir la portance du sol (q_l) est donnée par:

$$Y = f(B, L, EA, e, h, \phi, c, N)$$

Où : Y est la fonction de réponse[12] .

La valeur Y est approximée à l'aide d'un modèle mathématique non linéaire quadratique, qui convient à l'analyse de l'interaction entre différents paramètres du modèle. Ce modèle du second ordre est basé sur des méthodes de régression générales et peut représenter avec précision les relations complexes entre les variables.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2$$

Donné par [12]:

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e}$$

Dans cette équation de régression, b_0 représente le terme constant. Les coefficients $b_1, b_2, \dots, b_k$ correspondent aux effets linéaires des variables, tandis que $b_{11}, b_{22}, \dots, b_{kk}$ désignent les effets quadratiques. Les termes comme $b_{12}, b_{13}, \dots, b_{k-1k}$ représentent quant à eux les interactions entre les différentes variables d'entrée.

Les variables X_i correspondent aux paramètres d'entrée, à savoir : B, L, EA,

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

Avec :

y_i : Valeur de la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience;

$\bar{y}_i$: Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience;

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

e, h, ϕ , c, N.

Enfin, le coefficient de détermination R^2 mesure la proportion de la variance des résultats expliquée par le modèle et donné par la relation suivante :

Pour évaluer la validité du modèle, une analyse de la variance (ANOVA) est utilisée afin de vérifier sa pertinence et sa signification statistique. Le modèle est jugé fiable lorsque les résultats se situent dans un intervalle de confiance de 95 %. Si la valeur de p est inférieure à

0,05, cela signifie que le modèle est statistiquement significatif. En d'autres termes, plus le coefficient de détermination (R^2) se rapproche de 1, plus le modèle correspond bien aux valeurs réelles observées expérimentalement.

VI.3.4 Résultats:

Le tableau VI.3 présente les résultats de capacité de portance calculés à l'aide des formules établies. Ces résultats proviennent de différentes combinaisons expérimentales définies selon une matrice de planification basée sur un plan fractionnaire de type composite centré.

Tableau 4.4: Plan d'expériences en valeurs des paramètres.

N°	B	L	EA	e	h	ϕ	C	N	QI
	[m]	[N]	[KN\m]	[N]	[N]	[°]	[Kpa]	[N]	[KN]
1	1	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	5,476.00
2	1	7	3500	0.6	0.6	50	1	1	15,524.00
3	1	1	3500	0.1	0.6	30	1	1	392.84
4	1	1	500	0.6	0.6	50	1	7	10,940.00
5	1	7	500	0.6	0.6	30	15	7	1,528.80
6	1	1	3500	0.6	0.6	50	15	7	14,644.00
7	1	7	500	0.1	0.6	30	2	7	572.00
8	1	1	500	0.1	0.6	50	15	7	15,356.00
9	1	7	500	0.1	0.1	50	2	7	14,216.00
10	1	7	3500	0.1	0.6	30	15	7	1,586.40
11	1	7	500	0.6	0.6	50	15	1	17,552.00
12	1	1	500	0.1	0.1	50	15	1	15,408.00
13	1	7	3500	0.1	0.6	50	15	1	16,252.00
14	1	7	500	0.1	0.6	50	1	1	13,564.00
15	1	1	500	0.6	0.1	30	1	7	294.12
18	1	7	3500	0.6	0.1	50	1	7	12,176.00
19	1	1	3500	0.6	0.6	30	15	1	1,529.20
20	1	1	3500	0.1	0.1	50	1	1	12,808.00
21	1	7	3500	0.1	0.1	30	15	1	1,485.20
22	1	1	500	0.6	0.1	50	1	1	12,732.00
23	1	1	3500	0.6	0.1	30	15	7	1,428.80
24	1	1	3500	0.1	0.6	50	1	7	12,264.00
25	1	7	3500	0.6	0.1	30	1	1	548.40
26	1	7	500	0.1	0.1	30	1	1	454.80

27	1	7	3500	0.6	0.6	30	5	7	1,176.00
28	1	7	500	0.6	0.1	30	15	1	1,252.80
29	1	1	500	0.1	0.1	30	15	7	1,355.60
30	1	1	500	0.6	0.6	30	1	1	467.20
31	1	1	3500	0.1	0.1	30	1	7	898.00
32	1	7	500	0.6	0.1	50	15	7	14,300.00
33	1	1	500	0.1	0.6	30	15	1	1,289.20
34	1	1	3500	0.6	0.1	50	15	1	14,880.00
35	1	7	3500	0.1	0.1	50	15	7	17,504.00
36	1	1	2000	0.1	0.1	45	8	1	8,356.00
37	1	2	2000	0.1	0.1	45	8	1	8,992.00
38	1	2	2000	0.1	0.1	45	8	6	10,848.00
39	2	4	2000	0.35	0.35	50	8	4	16,410.00
40	2	7	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,895.00
41	2	4	2000	0.35	0.35	40	15	4	5,398.00
42	2	4	2000	0.1	0.35	40	8	4	5,597.00
43	2	4	500	0.35	0.35	40	8	4	4,419.00
44	2	4	2000	0.35	0.35	40	8	1	5,200.00
45	2	4	3500	0.35	0.35	40	8	4	4,979.00
46	2	1	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,617.00
47	2	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,721.00
48	2	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,696.00
49	2	4	2000	0.35	0.6	40	8	4	5,064.00
50	2	4	2000	0.35	0.35	40	1	4	3,914.00
51	2	4	2000	0.6	0.35	40	8	4	4,693.00
52	2	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,746.00
53	2	4	2000	0.35	0.35	40	8	7	4,726.00
54	2	4	2000	0.35	0.1	40	8	4	5,446.00
55	2	4	2000	0.35	0.35	30	8	4	1,281.00
56	2	2	2000	0.1	0.1	40	8	1	5,301.00
57	2	2	2000	0.1	0.1	40	8	2	5,455.00
58	2	2	2000	0.1	0.1	40	8	3	5,593.00
59	2	2	2000	0.1	0.1	40	8	6	6,221.00
60	2	2	2000	0.1	0.1	30	8	1	1,140.00
61	2	2	2000	0.1	0.1	30	8	2	1,252.00
62	2	2	2000	0.1	0.1	30	8	6	1,560.00
63	2	2	2000	0.6	0.6	30	8	6	1,188.00
64	2	2	2000	0.1	0.35	30	8	6	588.89

65	3	1	3500	0.6	0.1	30	1	1	1,531.00
66	3	7	500	0.6	0.1	50	1	1	34,590.00
67	3	7	500	0.6	0.6	30	1	1	1,885.00
68	3	1	500	0.1	0.6	30	1	7	1,573.00
69	3	1	500	0.6	0.6	30	15	7	3,445.00
70	3	7	500	0.6	0.6	50	1	7	35,010.00
71	3	1	3500	0.1	0.6	50	15	1	40,030.00
72	3	1	500	0.1	0.1	50	1	7	34,390.00
73	3	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	12,580.00
74	3	7	500	0.1	0.1	50	15	1	41,100.00
75	3	7	3500	0.1	0.1	50	1	1	38,610.00
76	3	1	3500	0.6	0.1	50	1	7	35,070.00
78	3	7	3500	0.1	0.6	30	1	1	1,945.00
79	3	7	3500	0.1	0.1	30	1	7	3,235.00
80	3	7	3500	0.1	0.6	50	1	7	40,380.00
81	3	7	500	0.1	0.6	30	15	1	3,488.00
82	3	1	3500	0.6	0.6	50	1	1	37,590.00
83	3	7	500	0.1	0.6	50	15	7	41,870.00
84	3	1	3500	0.1	0.1	50	15	7	37,760.00
85	3	1	500	0.6	0.1	30	15	1	3,418.00
86	3	7	500	0.1	0.1	30	15	7	3,782.00
87	3	1	3500	0.1	0.6	30	15	7	3,581.00
88	3	1	500	0.1	0.1	30	1	1	1,710.00
89	3	7	3500	0.6	0.6	30	15	1	3,687.00
90	3	1	500	0.6	0.1	50	15	7	40,000.00
91	3	7	3500	0.6	0.1	30	15	7	3,422.00
92	3	1	500	0.6	0.6	50	15	1	41,740.00
93	3	7	500	0.6	0.1	30	2	7	1,330.00
94	3	1	3500	0.6	0.6	30	1	7	1,472.00
95	3	1	500	0.1	0.6	50	1	1	37,310.00
96	3	7	3500	0.6	0.1	50	15	1	41,230.00
97	3	1	3500	0.1	0.1	30	15	1	3,593.00
98	3	7	3500	0.6	0.6	50	15	7	41,220.00
99	3	2	2000	0.1	0.1	45	8	1	23,720.00
100	3	2	2000	0.1	0.1	45	8	6	27,220.00

Selon les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA), les principaux facteurs influençant la capacité portante du sol sont : l'angle de frottement du sol ϕ et la largeur de la

semelle **B**. L'angle de frottement du sol ϕ présente la contribution la plus élevée avec 65,42%, soulignant son rôle essentiel dans l'amélioration de la résistance du sol. Vient ensuite la largeur de la fondation, avec une contribution de 18,45 %, qui influence directement la répartition des charges. Ensuite l'interaction entre l'angle de frottement du sol et la largeur de la fondation B (13.42%). En revanche, les autres paramètres tels que le nombre de couches (N), le rapport L/B , l'espacement entre la 1ère nappe et la base de la semelle e (e/B), l'espacement entre les nappes géogrilles h et la rigidité axiale de géogrilles EA ont montré des contributions faibles.

VI.3.4.1 Analyse de régression:

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie, à savoir la capacité portante, et les variables d'entrée telles que la cohésion du sol (c), les dimensions de la semelle (B), l'angle d'inclinaison (q), les dimensions des couches de géogrille (L/B), le nombre de couches de renforcement (N), l'espacement vertical entre les couches (d), ainsi que le module de la géogrille (EA), a été modélisée à l'aide d'une équation quadratique. La qualité de l'ajustement a été confirmée par un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 99,35 \%$), ce qui témoigne d'une grande précision du modèle dans la prédiction de la capacité portante.

L'analyse a permis d'établir un modèle quadratique capable de prédire la réponse Y en fonction des paramètres d'entrée. Ce modèle mathématique est formulé selon deux représentations :

➤ En variables codées

$$q_l = +4832.50 + 6343.54 \times A + 323.21 \times B + 187.22 \times C - 223.00 \times D + 203.89 \times E + 12132.48 \times F + 1180.96 \times G - 142.80 \times H + 62.26 \times AB + 71.68 \times AC + 225.08 \times AE + 5598.14 \times AF + 252.72 \times AG + 53.73 \times AH + 245.46 \times BC - 235.61 \times BD + 360.94 \times BF + 98.00 \times BH - 28.63 \times CE + 76.79 \times CF - 282.74 \times CG + 69.49 \times CH + 150.60 \times DE - 50.06 \times DF + 195.74 \times DG - 281.72 \times DH + 270.88 \times EF - 109.87 \times EH + 499.51 \times FG - 197.17 \times FH + 61.17 \times GH + 3889.03 \times A^2 - 123.17 \times B^2 - 914.16 \times C^2 + 1124.87 \times D^2 + 787.18 \times E^2 + 5804.76 \times F^2 - 1004.24 \times G^2 - 231.60 \times H$$

L'équation en variables codées révèle que l'angle de frottement (ϕ , $F : +12132.48$) et la largeur de la semelle (B , $A : +6343.54$) ont les effets positifs dominants sur q_l , conformément à leurs contributions majeures en ANOVA (65,42 % et 18,45 %). Leur interaction ($AF : +5598.14$) amplifie significativement la portance. À l'inverse, l'espacement première nappe-semelle (e/b , $D : -223.00$) et le nombre de nappes (N , $H : -142.80$) présentent des effets linéaires négatifs. Contrairement à l'effet positif attendu de la longueur des géogrilles (L , $B : +323.21$), qui correspond au comportement mécanique connu, l'effet négatif du nombre de couches (N) semble contradictoire avec les observations physiques traditionnelles (où l'augmentation du

nombre de nappes améliore normalement la capacité portante). Cette apparente contradiction dans le modèle s'explique par :

- La compensation entre son terme linéaire et ses interactions positives (BH : +98.00, CH : +69.49, GH : +61.17), montrant que son impact dépend du contexte géotechnique global ;
- Les limites du domaine expérimental (modèle central composite non complet avec 1/4 du plan étudié), qui peut masquer des effets non-linéaires.

Les autres paramètres (EA, L/ B, etc.) présentent des influences marginales. Ces résultats orienteront l'optimisation du renforcement du sol par des nappes géosynthétiques en considérant à la fois les effets individuels des paramètres et leurs interactions.

➤ En variables réelles

$$\begin{aligned}
 q_l = & +101492.00 - 32459.30240 \times B - 348.23188 \times L (L/B) + 1.41184 \times EA - 11668.71015 \times d (d/B) - \\
 & 14240.14949 \times h (h/B) - 4670.2637273 \times \varphi + 142.03818 \times C + 470.34283 \times N + 20.75358 \times B * L \\
 & (L/B) + 0.047784 \times B * EA + 900.32015 \times B * h (h/B) + 559.81430 \times B * \varphi + 36.102978 \times B * C \\
 & + 17.90975 \times B * N + 0.054546 \times L (L/B) * EA - 314.14359 \times L (L/B) * d (d/B) + 12.03123 \times L \\
 & (L/B) * \varphi + 10.88861 \times L (L/B) * N - 0.076356 \times EA * h (h/B) + 0.005119 \times EA * \varphi - 0.026927 \times \\
 & EA * C + 0.015442 \times EA * N + 2409.53812 \times d (d/B) * h (h/B) - 20.02290 \times d (d/B) * \varphi \\
 & + 111.85126 \times d (d/B) * C - 375.63041 \times d (d/B) * N + 108.35027 \times h (h/B) * \varphi - 146.49562 \times h \\
 & (h/B) * N + 7.13588 \times \varphi * C - 6.57231 \times \varphi * N + 2.91287 \times C * N + 3889.02708 \times B^2 - \\
 & 13.68551 \times L (L/B)^2 - 0.000406 \times EA^2 + 17997.9864950 \times d (d/B)^2 + 12594.86460 \times h (h/B)^2 \\
 & + 58.04759 \times \varphi^2 - 20.49476 \times C^2 - 25.733667 \times N^2
 \end{aligned}$$

Cette équation en variables réelles permet de prédire la capacité portante (q_l) en fonction des caractéristiques géotechniques et géométriques du système.

La Figure 4.9 présente une comparaison entre les valeurs de capacité portante (q_l) obtenues numériquement et celles prédites par le modèle. L'analyse révèle un excellent accord entre ces deux ensembles de résultats, confirmant ainsi la précision et la fiabilité du modèle de prédiction développé.

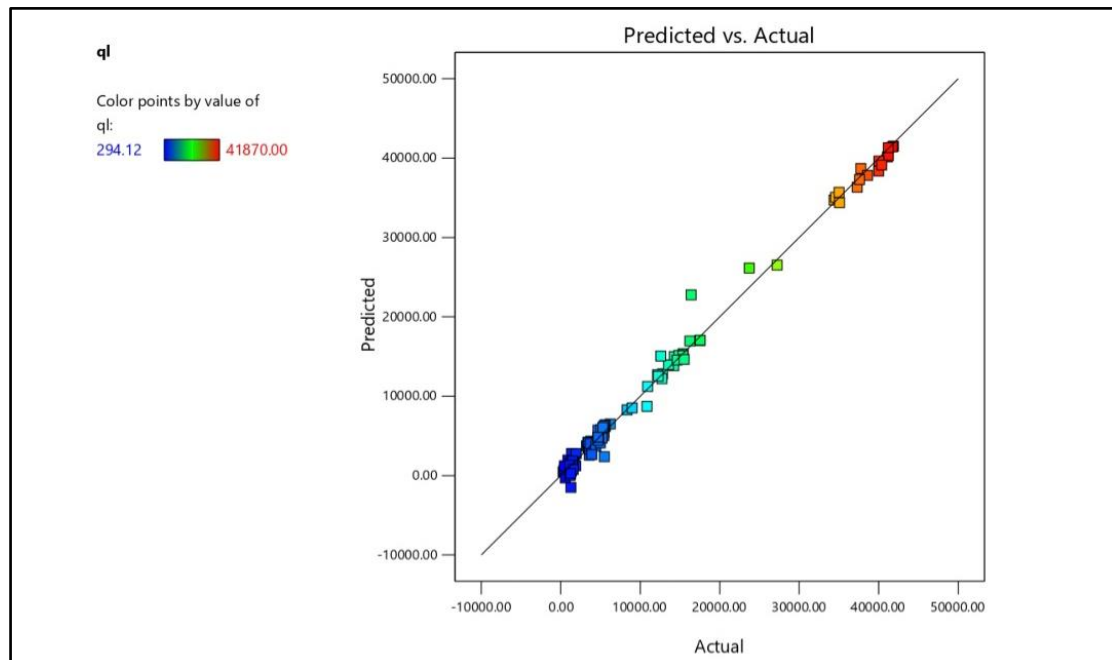


Figure 4.9 : Probabilités normales des résidus de la capacité portante q_l .

VI.3.4.2 Analyse des surfaces de réponses et graphiques:

Les figures VI.10 et 4.11 présentent les surfaces de réponse permettant de visualiser l'influence combinée des différents paramètres sur la capacité portante q_l du sol renforcé par des nappes de géogridde. On observe plusieurs phénomènes intéressants :

Premièrement, l'interaction entre l'angle de frottement ϕ et la largeur de semelle B (AF) montre l'effet synergique le plus marqué, avec un coefficient particulièrement élevé de +5598.14. Cette interaction domine clairement le comportement du système (figure 4.10).

Deuxièmement, le couplage entre l'angle de frottement ϕ et la longueur des géogriddes L (BF) présente également un effet positif notable (+360.94), bien que moins prononcé que le premier cas (figure 4.10). Ce phénomène s'explique par l'efficacité accrue des géogriddes dans les sols plus frottants.

Par ailleurs, deux interactions géométriques méritent attention (figure 4.11):

La combinaison longueur des géogriddes/largeur de semelle (AB) montre une influence positive modérée (+62.26).

L'interaction nombre de nappes/largeur de semelle (AH) révèle un effet compensatoire intéressant (+53.73) qui atténue l'effet linéaire négatif du nombre de nappes.

Ces visualisations et l'analyse des surfaces de réponse vient conforter les conclusions tirées de l'ANOVA, et permettent de comprendre comment les différents paramètres interagissent pour influencer la capacité portante, avant toute considération d'optimisation qui sera abordée ultérieurement.

Par ailleurs, les courbes de niveau issues de cette modélisation offrent une visualisation claire et intuitive des zones de performance optimale. Elles permettent non seulement de cerner les plages de variation des réponses, mais également de définir les conditions d'exploitation les plus favorables à une conception efficace et durable.

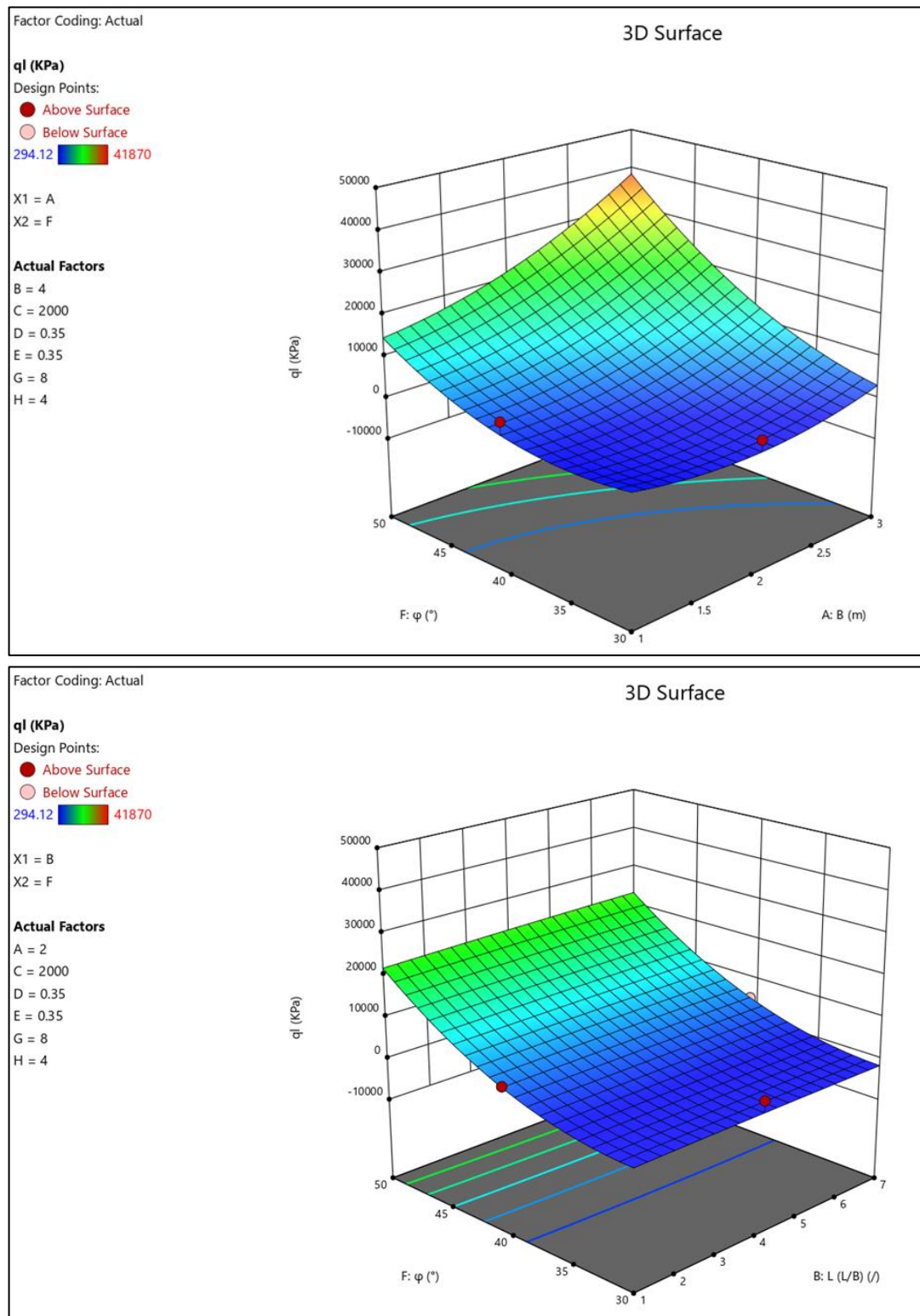


Figure 4.10 : Surfaces de réponse des interactions $\varphi \times b$ (AF) et $\varphi \times L$ (BF) pour la capacité portante q_l

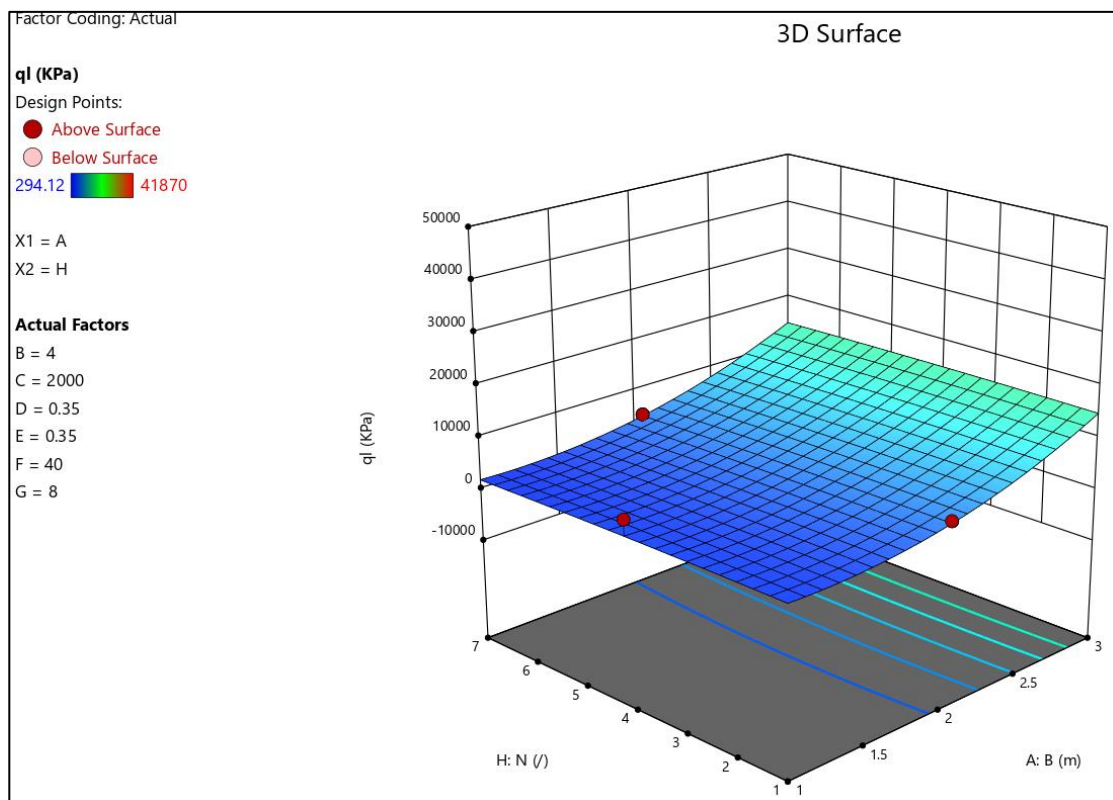
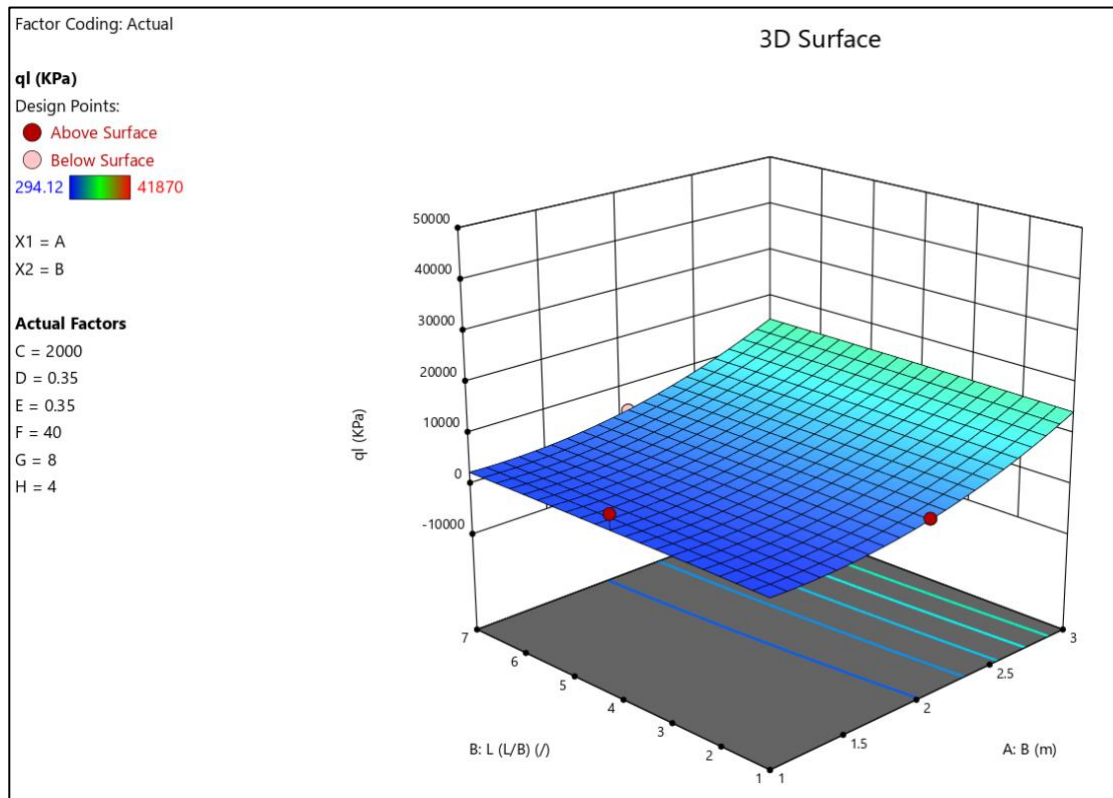


Figure 4.11: Surfaces de réponse des interactions $b \times L$ (AB) et $b \times N$ (AH) pour la capacité portante q_l

VI.3.5 Optimisation des paramètres de renforcement :

Dans le cadre de cette recherche, une attention particulière a été portée sur l'optimisation des paramètres influençant la portance des sols renforcés par géosynthétiques. Les variables étudiées incluent les dimensions de la couche de géogridde (L), les dimensions du sabot de fondation (B), la distance verticale entre le sabot et la première couche de géogridde (d), l'espacement entre les couches de géogridde (h), le module EA du renforcement, ainsi que le nombre de couches de géogridde (N).

Chaque paramètre a été analysé à plusieurs niveaux afin d'étudier son influence sur la performance globale du sol renforcé. La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été utilisée pour modéliser et optimiser ces variables, en vue de maximiser la capacité portante tout en assurant une configuration économique et efficace. Cette approche permet de déterminer une combinaison optimale des paramètres d'entrée conduisant à une réponse mécanique améliorée du système de fondation renforcé.

Après avoir analysé l'influence des paramètres géotechniques (ϕ , B, L, N, etc.) sur la capacité portante (ql) via la méthodologie des surfaces de réponse, les plages optimales et les critères d'optimisation sont présentés dans le Tableau VI.5.

Tableau 4.5: Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.

Paramètres	Objectif	Limite Inférieure	Limite Supérieure	Poids Inférieure	Poids Supérieure	Importance
A: B	Dans l'intervalle	1	3	1	1	3
B: L (L/B)	Dans l'intervalle	1	7	1	1	3
C: EA	Dans l'intervalle	500	3500	1	1	3
D: d (d/B)	Dans l'intervalle	0.1	0.6	1	1	3
E:h (h/B)	Dans l'intervalle	0.1	0.6	1	1	3
F: ϕ	Dans l'intervalle	30	50	1	1	3
G:C	Dans l'intervalle	1	15	1	1	3
H: N	Dans l'intervalle	1	7	1	1	3
ql	maximiser	294.12	41870	1	1	3

Les paramètres optimaux ont été déterminés à l'aide du logiciel Design Expert V13 selon la conception expérimentale (Composite Centré). La méthodologie consiste à maximiser la fonction de désirabilité (D) sous les contraintes des variables d'entrée. Le Tableau VI.6 présente à la fois les combinaisons optimales des paramètres et les valeurs maximales obtenues pour les réponses étudiées.

Tableau 4.6: Valeurs des paramètres à optimiser

Number	B	L (L/B)	EA	d (d/B)	h (h/B)	ϕ	C	N	ql	Desirability	
1	3.000	6.371	1748.684	0.117	0.549	50.000	11.871	6.240	41893.913	1.000	Selected
2	2.993	5.376	1354.903	0.101	0.597	49.958	14.735	1.764	41878.685	1.000	
3	3.000	6.412	2480.440	0.120	0.596	49.998	8.194	2.903	41891.974	1.000	
4	3.000	6.822	2968.920	0.598	0.598	49.996	14.367	5.393	42040.470	1.000	
5	2.997	6.678	2384.685	0.132	0.535	49.950	14.059	4.204	41871.293	1.000	
6	2.999	6.251	1769.266	0.531	0.594	49.999	13.792	3.791	41882.995	1.000	
7	2.988	6.989	2392.026	0.568	0.593	49.972	14.382	4.032	41956.889	1.000	
8	3.000	6.387	2390.870	0.188	0.600	49.989	14.994	6.148	41872.764	1.000	
9	3.000	1.229	1099.150	0.600	0.600	49.998	14.814	1.128	41910.302	1.000	
10	3.000	6.980	884.417	0.100	0.600	49.999	14.965	6.913	41979.519	1.000	

La figure 4.12 présente la solution optimale obtenue, mettant en évidence la valeur la plus élevée de la fonction de désirabilité. On y retrouve les valeurs optimales des paramètres ϕ , B, L, N, etc. choisies de manière à maximiser au maximum la capacité portante (ql) du sol renforcé.

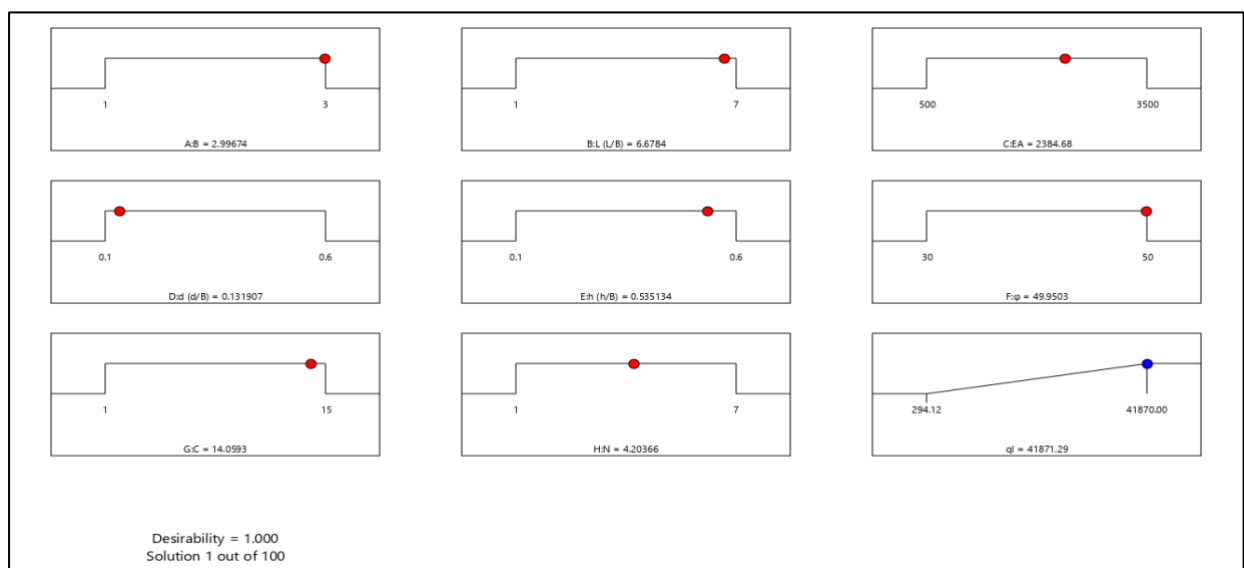


Figure 4.12: Représentation graphique de la procédure d'optimisation.

VI.4. Conclusion

Cette étude met en évidence l'efficacité de la combinaison entre la modélisation numérique et les techniques d'optimisation statistique, en s'appuyant sur le plan d'expériences (DOE) et la méthode des surfaces de réponse (RSM) comme outils méthodologiques pour améliorer le comportement des sols renforcés par géosynthétiques. La simulation numérique à l'aide du logiciel Plaxis 3D a permis d'analyser en profondeur l'influence des paramètres géométriques et mécaniques, conduisant à l'élaboration de modèles de réponse précis reflétant le comportement du sol sous renforcement.

Cette approche méthodique a permis d'identifier les facteurs les plus influents et leurs interactions, aboutissant à la détermination de combinaisons optimales assurant de meilleures performances, sans recourir à un grand nombre d'essais. Ce travail souligne ainsi la pertinence de l'utilisation conjointe du DOE et de la RSM dans le développement de stratégies de conception fiables et performantes dans le domaine géotechnique.

***CONCLUSION
GENERALE***

CONCLUSION GENERALE

Le renforcement des sols à l'aide de géosynthétiques constitue une solution ingénieuse face aux limites de portance rencontrées dans de nombreuses applications géotechniques, en particulier lorsqu'il s'agit de fondations superficielles. Ce projet s'est fondé sur la nécessité de mieux comprendre et optimiser le comportement de ces systèmes renforcés, en mobilisant des outils numériques et des méthodes d'analyse avancées.

La première partie du mémoire a été consacrée à une recherche bibliographique approfondie. Elle a porté sur les fondations superficielles, leur fonctionnement, les principales méthodes de calcul de leur capacité portante, ainsi que les différentes techniques d'amélioration de la portance des sols, en particulier par l'utilisation de géosynthétiques. Cette partie a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension du sujet. Elle s'est conclue par une introduction aux plans d'expériences et aux méthodes d'optimisation, outils essentiels pour la suite du travail.

Par la suite, nous avons eu recours à la modélisation numérique via le logiciel PLAXIS 3D, afin de simuler différentes configurations représentatives de situations réelles. Ces simulations ont constitué la base d'une analyse paramétrique, optimisée à l'aide des plans d'expériences (DOE) et de la méthode des surfaces de réponse (RSM).

Cette étude vise donc à explorer l'application conjointe de la modélisation numérique et de la méthodologie des surfaces de réponse pour analyser et optimiser les paramètres influençant l'amélioration de la portance d'un sol renforcé par des géogrilles, dans le cas d'une semelle superficielle carrée.

Elle démontre que le renforcement par géosynthétiques améliore notablement la capacité portante des sols selon les configurations étudiées. L'analyse ANOVA révèle que deux paramètres dominent le comportement mécanique : l'angle de frottement du sol (ϕ) et la largeur de la semelle (B), avec des contributions respectives de 65,42 % et 18,45 %. Leur interaction produit un effet synergique important. Concernant les géogrilles, leur efficacité dépend principalement de la longueur relative (L/B) et des espacements verticaux e/B et h/B , tandis que le nombre de nappes (N) a un effet secondaire. Les configurations optimales identifiées privilégient des semelles larges et des sols à fort angle de frottement.

Grâce à cette méthodologie, nous avons pu :

- Identifier les paramètres les plus influents.
- Construire des modèles prédictifs fiables pour estimer les performances du système.
- Déterminer des configurations optimales permettant d'améliorer l'efficacité des fondations superficielles renforcées tout en maîtrisant les coûts.

Au-delà des résultats techniques, ce travail nous a permis de nous approprier une méthode scientifique rigoureuse, combinant modélisation, expérimentation numérique et interprétation critique. Il nous a aussi offert une meilleure compréhension des enjeux liés à la conception et à l'optimisation des fondations dans un contexte de performance et de durabilité.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, ce projet nous a permis d'approfondir nos compétences dans le domaine du renforcement des sols pour améliorer sa portance, tout en développant une approche ingénierique cohérente et adaptable, que nous pourrons mettre à profit dans notre future carrière professionnelle et nos travaux de recherche.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Ichabira, A., & Djaaroune, M. (2021–2022). Modélisation du comportement d’une fondation superficielle sur un sol renforcé par géosynthétique. Mémoire de Master, Université de Batna 2. Retrieved from https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/ferrah_ferrah/files/chapitre_3.pdf
- [2] Ayad, C. (2022, Juin). Renforcement des sols par géosynthétiques: Évolution, approche expérimentale, modélisation numérique. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma.
- [3] Mebarkia, C. D. N. (n.d.). Analyse numérique de la capacité portante d’une fondation filante renforcée par géosynthétiques. Mémoire de Master, Université de Biskra. Retrieved from https://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/bahedimohamed/files/chapitre_2_calcul_de_la_capacite_portante_des_fondations.pdf
- [4] Bourokba, M., & Mrabet, S. A. (2016). Calcul analytique des fondations. Doctorat en Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf.
- [5] Rapport gratuit. (n.d.). Renforcement des sols par les géosynthétiques. Retrieved from <https://www.rapport-gratuit.com/renforcement-des-sols-par-les-geosyntheticues/>
- [6] Ould Ahmed, C. S. (2018). Analyse numérique de la capacité portante d’une semelle circulaire reposant sur un sol renforcé. Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M’sila.
- [7] Mirech, A. (2013, Juin). Utilisation des géosynthétiques en géotechnique routière. Mémoire de Master, Université de Guelma.
- [8] Kira, G. (2018, Juillet). Renforcement des pentes par géotextile. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [9] Koerner, R. M. (2012). Designing with Geosynthetics (6th ed.). Pearson Education.
- [10] Dali, A., & Alloui, M. (2020, Juin). Modélisation numérique et optimisation par la méthode des surfaces de réponses d’un terrain renforcé. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma.
- [11] Goupy, J. (1990). Étude comparative de divers plans d’expériences. *Revue de Statistique Appliquée*, 38(4), 5–44. Retrieved from http://www.numdam.org/item?id=RSA_1990__38_4_5_0
- [12] Rezka, E., & Boukhalat, B. (2020–2021). Utilisation du plan d’expérience de Box-Behnken pour optimiser les différents facteurs influant sur la résistance de la poutre de terre. Mémoire de Master, Université Kasdi-Merbah Ouargla.
- [13] Lahmadi, A. (2006). Étude paramétrique de l’interaction entre ouvrages: Tunnel – Bâtiment – Excavation. Mémoire de Magister, Université de Batna.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [14] Laboratoire 3S & Terrasol. (2004). Formation PLAXIS: Quelques points importants - Pratique exclusive des éléments finis en Géotechnique. Paris, 17–19 novembre.
- [15] Chekima, D., Chika, A. A., & Doudi, M. (2023, Juin). Étude numérique de l'amélioration de la portance des sols par différentes techniques de renforcement. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [16] Ghouali, K. (2018, Juillet). Renforcement des pentes par géotextile. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [17] Chekima, D., Chika, A. A., & Djoudi, M. (2023, Juin). Étude numérique de l'amélioration de la portance des sols par différentes techniques de renforcement. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.