

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : GÉOTECHNIQUE

Présenté par : MIHOUBI Raid Nidhal

Thème : Recherche de la position et des dimensions optimales des excavations souterraines en utilisant l'intelligence artificielle

Sous la direction de : Dr LAFIFI Brahim

Juin 2024

REMERCIEMENT

À l'issue de cette étude, je désire ardemment rendre grâce à Allah « الله », le Tout Miséricordieux, pour avoir gratifié mon être de l'endurance, du courage et de la détermination qui m'ont permis de mener cette recherche à son apogée.

En tête de mes remerciements, je souhaite sincèrement exprimer ma gratitude profonde envers mon à mon encadreur « Dr. LAFIFI Brahim », pour sa constante bienveillance, ses conseils éclairés et son inestimable expertise, qui m'ont accompagné tout au long de ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers les membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation de mon travail et pour leur précieuse contribution.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers mes enseignants du département de Génie Civil et Hydraulique qui ont veillé à ma formation tout au long de mes cinq années d'études universitaires.

Je tiens à remercier aussi l'ensemble du personnel de département de Génie Civil et de L'Hydraulique.

Il est tout aussi essentiel pour moi d'exprimer ma gratitude envers mes deux chères sœurs et mon frère, dont l'aide précieuse et les commentaires édifiants, empreints d'un amour indéfectible, ont contribué à l'essor de ce travail.

Enfin, mes sincères remerciements se tournent vers ma famille et mes amis, dont le soutien moral et les encouragements inébranlables ont éclairé chacune des étapes de mon parcours académique.

« Merci à vous tous »

DÉDICACE

Je commence par rendre grâce à « Allah » de nous aider à accomplir ce travail

الحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك.

Je dédie ce modeste travail particulièrement mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

C'est avec fierté et respect que je consacre ce travail aux individus les plus précieux de ce monde. À ma chère mère « Kamila » (أمي العزيزة) Dieu la préserve, symbole incontestable du sacrifice de l'amour, de l'encouragement et de la tendresse, qu'elle puisse trouver dans ce travail toute ma reconnaissance et l'expression de ma profonde gratitude et admiration. Qu'il la garde en bonne santé, Dieu.

À mon père « Abdelmalek », mon modèle et l'exemple suprême pour moi, qui m'a toujours encouragé, tu m'as pleinement soutenu par tous les moyens, tu as tout mis à ma disposition je n'ai jamais manqué de rien ...tu es toujours là quand j'ai besoin de toi ... rien ne saurait exprimer l'estime, le respect et l'amour que j'ai pour toi.

À ma grand-mère « Mama Sakiana » رحمها الله وأسكنها فسيح جناته

A mes chères sœurs Souha et Kawther et mon frère Karim.

A toute la famille et spécialement mes cousins « Raouf » et « safwane ».

A tous mes chers collègues de Géotechnique promo 2022/2024 et à toute mes amis.

Et un grand merci à mon chère amis « Bilal Abdaoui » (les hommes).

RAID NIDHAL

Résumé :

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'optimiser la position et les dimensions des excavations souterraines en évaluant numériquement la capacité portante des semelles situées au-dessus de ces excavations. Pour ce faire, la méthode des surfaces de réponse et les réseaux de neurones artificiels seront utilisés. La modélisation numérique du problème sera effectuée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, basé sur la méthode des éléments finis. Des plans d'expériences numériques seront utilisés pour la modélisation, en prenant en compte les paramètres géométriques des excavations tels que leurs dimensions et leur position en profondeur. La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) seront utilisés pour développer des modèles mathématiques reliant les paramètres d'entrée et de sortie, en vue de futures optimisations. Enfin, ces modèles mathématiques seront combinés à une technique d'optimisation pour optimiser les dimensions géométriques et la position des excavations.

Mots clés : Capacité portante - semelle au-dessus des excavations - Modélisation numérique - Plans d'expériences - RSM - ANN - optimisation.

Abstract:

The objective of this thesis is to optimize the position and dimensions of underground excavations by numerically evaluating the bearing capacity of foundations located above these excavations. To achieve this, the response surface methodology and artificial neural networks will be used. Numerical modeling of the problem will be conducted using Plaxis 2D software, which is based on the finite element method. Numerical design of experiments will be used for modeling, taking into account the geometric parameters of the excavations such as their dimensions and depth position. The response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) will be used to develop mathematical models linking input and output parameters for future optimizations. Finally, these mathematical models will be combined with an optimization technique to optimize the geometric dimensions and position of the excavations.

Keywords: Bearing capacity - foundation above excavations - Numerical modeling - Design of experiments - RSM - ANN - optimization.

ملخص

الهدف من عمل التخرج هذا هو تحسين موقع وأبعاد الحفريات تحت الأرض من خلال التقييم العددي لقدرة تحمل القواعد الموجودة فوق هذه الحفريات. للقيام بذلك ، سنستخدم طريقة أسطح الاستجابة والشبكات العصبية الاصطناعية. سيتم تنفيذ النمذجة العددية للمشكلة باستخدام برنامج Plaxis 2D ، بناء على طريقة العناصر المحدودة. سنستخدم الخطط العددية للتجارب في النمذجة ، مع مراعاة المعلمات الهندسية للحفريات مثل أبعادها وموقعها في العمق. وسنستخدم منهجية سطح الاستجابة (RSM) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتطوير نماذج رياضية تربط بين معلمات المدخلات والمخرجات، بهدف التحسينات المستقبلية. أخيراً، سندمج هذه النماذج الرياضية مع تقنية التحسين لتحسين الأبعاد الهندسية وموقع الحفريات.

الكلمات المفتاحية: قدرة التحمل-أساس فوق الحفريات-النمذجة العددية - الخطط التجريبية - RSM-ANN-التحسين.

Table des matières

Résumé.....i
Abstract.....ii
ملخص.....iii
Table des matières.....iv
Liste des figures et courbes.....ix
Liste des tableaux.....xi
Liste des abréviations.....xii
Introduction générale..... 1

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la capacité portante des fondations superficielle

I .1. Introduction 4
I .2. Définition sur les fondations 4
I .3. Rôles des fondations 4
 I .3.1. Rôle principal..... 5
 I .3.1.1. Charges verticales : 5
 I .3.1.2. Charge horizontale : 5
 I .3.2. Rôles secondaires :..... 5
I .4. Choix du type de Fondation..... 6
I .5. Différents types de fondations 7
I .6. Principaux types de fondations superficielles 7
 I .6.1 Les fondations filantes 8
 I .6.2 Les fondations isolées 8
 I .6.3 Les radiers ou dallages..... 8
I .7. Comportement des fondations superficielles 9
 I .7.1. Rupture par cisaillement généralisé 10
 I .7.2. Rupture par cisaillement localisé 11
 I .7.3. Rupture par poinçonnement 11
I .8. Bases conceptuelles des calculs de stabilité 13

Table des matières

I.8.1 Les méthodes dérivées des essais en place	13
I .9.Généralités sur la capacité portante des fondations superficielles.....	13
I .10.Les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations superficielles. ...	14
I .10.1. La théorie de Meyerhof.....	14
I .10.2. La théorie de Vesicé :	16
I .11. Critiques générales des méthodes classiques.....	17
I.11. Conclusion.....	18

Chapitre II : Notions de base sur les plans d'expériences

II.1 Introduction	19
II.2 Notion d'espace expérimental	19
II.2.1 Choix de la méthode d'expérimentation	20
II.2.2 Analyse des résultats	20
II.2.3 Acquisition progressive de la connaissance	21
II.3. Terminologie	21
II.3.1 Facteurs continus.....	21
II.3.2 Facteurs discrets	21
II.3.3 Facteurs ordonnables.....	22
II.3.4 Facteurs booléens	22
II.4. Domaine d'étude.....	22
II.5. Points expérimentaux.....	23
II.6. Différents types des plans d'expériences	24
II.6.1 Plans factoriels complets.....	24
II.6.2 Avantages et inconvénients des plans factoriels complets.....	25
II.7. Plans factoriels fractionnaires	25
II.7.1 Mise en œuvre	25
II.7.1.1. Grands principes	25
II.7.1.2. Les matrices d'expériences fractionnaires de Taguchi	26
II.7.2. Plan d'expériences de surface de réponse.....	26
II.7.2.1. Les plans composites centrés.....	26
II.8. Des plans d'expériences classiques aux plans d'expériences numériques.....	31
II.8. Conclusion	32

Chapitre III: Méthodes de prédiction utilisées

III.1 Introduction à la planification expérimentale 33

III.2. La méthodologie des surfaces de réponse 33

 III.2.1 Les principes généraux..... 33

 III.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse..... 34

 a. Planification expérimentale 34

 b. Modélisation 35

 c. Validation des modèles : 36

 III.2.3 La RSM pour l'optimisation en ingénierie 38

 III.2.3.1 Méthode graphique..... 38

 III.2.3.2 Méthodes numériques 38

III.3. Réseaux de neurones artificiels 38

 III.3.1 Introduction aux réseaux de neurones artificiels..... 38

III.2. Notions de base sur les réseaux de neurones artificiels..... 39

 III.2.1 Du Neurone biologique au neurone artificiel..... 39

 III.2.2 Les réseaux de neurones 40

 III.2.2.1 Réseau de neurones non bouclé 41

 III.2.2.2 Réseau de neurones bouclé (ou récurrent) 42

III.3.Types de modèles de neurones : 43

 III.3.1 Modèle d'un neurone à entrer simple : 43

 III.3.2. Neurone à entrées multiples : 44

III.4. Apprentissage des réseaux de neurones 44

 III.4.1. Type d'apprentissage 46

 III.4.1.1. Apprentissage supervisé 46

 III.4.1.2 Apprentissage renforcé 47

 III.4.1.3 Apprentissage non supervisé 47

 III.4.2. Algorithme d'apprentissage 47

Chapitre IV: Présentation du logiciel Plaxis

IV.1 Présentation de la méthode des éléments finis 49

 IV.1.1 Le calcul par la méthode des éléments finis 49

IV.2 Présentation du code de calcul Plaxis	50
IV.2.1 Les sous-programmes de Plaxis.....	51
IV.2.2 Les modèles de comportement utilisés dans le Plaxis	52
IV.3 Les éléments de la modélisation	54
IV.3.1 Modélisation de sol.....	54
IV.3.2 Plaques	55
IV.3.3 Géogrilles.....	56
IV.3.4 Interfaces	56
IV.4 La démarche de modélisation	57
IV.4.1 Entrée des données	57
a. La géométrie du modèle	57
b. Conditions aux limites.....	57
c. Chargement.....	58
d. Propriétés des Matériaux	58
e. Génération automatique du maillage	58
f. Conditions initiales	58
IV.4.2 Le calcul.....	58
IV.4.3 Analyse des Résultats	59
a. Déformations	59
b. Contraintes	59
IV.5 Conclusion	59

Chapitre V: Validation du modèle numérique et étude paramétrique

V.1 Introduction	60
V.2 Présentation du modèle numérique	60
V.3 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques de modélisation	61
V.3.1 Le sol.....	61
V.3.2 Semelle de fondation.....	62
V.4 Critères d'analyse	63
V.5 Résultats de la modélisation	63
V.5.1 Calcul	63
V.5.2 Déformation et stabilité.....	64
V.5.3 Résultats pour le cas de modèle avec deux excavations	65

Table des matières

V.6 Etude paramétrique	67
V.6.1 Influence de profondeur des excavations (Y)	68
V.6.2 Influence de la distance entre les excavations (X)	68
V.6.3 Influence de la Largeur des excavations (B).....	69
V.7 Conclusion	70
Chapitre VI: Optimisation des paramètres géométrique des excavations	
VI.1 Introduction	72
VI.2 Choix d'un plan d'expériences	72
VI.3 Méthodes prédictives	74
VI.3.1 Méthode des surfaces de réponses	74
VI.3.2 Réseaux de neurones artificiels.....	75
VI.4. Résultats	76
VI.4.1 Modélisation des résultats par la méthode des surfaces de réponse	78
VI.4.2 Modélisation des résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels	79
VI.4.3 Comparaison des modèles RSM et ANN	81
VI.5. Optimisation par l'utilisation de l'algorithme génétique	82
VI.6 Conclusions	85
Conclusion générale et perspectives	86
Bibliographie	88

Liste des figures et courbes

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la capacité portante des fondations superficielle

Figure I. 1 : La structure porteuse transmet toutes ces charges au sol par l'intermédiaire des fondations 5
Figure I. 2: Les types de fondations 7
Figure I. 3: Fondation filante 8
Figure I. 4: Types des fondations isolées 8
Figure I. 5: Fondation de type radier 9
Figure I. 7: Mécanisme de cisaillement généralisé 10
Figure I. 8: Rupture par cisaillement localisé, Vesic. (1973) 11
Figure I. 9: Mécanisme de rupture par poinçonnement 12
Figure I. 10: Nature de la rupture en fonction de la densité relative D_r et D_f / R 12
Figure I. 11: Schéma de Gorbunov d'après Costet et Sanglerat (1983) 18

Chapitre II : Notions de base sur les plans d'expériences

Figure II. 1: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1 19
Figure II. 2: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental 20
Figure II. 3: Le domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs (ici, il n'y a pas de contraintes) 22
Figure II. 4: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. 23
Figure II. 5: points expérimentaux d'un plan composite centré pour $k = 2$ facteurs 28
Figure II. 6: Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs. 30

Chapitre III: Méthodes de prédiction utilisées

Figure III. 1: Etapes de la méthodologie de surface de réponse 34
Figure III. 2: Un neurone avec son arborisation dendritique 39
Figure III. 3: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel 40
Figure III. 4: a-Fonction de Heaviside, b-Fonction signe 41
Figure III. 5: a-Fonction linéaire à seuil, b-Fonction sigmoïde 41
Figure III. 6: Structure d'un réseau de neurones non bouclé 42
Figure III. 7: Un réseau de neurones bouclé à deux entrées 43
Figure III. 8: Neurone à simple entrée 43
Figure III. 9: Neurone à entrées multiples 44
Figure III. 10: Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations 46

Chapitre IV: Présentation du logiciel Plaxis

Figure IV. 1: Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique 51
Figure IV. 2: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb 53
Figure IV. 3: Résultats d'essais triaxiaux standards (a) et modèle élasto-plastique (b) (Brinkgreve et al., 2011)..... 54
Figure IV. 4: Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments du sol 55
Figure IV. 5: Position des nœuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 nœuds et à 5 nœuds 56
Figure IV. 6: Distribution des nœuds et des points de contrainte dans les éléments d'interface et connexion avec les éléments de sol : (a) élément à 6 nœuds ; (b) élément à 10 nœuds (Brinkgreve et al., 2011)..... 57

Chapitre V: Validation du modèle numérique et étude paramétrique

Figure V. 1: Présentation du modèle géométrique 60
Figure V. 2: Modèle numérique du modèle de référence 61
Figure V. 3: Phase de calcul numérique. 64
Figure V. 4: Maillage déformé. 65
Figure V. 5: Résultats en termes de déplacement vertical de la fondation. 65
Figure V. 6: Résultats en termes d'incrément de chargement. 66
Figure V. 7: Maillage déformé pour $Y=1.5$; $X = 0.5$ et $B=2.0$ 66
Figure V. 8: Déplacement vertical pour $Y=1.5$; $X = 0.5$ et $B=2.0$ 67
Figure V. 9: Influence de la profondeur des excavations. 68
Figure V. 10: Influence de la distance entre les excavations (X). 69
Figure V. 11: Influence de la largeur des excavations (B). 70

Chapitre VI: Optimisation des paramètres géométrique des excavations

Figure VI. 1: Probabilités normales des résidus de capacité portante (q_u). 79
Figure VI. 2: Architecture du réseau de neurones artificiels (3-6-1) pour la capacité portante (q_u). 80
Figure VI. 3: Valeurs prédites par rapport aux valeurs numériques pour la capacité portante q_u 81
Figure VI. 4: Comparaison entre les valeurs de la capacité portante numériques et prédites Par RSM et ANN. 82
Figure VI. 5: Diagramme de l'algorithme génétique. 83

Liste des tableaux

Chapitre II : Notions de base sur les plans d'expériences

Tableau II. 1: Exemples de plans d'expériences..... 24
Tableau II. 2: matrice d'expériences d'un plan composite centré pour $k = 2$ facteurs 28
Tableau II. 3: pseudo-orthogonalité et iso variance par rotation. 29

Chapitre V: Validation du modèle numérique et étude paramétrique

Tableau V. 1: Caractéristiques géomécaniques du sol..... 62
Tableau V. 2: Caractéristiques de la semelle. 62
Tableau V. 3: Résultats du calcul du modèle de référence. 64
Tableau V. 4: Influence des paramètres géométriques du modèle proposé..... 67

Chapitre VI: Optimisation des paramètres géométrique des excavations

Tableau VI. 1: Intervalle de variation des paramètres à optimiser..... 72
Tableau VI. 2: Plan d'expériences type factoriel complet L64 (3 facteurs, 4 niveaux)..... 72
Tableau VI. 3: Résultats de la modélisation..... 76
Tableau VI. 4: Comparaison entre RSM et ANN. 81
Tableau VI. 5: Conditions d'optimisation. 84
Tableau VI. 6: Paramètres de l'algorithme génétique (GA)..... 84
Tableau VI. 7: Résultats de l'optimisation..... 84

Liste des abréviations

β :	Vecteur de régression.
ε :	Terme d'erreur.
x_i :	Variation.
y :	Grandeur d'intérêt.
nf :	Essais du plan factoriel.
S :	Réponse.
f_β :	La fonction de réponse.
X_i :	Variation de prédiction codées appelées facteurs.
β :	Coefficient de régression.
R_i :	Variable courante.
R^2 :	Coefficient de détermination statistique.
R^2_{adj} :	Coefficient de détermination ajusté.
SS_E :	La somme des carrés de l'erreur.
Sst :	L'erreur totale.
G :	Module de cisaillement.
ν :	Coefficient de Poisson.
K :	Comme second paramètre.
E :	Module d'Young.
C :	Cohésion.
Φ :	L'angle de frottement.
Ψ :	L'angle de dilatance.
σ_n :	Contrainte normale.
τ :	Contrainte de cisaillement.
Deq :	L'épaisseur équivalente.
J :	Module de rigidité.
N :	La tension interne.
U :	Déformation du sol renforcé.
X :	Distance entre les excavations.
B :	Largeur des excavations.
Y :	Profondeur des excavations.

Liste des abréviations

SC :	La somme des carrés.
N :	Nombre total d'expériences.
N_{nf} :	Niveau de chaque facteur.
MC :	La moyenne des carrés.
df :	Degré de liberté.
MC_e :	Les carrés moyens des erreurs.
qu :	La capacité portante
G :	Fonction de réponse.
b_0 :	Le terme constant de l'équation de régression.
X_i :	Paramètres d'entrée.
y_i :	Valeur de la réponse calculée à la <i>i</i> ème expérience.
\bar{y}_i :	Valeur mesurée à la <i>i</i> ème expérience.
\bar{y} :	Valeur moyenne des réponses mesurées.
$Y_{i,min}$:	Valeur en dessous de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$).
$Y_{i,max}$:	Valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$).



Introduction Générale

Introduction générale

Les excavations souterraines jouent un rôle crucial dans divers domaines tels que la construction de tunnels, les mines et les infrastructures souterraines. La sécurité et la stabilité de ces excavations sont d'une importance primordiale pour assurer la durabilité des projets et la sécurité des personnes et des biens. Dans cette optique, la recherche de la position optimale ainsi que des dimensions idéales des excavations est une problématique complexe qui nécessite une approche rigoureuse et innovante.

L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans la recherche de la position et des dimensions optimales des excavations souterraines représente une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Les excavations souterraines, qu'elles soient destinées à des projets miniers, de construction de tunnels ou d'autres infrastructures, présentent souvent des défis complexes liés à leur positionnement et à leurs dimensions. Traditionnellement, la conception de telles excavations repose largement sur l'expertise humaine et l'analyse de données géotechniques. Cependant, avec l'avènement de l'IA, de nouvelles approches émergent pour optimiser ce processus. Dans cette étude, la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été utilisés en conjonction avec le logiciel de calcul par éléments finis Plaxis 2D. L'IA offre la capacité de traiter de vastes ensembles de données géotechniques, d'analyser des modèles complexes, et même de prédire le comportement futur des structures souterraines avec une précision accrue.

Le but de cette étude est de présenter et d'appliquer la méthode des surfaces de réponse (RSM) et des réseaux de neurones artificiels (ANN) à travers des plans d'expériences, afin de confirmer la méthode d'optimisation proposée en optimisant les paramètres géométriques qui influencent la capacité portante des fondations au-dessus des excavations, tels que la profondeur des excavations (Y), la distance entre les excavations (X), et la largeur des excavations (B). Les plans d'expériences numériques sont utilisés pour analyser la capacité portante non drainée des fondations au-dessus des excavations, en se basant sur la modélisation d'une semelle de fondation au-dessus des excavations par le logiciel de calcul par éléments finis Plaxis 2D. La méthode implique l'utilisation d'un plan d'expériences de type factoriel complet L64 (3 facteurs, 4 niveaux) en tant que support de modélisation afin de déterminer les paramètres de comportement fréquemment utilisés dans la modélisation.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons décidé d'utiliser les techniques des plans d'expériences numériques. L'objectif des plans d'expériences est d'obtenir un maximum d'informations en réalisant seulement un minimum d'essais, ce qui répond parfaitement au défi posé par le contexte économique actuel. La méthode des surfaces de réponse et les réseaux de neurones artificiels sont utilisés pour élaborer des modèles mathématiques et prédire le comportement du problème traité.

Cette étude est divisée en six chapitres :

Premièrement, Une recherche bibliographique exhaustive sur la capacité portante des semelles superficielles. Comprendre les principaux facteurs influençant la capacité portante des semelles et les méthodes existantes pour son évaluation.

Le deuxième chapitre, présente la méthode des plans d'expériences. Cette méthode constitue un ensemble cohérent d'outils et de techniques visant à établir et analyser les liens existants entre les grandeurs étudiées (réponses) et leurs sources de variations supposées (facteurs). Son but est de développer des modèles mathématiques proches des réponses exprimées en fonction des facteurs. Les plans d'expériences, la méthode des surfaces de réponses et les réseaux de neurones artificiels seront exposés comme outils puissants pour l'optimisation des systèmes complexes. Leur application dans le domaine des excavations souterraines sera discutée.

Ensuite, dans **le troisième chapitre**, nous aborderons les méthodes avancées de prédiction, notamment la méthode des surfaces de réponses et les réseaux de neurones artificiels. Ces outils permettront de concevoir des modèles prédictifs précis et efficaces pour évaluer la stabilité des excavations en fonction de différentes variables.

Le quatrième chapitre sera dédié à la présentation du logiciel de modélisation Plaxis 2D, exploration de ses performances, ainsi que la description des lois de comportement disponibles dans ce logiciel. Cette section fournira une vue d'ensemble des fonctionnalités du logiciel et évaluera son efficacité dans le contexte de la modélisation numérique des problèmes géotechniques.

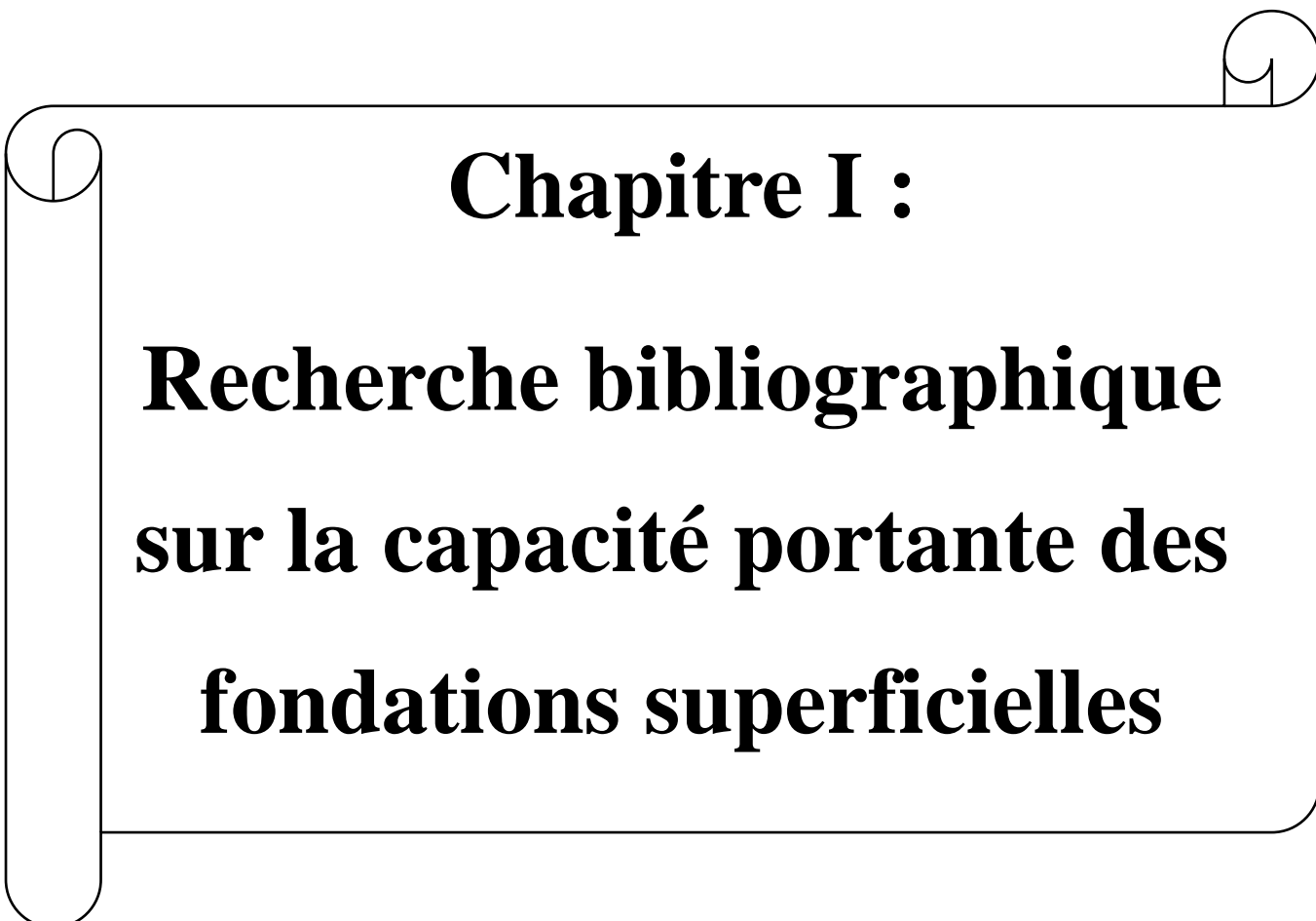
Le cinquième chapitre présente la validation de la modélisation du cas de référence basée sur des paramètres géotechniques réels de notre modèle numérique. Les résultats obtenus en termes de capacité portante non drainée sont comparés à ceux obtenus par le calcul analytique. Une étude paramétrique analysera également l'impact de la profondeur des

excavation (Y), de la distance entre les excavations (X), et de la largeur des excavations (B) sur le comportement des fondations situées au-dessus de ces excavations.

Dans le **sixième chapitre**, nous procéderons à une étude statistique des résultats afin de comprendre les relations entre les différentes variables et la stabilité des excavations. Utilisation de techniques de prédiction mathématique pour anticiper le comportement des excavations dans des situations non testées. Validation de la méthode d'optimisation suggérée en optimisant les paramètres géométriques influençant la capacité portante des fondations au-dessus des excavations, basée sur les résultats des modélisations de la capacité portante non drainée des fondations au-dessus des excavations. Utilisation de la méthode des réseaux de neurones artificiels (ANN) combinée avec l'algorithme génétique pour cette optimisation.

Enfin, les conclusions principales tirées de cette étude, ainsi que les perspectives pour les futurs travaux, ont été présentées à la fin de ce mémoire.

En conclusion, ce mémoire vise à apporter une contribution significative à la recherche sur la stabilité des excavations souterraines en proposant une approche intégrée basée sur l'IA et la modélisation numérique avancée. Les résultats obtenus pourraient avoir des implications importantes pour l'ingénierie géotechnique et contribuer à améliorer la conception et la construction des infrastructures souterraines.

A decorative border resembling a scroll or ribbon frames the text. It features a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll at the top right, with the text centered within the frame.

Chapitre I :

**Recherche bibliographique
sur la capacité portante des
fondations superficielles**

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la capacité portante des fondations superficielles

I.1. Introduction

Le chapitre présenté offre une vue d'ensemble approfondie sur la capacité portante des fondations superficielles au-dessus des excavations. En commençant par une définition des fondations, il explore ensuite les rôles principaux et secondaires des fondations, ainsi que les différents types de fondations. Il examine également le comportement des fondations superficielles et les méthodes de calcul de leur capacité portante, basant sur les théories de Meyerhof et Vesic.

Ce chapitre offre une compréhension approfondie des principes fondamentaux et des méthodes de calcul utilisées dans l'ingénierie géotechnique pour évaluer la stabilité des fondations superficielles. Il aborde également les facteurs à considérer lors du choix du type de fondation le plus approprié, en mettant en lumière l'importance de prendre en compte la nature du sol, les charges appliquées et les contraintes environnementales.

I.2. Définition sur les fondations

La fondation d'un ouvrage est l'élément qui transmet au sol d'assise les charges provenant de cet ouvrage. Les fondations sont appelées superficielles ou profondes ; la fondation superficielle est, par définition, une fondation qui repose sur le sol ou qui n'y est que faiblement encastree. Les charges qu'elle transmet ne sollicitent que les couches superficielles et peu profondes. Par ailleurs, les fondations profondes transmettent les charges dans les couches profondes ainsi que dans les couches superficielles qu'elles traversent. Pour pouvoir remplir le rôle de support qu'on lui demande, le sol doit posséder une résistance ou une capacité suffisante la rupture ; également il faut que les déformations du sol soient acceptables pour la construction. Cependant, outre ces deux premiers problèmes, on doit également examiner d'autres points comme l'influence de l'ouvrage sur le voisinage. [1]

I.3. Rôles des fondations :

Un ouvrage quelle que soient sa forme et sa destination, prend toujours appui sur un sol d'assise. Les éléments qui jouent le rôle d'interface entre l'ouvrage et le sol s'appellent fondations. Ainsi, Quel que soit le matériau utilisé, sous chaque porteur vertical, mur, voile ou poteau, il existe une fondation.

I.3.1. Rôle principal

La structure porteuse d'un ouvrage supporte différentes charges telles que :

I.3.1.1. Charges verticales :

- Comme les charges permanentes telles que le poids des éléments porteurs, le poids des éléments non porteurs,
- Comme les charges variables telles que le poids des meubles, le poids des personnes..., le poids de la neige,

I.3.1.2. Charge horizontale :

- Comme des charges permanentes telles que la poussée des terres,
- Comme les charges variables telles que la poussée de l'eau ou du vent.

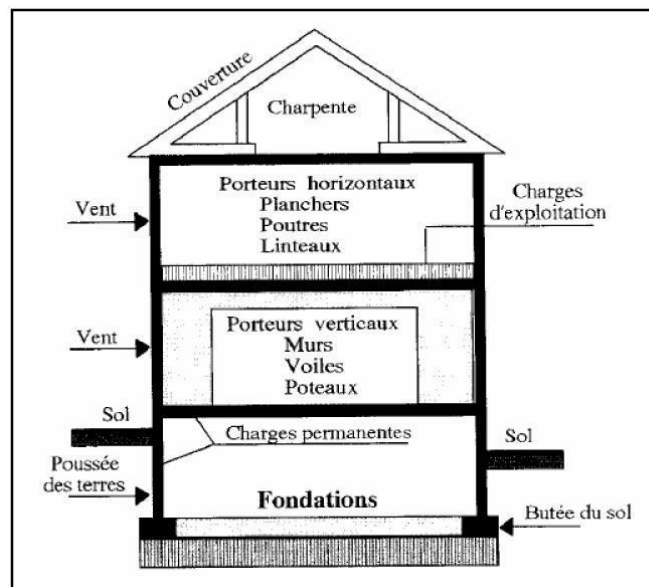


Figure I. 1 : La structure porteuse transmet toutes ces charges au sol par l'intermédiaire des fondations

I.3.2. Rôles secondaires :

- 1) La fondation doit résister elle-même aux charges et doit être calculée en conséquence.
- 2) L'ensemble ouvrage – fondation - sol doit être en équilibre stable. Il ne doit pas y avoir possibilité de mouvement.

- **pas de glissement horizontal** : L'adhérence sol – fondation doit empêcher les forces horizontales (poussées du vent, des terres...) de pousser l'ouvrage horizontalement.

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la capacité portante des fondations superficielles

- **pas de basculement** : Les charges horizontales ont tendance à faire basculer l'ouvrage car elles créent un moment. Les forces verticales (poids) doivent les contrebalancer.

- **pas de déplacement vertical** : Le sol doit être suffisamment résistant pour éviter l'enfoncement du bâtiment de manière uniforme ou dissymétrique (tassements différentiels entre deux parties solidaires de l'ouvrage) et le bâtiment doit être suffisamment lourd pour éviter les soulèvements dus à l'action de l'eau contenue dans le sol (poussée d'Archimède).

3) Une fondation doit être durable. Toutes les précautions devront être prises dans les dispositions constructives, le choix et l'emplacement des matériaux, ainsi que dans la mise en œuvre.

4) Une fondation doit être économique. Le type de fondation, les matériaux employés et la mise en œuvre doivent être le moins coûteux possible. [2]

I.4. Choix du type de Fondation :

Le choix du type de fondation le plus approprié est influencé par plusieurs facteurs essentiels, tels que :

- La nature de la structure, c'est-à-dire sa taille, sa forme et sa masse, est l'un des principaux facteurs qui déterminent le choix de la fondation appropriée.

- Les charges appliquées par la structure, comme le poids des matériaux et des équipements, sont également un facteur essentiel.

- Les caractéristiques du sol sous la fondation, telles que sa capacité portante, sa perméabilité, sa compressibilité et sa stabilité, doivent également être prises en compte pour garantir une fondation stable et solide.

- Les coûts des fondations souhaitées sont également un facteur important, car différents types de fondations peuvent varier considérablement en termes de coût de conception, d'installation et d'entretien.

D'autres facteurs tels que les réglementations locales, les conditions environnementales, les risques sismiques et les exigences de durabilité peuvent également influencer la décision finale sur le choix de la fondation appropriée.

I.5. Différents types de fondations

Selon la capacité de sol ou de la roche à supporter des ouvrages tels que les bâtiments, usines, barrages et les ponts, on distingue deux types de fondations selon le mode de transmission des charges des constructions au sous-sol :

Les fondations profondes transmettent les charges dans les couches profondes ainsi que dans les couches superficielles qu'elles traversent. Pour pouvoir remplir le rôle de support qu'on lui demande, le sol doit posséder une résistance ou une capacité suffisante à la rupture ; également il faut que les déformations du sol soient acceptables pour la construction.

Les fondations superficielles sont des fondations en contact direct avec le sol ou enterrées à faible profondeur. Elles transmettent les charges aux couches superficielles du sol.

Entre ces deux extrêmes, il existe un autre type de fondation appelé fondation semi-profonde. Les fondations semi-profondes offrent une solution pratique lorsque les fondations superficielles ne sont pas suffisantes et que les fondations profondes ne sont pas nécessaires.

- Si $D_f/B \geq 10$ la fondation est dite fondation profonde
- Une Fondation est dite superficielle si $D_f/B \leq 4$ à 5
- Si $4 \leq D_f/B \leq 10$ la fondation semi-profonde [3]

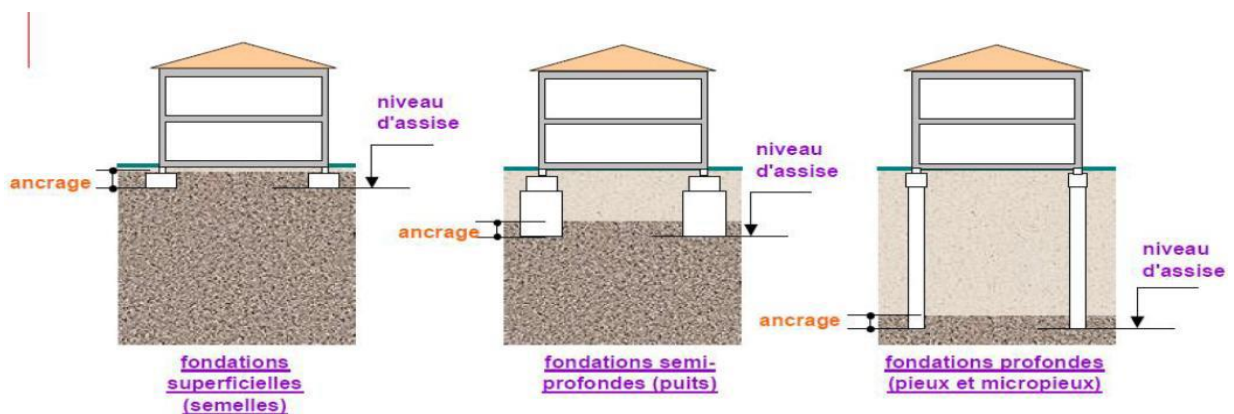


Figure I. 2: Les types de fondations

I.6. Principaux types de fondations superficielles

On distingue trois types de fondations superficielles : les fondations filantes, les fondations isolées et les radiers ou dallages.

I.6.1 Les fondations filantes

Lorsque la descente de charges n'est plus concentrée (sous un mur classique), on met logiquement en œuvre une fondation de type filante, c'est à dire continue sous l'objet fondé.

Les fondations filantes, généralement de largeur B modeste (au plus quelques mètres) et de Grande longueur L ($L/B > 10$).

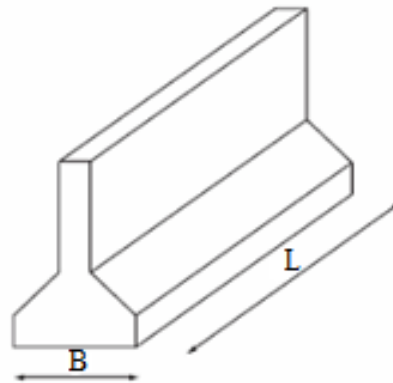
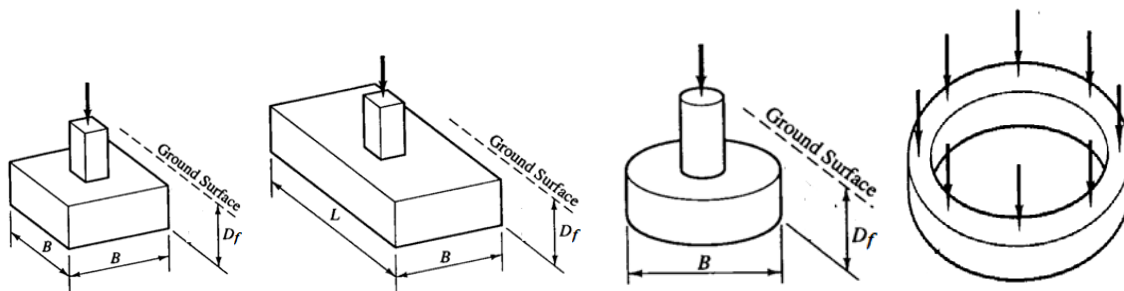


Figure I. 3: Fondation filante

I.6.2 Les fondations isolées

Si cette fondation supporte un poteau unique, elle est appelée semelle isolée ($L/B < 5$), elle peut être généralement, soit circulaire ou annulaire (de diamètre B), soit carrée ($L=B$), soit rectangulaire ($B < L < 5B$), etc.



(a) Semelle carrée (b) Semelle rectangulaire (c) semelle circulaire (d) semelle annulaire

Figure I. 4: Types des fondations isolées

I.6.3 Les radiers ou dallages

Les radiers ou dallages ont des dimensions B et L importantes, cette catégorie inclut les radiers généraux.[4]

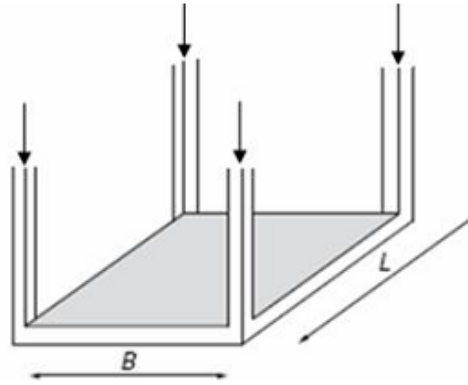


Figure I. 5: Fondation de type radier

I.7. Comportement des fondations superficielles

Afin d'analyser le comportement d'une fondation superficielle, examinons le cas d'une fondation filante. Cette fondation a une largeur B et est placée à une profondeur D dans le sol. Elle est soumise à une charge verticale centrée.

La figure (I-6) montre l'évolution du tassement (s) en fonction de la charge appliquée (Q), au début du chargement, le tassement croît de manière proportionnelle à la charge appliquée. Ce comportement linéaire est dû aux déformations élastiques du sol. À partir d'une certaine charge de rupture (Q_d), le tassement de la fondation n'est plus proportionnel à la charge appliquée. Le sol se plastifie, créant des zones de déformation sous la fondation, Enfin, la charge (Q_u) représente la charge limite qui entraîne la rupture. Lorsque la charge appliquée sur la fondation atteint ou dépasse cette charge limite, le sol n'est plus capable de supporter une charge supérieure, Frank. (1999).

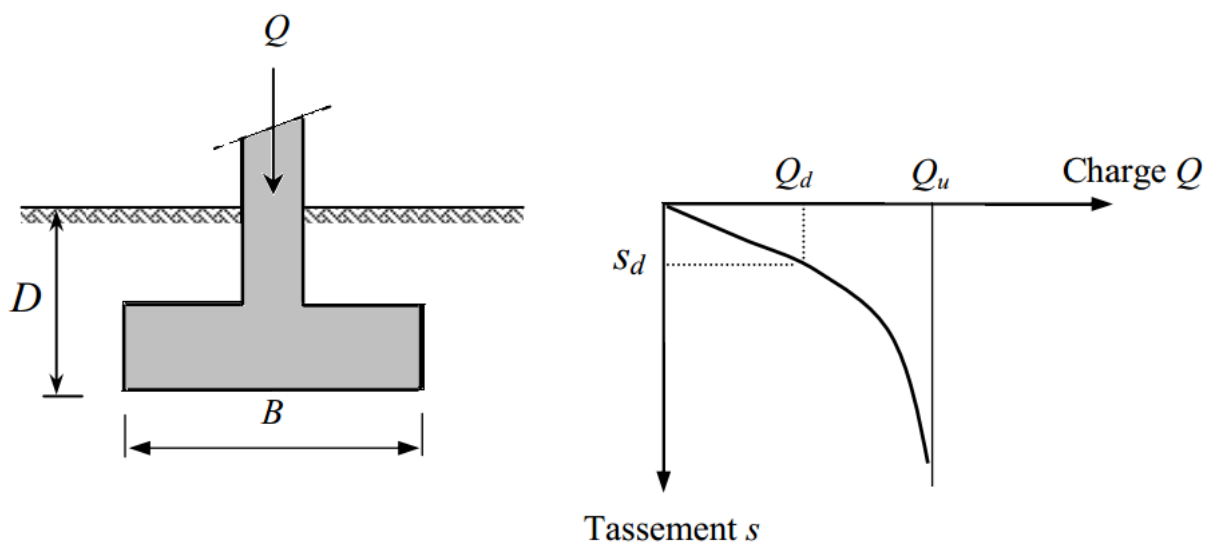


Figure I. 6: chargement d'une fondation superficielle (Frank, 1999)

D'après Vesic. (1973) on peut identifier trois modes de rupture différents lors l'analyse du comportement d'une fondation superficielle (fondation filante). Ces modes de rupture sont représentés par des courbes de charge-déplacement. Le premier mode de rupture est caractérisé par une rupture de cisaillement généralisé, la deuxième correspond à une rupture par cisaillement localisé, et le troisième est une rupture par poinçonnement. Ces différents modes de rupture dépendent des caractéristiques géotechniques du sol, de la géométrie de la fondation et des conditions de chargement. Il est essentiel de comprendre ces modes de rupture pour concevoir une fondation appropriée et prévenir les ruptures potentielles.

I.7.1. Rupture par cisaillement généralisé

Caractérisé par la formation d'un coin sous la base de la fondation, Ce coin pousse latéralement le sol selon des lignes de glissement débouchant à la surface du sol. Lorsque la fondation s'enfonce dans le sol, le coin qui se forme exerce une pression sur le sol environnant et peut provoquer un soulèvement du sol. Ce type de rupture se produit lorsque les contraintes appliquées à la fondation dépassent la résistance au cisaillement du sol.

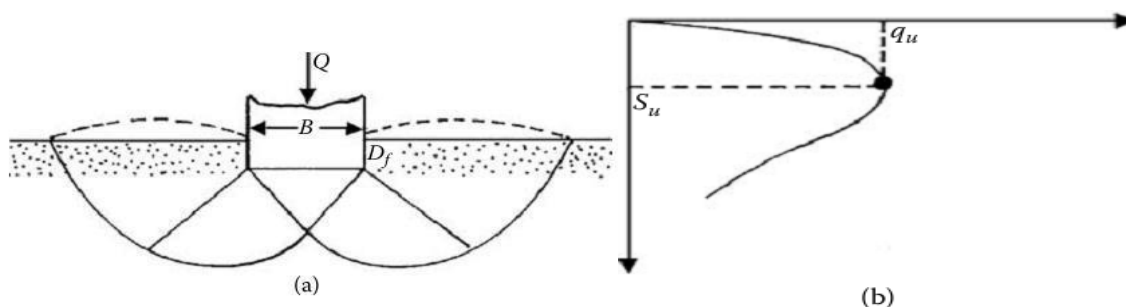


Figure I. 7: Mécanisme de cisaillement généralisé

Lors l'application d'une charge sur la fondation, on observe un tassement qui augmente progressivement jusqu'à une valeur limite maximale, représentée par (q_u), Cette valeur limite correspond à la capacité portante ultime de la fondation, Une fois que le tassement atteint la valeur limite maximale (S_u), le sol subit une rupture brusque par cisaillement. Cela signifie que le sol ne peut plus résister à la charge appliquée. La surface de rupture dans le sol est représentée dans la figure (I.7a) et la courbe chargement-tassement est représentée dans la figure (I.7b).

I.7.2. Rupture par cisaillement localisé

Dans le cas d'une fondation posée sur un sable moyennement dense ou une argile moyennement consistante, un autre mode de rupture possible est la rupture par cisaillement localisé. On observe que la charge (q) augmente avec le tassement jusqu'à atteindre la première charge de rupture, représentée par la courbe continue dans la figure (I.8b). Cette première charge de rupture correspond à la valeur (q'_u). Ensuite, la courbe devient plus raide et plus irrégulière, lorsque la valeur de q atteint la capacité limite ultime (q_u), la courbe prend une forme linéaire sans aucun pic n'est observée. C'est ce qu'on appelle la rupture par cisaillement localisé.

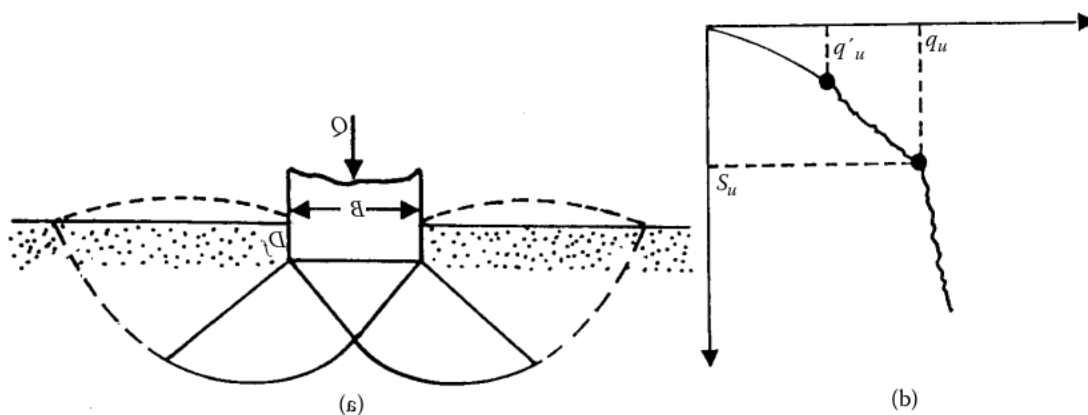


Figure I. 8: Rupture par cisaillement localisé, Vesic. (1973)

I.7.3. Rupture par poinçonnement

Dans le cas d'une fondation posée sur un sable lâche ou une argile molle, un mode de rupture possible est la rupture par poinçonnement, ce mode de rupture est courant dans les sols mous, où la capacité portante du sol est limitée. Dans le cas la fondation pénètre verticalement dans le sol sans provoquer de rupture horizontale. La surface de rupture reste confinée à proximité immédiate de la fondation et ne s'étend pas à la surface du sol Figure (I-9a). La courbe de chargement-tassement pour la rupture par poinçonnement montre généralement une augmentation progressive du tassement avec la charge appliquée, sans présenter de pics brusques ou de changements de comportement marqués, représentée dans la figure (I-9b).

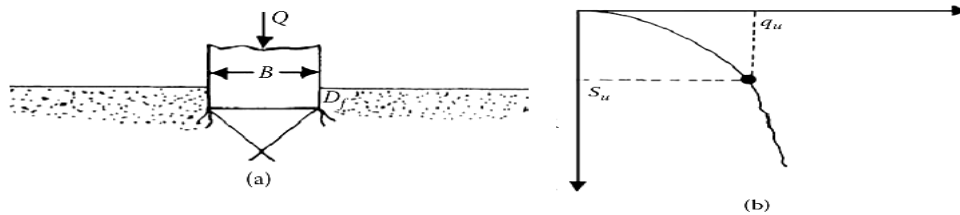


Figure I. 9: Mécanisme de rupture par poinçonnement

Dans l'étude des modes de rupture des sols sous une charge ultime, peuvent subir différents modes de rupture, et cela peut être influencé par plusieurs facteurs, tels que la résistance et la compressibilité du sol, la densité relative du sol, la profondeur d'ancrage de la fondation par rapport à la largeur de la fondation (D_f/R), et le rapport largeur/longueur (B/L) de la fondation.

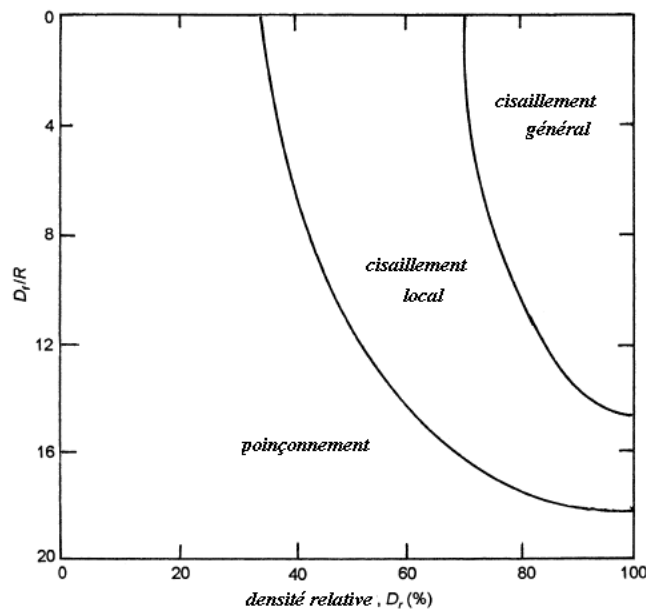


Figure I. 10: Nature de la rupture en fonction de la densité relative D_r et D_f / R

La figure (I-10) présente les observations de Vesic, qui a étudié ces facteurs. (D_r) représente la densité relative de sable. Plus la densité relative est élevée, plus le sol est dense et résistant. (R) défini comme le rapport entre la surface de la fondation (A) et le périmètre de la fondation (P).

La densité relative est définie par :

$$D_r (\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (I.1)[5]$$

I.8. Bases conceptuelles des calculs de stabilité

On peut analyser la stabilité des fondations superficielles, mais aussi des autres ouvrages géotechniques, de différentes manières à savoir :

- Par des corrélations avec des essais in situ.

I.8.1 Les méthodes dérivées des essais en place

Les essais en place (pénétromètre statique et dynamique, scissomètre, essais de pénétration de carottier \dot{R} SPT, pressiomètre,) complètent depuis plus de cinquante ans les essais de laboratoire pour la caractérisation mécanique des sols, notamment pour les sols où l'on ne peut prélever d'échantillons représentatifs.

Leurs résultats sont parfois exploités pour obtenir par corrélations analytique des paramètres de résistance utilisables pour l'analyse d'équilibre limite ou l'analyse limite (c_u , c' et φ').

Mais ils sont souvent utilisés directement pour évaluer la charge limite du massif de sol par des formules simples, du type de celle utilisée pour déduire la portance de la pression limite pressiométrique (Ménard) :

$$q_{max}=(p_1-p_0)+q_0$$

I.9. Généralités sur la capacité portante des fondations superficielles

Les facteurs de la capacité portante des fondations superficielles sont nombreux et variés.

On distingue :

- La forme des fondations (carrées, rectangulaires ou circulaires).
- L'inclinaison du sol (sol horizontal, sol incliné, bord de talus).
- Les propriétés mécaniques du sol (sol homogène, sol stratifié, sol cohérent, sol cohérent et frottant),
- Interaction sol-structure (contact rugueux, contact lisse).
- Les caractéristiques de la charge appliquée (charge verticale centrée, excentrée, inclinée),

L'analyse limite et sa généralisation, le calcul à la rupture, définissent des règles d'encadrement des charges limites par une approche dite statique ou par l'intérieur et une approche dite cinématique ou par l'extérieur. Sous certaines conditions, ces deux approches convergent vers une solution unique, qui est à la fois statiquement et cinématiquement

admissible, c'est à dire vérifie toutes les conditions aux limites imposées et respecte les critères de stabilité.[6]

I.10. Les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations superficielles.

Elle met en évidence diverses approches développées au fil du temps pour évaluer la capacité portante d'une fondation superficielle.

I.10.1. La théorie de Meyerhof

Meyerhof explique que la portance des semelles filantes est calculée en suivant la forme générale décrite par Terzaghi, avec les expressions établies par Prandl pour N_c , par Reissner pour N_q et par lui-même Meyerhof pour une valeur approchée de N_i . Ces coefficients ne tenant pas compte de la résistance au cisaillement dans le sol situé au-dessus de la

Base de la fondation :

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi \quad (I.2)$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (I.3)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1,4\varphi) \quad (I.4)$$

Pour les semelles circulaires et rectangulaires de côtés B et L , des facteurs partiels ont été proposés, à l'initiative de Skempton pour les argiles, par interpolation entre le cas des semelles filantes et celui des semelles circulaires :

$$S_C = 1 + 0,2 \frac{B}{L} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (I.5)$$

$$S_\gamma = S_q = 1 \quad \text{Si } \varphi = 0 \quad (I.6)$$

$$S_\gamma = S_q = 1 + 0,1 \frac{B}{L} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) ; \quad \text{si } \varphi > 10^\circ \quad (I.7)$$

Pour les fondations rectangulaires, une interpolation est aussi proposée pour corriger la valeur de l'angle de frottement interne, plus forte de 10% dans les ruptures en déformations planes (φ_p) que

Dans les essais triaxiaux (φ_t) :

$$\varphi = \varphi_p = \left(1,1 - 0,1 \frac{B}{L} \right) \varphi_t \quad (I.8)$$

S'il y a de l'eau dans le sol, ou si le sol n'est pas homogène, il est recommandé d'utiliser des valeurs moyennes du poids volumique déjaugé (sous l'eau) et non déjaugé (en l'absence d'eau), de la cohésion c et de l'angle de frottement interne φ_t

- Jusqu'à deux fois B sous la base des semelles filantes,

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la capacité portante des fondations superficielles

- Jusqu'à une fois B sous la base des semelles circulaires et carrées.

Pour tenir compte de la résistance du sol au-dessus de la base de la fondation, on utilise d'autres facteurs partiels :

$$dc = 1 + 0,2 \frac{B}{D} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (\text{I.9})$$

$$dq = d\gamma = 1 \text{ si } \varphi = 0 \quad (\text{I.10})$$

$$dq = d\gamma \text{ si } \varphi > 10 \quad (\text{I.11})$$

Meyerhof indique aussi que, pour les charges excentrées, la pratique consistant à faire le calcul de portance sur une semelle filante de largeur B' réduite :

$$B' = B - 2e \quad (\text{I.12})$$

Semble trop sévère par comparaison avec les résultats d'essais. Les observations sont intermédiaires entre ces valeurs et celles déduites d'une répartition triangulaire des pressions sous la semelle Brinch Hansen. Toutefois, en cas de double excentrement, la réduction de la longueur et de la largeur de deux fois les excentremments correspondants est jugée suffisante. Pour les charges inclinées, les travaux de Schultzeet de Meyerhof ont défini des coefficients réducteurs égaux à :

$$i\gamma = \left(1 - \frac{\delta}{\varphi} \right)^2 \quad (\text{I.13})$$

$$ic = iq = \left(1 - \frac{\delta}{90} \right)^2 \quad (\text{I.14})$$

En fonction de l'angle d'inclinaison de la charge par rapport à la verticale (δ , exprimé en degrés).

Il est conseillé d'incliner la base de la fondation en cas de charge inclinée permanente (par exemple, pour reprendre les charges d'un pont en arc). La solution est alors semblable à celle d'une fondation sur pente.

Dans le cas général, la formule de calcul de la capacité portante du sol a donc la forme

$$q_{ultime} = c \cdot Sc \cdot dc \cdot ic \cdot Nc + q \cdot Sq \cdot dq \cdot iq \cdot Nq + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot Sy \cdot d\gamma \cdot i\gamma \cdot Ny \quad (\text{I.15})$$

Meyerhof attire l'attention du lecteur sur la liaison entre la résistance et le déplacement : sous une charge inclinée et excentrée, une fondation superficielle peut se déplacer horizontalement de 5 à 20% de la largeur de la fondation, et tourner de 1 à 5 degrés, selon la

densité ou rigidité du sol et la profondeur d'encastrement de la fondation. Ces déplacements sont nécessaires pour mobiliser la résistance du sol et peuvent avoir une influence importante sur les structures qu'il porte. Pour limiter les déplacements des fondations, il faut les élargir ou les encastrent plus profondément.

D'autre part, si la rigidité de la fondation est faible par rapport à celle du sol, il faut utiliser une approche différente, par exemple avec des coefficients de réduction.[7]

I.10.2. La théorie de Vesic :

Vesic présente un panorama complémentaire du développement de l'analyse de la capacité portante des fondations superficielles. Il rappelle que l'histoire des premiers travaux sur le sujet, commençant de Rankine, a été décrite dans le premier traité de mécanique des sols de Terzaghi. Les recherches modernes partent de l'article de Prandl sur le poinçonnement des métaux qui a été étendu aux matériaux non pesants à frottement interne par Reissner.

La première application de ces solutions au calcul des fondations est due à Caquot, qui a inspiré les premières tentatives d'extension des calculs de plasticité aux sols pesants. Raes avait suggéré la superposition du terme en N avec les deux autres termes de l'équation de la capacité portante.

Cette approche a été adoptée à la même époque par Terzaghi et a marqué une influence durable sur tous les travaux ultérieurs.

Vesic décrit le mode de calcul par superposition de la capacité portante avec les facteurs N_c et N_q de Prandl et Reissner; pour N_γ , il indique que la solution tabulée de Caquot et Kérisel peut être représentée avec moins de 10% d'erreur sur l'intervalle $15 < \varphi < 45$ degrés (moins de 5% d'erreur entre 20 et 40 degrés) par l'expression :

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi \quad (\text{I.16})$$

La superposition des trois termes de capacité portante donne une estimation approchée par défaut (de 17 à 10% au plus pour $\varphi = 30$ à 40 degrés) mais exacte pour $\varphi = 0$ degré.

L'auteur indique que le choix d'un angle de frottement en déformations planes n'est pas nécessairement la meilleure solution pour rapprocher les résultats des calculs des portances observées.

La prise en compte de la rupture progressive du sol sous des niveaux de contraintes varié semble une voie plus prometteuse.

Pour les coefficients correcteurs appliqués à chacun des termes de l'équation de Terzaghi, Vesic donne les expressions suivantes :

- coefficients de forme :

$$S_c = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_q - 1} - 1 \quad (\text{I.17})$$

$$S_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \varphi \quad (\text{I.18})$$

$$S_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B}{L} \quad (\text{I.19})$$

- coefficients de profondeur (pour $D/B \leq 1$, d'après Brinch Hansen)).

$$d_q = 1 + 2 \tan(1 - \sin \varphi) \frac{B}{D} \quad (\text{I.20})$$

$$d_\gamma = 1 \quad (\text{I.21})$$

L'effet de la compressibilité du sol et de la dimension de la fondation est ensuite longuement discuté. La diminution de la résistance du sol lorsque la taille de la fondation augmente semble provenir de trois causes :

- l'enveloppe des cercles de Mohr n'est pas une droite,
- la rupture se développe progressivement sur la surface de rupture,
- il existe des zones de plus faible résistance dans tous les sols naturels.

Cette diminution provient principalement du terme N_γ . Des équations sont proposées pour en tenir compte.[8]

I.11. Critiques générales des méthodes classiques

Costet et Sanglerat (1983) indiquent que la théorie qui conduit à la définition des trois facteurs de capacité portante, soulève un certain nombre de critiques. Le premier point concerne la forme du coin OAÀ (Figure I.11) ; les essais sur modèle réduit ont montré que les côtés du coin sont loin d'être rectilignes principalement lorsque le rapport D/B est inférieur à 0,5. Afin de traiter cette difficulté, plusieurs auteurs ont repris l'étude de coin, en adoptant pour OA et OÀ des arcs de lignes de glissement, en appliquant la méthode des lignes de glissement (Sokolovskii, 1960).

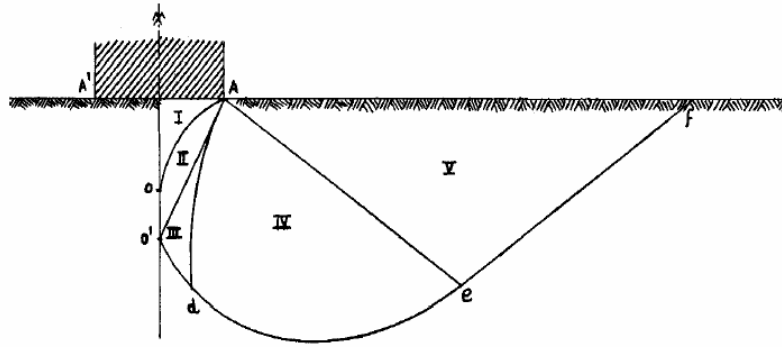


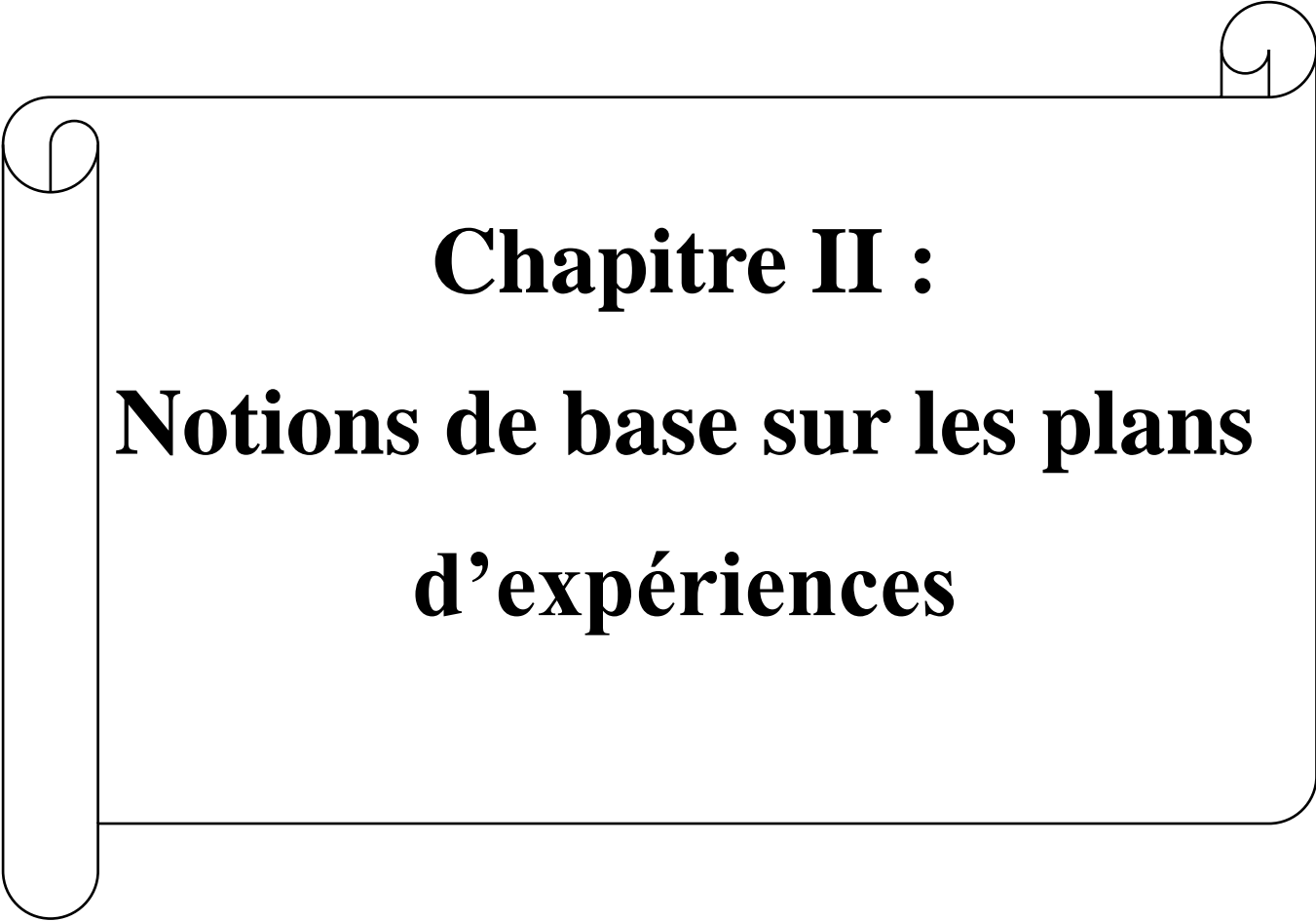
Figure I. 11: Schéma de Gorbunov d'après Costet et Sanglerat (1983)

L'hypothèse de la superposition des états d'équilibre (d'un milieu pesant non chargé, milieu non pesant cohérent et d'un milieu non pesant surchargé) est une approximation, car les lignes de glissement des différents équilibres sont loin d'être superposables. Les vérifications expérimentales de la capacité portante montrent que les formules classiques sont plutôt dans le sens de la sécurité ; c'est la meilleure justification de l'approximation faite qui permet de séparer l'effet du poids du sol de celui de la cohésion et de celui de l'encastrement de la fondation dans le terrain, ce qui simplifie beaucoup les calculs.

Une autre approximation concerne d'assimiler le terrain situé au-dessus du plan horizontal de la base de la fondation par une surcharge. Il est certain que les lignes de glissement au sein du massif se prolongent au de-là du plan horizontal et que cette approximation est d'autant moins bonne que le rapport D/B est grand. De plus, les calculs à la rupture ne prennent pas en compte les déformations du terrain et imposent les directions des plans de rupture ; également, ils considèrent que le sol se comporte comme un matériau associé, avec un angle de dilatance ψ égal à l'angle de frottement φ , alors que, pour les cas des sols réels, l'angle de dilatance ψ est généralement inférieur à l'angle de frottement φ . [9]

I.11. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre fournit une base solide pour la compréhension de la capacité portante des fondations superficielles au-dessus des excavations. En examinant les principaux concepts, les différentes théories et les méthodes de calcul, il permet aux ingénieurs et aux professionnels du domaine de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction d'ouvrages. En outre, il souligne l'importance de considérer divers facteurs tels que la nature du sol, les charges appliquées et les conditions environnementales pour garantir la stabilité et la durabilité des fondations.

A decorative border resembling a scroll or ribbon, with curved ends at the top-left, top-right, and bottom-left corners, framing the central text.

Chapitre II :
Notions de base sur les plans
d'expériences

Chapitre II : Notions de base sur les plans d'expériences

II.1 Introduction

Les plans d'expériences sont utilisés pour organiser de manière optimale les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses disciplines et dans toutes les industries dès lors que l'on cherche le lien entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il est important de prendre en compte les plans d'expériences lorsque l'on s'intéresse à une fonction de ce genre :

$$y = f(x_i) \quad (\text{II.1})$$

En utilisant des plans d'expériences, on peut obtenir le maximum de renseignements en minimisant les expériences. Afin d'y parvenir, il est nécessaire de respecter des règles mathématiques et d'adopter une démarche rigoureuse. Les plans d'expériences sont nombreux et adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Nous exposerons les principes essentiels de cette science et examinerons les principaux plans. La méthode des plans d'expériences repose sur deux concepts fondamentaux, à savoir l'espace expérimental et la modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

II.2 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

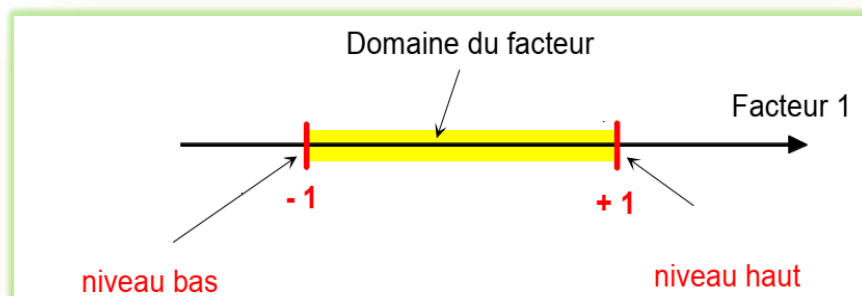


Figure II. 1: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure II.2).

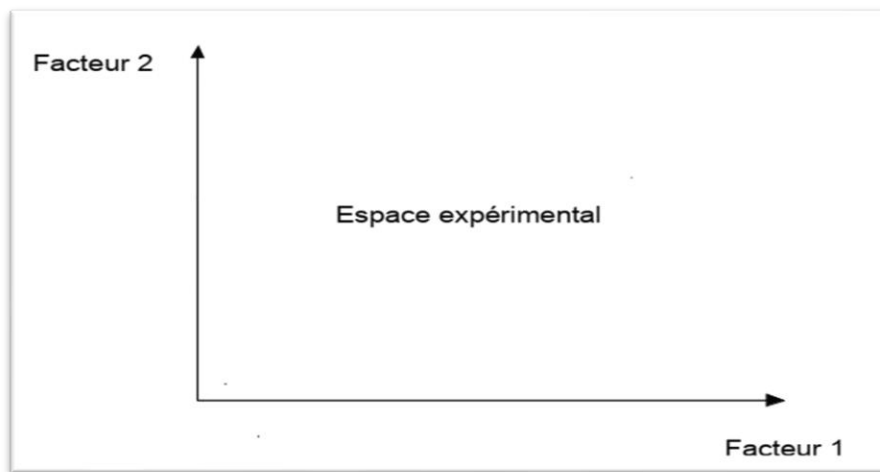


Figure II. 2: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental

II.2.1 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 assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

II.2.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent

également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

II.2.3 Acquisition progressive de la connaissance

L'expérimentateur qui entreprend une étude ne connaît pas les résultats, il est donc sage d'avancer progressivement pour pouvoir réorienter les essais en fonction des premiers résultats. Une première ébauche permettra de mieux orienter les essais vers les seuls aspects intéressants de l'étude et d'abandonner les voies sans issues. Une première série d'expériences conduit à des conclusions provisoires ; en fonction de ces conclusions provisoires, on lance une nouvelle série d'essais. L'ensemble des deux séries d'expériences est utilisé pour obtenir un contour précis des résultats d'étude. L'expérimentateur accumule ainsi les seuls résultats dont il a besoin et s'arrête dès qu'il a obtenu ce qu'il cherche.[10]

II.3. Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées **facteurs**. On parle donc des Facteurs qui influent sur une réponse. Les termes **facteur** et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

II.3.1 Facteurs continus

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

II.3.2 Facteurs discrets

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

II.3.3 Facteurs ordonnables

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

II.3.4 Facteurs booléens

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc. La compréhension des plans d'expériences s'appuie sur la notion essentielle d'espace expérimental des grandeurs étudiées. Nous allons examiner en détail ce concept fondamental. Nous insisterons sur les facteurs continus qui sont les plus couramment utilisés. [11]

II.4. Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude (Figure II.3). Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs. Supposons que le second facteur soit la surcharge du véhicule définie comme toute masse supplémentaire à celle du véhicule et du chauffeur. Le niveau bas de la surcharge est 0kg et le niveau haut 300 kg, par exemple. S'il n'y a pas de contraintes, le domaine d'étude est représenté par tous les points dont les surcharges sont comprises entre 0 et 300 kg et dont les vitesses sont comprises entre 80 et 120 km/h.

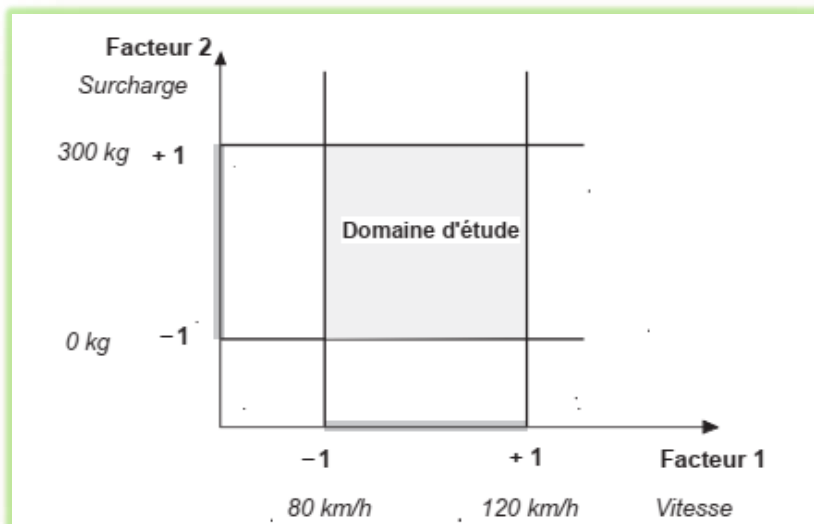


Figure II. 3: Le domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs (ici, il n'y a pas de contraintes).

II.5. Points expérimentaux

Dans un espace à deux dimensions, le niveau i du facteur 1, noté $x_{1,i}$, et le niveau j du facteur 2, noté $x_{2,j}$, peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental ou du domaine d'étude (Figure II.4). Par exemple, si le niveau de la vitesse est 90 km/h et celui de la surcharge est 250 kg, les coordonnées du point expérimental sont :

- $X_{1,i} = 90 \text{ km/h}$
- $X_{2,j} = 250 \text{ kg}$

Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. C'est la raison pour laquelle une expérience est souvent désignée par l'expression point expérimentale, point d'expérience ou même simplement point. Un plan d'expériences est donc représenté par un ensemble de points expérimentaux, eux-mêmes situés dans l'espace expérimental. Dans l'exemple que nous avons pris, l'expérience est conduite sur un véhicule qui roule à 90 km/h avec une surcharge de 250 kg.

Jusqu'à trois facteurs, il est possible de dessiner le domaine d'étude. Au-delà de trois facteurs, on utilise une représentation en tableau, dite *matricielle*, plus générale puisqu'elle permet de représenter les points d'expériences dans un hyper volume à un nombre quelconque de dimensions.

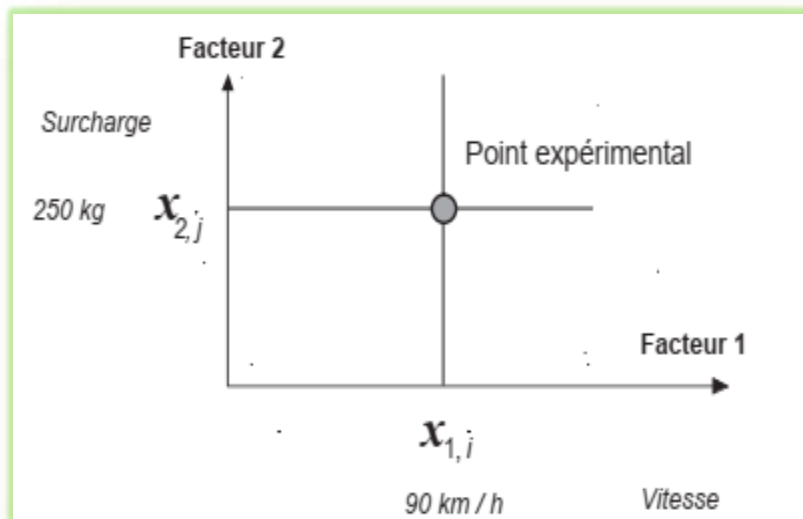


Figure II. 4: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

II.6. Différents types des plans d'expériences**II.6.1 Plans factoriels complets**

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante : $N = 2^k$ où k est le nombre de facteurs. Le nombre d'essais est exactement égal au nombre de coefficients du modèle à déterminer. On vérifie bien ceci pour les plans 2^2 et 2^3 .

Plan 2^2 : facteurs A et B **4** expériences

Plan 2^3 : facteurs A, B et C **8** expériences

Plan 2^4 :facteurs A, B, C et D **16** expériences

Les matrices d'expériences se construisent selon les tableaux suivants pour les cas des plans 2^2 et 2^3 avec des facteurs A, B et C.

Tableau II. 1: Exemples de plans d'expériences.

N° essai	A	B
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

N° essai	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante : colonne

Du 1^{er} facteur : alternance de -1 et +1

- Colonne du 2^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- Colonne du 4^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 8 en 8

Et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

II.6.2 Avantages et inconvénients des plans factoriels complets

Les plans factoriels complets sont des plans dits sans risque car ils permettent de déterminer tous les effets et toutes les interactions sans ambiguïtés. Le nombre d'essais nécessaire est au moins égal au nombre total de coefficients à déterminer. Les essais sont réalisés de telle sorte que les coefficients sont estimés avec une variance minimale. Leur simplicité d'exploitation assure un bon "rendement" par rapport aux résultats obtenus. Néanmoins ils présentent une limite essentielle : le nombre d'essais augmente très rapidement avec le nombre de facteurs. On atteint déjà 128 expériences (2^7) pour 7 facteurs ce qui devient donc très vite difficile à réaliser dans la pratique.[12]

II.7. Plans factoriels fractionnaires

II.7.1 Mise en œuvre

II.7.1.1. Grands principes

Les plans fractionnaires ont été conçus pour remédier à l'inflation rapide du nombre d'essais dans les plans complets. L'objectif des plans fractionnaires va consister à réduire le nombre d'expériences à réaliser par rapport au nombre maximum donné par le plan complet. Les plans fractionnaires utilisent les matrices des effets des plans complets. Leurs matrices des effets ont donc également toutes les qualités des matrices d'Hadamard. On parlera de plan 2^{k-p} (p entier) pour indiquer un plan fractionnaire issu du plan complet 2^k avec k facteurs à 2 niveaux. Par exemple le plan 2^{4-1} est un plan fractionnaire permettant l'étude de 4 facteurs en utilisant la matrice des effets du plan complet 2^3 : 2^3 expériences sont à réaliser au lieu des 2^4 expériences du plan complet. Le nombre d'expériences est divisé par 2, il correspond à la réalisation d'un demi plan complet 2^4 . De la même manière il est possible de réaliser des plans $2^{k-2}, 2^{k-p}$ (p entier < k). Le plan 2^{7-3} permettra une étude de 7 facteurs avec seulement 2^4 expériences au lieu de 2^7 : il s'agit donc de 1/8ème du plan complet 2^7 .

Néanmoins les plans fractionnaires nécessitent une phase de conception plus longue car l'interprétation qui résultera des résultats dépend essentiellement du choix de p. Plus le nombre p augmente, plus la charge expérimentale va diminuer mais au détriment d'un risque

de plus en plus grand sur la qualité des informations tirées du plan. Il faudra donc évaluer les risques avant de démarrer l'expérimentation et les minimiser en construisant le plan fractionnaire adéquat. C'est le pari du plan fractionnaire.

II.7.1.2. Les matrices d'expériences fractionnaires de Taguchi

La mise au point d'une matrice d'expériences fractionnaire orthogonale, spécialement adaptée à la réalisation d'une expérimentation donnée, n'est pas à la portée des non spécialistes. Une des contributions majeures de G. Taguchi est d'avoir mis au point des outils qui simplifient, et, surtout, fiabilisent considérablement cette tâche notamment une collection des matrices d'expériences fractionnaires orthogonales standard, qui s'avèrent suffisantes pour la quasi-totalité des situations industrielles. Chaque matrice est désignée par un symbole Par exemple : **L8** (2^7) signifie que l'on étudie 7 facteurs à 2 niveaux et qu'il faut réaliser 8 essais. **L18** ($2^1 \times 3^7$) signifie que l'on étudie 1 facteur à 2 niveaux et 7 facteurs à 3 niveaux et qu'il faut réaliser 18 essais.

II.7.2. Plan d'expériences de surface de réponse

II.7.2.1. Les plans composites centrés

Les plans composites centrés font appel à la méthodologie des surfaces de réponses, leur construction consiste à ajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ils sont cependant assez "gourmands" en termes de nombre d'essais par rapport à d'autres types de plans mais ce nombre reste raisonnable lorsque le nombre de facteurs étudiés est faible (entre 2 et 4). Le nombre d'expériences dans un plan composite centré est donné par la relation suivante :

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (\text{II.2})$$

Où k est le nombre de facteurs d'entrée. Un plan composite centré se décompose en somme de trois quantités :

- Un plan factoriel complet 2^k .
- Deux points en étoile par facteur qui sont positionnés sur les axes de chacun de ceux-ci à une distance α du centre du domaine, nous verrons par la suite que :

$\alpha = 4\sqrt{2^k}$. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse.

- n_0 Répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique. Dans le cas où les expériences sont des simulations numériques, le nombre de répétitions au centre du domaine expérimental est égal à 1 (pas d'erreur expérimentale). Trois types de plans composites centrés existent dans la littérature ; ils sont décrits dans les paragraphes suivants.

a. Plan composite centré ordinaire

Dans ce type de plan, chaque facteur prend 5 niveaux et le domaine expérimental est un domaine sphérique. Dans ce cas, et compte tenu de la relation de codage des facteurs, le domaine expérimental est donc inscrit dans un cercle de rayon α (voir figure II.5). Les deux axes de la figure représentent la variation de deux facteurs codés.

Ce plan est composé de trois familles de combinaisons entre les niveaux des facteurs :

- Les sommets du domaine, définis à partir des combinaisons des niveaux -1 et +1 des facteurs. Ces points représentent les traitements expérimentaux d'un plan factoriel complet. Lorsque le nombre de facteurs devient important ($k > 4$), pour que le nombre d'expériences n'augmente pas rapidement, il est possible de ne réaliser qu'une fraction régulière ou irrégulière de cet ensemble de sommets.

Pour $k = 5$ à 7 facteurs, on réalise 2^{k-1} sommets ; pour $k = 8$ et 9 facteurs, on réalise 2^{k-2} sommets.

- Les points en étoile qui se situent sur chacun des axes (deux points par axe). L'objectif ici est d'estimer les courbures de la surface de réponse. Ils sont situés à une distance α à déterminer.
- Le centre du domaine (0, 0) qui fait l'objet de répétitions dont le nombre est noté n_0 .

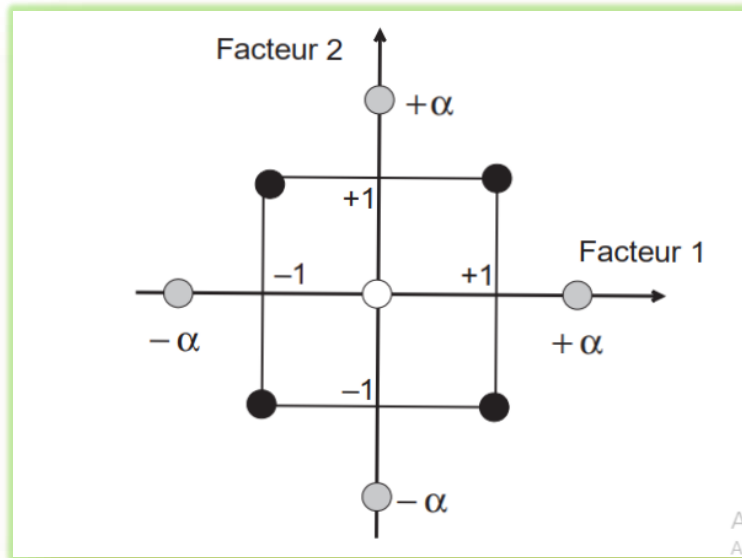


Figure II. 5: points expérimentaux d'un plan composite centré pour $k = 2$ facteurs.

Dans le cas de deux facteurs ($k = 2$), la matrice d'expériences est alors donnée dans le tableau 1. Les quatre premières expériences représentent le plan factoriel complet (combinaisons possibles des niveaux -1 et +1 de chaque facteur). Les expériences 5 à 8 représentent les points en étoile, chaque facteur prend sa valeur la plus grande du plan. Le dernier point de la matrice représente le centre du domaine (0, 0).

Tableau II. 2: matrice d'expériences d'un plan composite centré pour $k = 2$ facteurs

Plan CCC	Numéro d'expérience	X_1	X_2
Plan factoriel complet	1	-1	-1
	2	1	-1
	3	-1	1
	4	1	1
Points étoiles	5	α	0
	6	$-\alpha$	0
	7	0	α
	8	0	$-\alpha$
Point au centre du domaine	9	0	0

Après avoir construit la matrice d'expériences en variables codées, l'étape suivante consiste à construire le plan d'expériences. On doit donc établir la correspondance entre les variables codées (X_i) et les facteurs (u_i). Pour transformer linéairement un facteur en variable (et vice versa), on doit connaître deux informations.

- La valeur du facteur correspondant à la valeur au centre du domaine (0) de la variable codée ; cette grandeur est désignée par le terme “centre u_0 ”.
- L'étendue de la variation du facteur lorsque la variable codée varie d'une unité, cette grandeur est souvent désignée par le terme “pas de variation Δu ”.

La valeur minimale prise par chaque facteur u_{\min} est égal à $u_0 - \Delta u$ (-1 dans la matrice d'expériences), sa valeur maximale u_{\max} est égale à $u_0 + \Delta u$ (+1 dans la matrice d'expériences) ; si la valeur de α est plus grande que 1, on remarque que chaque facteur varie dans un nouveau domaine plus grand que l'ancien (deux nouvelles valeurs). Si ces nouvelles valeurs ne nous conviennent pas, on ajuste la valeur de Δu pour que les valeurs $-\alpha$ et $+\alpha$ représentent les bornes des facteurs choisis par l'utilisateur.

b. Détermination de la valeur de α

Pour déterminer la valeur de α , il est nécessaire de définir la matrice du modèle, la matrice d'information et la matrice de dispersion, ainsi que des critères d'optimalité comme l'iso variance par rotation et la pseudo-orthogonalité. On donne dans le tableau (II.3) la valeur de α et le nombre N de traitements expérimentaux définis par un plan composite centré permettant de vérifier simultanément les propriétés de pseudo-orthogonalité et d'iso variance par rotation.

Tableau II. 3: pseudo-orthogonalité et iso variance par rotation.

	Nombre de facteurs k			
	K=1	K=3	K=4	K=5
N_0	8	9	12	17
α	1.414	1.682	2	2.378
$N = 2^K + 2k + n_0$	16	23	36	59

c. Les plans de Box-Behnken (BB)

Box et Behnken (1960) ont introduit un type différent de plans d'expériences pour les modèles du deuxième ordre qui permettent l'estimation de certaines interactions.

Définition : Un plan de Box et Behnken est une fraction d'un plan factoriel complet 3^m qui permet d'estimer un modèle du second ordre.

Un plan de Box-Behnken pour m facteurs est composé d'un plan en blocs incomplets équilibrés suivant un arrangement particulier de m traitements dans b blocs de taille k , et un plan factoriel à deux niveaux, complété par des points au centre. Dans chaque bloc, un certain nombre de facteurs est utilisé dont les combinaisons constituent le plan factoriel, pendant que les autres facteurs sont maintenus à leurs valeurs centrales. Dans ce plan les points expérimentaux ne se trouvent pas aux sommets du cube ou hyper cube mais ils sont aux milieux des arêtes ou au centre des faces ou au centre des cubes, donc sur une sphère ou hyper sphère de rayon constant R , le tableau suivant donne certaines valeurs de R .

M	3	4	5	6	7
R	$m\sqrt{2}$			$m\sqrt{3}$	

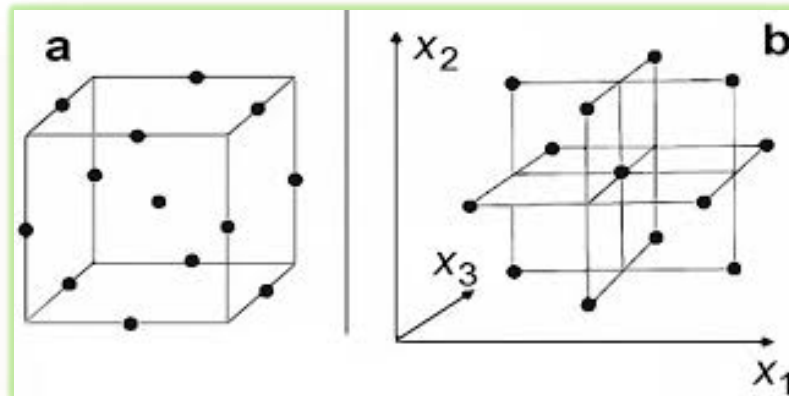


Figure II. 6: Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs.

Remarque 1 :

Les plans de Box-Behnken pour 3 facteurs impliquent trois blocs, dans chacun, un plan factoriel 2^2 qui est représenté par chaque paire de traitement pendant que le troisième facteur reste fixé à 0. Donc le plan de Box-Behnken de 3 facteurs possède 15 essais (12 arêtes et 3 points au centre). En conséquence, les plans de Box-Behnken pour $m = 3$ sont donnés par :

X₁	X₂	X₃
±b	±b	0
±b	0	±b
0	±b	±b
0	0	0

Dont la représentation graphique est :

Il en est de même pour un nombre de facteurs $m = 4$ et $m = 5$. Dans le cas où $m = 6$ et $m = 7$, les BB sont construits à partir d'un plan d'expérience 2^3 avec les $(m-3)$ autres facteurs fixés à la valeur 0 et répartis suivant un plan en blocs incomplets équilibrés pour $m = 7$ et un plan en blocs incomplets partiellement équilibrés pour $m = 6$, ce qui donne dans ce cas-là, un plan d'expériences qui n'est pas symétrique pour tous les facteurs.

Remarque 2 :

- Il n'existe pas de plan de Box-Behnken à deux facteurs. Si on peut l'écrire, il ne serait pas un plan très utile.
- Les plans de Box-Behnken sont disponibles pour les modèles avec 3 - 12 et 16 facteurs.

II.8. Des plans d'expériences classiques aux plans d'expériences numériques

La différence fondamentale entre les plans d'expériences numériques et les plans classiques développés en laboratoire (expériences physiques) réside dans le fait qu'en laboratoire, on suppose la présence d'erreurs aléatoires dues aux mesures, aux conditions expérimentales, etc. Ce qui n'est en principe pas le cas avec une expérience numérique (simulation déterministe). Nous n'envisageons pas ici le cas des simulateurs bruités, à savoir des simulations entachées de bruit de simulation (Monte-Carlo ou autre). La présence d'une racine aléatoire dans les simulateurs peut aussi induire des différences au niveau des réponses. Nous n'envisageons pas ce cas dans ce travail.

Remarque :

Il convient de prendre conscience que la répétition d'une simulation, à variables de contrôle et d'environnement fixées, pour lesquelles on ferait varier les variables de simulation donnerait des résultats différents. Cette pratique se rapprocherait donc de la répétition d'expériences et générerait un bruit de nature numérique. A variables fixées, on suppose alors que le simulateur reste inchangé au fil du temps. Aussi, lorsqu'un plan est lancé séquentiellement et que le code est écrit et exécuté par une tierce personne, il peut être intéressant de dupliquer un des points dans le but de vérifier que celui-ci est resté inchangé. Dans le cas général, les techniques des plans classiques telles que la randomisation et la répétabilité ne sont plus forcément de mise. En effet, les plans classiques ont tendance à positionner les points aux bords du domaine pour prendre en compte la variation aléatoire et offrir une tendance plus fiable en présence d'erreurs de mesures ; on pense par exemple aux plans Box Behnken, plans composites, etc. La différence entre les approches classiques et numériques est dans la nature de l'erreur du modèle associé aux paramètres du plan. Avec l'approche classique, l'erreur dépend d'un bruit,

i.e. de l'erreur de mesure, tandis qu'en numérique, c'est une erreur liée au modèle et non à l'expérimentation. Une autre différence réside entre les modèles paramétriques et non paramétriques. Il existe cependant des attributs communs entre ces deux types de plans.

Dans les deux cas, l'objectif principal est d'extraire le plus d'information possible avec un nombre d'expériences limité. Une autre caractéristique est que l'échantillonnage des points se fait indépendamment et donc se prête à une évaluation désordonnée. En numérique, il sera donc possible de faire des calculs parallèles ou bien d'utiliser des multiprocesseurs tout comme en expérimentation classique où il est possible de faire plusieurs manipulations en parallèle.[13]

II.8. Conclusion

Le deuxième chapitre donne une introduction complète sur les plans d'expériences, mettant en lumière leur importance dans la recherche scientifique et industrielle. Le chapitre souligne la relation entre la variable d'intérêt et les variables, ainsi que la nécessité de suivre des règles mathématiques précises pour obtenir des informations précises avec le moins d'expériences possible. Les concepts de base tels que l'espace expérimental, les variables continues, discrètes, ordonnables et booléennes sont clairement exposés. De plus, les similitudes entre les plans d'expériences classiques et numériques sont mises en évidence, mettant en lumière les différences dans la nature de l'erreur du modèle associée aux paramètres du plan.

Il présente également des attributs communs entre les deux types de plans, notamment l'objectif principal d'extraire le plus d'informations possible avec un nombre limité d'expérience.

A decorative border resembling a scroll or ribbon, with a vertical strip on the left and horizontal strips at the top and bottom, all featuring rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre III :
Méthodes de prédiction
utilisées

Chapitre III : Méthodes de prédiction utilisées

III.1 Introduction à la planification expérimentale

L'ensemble des techniques statistiques utilisées pour analyser le comportement d'un système expérimental vise à comprendre et à améliorer son fonctionnement. Dans le secteur industriel, notamment, l'emploi des plans expérimentaux est en constante évolution et peut être utilisé comme outil d'amélioration des procédés de production et de contrôle, comme dans le cas qui nous intéresse, ainsi que pour la formulation des produits. La planification expérimentale implique d'imposer des variations spécifiques aux entrées du problème et de mesurer les variations qui en découlent pour déduire les relations de causes à effets. On peut donc la considérer comme un système qui permet d'exprimer une ou plusieurs réponses en fonction de plusieurs facteurs. En général, les réponses de ce système se composent de variables qui seront utilisées pour optimiser. On nomme facteurs ces variables d'entrée du système qui doivent fluctuer indépendamment les unes des autres pendant l'expérimentation.

III.2. La méthodologie des surfaces de réponse

III.2.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants. L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.[14]

III.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

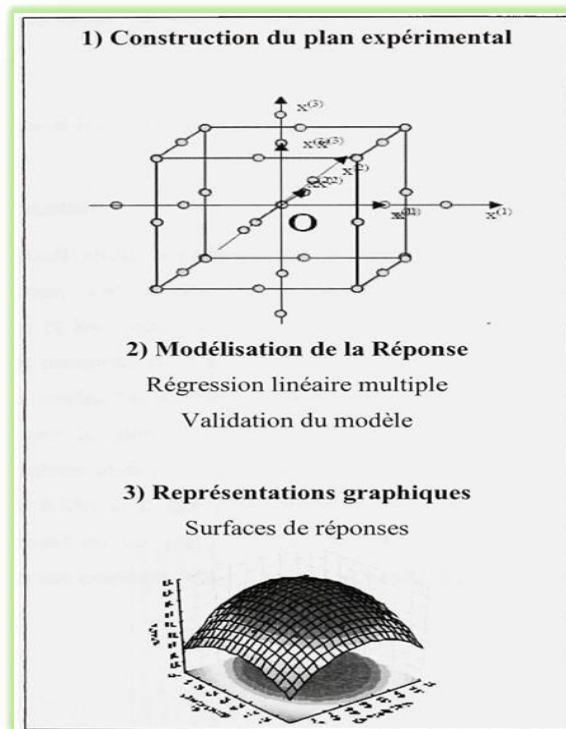


Figure III. 1: Etapes de la méthodologie de surface de réponse

(Figure III.1) schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses. 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 présumé 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

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_k à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire [8]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{III.1})$$

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_p) + \varepsilon \quad (\text{III.2})$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme. Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme [8] :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (\text{III.3})$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec d variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{III.4})$$

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 conceptions 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 :

$$X_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{[R_{max} + R_{min}]} \quad (III.5)$$

X_i : variables de prédiction centrée réduite (codée).

R_i : Variable courante (naturelle, réelle).

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle équation (2.4), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = X_b \quad (III.6)$$

Où:

$\hat{y} = [\hat{y}_1 + \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: Estimation de la vectrice réponse des n réponses observées.

X : la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception

b est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SSE définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (III.7)$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

c. Validation des modèles :

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- le coefficient de détermination statistique : R^2
- le coefficient de détermination ajusté : R^2_{adj} ;
- l'erreur RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{III.8})$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (\text{III.9})$$

Où :

$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$: Est la moyenne de réponses.

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (\text{III.10})$$

Le coefficient de détermination ajusté R^2_{adj} est une mesure améliorée de R^2 . Contrairement à R^2 , R^2_{adj} n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (\text{III.11})$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_E}{(n-p)}} \quad (\text{III.12}) \quad [15]$$

III.2.3 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.

III.2.3.1 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.

III.2.3.2 Méthodes numériques

A. 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 intéressantes.[16]

III.3. Réseaux de neurones artificiels

III.3.1 Introduction aux réseaux de neurones artificiels

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) s'est étendue dans des domaines très divers de l'industrie et des services. En géophysique les RNA ont été utilisés pour plusieurs méthodes, par exemples pour détecter les premières arrivées d'ondes sismiques (Murat and Rudman, 1992; McCormack et al., 1993); classifier les différents signaux par l'inversion (Roth and Tarantola, 1994; Langer et al., 1996); transformer un problème de déconvolution sismique dans un réseau de Hopfield afin de réduire le temps

de calcul (Wang and Mendal, 1992); pour caractériser la distribution de résistivité du sous-sol par l'inversion de données magnétotelluriques (Zhang and Paulson, 1997) et électromagnétiques (Poulton et al., 1992). Ils sont particulièrement utilisés pour résoudre des problèmes de classification, de prédiction, de reconnaissance des formes, de catégorisation, de mémoire associative et d'optimisation (Drew et Monson, 2000). Par l'entraînement d'un système non linéaire de multiples variables, les RNA peuvent prédire la variable indépendante (Huang et al., 1996). Par conséquent, les RNA constituent une technique d'approximation de systèmes complexes, qui sont difficiles à modéliser par les méthodes statistiques classiques. Puisqu'il existe un grand nombre de structures des réseaux de neurones artificiels, il est nécessaire de faire un résumé de leurs caractéristiques afin de choisir un réseau de neurone approprié au développement de ce mémoire. [17]

III.2. Notions de base sur les réseaux de neurones artificiels

III.2.1 Du Neurone biologique au neurone artificiel

Un neurone biologique est une cellule vivante consacrée au traitement de l'information (figure III.2). De son corps cellulaire ou soma, rayonnent de nombreuses dendrites (jusqu'à 100000) qui reçoivent des signaux provenant d'autres neurones ou cellules sensorielles. Ces signaux sont traités par le neurone qui transmet à son tour un signal, si certaines conditions sont réunies le long de son axone à d'autres neurones ou à de cellules effectrices (cellule musculaire par exemple) : On dit que le neurone est alors activé.

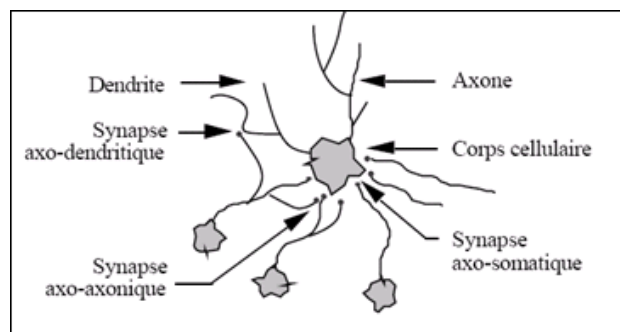


Figure III. 2: Un neurone avec son arborisation dendritique

La figure III.2 montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associée un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. A chaque connexion est associé un poids.

Le modèle général du neurone artificiel est composé des éléments suivants :

- Une ou plusieurs entrées pondérées,
- Un sommateur,
- Une fonction de transfert,
- Une sortie.

Avec :

- x_i est l'entrée i ,
- w_{ij} est la valeur du poids synaptique reliant l'entrée i au neurone j ,
- Σ est la somme pondérée des entrées x_i ,
- $F()$ est la fonction de transfert,
- s est la sortie du neurone.

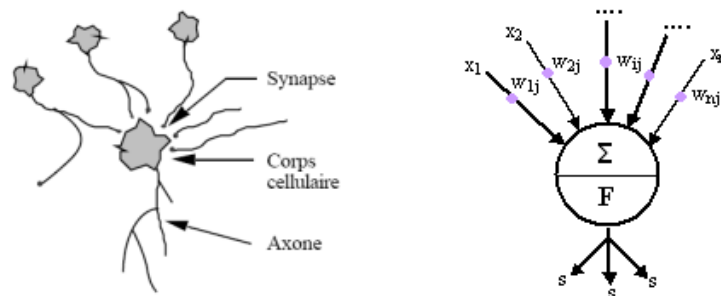


Figure III. 3: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

III.2.2 Les réseaux de neurones

Définition : Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des processeurs élémentaires fortement connectés fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

De point de vue modélisation mathématique, on peut définir un réseau de neurone artificiel par les quatre éléments suivants :

- La nature des entrées et des sorties : Elles peuvent être :
- Binaire : (-1; +1) ou (0,1)
- Réelles.
- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées : Elle peut être :
- Booléenne

- Linaire
- Affine
- Polynomiale de degré supérieur à deux
- La fonction d'activation du neurone qui définit son état en fonction de son entrée totale :

Elle peut être :

- Une fonction binaire à seuil ; dans ce cas on s'arrange pour que la forme de la fonction soit telle qu'on puisse utiliser la fonction de Heaviside (figure III.4.a) ou la fonction signe (Figure III.4.b) :
- Une fonction linéaire à seuil (figure III.5.a) : Soit SATUR la fonction à seuil
- Une fonction sigmoïde (figure III.5.b).
- La fonction de sortie qui calcule la sortie du réseau en fonction de son état d'activation ; en général cette fonction est considérée comme la fonction identité.

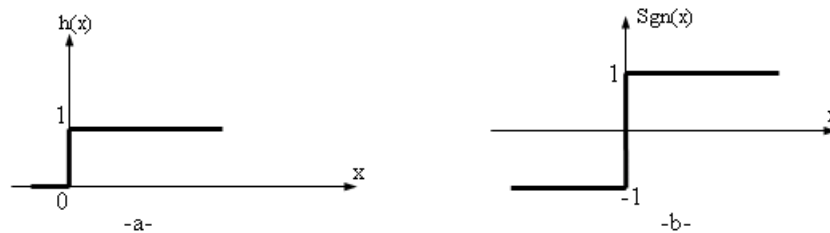


Figure III. 4: a-Fonction de Heaviside, b-Fonction signe

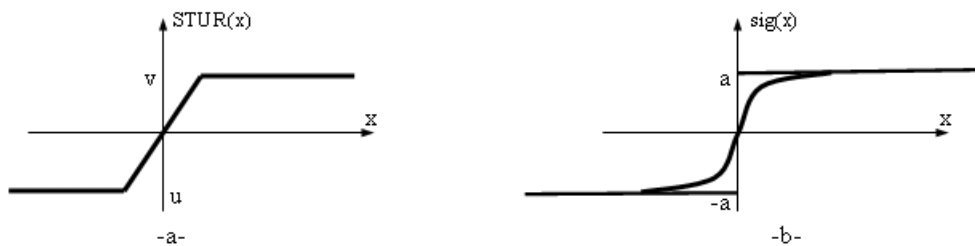


Figure III. 5: a-Fonction linéaire à seuil, b-Fonction sigmoïde

On distingue deux types de réseaux de neurones : Les réseaux non bouclés et les réseaux bouclés.

III.2.2.1 Réseau de neurones non bouclé

Un réseau de neurones non bouclé est donc représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans "retour

en arrière" [Bis1995]. On constate que le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. En effet, si on se déplace dans ce type de réseau à partir d'un neurone quelconque en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ. Les neurones qui effectuent le dernier calcul de la composition de fonctions sont les neurones de sortie. Ceux qui effectuent des calculs intermédiaires sont les neurones cachés (figure III.6).

Les réseaux non bouclés à couche sont structurés tel que les neurones qui appartiennent à une même couche ne soient pas connectés entre eux, chacune des couches recevant des signaux de la couche précédente, et transmettant le résultat de ses traitements à la couche suivante. Les deux couches extrêmes correspondent à la couche d'entrée qui reçoit ses entrées du milieu extérieur d'une part, et à la couche de sortie qui fournit le résultat des traitements effectués d'autre part. Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées, leur nombre est variable.

Les réseaux de neurones non bouclés à couches dont les neurones cachés ont une fonction d'activation sigmoïde, sont souvent appelés des perceptrons multicouches.

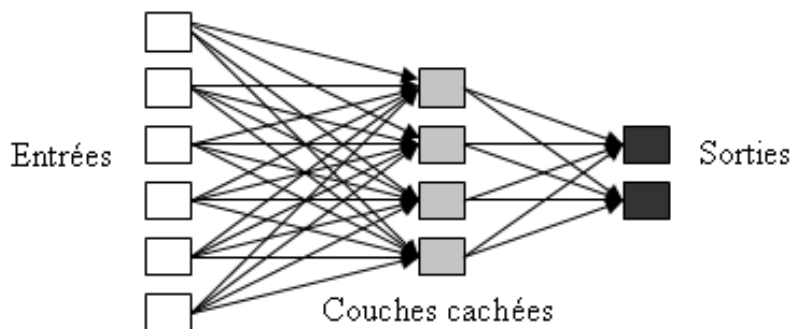


Figure III. 6: Structure d'un réseau de neurones non bouclé.

III.2.2.2 Réseau de neurones bouclé (ou récurrent)

Un réseau de neurones bouclé est schématisé par un graphe des connexions qui est cyclique.

Lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de "cycle"). Ainsi, un retard entier multiple de l'unité de temps choisie est attaché à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arrête de son graphe). Une grandeur à un instant donné ne peut pas être fonction de sa propre valeur au même instant. Tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul.

La figure III.7 représente un exemple de réseau de neurones bouclé. Les chiffres dans les carrés indiquent le retard attaché à chaque connexion, exprimé en multiple de l'unité de

temps. Ce réseau contient un cycle, qui part du neurone 3 et revient à celui-ci en passant par le neurone 4. La connexion de 4 vers 3 ayant un retard d'une unité de temps. [18] [19]

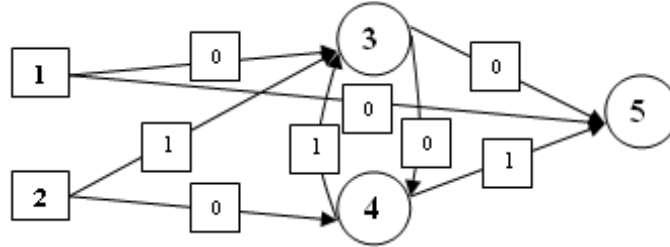


Figure III. 7: Un réseau de neurones bouclé à deux entrées

III.3. Types de modèles de neurones :

III.3.1 Modèle d'un neurone à entrées simple :

Le scalaire d'entrée p est multiplié par le scalaire poids w pour former wp , un des termes de la somme. L'autre entrée, 1, est multipliée par le biais b , puis introduite dans la somme. La somme de sortie n , souvent dénommée entrée du réseau, passe dans la fonction de transfert f qui produit le scalaire de sortie à voir figure III.8.

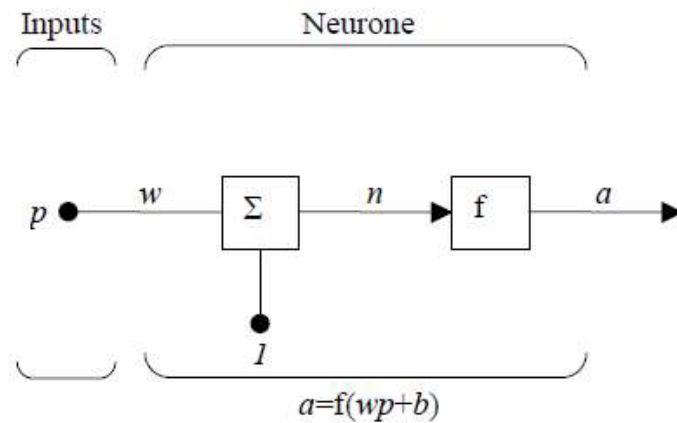


Figure III. 8: Neurone à simple entrée

Le neurone de sortie est calculé par l'équation :

$$a=f (wp+b) \tag{III.13}$$

Si par exemple

$$w=3$$

$$p=2 \quad \Rightarrow \quad a=f(3*2-1.5)=f(4.5) \quad (III.14)$$

$$b=-1.5$$

La sortie dépend de la fonction de transfert choisie. Le biais est quasi similaire au poids sauf qu'il possède une valeur d'entrée constante égale à 1. Il peut cependant être omis selon les conditions choisies par l'utilisateur.

A noter que w et b sont des paramètres scalaires ajustables du neurone. Typiquement, la fonction de transfert f est choisie par l'utilisateur et les paramètres w et b sont, ajustés par des lois d'apprentissage de façon à adapter le neurone entrée/sortie à un but spécifique.

III.3.2. Neurone à entrées multiples :

Typiquement, un neurone possède plus d'une entrée, comme le montre la figure ci-dessous.

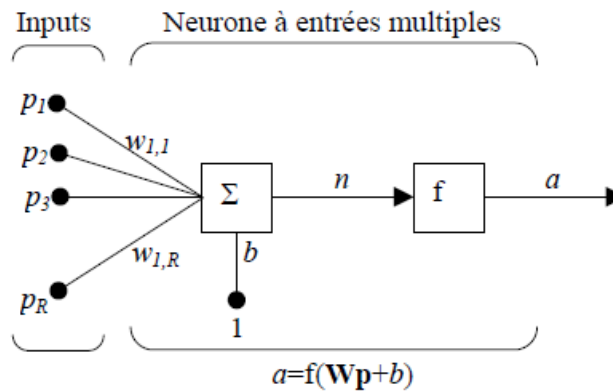


Figure III. 9: Neurone à entrées multiples

Les entrées individuelles P_1, P_2, \dots, P_r sont pondérées par les éléments $W_{1,1}, W_{1,2}, \dots, W_{1,R}$ de la matrice W .

Le neurone possède un biais b , sommé avec les entrées pondérées pour former l'entrée n du réseau.

$$n = W_{1,1} * P_1 + W_{1,2} * P_2 + \dots + W_{1,R} * P_R + b \quad (III.15)$$

L'équation (III.5) peut être formulée sous forme matricielle :

$$\mathbf{n} = \mathbf{Wp} + \mathbf{b} \quad (III.16)[20]$$

III.4. Apprentissage des réseaux de neurones

Le point crucial du développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Il s'agit d'une procédure adaptative par laquelle les connexions des neurones sont ajustées face à une source d'information.

Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Les poids sont initialisés avec des valeurs aléatoires. Puis des exemples expérimentaux représentatifs du fonctionnement du procédé dans un domaine donné, sont présentés au réseau de neurones. Ces exemples sont constitués de couples expérimentaux de vecteurs d'entrée et de sortie. Une méthode d'optimisation modifie les poids au fur et à mesure des itérations pendant lesquelles on présente la totalité des exemples, afin de minimiser l'écart entre les sorties calculées et les sorties expérimentales. Afin d'éviter les problèmes de surapprentissage, la base d'exemples est divisée en deux parties : la base d'apprentissage et la base de test. L'optimisation des poids se fait sur la base d'apprentissage, mais les poids retenus sont ceux pour lesquels l'erreur obtenue sur la base de test est la plus faible. En effet, si les poids sont optimisés sur tous les exemples de l'apprentissage, on obtient une précision très satisfaisante sur ces exemples mais on risque de ne pas pouvoir généraliser le modèle à données nouvelles. A partir d'un certain nombre d'itérations, le réseau ne cherche plus l'allure générale de la relation entre les entrées et les sorties du système, mais s'approche trop près des points et « apprend » le bruit.

Sur la figure III.10 ci-dessous, on peut observer qu'au début de l'apprentissage, pour les premières itérations, l'erreur sur la base d'apprentissage est grande et peut légèrement augmenter étant donné que les poids initiaux sont choisis aléatoirement. Ensuite, cette erreur diminue avec le nombre d'itérations. L'erreur sur la base de test diminue puis augmente à partir d'un certain nombre d'itérations. Les poids retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test.

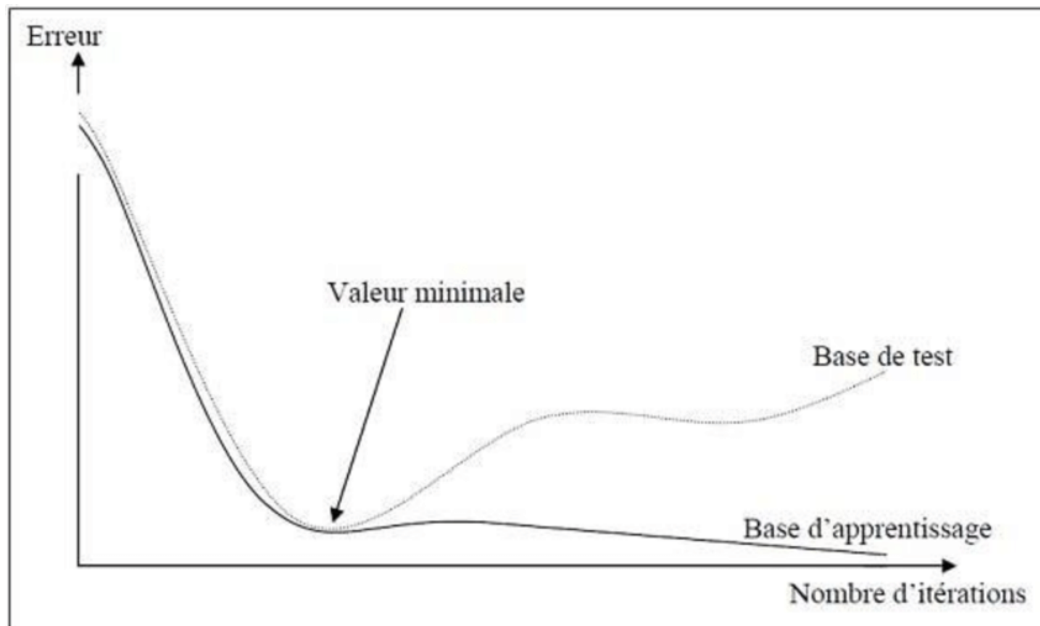


Figure III. 10: Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations

III.4.1. Type d'apprentissage

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories : les règles d'apprentissage supervisé, non supervisé, et renforcé. Mais l'objectif fondamental de l'apprentissage reste le même : soit la classification, l'approximation de fonction ou encore la prévision. Dans l'optique de la prévision, l'apprentissage consiste à extraire des régularités (à partir des exemples) qui peuvent être transférées à de nouveaux exemples.

III.4.1.1. Apprentissage supervisé

Un apprentissage est dit supervisé lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif. Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base d'apprentissage, constituée de plusieurs exemples de type entrées-sorties (les entrées du réseau et les sorties désirées ou encore les solutions souhaitées pour l'ensemble des sorties du réseau).

La procédure usuelle dans le cadre de la prévision est l'apprentissage supervisé (ou à partir d'exemples) qui consiste à associer une réponse spécifique désirée à chaque signal d'entrée. La modification des poids s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur (ou l'écart) entre les sorties du réseau (ou résultats calculés) et les résultats désirés soient minimisés.

Cet apprentissage n'est possible que si un large jeu de données est disponible et si les solutions sont connues pour les exemples de la base d'apprentissage.

III.4.1.2 Apprentissage renforcé

L'apprentissage renforcé est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade (ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations.

Les algorithmes utilisant la procédure d'apprentissage renforcé sont surtout utilisés dans le domaine des systèmes de contrôle.

III.4.1.3 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données. Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau.

Qu'est-ce que le réseau apprend exactement dans ce cas ? L'apprentissage consiste à détecter les similarités et les différences dans l'ensemble d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers les représentations qui capturent les régularités statistiques des données. Ce type d'apprentissage est également dit compétitif et (ou) coopératif. L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto organisation. L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle.

III.4.2. Algorithme d'apprentissage

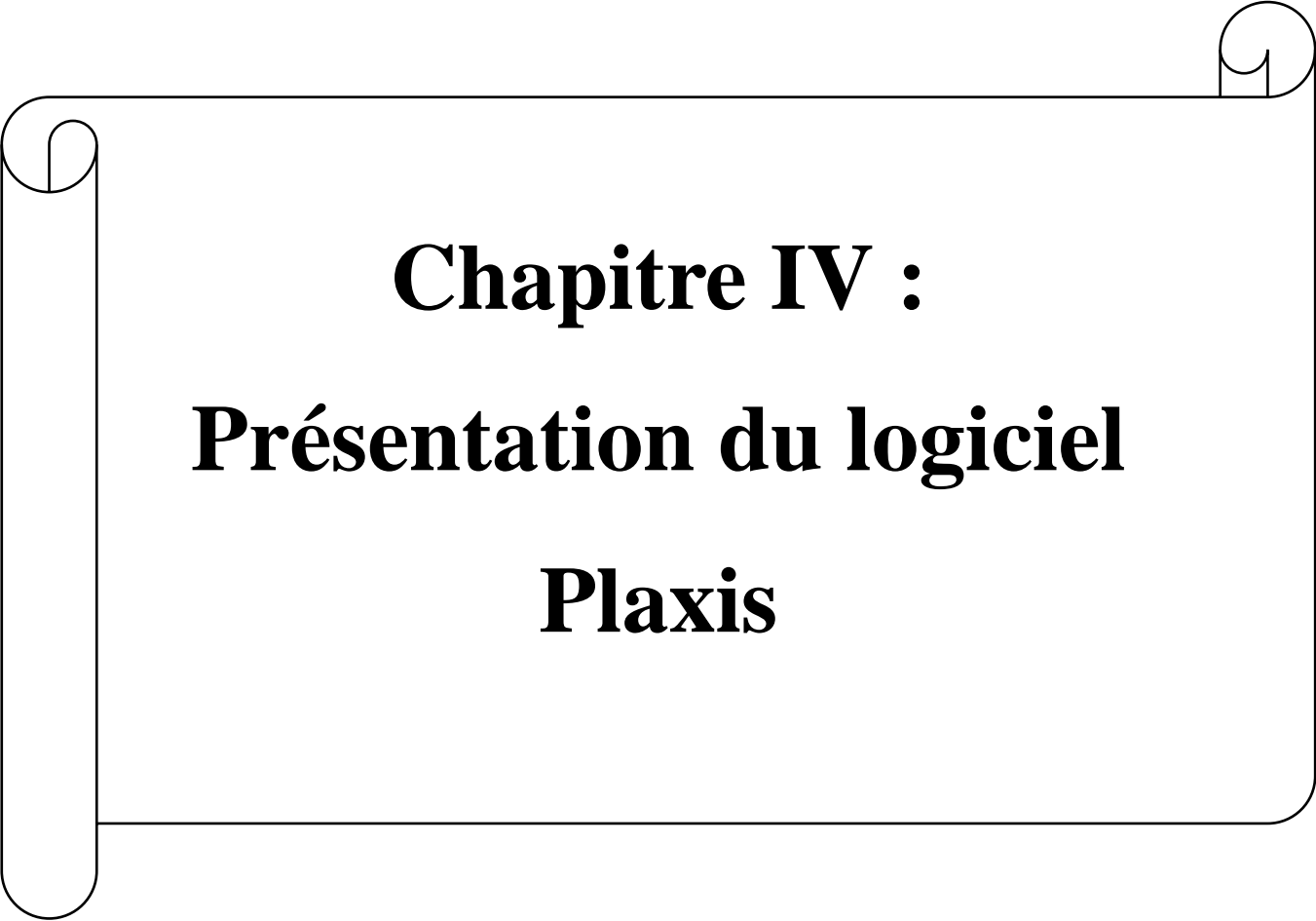
L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids n de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note : l'algorithme de rétropropagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS etc...

L'algorithme de rétropropagation (ARP) ou de propagation arrière « back propagation » est l'exemple d'apprentissage supervisé le plus utilisé à cause de l'écho médiatique de certaines applications spectaculaires telles que la démonstration de Sejnowski et Rosenberg dans laquelle l'ARP est utilisé dans un système qui apprend à lire un texte. Un autre succès fut la prédiction des cours du marché boursier et plus récemment la détection de la fraude dans les opérations par cartes de crédit.

La technique de rétropropagation du gradient (Back propagation en anglais) est une méthode qui permet de calculer le gradient de l'erreur pour chaque neurone du réseau, de la dernière couche vers la première. L'historique des publications montre que l'ARP a été découvert indépendamment par différents auteurs mais sous différentes appellations. Le principe de la rétropropagation peut être décrit en trois étapes fondamentales : acheminement de l'information à travers le réseau ; rétropropagation des sensibilités et calcul du gradient ; ajustement des paramètres par la règle du gradient approximé. Il est important de noter que l'ARP souffre des limitations inhérentes à la technique du gradient à cause du risque d'être piégé dans un minimum local. Il suffit que les gradients ou leurs dérivées soient nuls pour que le réseau se retrouve bloqué dans un minimum local.

Ajoutons à cela la lenteur de convergence surtout lorsqu'on traite des réseaux de grande taille (c'est à dire pour lesquels le nombre de poids de connexion à déterminer est important).[21]

A decorative border resembling a scroll or ribbon, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a small circular detail at the top-left and top-right corners respectively.

Chapitre IV :
Présentation du logiciel
Plaxis

Chapitre IV : Présentation du logiciel Plaxis

IV.1 Présentation de la méthode des éléments finis

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

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

La méthode des éléments finis est donc une méthode mathématique qui permet la résolution d'équations différentielles. Elle a été développée dans les années 60 et permet de décrire le comportement global d'une structure complexe à partir de fonctions simples et paramétrées définies pour chaque zone du modèle. Un maillage du domaine à étudier permet de définir des zones élémentaires appelées éléments. Ceux-ci sont reliés entre eux en différents points dénommés nœuds.

Cette dernière elle consiste à résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée. Elle comporte des conditions aux limites permettant d'assurer l'existence et l'unicité de la solution. La discrétisation du problème consiste à vérifier les équations de base en un nombre limité de points (nœuds). Ainsi, on obtient une formulation algébrique du problème initial. La solution algébrique obtenue correspond aux composantes de la solution approchée du problème pour les éléments. [23]

IV.1.1 Le calcul par la méthode des éléments finis

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes. [22]

➤ Elle nécessite

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

✓Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.

✓L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

➤**Elle permet :**

✓D'effectuer les calculs d'écoulement ;

✓De simuler toutes les phases de travaux ;

✓De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;

✓De calculer un coefficient de sécurité.

Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :

✓Les déplacements des ouvrages ;

✓Les sollicitations internes des ouvrages ;

✓Les efforts dans les butons ou tirants.

Et pour le sol :

✓Les déplacements du sol ;

✓Les déformations du sol ;

✓Les contraintes totales et effectives dans le sol ;

✓ Les pressions interstitielles ;

✓ De calculer un coefficient de sécurité.

IV.2 Présentation du code de calcul Plaxis

Le logiciel Plaxis V8 est un programme de calcul basé sur la méthode des éléments finis spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour les différents types d'applications géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques.

L'algorithme général du code Plaxis consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les champs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol.

Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer

rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

L'interface d'utilisation du programme Plaxis V8 se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

Plaxis version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par les éléments finis en deux ou trois dimensions. Les modèles d'éléments finis en deux dimensions « 2D » peuvent être soit aux déformations planes (Plane strain), soit axisymétriques en trois dimensions « 3D » (Axisymétric).

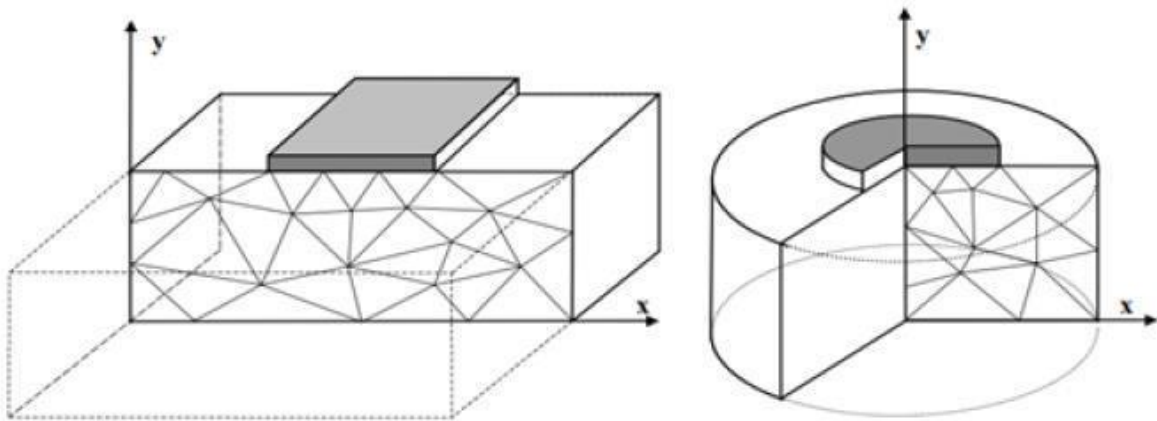


Figure IV. 1: Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique [26]

IV.2.1 Les sous-programmes de Plaxis

L'interface d'utilisation de Plaxis se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

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



Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

b. Le programme de calcul (Calculations)



Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

c. Le programme de résultats (Output)



Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit

choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.



d. Le programme courbe (Curves)

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

IV.2.2 Les modèles de comportement utilisés dans le Plaxis

La méthode des éléments finis qui utilise le code Plaxis comprend des lois de comportement à différents niveaux de complexité depuis l'élasticité linéaire jusqu'à un modèle permettant de tenir compte de la raideur du sol sous très petites déformations.

Les détails de chaque modèle peuvent être trouvés dans le guide d'utilisateurs de Plaxis. [23]

IV.2.2.1 Modèle élastique linéaire

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young E , et le coefficient de Poisson ν . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol (par exemple le cas du parement en bloc en béton). [23]

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν . L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu_u = 0,5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. La relation entre le module d'Young E et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{IV.1}) ; \quad K = \frac{E}{3(1+\nu)} \quad (\text{IV.2}) \quad ; \quad E_{oed} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{IV.3})$$

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

IV.2.2.2 Modèle élastique parfaitement plastique Mohr-Coulomb

Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont :

- Le module d'Young E ,
- Le coefficient de Poisson ν ,
- La cohésion c ,
- L'angle de frottement ϕ ,
- L'angle de dilatance ψ .

Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données. Le modèle à critère de rupture de Mohr-Coulomb, est le plus couramment utilisé en mécanique des sols. Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élastique-parfaitement plastique (sans écoulement). Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par : $\tau = \sigma_n \tan \phi + c$ (IV.4)

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, c et ϕ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure IV.2).

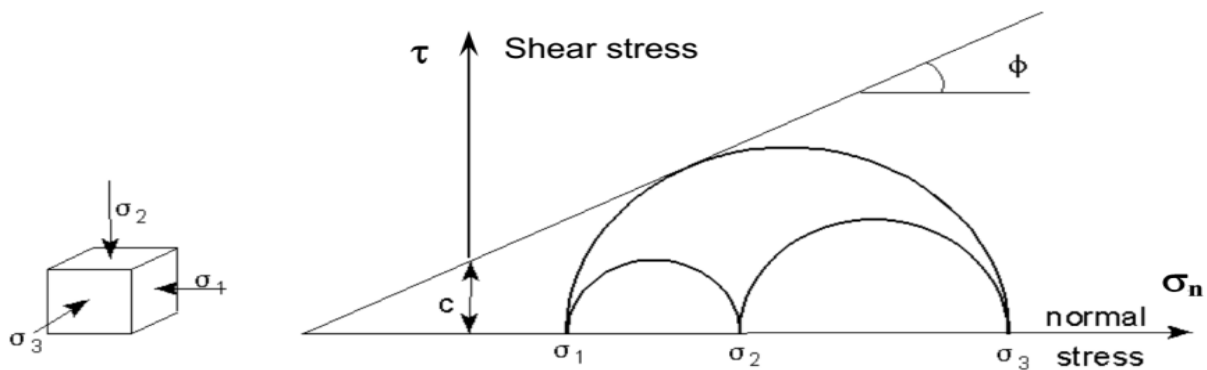


Figure IV. 2: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Afin de comprendre la signification des cinq paramètres fondamentaux du modèle, considérons des courbes contraintes-déformations classiques comme celles obtenues à partir d'essais triaxiaux drainés (figure IV.3).

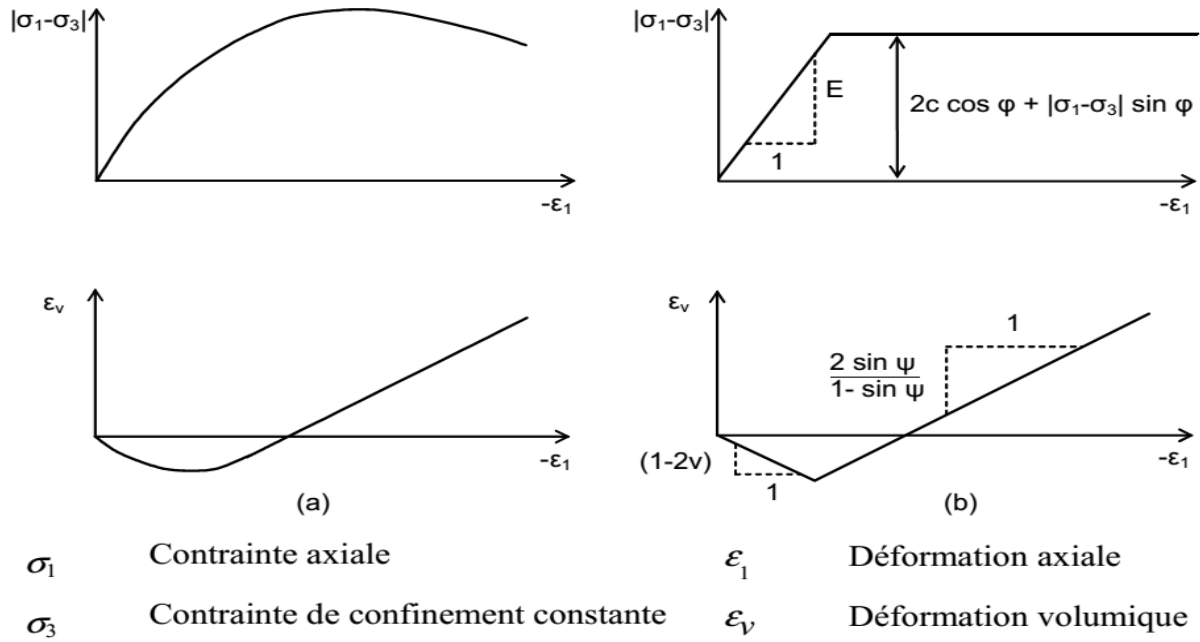


Figure IV. 3: Résultats d'essais triaxiaux standards (a) et modèle élasto-plastique (b)
(Brinkgreve et al., 2011)

IV .2.2.3 Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model)

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique formulé dans le cadre de la plasticité avec écouissage en cisaillement. De plus, ce compactage irréversible d'un sol sous son premier chargement en compression. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graviers, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons.[24]

IV.2.2.4 Modèle pour les sols mous (Soft Soil model)

C'est un modèle de type Cam-Clay qui permet de simuler le comportement de sols mous comme des argiles normalement consolidées. Ce modèle s'applique très bien aux situations où la consolidation primaire est prépondérante [24]

IV.3 Les éléments de la modélisation

IV.3.1 Modélisation de sol

L'utilisateur de Plaxis doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut de Plaxis est le triangle à 15 nœuds, il fournit des interpolations de quatrième ordre pour les déplacements. La matrice de rigidité des éléments est évaluée par l'intégration numérique en utilisant en

total douze points de Gauss (points de contrainte). Pour les triangles à 6 nœuds, l'interpolation est du second ordre, et l'intégration nécessite trois points de contraintes (Figure IV.4) [25]

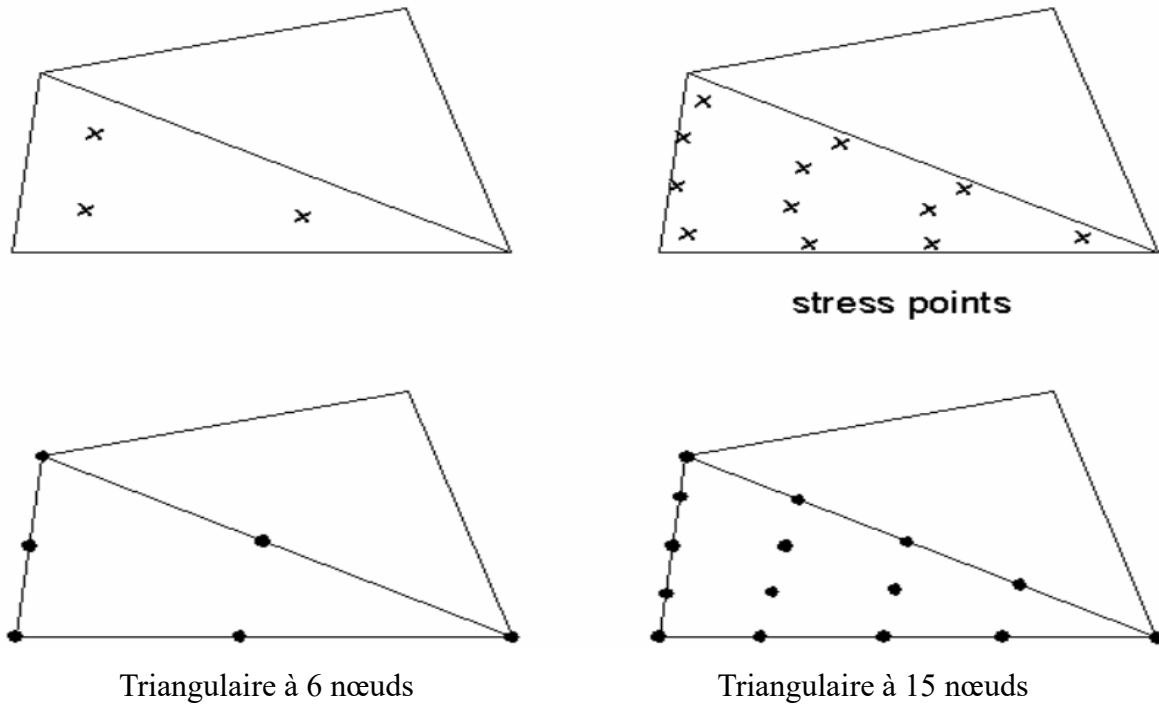


Figure IV. 4: Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments du sol

Dans cette étude, la masse de sol est modélisé par un maillage en éléments triangulaires à 15 nœuds comme montré sur la figure IV.4. Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui à produit des résultats en contraintes de haute qualité, sur différents problèmes. L'utilisation des triangles à 15 nœuds implique une consommation de mémoire assez élevée, quoique les calculs et la manipulation soient donc un peu ralentis.

IV.3.2 Plaques

Le logiciel Plaxis offre la possibilité de modéliser des éléments de structure tels que des fondations en béton armé, des murs, des blocs en béton, des voiles de soutènement, des coffrages, ...etc. par l'élément " Plate ". Ces éléments peuvent suivre des rhéologies élastiques et élasto-plastiques. Dans le cas d'une élasto-plasticité, le projeteur doit rentrer le moment de plastification de la poutre préalablement calculé. Dans les modélisations réalisées, nous n'avons considéré qu'un comportement élastique. Les données demandées par le logiciel pour la modélisation des blocs en béton sont les suivantes :

➤ la valeur **EA** égale au produit de la section du bloc modulaire ($b \times h$ dans le cas d'une section rectangulaire) et du module d'élasticité du matériau constitutif ces blocs,

➤ la valeur **EI** égale au produit du second moment d'inertie ($bh^3/12$ dans le cas d'une section rectangulaire) et du module d'élasticité du matériau constitutif ces blocs. [23]

A partir de ces deux paramètres, l'épaisseur équivalente de la plaque est calculée à partir de

l'équation :

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \text{ (IV.1)}$$

IV.3.3 Géogrilles

Les géogrilles sont des éléments élancés possédant une rigidité normale mais aucune rigidité de flexion. Les géogrilles ne peuvent résister qu'à des efforts de traction et non à des efforts de compression. Ces éléments sont principalement utilisés pour modéliser des renforcements de sol. Les nappes géogrilles sont modélisées par un élément de structure appelé "geogrid". Cet élément est régi par un comportement élastique parfaitement plastique, l'élément est caractérisé par sa rigidité axiale **EA** (ou le module de rigidité **J**) et la tension interne **N**. [23]

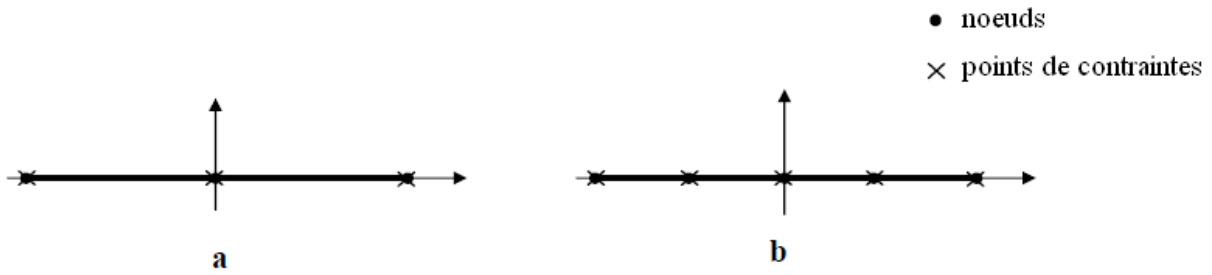


Figure IV. 5: Position des nœuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 nœuds et à 5 nœuds

IV.3.4 Interfaces

Les interfaces sont utilisées pour modéliser les interactions entre les structures et le sol. Les interfaces sont composées d'éléments "Interface". La figure IV.6 montre comment les éléments d'interface sont connectés aux éléments de sol. Si les éléments de sol à 6 nœuds sont utilisés, les éléments d'interface correspondant sont définis par trois paires de nœuds, alors que pour les éléments de sols à 15 nœuds, les éléments d'interface sont définis par cinq paires de nœuds. Sur la figure, les éléments d'interface sont montrés avec une épaisseur finie, mais dans la formulation des éléments finis, les coordonnées de chaque paire de nœuds sont identiques, ce qui signifie que les éléments ont une épaisseur nulle. Chaque interface à une "épaisseur virtuelle" qui lui est assignée ; c'est une dimension imaginaire utilisée pour obtenir les propriétés du matériau de l'interface. Cette épaisseur virtuelle est définie comme le produit du facteur d'épaisseur virtuelle (Virtual thickness factor) par la taille moyenne de l'élément. La taille moyenne de l'élément est déterminée par le réglage de la précision du maillage. La valeur par défaut de Virtual thickness factor est de 0.1. Cette valeur peut être changée en

double cliquant sur la ligne géométrique et en sélectionnant l'interface dans la boîte de dialogue. Toutefois, des précautions doivent être prises en changeant le facteur par défaut. Cependant, si des éléments d'interface sont sujets à des contraintes très importantes, il peut être nécessaire de réduire l'épaisseur virtuelle.[22]

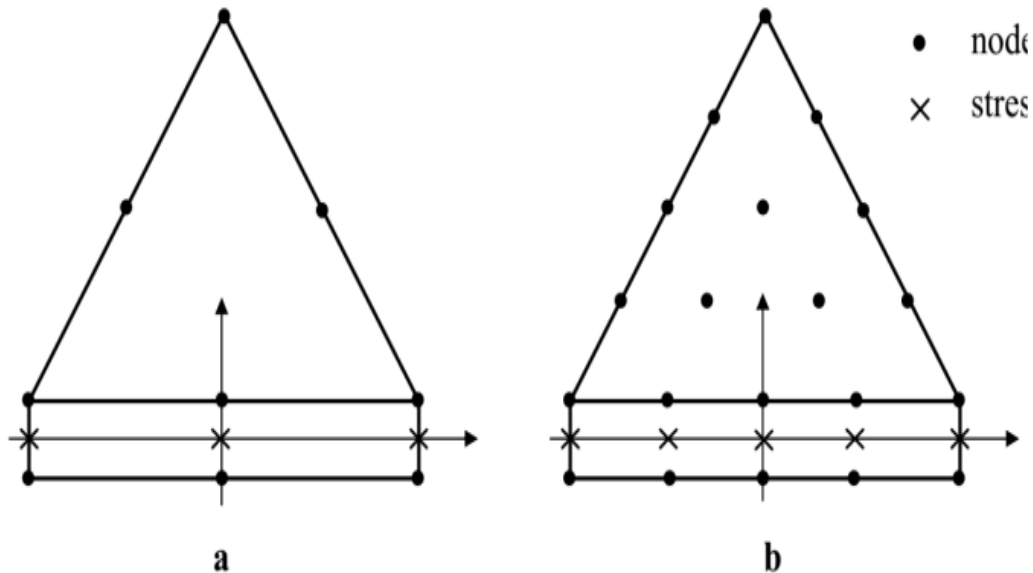


Figure IV. 6: Distribution des nœuds et des points de contrainte dans les éléments d'interface et connexion avec les éléments de sol : (a) élément à 6 nœuds ; (b) élément à 10 nœuds (Brinkgreve et al., 2011).

IV.4 La démarche de modélisation

IV.4.1 Entrée des données

a. La géométrie du modèle

La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques faciles à utiliser, ce qui permet une description détaillée et précise des conditions réelles à modéliser. Le maillage d'éléments finis en 2D est généré de manière automatique directement à partir de ce modèle géométrique.

b. Conditions aux limites

Les "fixités" sont des déplacements nuls imposés. Ces conditions peuvent être appliquées aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle, dans les directions x ou y. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard valables dans la majorité des cas.

c. Chargement

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

d. Propriétés des Matériaux

Dans Plaxis, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux : Sols et interfaces (Soil & Interfaces), plaques (Plates), géogrilles (Geogrids) et ancrages (Anchors).

Le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir.

Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramétrés, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non- drainer ou non-poreux).

e. Génération automatique du maillage

Plaxis offre une génération entièrement automatique de maillages non structurés d'éléments finis, avec des options pour raffiner le maillage, globalement ou localement. Le maillage peut contenir des milliers d'éléments.

f. Conditions initiales

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).

IV.4.2 Le calcul

Le programme de calcul conduit des analyses en déformation menées soit par un calcul plastique, un calcul de consolidation ou un calcul en grandes déformations et calcul de

coefficient de sécurité. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies avant le lancement du calcul.

IV.4.3 Analyse des Résultats

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points de contraintes. De plus, lorsqu'un modèle d'éléments finis inclut des éléments de structure, des efforts sont calculés dans ces éléments. [22]

a. Déformations

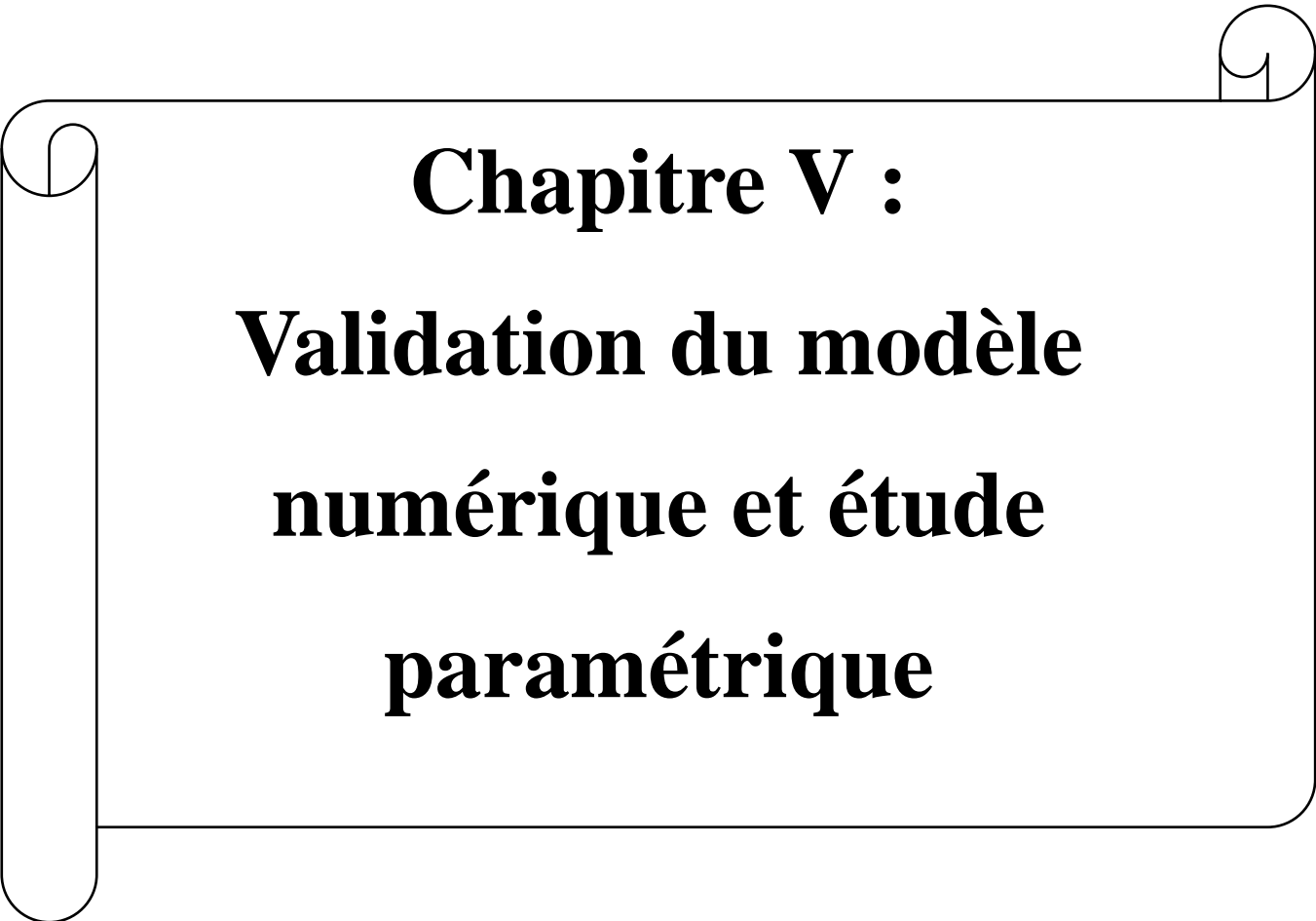
La restitution graphique des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, carte de déplacements totaux ou incrémentaux ou cartes de déformations totales ou incrémentales.

b. Contraintes

La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles

IV.5 Conclusion

Comme tous les logiciels, Plaxis est un outil simple à utiliser, offrant la possibilité d'analyser des problèmes géotechniques en deux dimensions. Dans la barre d'outils, on trouve les symboles des actions liées à la création du modèle géométrique. On dispose ces icônes dans un ordre qui permet généralement de définir complètement le modèle en suivant les boutons de la barre d'outils de gauche à droite. Celui-ci se distingue notamment par La fonction "construction par étapes" (Staged construction) est la principale forme de chargement (Input loading). Les caractéristiques particulières de Plaxis permettent de modifier la géométrie et la configuration de chargement en désactivant ou réactivant les charges, Les différentes couches de sol ou éléments de structure sont développés lors de la création du modèle géométrique. La mise en place de la construction par étapes offre une simulation précise et réaliste de diverses étapes de chargement, de construction et de découpe. Dans la suite du travail, le code de calcul Plaxis a été employé comme outil de modélisation dans ce mémoire.

A decorative border resembling a scroll or ribbon, with rounded corners and a slight shadow effect, framing the central text.

Chapitre V :
Validation du modèle
numérique et étude
paramétrique

Chapitre V : Validation du modèle numérique et étude paramétrique

V.1 Introduction

Le calcul numérique de la capacité portante d'une semelle de fondation sur un sol argileux est une étape cruciale dans la conception des fondations, en raison des propriétés complexes et souvent imprévisibles de l'argile. Lorsque ce sol contient des excavations, l'analyse devient encore plus délicate. Les excavations peuvent altérer la distribution des contraintes et augmenter les risques de déformation et d'instabilité. Pour aborder ces défis, l'utilisation de Plaxis, un logiciel de modélisation par éléments finis spécialisé en géotechnique, permet de simuler avec précision le comportement du sol et de la fondation sous diverses conditions de chargement. Cette étude vise à déterminer la capacité portante d'une semelle de fondation reposant sur un sol argileux avec des excavations, en exploitant les capacités avancées de Plaxis pour obtenir une analyse détaillée et fiable des interactions sol-structure.

V.2 Présentation du modèle numérique

L'objectif de cette section est d'analyser la capacité portante d'une fondation superficielle située au-dessus d'excavations, soumise à une charge verticale centrée de $P=700$ kN. La fondation, ayant une largeur de semelle de $B=1$ m, repose sur un sol argileux d'une largeur de 20 m et d'une profondeur de 15 m. La semelle est placée à une distance de 1 m du bord de l'excavation.

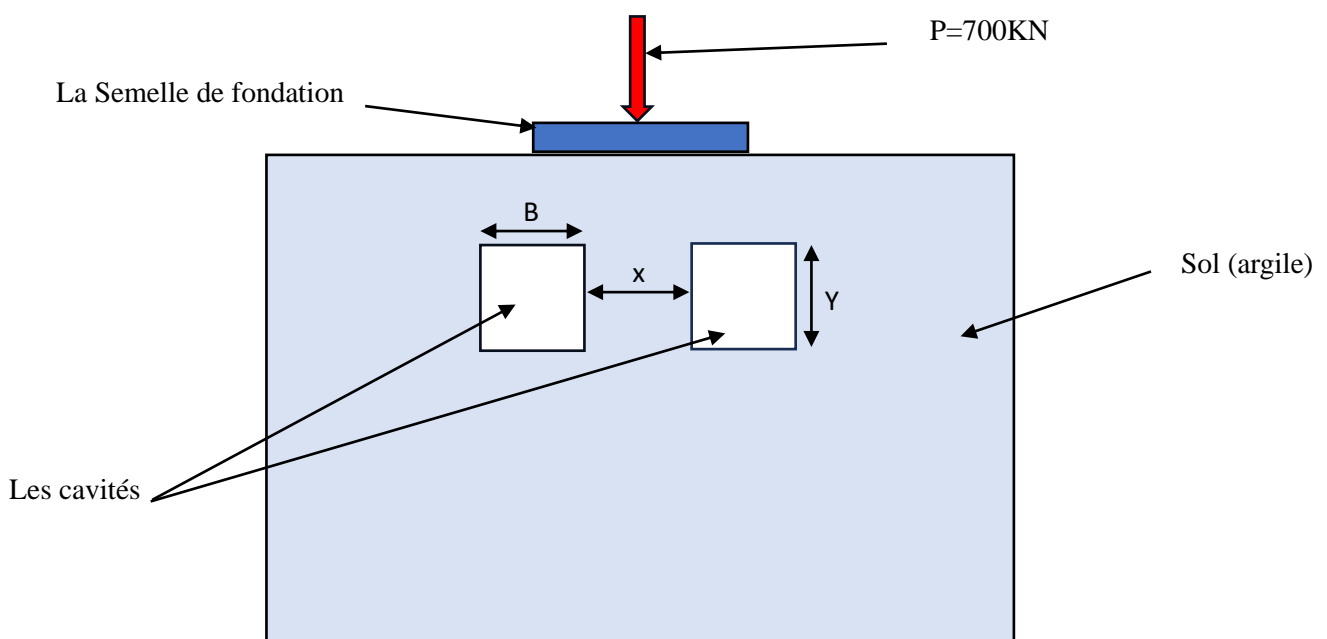


Figure V. 1: Présentation du modèle géométrique

Le problème est modélisé à l'aide d'un modèle géométrique plan (2D), illustré dans la Figure (V.1) L'analyse numérique a été effectuée avec le logiciel PLAXIS, qui permet de modéliser les déformations dans un temps de calcul optimisé. Les conditions aux limites ont été définies en bloquant les déplacements horizontaux et verticaux à l'extrémité inférieure du modèle, afin de simuler correctement les contraintes de bord et garantir la précision des résultats. Cette approche permet une évaluation détaillée de la capacité portante de la fondation et des impacts des excavations sur le comportement du sol argileux.

V.3 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques de modélisation

La modélisation du cas de référence est basée sur des paramètres géomécaniques réels [27], dont les détails sont présentés dans la section suivante.

V.3.1 Le sol

Le matériau utilisé dans cette étude est une argile non drainée, respectant le critère de Mohr-Coulomb. Et régie par une loi de comportement non linéaire. Ce critère a été choisi pour sa simplicité et la disponibilité des paramètres requis. Le modèle est constitué d'un sol argileux, comme illustré à la Figure (V.2), avec les caractéristiques détaillées dans le tableau (V.1).

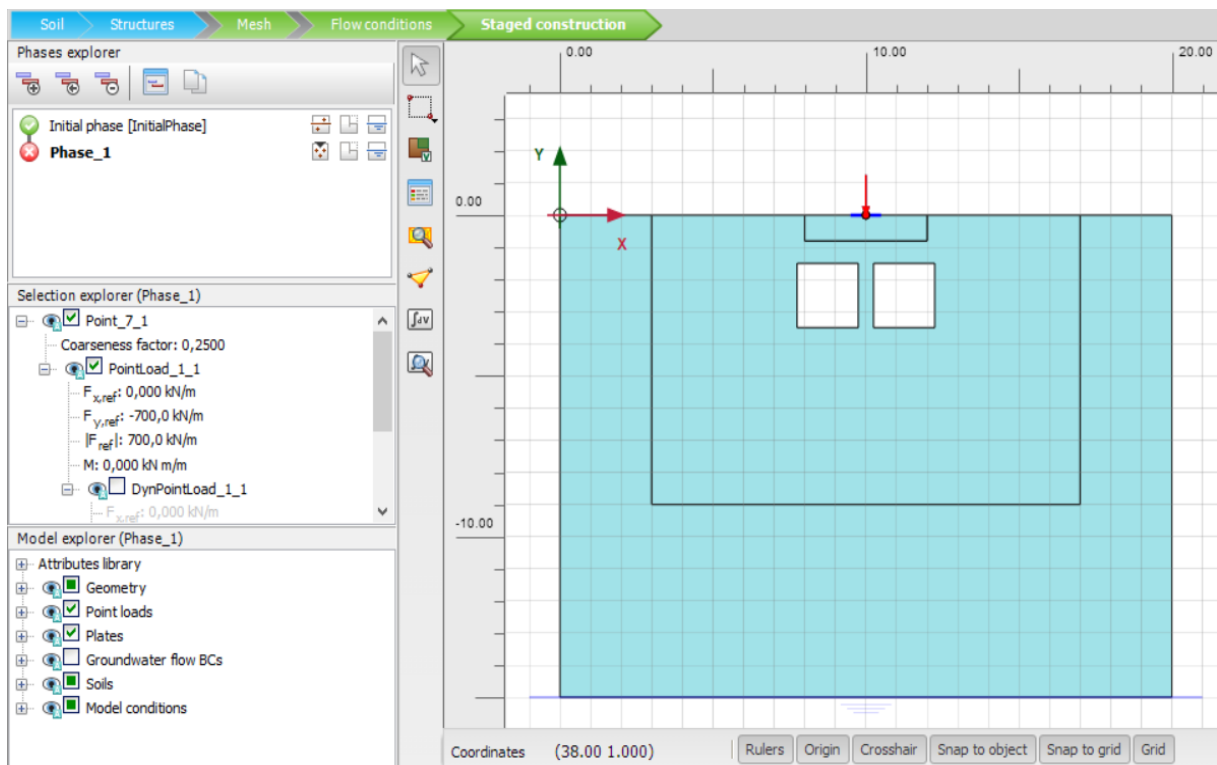


Figure V. 2: Modèle numérique du modèle de référence

Tableau V. 1: Caractéristiques géomécaniques du sol

Paramètre	Argile non drainé	unite
Modèle de comportement	Mohr-Coulomb	-
Module de Young(E)	50×10^3	(KN/m ²)
Coefficient de Poisson (ν)	0,4950	-
Masse volumique (γ)	20	(KN/m ³)
Angle de frottement (ϕ)	-	(°)
Angle de dilatance (ψ)	-	(°)
Cohésion (Cu)	100	(KN/m ²)

Le modèle de comportement employé afin de simuler le sol argileux est un modèle élastique parfaitement plastique qui respecte le critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Trois paramètres définissent ce modèle de comportement : les paramètres élastiques (E : module d'Young, ν : coefficient de Poisson) et les paramètres plastiques (c : cohésion).

V.3.2 Semelle de fondation

La fondation est considérée comme un élément poutre élastique. Les paramètres essentiels sont la rigidité de flexion EI et la raideur axiale EA. Pour garantir sa rigidité, on a opté pour une épaisseur de 1 m en raison de la condition de rigidité ($0.2B \leq e \leq 0.5B$), où e correspond à l'épaisseur de la fondation et B à sa largeur.

Les éléments de la semelle de fondation sont représentés par des plaques dans le code de calcul Plaxis 2D, représentées par l'objet « plate ». Ces éléments sont employés afin de reproduire des éléments structuraux. Le modèle présente les caractéristiques dans le tableau (V.2).

Tableau V. 2: Caractéristiques de la semelle.

Paramètre	Semelle	Unité
Modèle de comportement	Elastique linéaire	-
Rigidité axial (EA)	50×10^6	(KN/m)
Rigidité flexionnelle (EI)	8500	(KN.m ² /m)

Coefficient de Poisson (ν)	0,2	-
Masse volumique (γ)	25	(KN/m ³)

V.4 Critères d'analyse

Avant d'entamer les séries de modélisations avec le modèle numérique proposé, il est essentiel de valider ce modèle. Pour ce faire, la validation sera basée sur la comparaison des résultats du modèle numérique en termes de capacité portante non drainée avec les valeurs calculées à l'aide de la formule analytique suivante :

$$q_u = (\pi + 2) \times C_u \quad (V.1)$$

Pour le calcul numérique, la capacité portante non drainée est donnée par:

$$q_{u_{num}} = \sum M_{stage} \times P \quad (V.2)$$

Avec : P est la charge introduite dans la phase de calcul.

V.5 Résultats de la modélisation

V.5.1 Calcul

Après avoir mis en œuvre la méthode de chargement gravitaire lors de la première phase de calcul plastique, il est passé à la seconde phase de calcul qui consiste à appliquer le chargement proprement dit. Pour cela, une charge a été appliquée par incréments, suivie d'une analyse itérative jusqu'à ce que le sol se brise sous la fondation. L'élément pour lequel il y a eu une rupture est connu sous le nom de charge limite.

Il faut déterminer les points de contrôle où l'on veut enregistrer les valeurs des contraintes et des déformations ou des déplacements. Ces points offrent la possibilité de tracer les différentes courbes liées à ces points. Il convient de souligner que l'on a la possibilité de sélectionner des points de déplacement ou des points de contraintes. Dans notre situation, ces éléments ont été établis à l'emplacement de la charge. La relation (5.2) permet d'obtenir la capacité portante pour chaque modèle numérique.

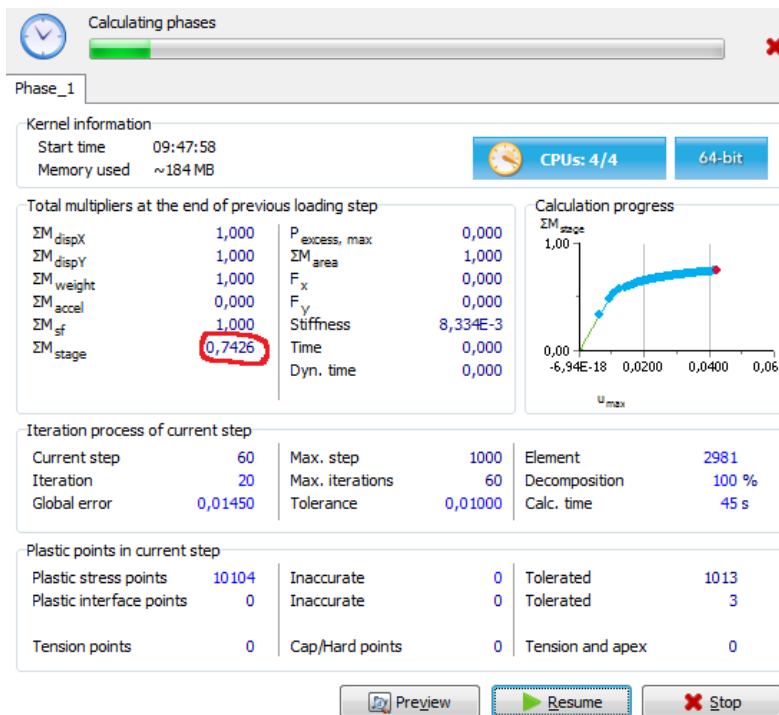


Figure V. 3: Phase de calcul numérique.

V.5.2 Déformation et stabilité

Pour la validation de notre modèle numérique de référence, les résultats obtenus en termes de capacité portante non drainée sont comparés par le calcul analytique à ceux obtenus par le calcul numérique (Tableau V.3).

Tableau V. 3: Résultats du calcul du modèle de référence.

	qu (KPa)
Calcul analytique (mathématique)	514.0
Calcul numérique	519.82

On peut observer sur la figure (figure V.4) que le sol a subi une déformation (DEFORMED MESH) avec un déplacement vertical de sa surface libre vers le bas. Le déplacement vertical maximal enregistré à la fin de l'application de la charge est de 4,395 cm.

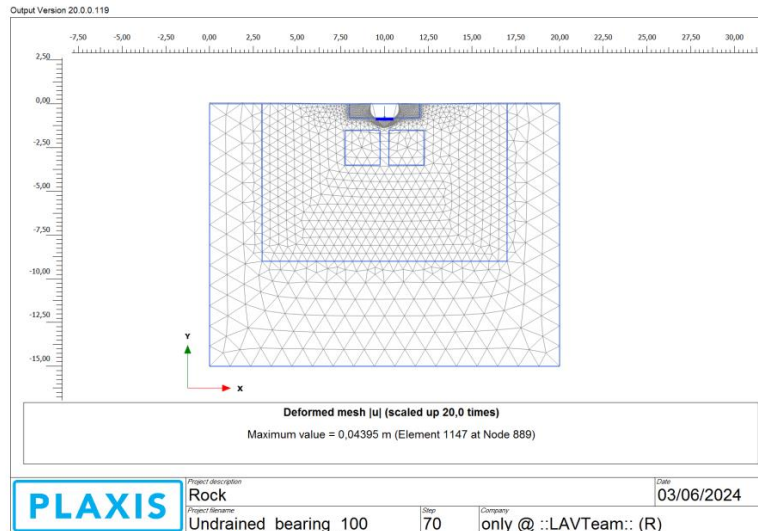


Figure V. 4: Maillage déformé.

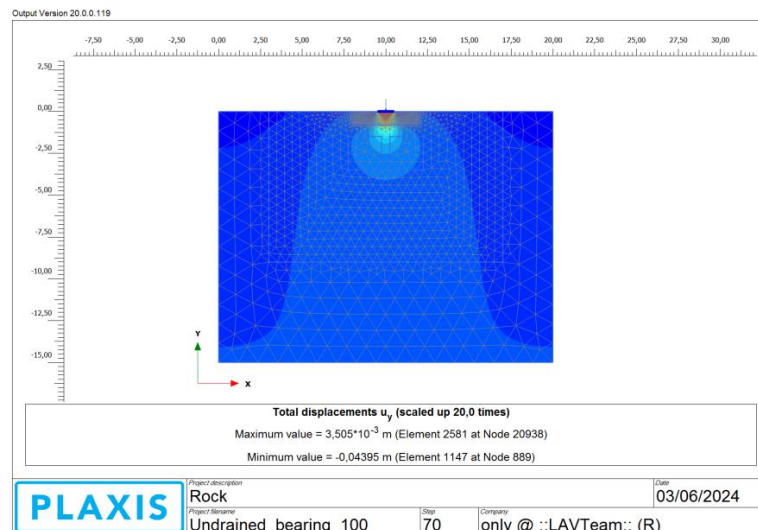


Figure V. 5: Résultats en termes de déplacement vertical de la fondation.

V.5.3 Résultats pour le cas de modèle avec deux excavations

Après avoir validé le modèle numérique de la capacité portante, nous présentons maintenant les résultats de la modélisation pour un cas comportant deux excavations sous la fondation. Les résultats ci-dessous concernent un modèle avec deux excavations de profondeur $Y = 1,5$ m, de distance entre les excavations $X = 0,5$ m, et de largeur de l'excavation $B = 2,0$ m.

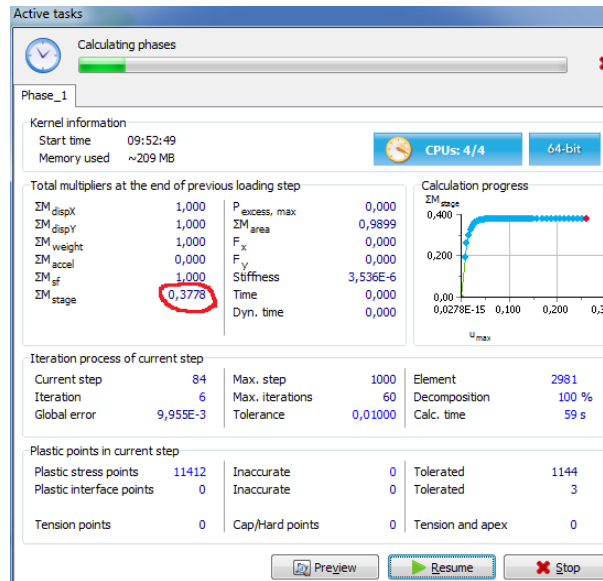


Figure V. 6: Résultats en termes d'incrément de chargement.

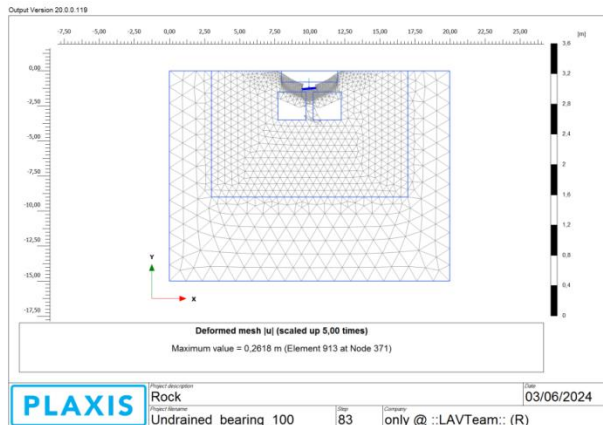


Figure V. 7: Maillage déformé pour Y=1.5 ; X = 0.5 et B=2.0.

On constate une diminution de la capacité portante, avec la valeur de l'incrément de chargement passant de 0,7426 à 0,3778, ce qui représente une réduction de 49,12 %. Cette diminution est due à la présence des excavations sous la semelle. Par ailleurs, on observe une augmentation du déplacement vertical sous la semelle, avec un déplacement maximal de 26,17 cm enregistré à la fin du chargement. Ces observations indiquent que les excavations sous la semelle influencent de manière significative le comportement mécanique du sol, en réduisant sa capacité à supporter les charges appliquées et en augmentant les déformations verticales. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la présence des excavations dans les analyses de stabilité et de conception des fondations.

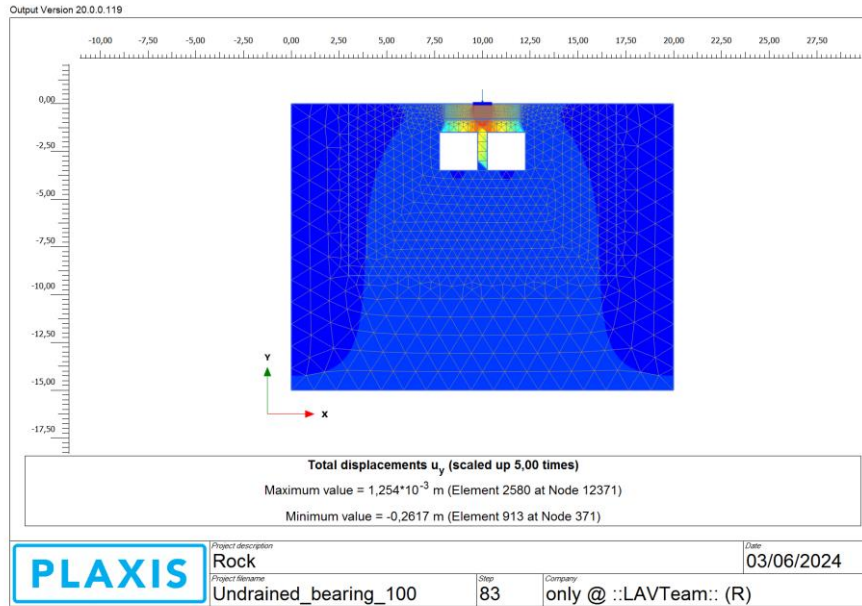


Figure V. 8: Déplacement vertical pour Y=1.5 ; X = 0.5 et B=2.0.

V.6 Etude paramétrique

Dans cette étude, nous analysons l'impact de la profondeur des excavations (Y), de la distance entre les excavations (X), et de la largeur des excavations (B) sur le comportement des fondations situées au-dessus de ces excavations. La plage de variation de ces paramètres est présentée dans le Tableau (V.4). La recherche repose sur la première modélisation, en utilisant les paramètres de référence.

En ajustant chaque paramètre dans un intervalle précis et en utilisant le logiciel Plaxis pour effectuer le calcul de la capacité portante, nous obtenons les résultats suivants, illustrés dans les courbes ci-après. Ces courbes permettent de visualiser et de comprendre l'influence de chaque paramètre sur les performances des fondations.

Tableau V. 4: Influence des paramètres géométriques du modèle proposé.

Paramètres	Variation entre	
	Min	Max
Profondeur des excavations Y(m)	1,0	2,50
Distance entre les excavations X(m)	1,0	3,0
Largeur des excavations B (m)	0,50	2,0

V.6.1 Influence de profondeur des excavations (Y)

L'effet de la profondeur des excavations (Y) sur le comportement des fondations est illustré dans la Figure (V.9). Les résultats de cette étude démontrent que la profondeur des excavations a une influence significative sur la capacité portante.

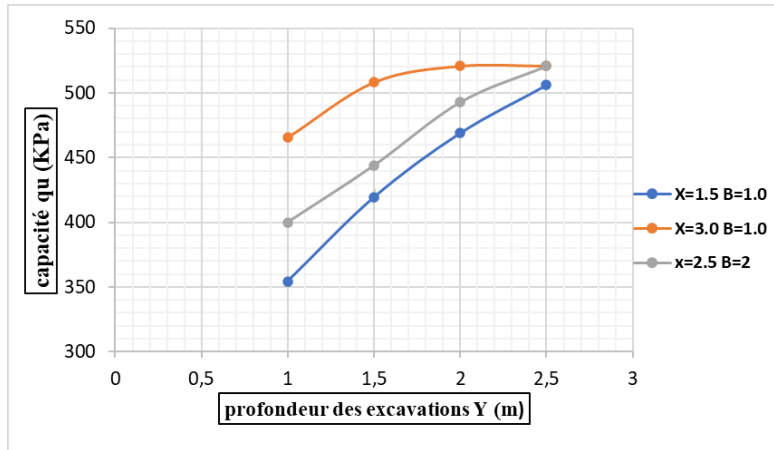


Figure V. 9: Influence de la profondeur des excavations.

Dans la figure (Figure V.9), on observe comment la valeur de la capacité portante (qu) varie en fonction de la profondeur des excavations (Y) pour le modèle proposé. Il apparaît que la capacité portante (qu) augmente de manière régulière à mesure que la profondeur des excavations (Y) s'accroît. De plus, la figure (Figure V.9) montre que la capacité portante (qu) est également influencée par la distance entre les excavations (X) et la largeur des excavations (B).

V.6.2 Influence de la distance entre les excavations (X)

Nous avons étudié l'effet de la distance entre les excavations (X) en prenant en compte différentes distances, comme illustré dans la Figure (V.10).

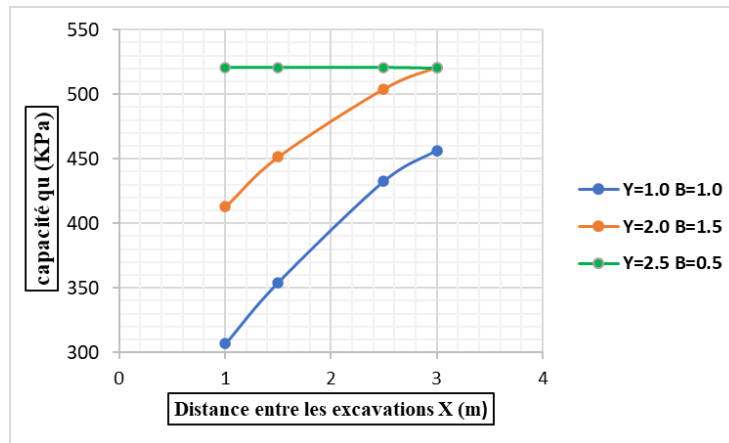


Figure V. 10: Influence de la distance entre les excavations (X).

Le graphique présenté dans la Figure (V.10) montre une relation positive entre la capacité portante et la distance entre les excavations sous la semelle. Cela signifie que plus la distance entre les excavations est grande, plus la capacité portante augmente. Cette tendance s'explique par une meilleure répartition de la pression lorsque la distance entre les excavations est plus grande, permettant une distribution plus uniforme du poids sur le sol ou la structure.

Il est également important de noter que la profondeur et la largeur des excavations peuvent avoir un impact significatif sur la capacité portante et la répartition de la pression. Si les cavités sont plus profondes ou plus larges, la capacité à supporter la charge peut augmenter, améliorant ainsi la répartition du poids sur la structure. Ces observations soulignent l'importance de considérer ces paramètres dans la conception des fondations pour assurer une performance optimale.

V.6.3 Influence de la Largeur des excavations (B)

L'effet de la largeur des excavations sur le comportement de la semelle et la position de la cavité est résumé dans la Figure (V.11).

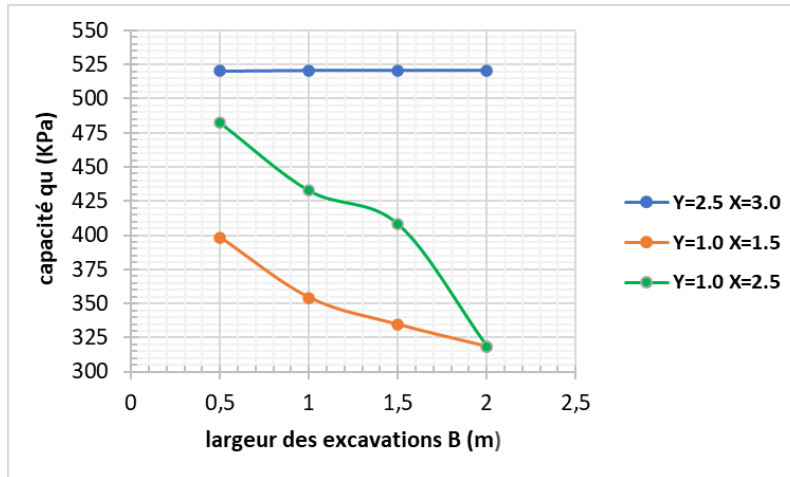


Figure V. 11: Influence de la largeur des excavations (B).

Le graphique (Figure V.11) met en évidence une relation claire entre la largeur des excavations et la capacité portante, démontrant que les cavités plus larges ont tendance à présenter une capacité portante moindre. Cette analyse souligne l'importance d'examiner l'impact de la largeur des excavations sur la capacité de la semelle à supporter la charge.

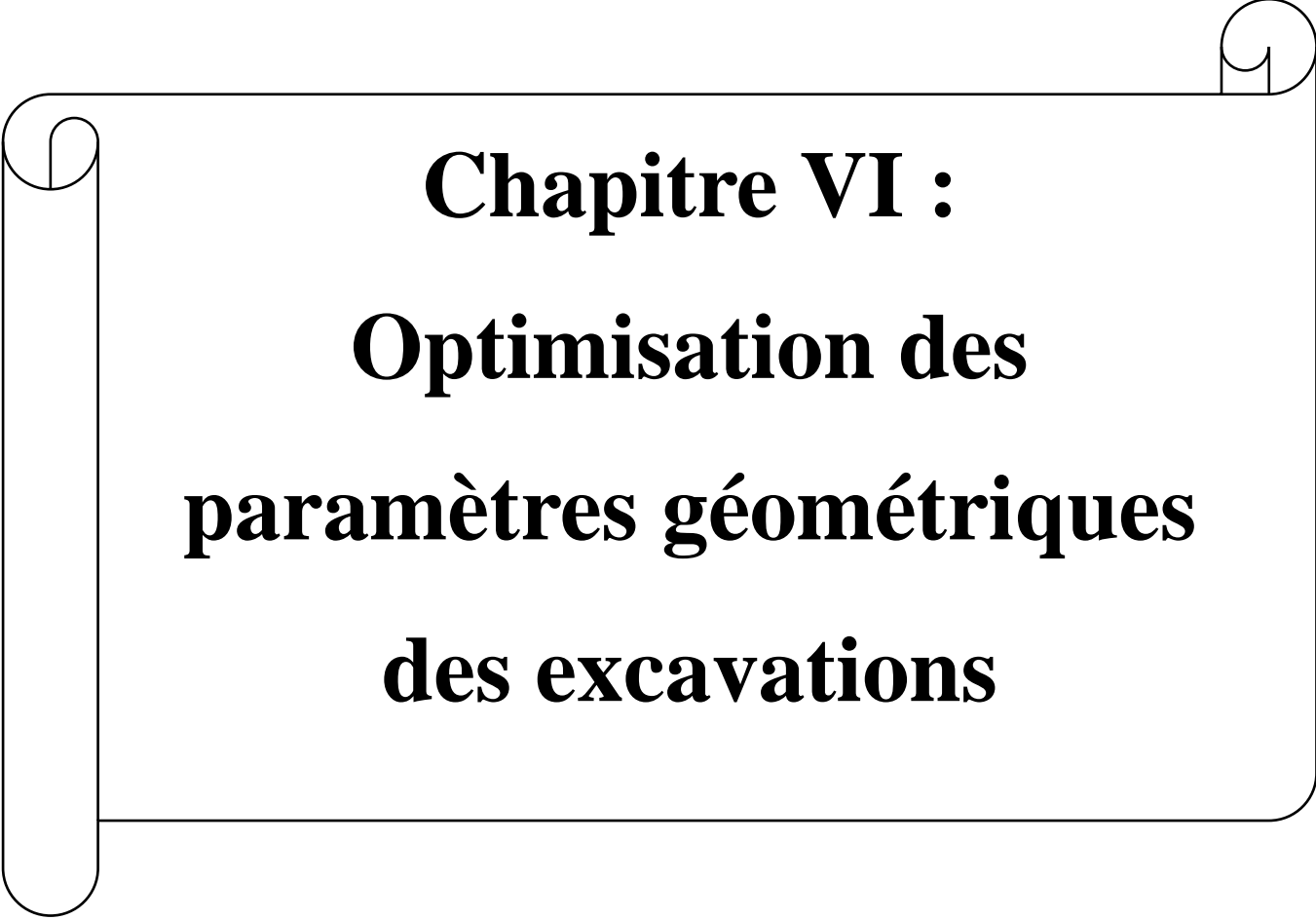
V.7 Conclusion

Cette étude numérique a permis de tirer des conclusions intéressantes sur le comportement de la capacité portante des fondations au-dessus d'une excavation, tout en soulignant l'importance de certains paramètres géométriques dans la modélisation numérique. L'objectif de cette étude était d'assurer une modélisation aussi réaliste que possible en utilisant une méthode et des paramètres adéquats. Les différentes étapes de la construction ont été simulées dans des conditions réalistes.

La validation de notre modèle numérique lors de la première modélisation, en utilisant des paramètres de référence et en comparant les résultats en termes de déplacement vertical et de capacité portante avec les résultats disponibles sur ce type d'ouvrage, a été cruciale. Cette étape a permis de confirmer la fiabilité de notre approche de modélisation.

L'étude paramétrique a ensuite permis de déterminer les paramètres qui influencent le comportement de la fondation au-dessus de l'excavation, ainsi que l'importance relative de chacun de ces paramètres. À partir de cette étude, on peut conclure que la profondeur des cavités, la distance entre les cavités et la largeur des cavités sont les facteurs ayant l'influence

la plus significative sur la stabilité et la déformation de la fondation étudiée. Ces résultats sont essentiels pour orienter les futures conceptions de fondations dans des conditions similaires.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a small circular detail at the corners.

Chapitre VI :
Optimisation des
paramètres géométriques
des excavations

Chapitre VI : Optimisation des paramètres géométrique des excavations

VI.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de valider la méthode d'optimisation suggérée en optimisant les paramètres géométriques influençant la capacité portante des fondations au-dessus des excavations, tels que la profondeur des excavations (Y), la distance entre les excavations (X) et la largeur de l'excavation (B). Cette optimisation est basée sur les résultats des modélisations de la capacité portante non drainée des fondations au-dessus des excavations.

Pour réaliser cette optimisation, nous utilisons la méthode de surface de réponse (RSM) ainsi que les réseaux de neurones artificiels (ANN). La démarche consiste d'abord à choisir, dans un recueil de tables, le plan d'expériences le plus adapté au modèle employé. Ce modèle comporte trois facteurs, chaque facteur ayant quatre niveaux. Les intervalles de variation de chaque paramètre sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI. 1: Intervalle de variation des paramètres à optimiser.

Paramètres	Niveaux de variation			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Y (m)	1,0		2,50	
X (m)	1,0		3,0	
B (m)	0,50		2,0	

VI.2 Choix d'un plan d'expériences

Il est maintenant nécessaire de choisir un plan d'expériences, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant d'identifier les paramètres recherchés du problème. Dans le cadre de cette étude, nous allons mettre en œuvre un plan factoriel complet L64 (voir tableau ci-dessous) :

Tableau VI. 2: Plan d'expériences type factoriel complet L64 (3 facteurs, 4 niveaux).

N° d'essai	Facteurs		
	Y (m)	X (m)	B (m)
1	1	1,5	1
2	2	1,5	2
3	1,5	1	1
4	2,5	1	0,5
5	2,5	3	0,5

6	2	1	2
7	1	3	2
8	2,5	1,5	1,5
9	1	2,5	1
10	2	1,5	1,5
11	2	1,5	0,5
12	1,5	2,5	2
13	1,5	1,5	1,5
14	2,5	3	1,5
15	2	1,5	1
16	1,5	1	0,5
17	1,5	1	2
18	2,5	2,5	1,5
19	2,5	2,5	0,5
20	2	1	1
21	2	2,5	2
22	1,5	1	1,5
23	1	1,5	0,5
24	1,5	1,5	0,5
25	2,5	3	1
26	1	1,5	2
27	2	2,5	1,5
28	2	3	1
29	1	1,5	1,5
30	1	1	1,5
31	2,5	1	1,5
32	2,5	1,5	2
33	2	3	2
34	1,5	3	2
35	1	2,5	2
36	1	1	0,5
37	1,5	2,5	1
38	1,5	1,5	1
39	2,5	1	1
40	2	2,5	1
41	2	1	1,5
42	1	1	1
43	1	3	1
44	1,5	3	1
45	1	3	1,5
46	2,5	2,5	2

47	2,5	1	2
48	2,5	3	2
49	1	2,5	1,5
50	2,5	1,5	0,5
51	1	1	2
52	1,5	2,5	1,5
53	1,5	2,5	0,5
54	2	2,5	0,5
55	1,5	1,5	2
56	2,5	2,5	1
57	1	2,5	0,5
58	1	3	0,5
59	2	3	0,5
60	2	3	1,5
61	2	1	0,5
62	1,5	3	1,5
63	1,5	3	0,5
64	2,5	1,5	1

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une simulation numérique à réaliser à l'aide du logiciel Plaxis. Ainsi, il est nécessaire de créer 64 modèles numériques en se basant sur les données fournies dans le tableau ci-dessus. Chaque modèle représentera une combinaison unique des paramètres étudiés, permettant d'évaluer leur influence sur la capacité portante des fondations au-dessus des excavations.

VI.3 Méthodes prédictives

VI.3.1 Méthode des surfaces de réponses

La méthode de surface de réponse (RSM) est un outil pratique pour déterminer des modèles mathématiques reliant les paramètres d'entrée et les réponses de sortie [28]. L'idée principale de la RSM est d'approximer la réponse de sortie en utilisant une fonction explicite des variables d'entrée. L'expression de cette approximation est donnée ci-dessous :

$$g(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n a_i b_j \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_i x_i^2 \quad (\text{VI. 1})$$

Où x_i sont les variables d'entrée ; n est le nombre de paramètres d'entrée ; et a_i , b_i , $a_i b_j$ sont les coefficients à déterminer et $g(x)$ représente la réponse de sortie. où b_0 est l'interception du modèle mathématique, les coefficients b_1 , b_2 ... b_k et b_{12} , b_{13} , $b_{(k-1)}$ sont les termes linéaires et

d'interaction, respectivement. $g(x)$ représente la sortie (capacité portante). Pour vérifier la capacité du modèle prédit et s'assurer qu'il fournit la meilleure approximation pour le problème traité, le graphique de probabilité normale doit être presque linéaire. L'analyse ANOVA est également un outil efficace pour déterminer les facteurs qui influencent principalement la réponse. De plus, l'évaluation des coefficients de détermination (R^2) et du R^2 ajusté indique également la robustesse du modèle prédictif.

VI.3.2 Réseaux de neurones artificiels

La technique des réseaux de neurones artificiels (ANN) est un outil informatique inspiré par le fonctionnement des neurones du cerveau humain, capable de trouver une formulation mathématique reliant les données d'entrée et les résultats de sortie d'un problème défini [29].

Cette technique a été utilisée pour résoudre des problèmes complexes en raison de sa capacité exceptionnelle. Il est recommandé d'utiliser ce type d'outils pour approximer les fonctions de réponse dans l'évaluation de processus compliqués. Les ANN sont plus robustes et précises et peuvent être utilisés à la place des ajustements non linéaires, résolus avec des modèles de régression polynomiale [30]. Pour obtenir des résultats significatifs, l'utilisateur doit prendre en compte les principaux facteurs : le type de réseau, l'architecture du réseau et les paramètres d'entraînement du réseau [31]. Le réseau a été conçu en augmentant progressivement le nombre de couches cachées et de nœuds jusqu'à ce qu'une architecture appropriée puisse être trouvée. Selon [32], la fonction hyperbolique tangente est utilisée dans les couches cachées du réseau de neurones, dans lequel l'utilisation de cette fonction accélère l'entraînement du réseau par rapport à la fonction sigmoïde [33]. Les données volumineuses sont réservées à l'entraînement du réseau pendant le calcul, et le reste est utilisé pour le processus de validation.

L'algorithme de rétropropagation est utilisé pour entraîner le réseau en se basant sur la règle du gradient descendant. Cet algorithme minimise l'erreur quadratique moyenne (EQM) en introduisant les motifs d'entrée-sortie de manière séquentielle pour mettre à jour les poids à chaque fois. La minimisation est réalisée en ajustant les poids de la couche de sortie à la couche d'entrée [31]. Pour évaluer l'adéquation et la précision du modèle obtenu par ANN, [34] suggère trois indicateurs, à savoir le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), et l'erreur absolue moyenne (MAE) et qui sont définis comme suit :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{i,n})}{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{moyenne})^2} \quad (VI.2)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i,n} - y_{i,p})^2}}{n} \quad (VI.3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_{i,n} - y_{i,p})| \quad (VI.4)$$

Où n : est le nombre d'expériences ;

$y_{(i,e)}$, $y_{(i,p)}$: sont respectivement les valeurs numériques et prédites de la $i^{\text{ème}}$ expérience ;

$y_{moyenne}$: est la valeur moyenne des résultats expérimentaux. La première étape pour obtenir un modèle ANN est la sélection d'une architecture de réseau appropriée. L'objectif est de construire un modèle ANN prédictif en minimisant la taille du modèle et les erreurs utilisées lors de l'entraînement et de la validation [35]. Dans cette étude et dans tous les cas, le taux d'apprentissage adopté est de 0,01. De plus, pour sélectionner le nombre optimal de neurones dans chaque couche cachée, procédez en variant le nombre d'itérations jusqu'à obtenir une valeur élevée de R^2 avec une valeur plus faible du paramètre (RMSE).

VI.4. Résultats

Le Tableau (VI.3) présente les résultats de la modélisation en termes de capacité portante des semelles au-dessus des excavations. Ces résultats sont obtenus à partir des différentes combinaisons de paramètres, conformément à la matrice de planification des expériences d'un plan factoriel complet L64. Chaque combinaison de paramètres a été modélisée numériquement, permettant ainsi de mesurer l'influence de chaque facteur sur la capacité portante.

Tableau VI. 3: Résultats de la modélisation.

N° d'essai	Facteurs			Réponse
	Y (m)	X (m)	B (m)	qu (KPa)
1	1	1,5	1	354,2
2	2	1,5	2	428,4
3	1,5	1	1	376,6
4	2,5	1	0,5	520,8
5	2,5	3	0,5	520,6
6	2	1	2	384,3
7	1	3	2	431,2
8	2,5	1,5	1,5	490

9	1	2,5	1	432,6
10	2	1,5	1,5	451,5
11	2	1,5	0,5	520,8
12	1,5	2,5	2	443,8
13	1,5	1,5	1,5	346,5
14	2,5	3	1,5	520,8
15	2	1,5	1	469
16	1,5	1	0,5	422,1
17	1,5	1	2	321,3
18	2,5	2,5	1,5	520,8
19	2,5	2,5	0,5	520,8
20	2	1	1	434,7
21	2	2,5	2	492,8
22	1,5	1	1,5	349,3
23	1	1,5	0,5	398,3
24	1,5	1,5	0,5	464,1
25	2,5	3	1	520,8
26	1	1,5	2	318,5
27	2	2,5	1,5	504
28	2	3	1	520,8
29	1	1,5	1,5	334,6
30	1	1	1,5	280
31	2,5	1	1,5	461,3
32	2,5	1,5	2	476
33	2	3	2	511
34	1,5	3	2	470,4
35	1	2,5	2	399,7
36	1	1	0,5	343
37	1,5	2,5	1	480,2
38	1,5	1,5	1	419,3
39	2,5	1	1	476
40	2	2,5	1	516,6
41	2	1	1,5	413
42	1	1	1	306,6
43	1	3	1	465,5
44	1,5	3	1	508,2
45	1	3	1,5	442,4
46	2,5	2,5	2	520,8
47	2,5	1	2	441
48	2,5	3	2	520,8
49	1	2,5	1,5	408,1

50	2,5	1,5	0,5	520,8
51	1	1	2	256,9
52	1,5	2,5	1,5	458,5
53	1,5	2,5	0,5	519,4
54	2	2,5	0,5	520,8
55	1,5	1,5	2	372,4
56	2,5	2,5	1	520,6
57	1	2,5	0,5	482,3
58	1	3	0,5	509,6
59	2	3	0,5	520,8
60	2	3	1,5	520,8
61	2	1	0,5	483,7
62	1,5	3	1,5	483,7
63	1,5	3	0,5	520,8
64	2,5	1,5	1	506,1

VI.4.1 Modélisation des résultats par la méthode des surfaces de réponse

a. Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre les paramètres d'entrées, à savoir la profondeur des excavations (Y), la distance entre les excavations (X) et la largeur de l'excavation (B) et les paramètres de sorties (la capacité portante qu) est donnée par : $G = f(Y, B, X)$ (VI.5)

Où : G est la fonction de réponse.

L'approximation des G est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres du modèle. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$G = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (\text{VI.6})$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction.

X_i : représente les paramètres d'entrée (Y, X et B) ;

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{VI.7})$$

Avec :

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

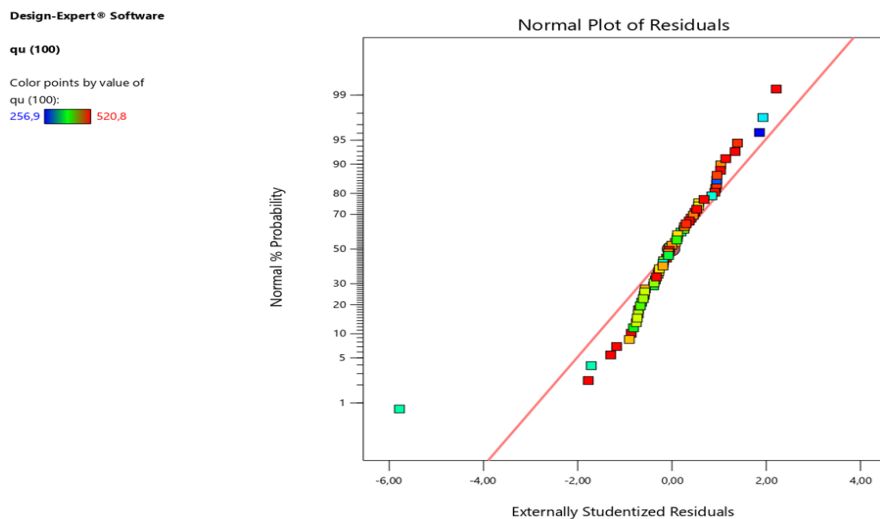
\bar{y}_i : Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience ;

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

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (capacité portante (qu)) et les variables d'entrées (Y, X, B) a été exprimé avec un coefficient de détermination ($R^2 = 98,13 \%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la sortie G en fonction des facteurs étudiés. Le modèle obtenu est présenté par l'équation.

$$\text{qu} = 113,01119 + 224,19137Y + 15913342X - 165,28713B - 39,98100 Y*X + 23,73300Y*B + 18,86500X*B - 26,75625Y^2 - 14,72917X^2 + 17,80625B^2 \quad (\text{VI.8})$$

D'après la figure (VI.1), les résidus du modèle de capacité portante peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

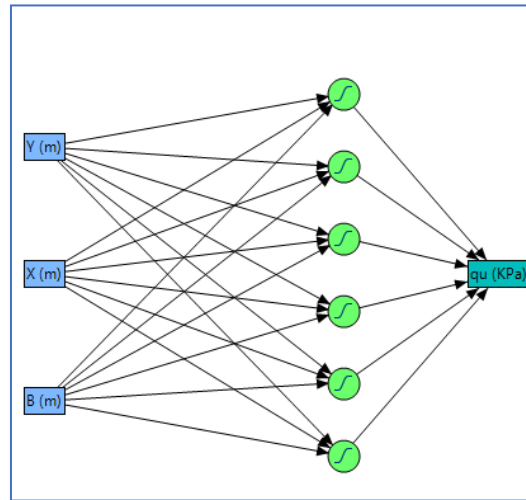


Figures VI. 1: Probabilités normales des résidus de capacité portante (qu).

VI.4.2 Modélisation des résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels

La figure (VI.2) illustre l'architecture adéquate du modèle de capacité portante (qu) par réseau de neurones artificiels (3-6-1), représentée avec trois nœuds d'entrée (Y, X et B), six nœuds

dans la couche cachée et un nœud pour la couche de sortie (capacité portante). Cette architecture finale est obtenue après un nombre optimal de 50 itérations.



Figures VI. 2: Architecture du réseau de neurones artificiels (3-6-1) pour la capacité portante (q_u).

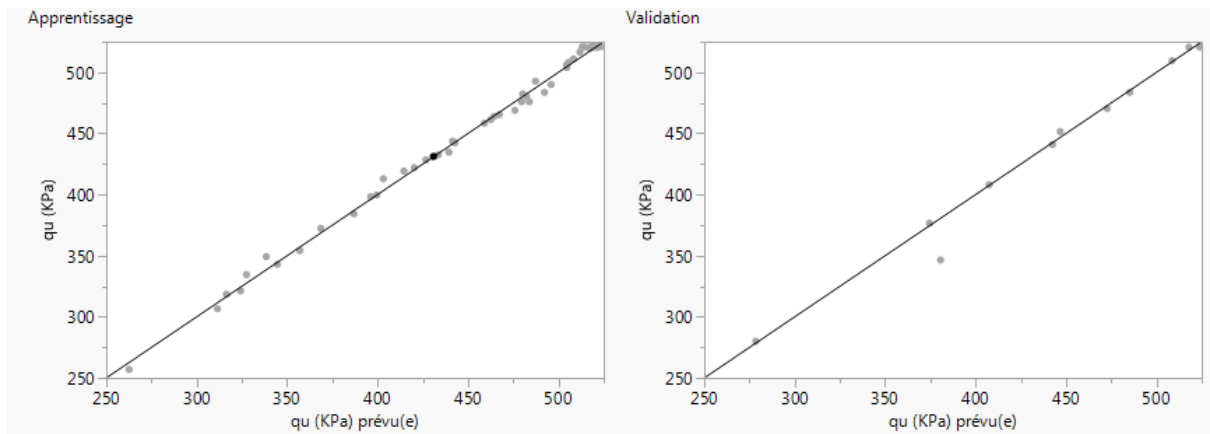
Le modèle mathématique de l'architecture de réseau de neurones artificiels (ANN) ci-dessus est présenté par l'équation 6.8. Ce modèle résulte du produit des couches cachées des six neurones avec une fonction linéaire.

$$q_u = -3.641xH_1 - 112.128xH_2 - 135.925xH_3 - 283.132xH_4 - 89.361xH_5 + 44.112xH_6 \quad (VI.9)$$

Où H_1 à H_6 sont les sorties de chaque neurone de la couche cachée et sont exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} H_1 &= \tanh(0.5x(-0.302xY - 0.974xX + 0.4197xB + 0.115)) \\ H_2 &= \tanh(0.5x(-1.054xY - 0.951xX - 1.187xB + 6.274)) \\ H_3 &= \tanh(0.5x(-1.776xY - 1.451xX - 0.073xB + 3.095)) \\ H_4 &= \tanh(0.5x(-0.059xY + 0.053xX + 0.670xB + 0.082)) \\ H_5 &= \tanh(0.5x(1.242xY + 1.025xX - 0.254xB - 5.652)) \\ H_6 &= \tanh(0.5x(3.460xY + 1.722xX - 2.249xB - 6.381)) \end{aligned} \quad (VI.10)$$

Les résultats prédits et observés pour les cas d'entraînement et de validation sont présentés dans la figure (VI.3).



Figures VI. 3: Valeurs prédites par rapport aux valeurs numériques pour la capacité portante q_u .

Comme le montre la figure (VI.3), il est crucial de noter que l'intersection entre les valeurs numériques et prédites de la capacité portante (q_u) est proche de la ligne médiane pour les deux cas. Le coefficient de détermination R^2 est de 0,9991 pour le cas d'apprentissage et de 0,996 pour le cas de validation ; la valeur de la RMSE est de 6,5125 et 4,716 pour les deux cas, respectivement. Cela révèle la robustesse du modèle mathématique ajusté.

VI.4.3 Comparaison des modèles RSM et ANN

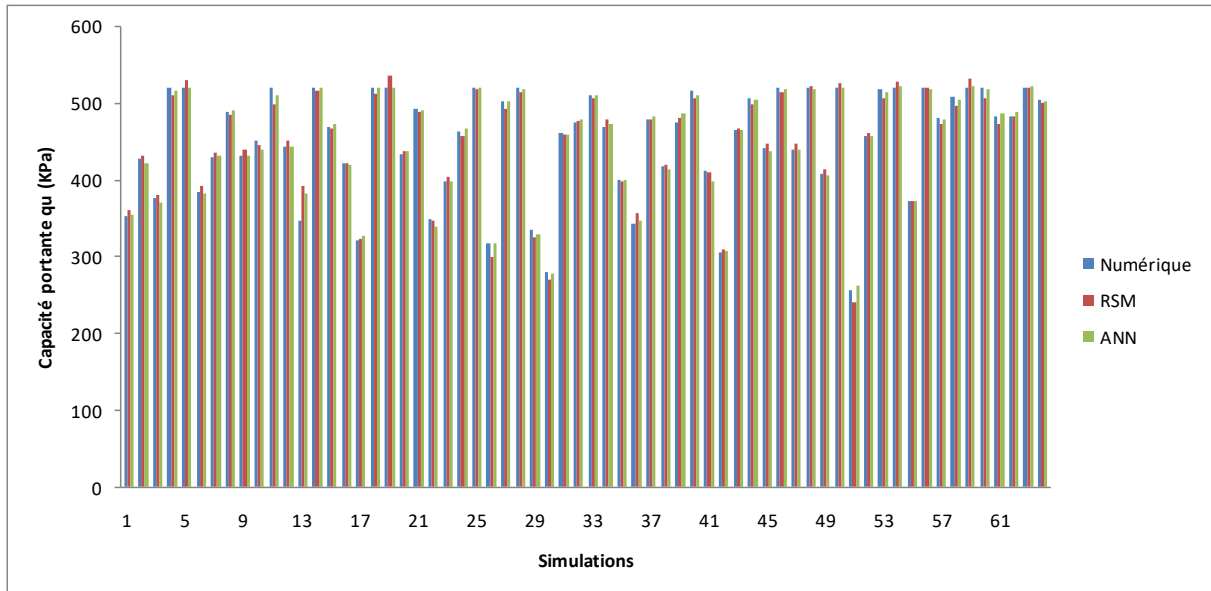
Une comparaison entre les méthodes RSM et ANN a été établie pour déterminer la précision des modèles prédictifs. À cette étape, certaines comparaisons étaient nécessaires pour évaluer la différence entre les résultats numériques et les valeurs prédites obtenues par les modèles RSM et ANN. Les critères de comparaison pour les deux modèles prédictifs sont le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, les faibles valeurs de l'erreur quadratique moyennent (RMSE) et de l'erreur absolue moyenne (MAE). Les différences entre les réponses numériques et prédites en utilisant les modèles RSM et ANN sont présentées dans la figure VI.4. Il est évident d'après cette figure que les valeurs numériques et prédites par le modèle ANN sont très proches les unes des autres comparativement aux valeurs prédites par le modèle RSM.

Tableau VI. 4: Comparaison entre RSM et ANN.

RSM			ANN		
R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
0.9813	9.666	6.868	0.9923	6.193	3.568

En effet, le coefficient R^2 obtenus par le modèle RSM est : 0,9813, tandis que la valeur correspondante obtenue à l'aide du modèle ANN est : 0,9923 (voir tableau VI.4). De plus, les

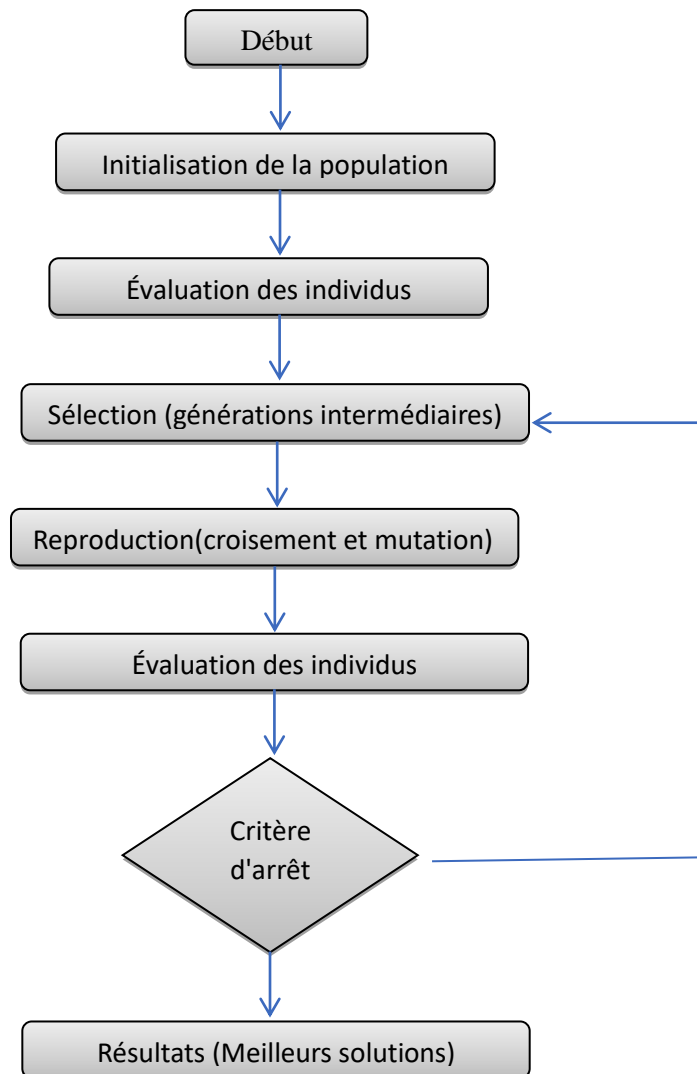
valeurs estimées de la RMSE et de la MAE basées sur le modèle ajusté par ANN sont plus précises que celles du modèle RSM. Les valeurs calculées de la RMSE et de la MAE sont : 6.193 et 3.568 pour le modèle ANN, et leurs valeurs pour le modèle RSM sont : 9.666 et 6.868. En conséquence, le modèle ANN sera adoptée pour le processus d'optimisation par la suite.



Figures VI. 4: Comparaison entre les valeurs de la capacité portante numériques et prédites Par RSM et ANN.

VI.5. Optimisation par l'utilisation de l'algorithme génétique

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. De nombreuses méthodes d'optimisation sont disponibles pour résoudre les problèmes à la fois contraints et non contraints.



Figures VI. 5: Diagramme de l'algorithme génétique.

Les algorithmes génétiques (AG) sont les méthodes d'optimisation les plus largement utilisées. Tout d'abord, en commençant par créer une population initiale arbitraire nommée chromosomes, considérée comme une solution initiale, dont la performance principale est l'évaluation de la fonction d'adaptation. Ensuite, selon les résultats obtenus, plusieurs paires parmi ces solutions potentielles sont générées en utilisant des techniques évolutives telles que la sélection, le croisement et la mutation. Le système de résolution peut répéter cette procédure jusqu'à l'obtention de la meilleure solution [36].

L'objectif recherché dans la procédure d'optimisation est la maximisation de la capacité portante de la semelle (q_u), cela sera réalisé avec trois variables d'entrée (Y , X et B). La profondeur des excavations (Y) a été variée entre 1.0 m et 2.5 m, la distance entre les excavations a été varié entre 1.0 m et 3.0 m, et la largeur des excavations entre 0.5 m et 2.0 m. L'outil d'algorithme

génétique est utilisé sur la base du modèle mathématique formulé par la méthode ANN. Les contraintes utilisées dans le processus d'optimisation sont présentées dans le tableau (VI.5).

Tableau VI. 5: Conditions d'optimisation.

Paramètres	Objective	Limite inférieure	Limite supérieure
Y (m)	Dans l'intervalle	1.0	2.5
X (m)	Dans l'intervalle	1.0	3.0
B (m)	Dans l'intervalle	0.5	2.0
qu (kPa)	Maximisation	256.9	520.8

Les caractéristiques de l'algorithme génétique, telles que la population, l'indice de distribution du croisement, l'indice de distribution de mutation, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation, ont été définies à l'aide de la boîte à outils GA implémentée dans le logiciel Matlab, comme présenté dans le tableau (VI.6).

Tableau VI. 6: Paramètres de l'algorithme génétique (GA).

Paramètres	Valeurs
Nombre de variables	3
Taille de population	100
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fraction de croisement	0.8
Probabilité de mutation	0.2
Nombre de générations	100

Le tableau (VI.7) présente les résultats obtenus grâce à l'optimisation par algorithme génétique des paramètres géométriques et de la capacité portante qu.

Tableau VI. 7: Résultats de l'optimisation.

N°	Y	X	B	qu
1	2,337	1,666	0,500	524,664
2	2,429	2,732	1,000	520,919
3	2,500	2,969	1,500	517,281
4	2,456	2,897	2,000	521,695

VI.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons validé la méthodologie d'optimisation proposée pour identifier les facteurs géométriques influençant la capacité portante des fondations situées au-dessus des excavations. L'étude a porté sur trois variables principales : la profondeur des excavations (Y), la distance entre les excavations (X) et la largeur des excavations (B). Nous avons utilisé deux approches prédictives : la méthode de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN).

Un plan d'expériences factoriel complet (L64) a été appliqué pour modéliser les différentes combinaisons de variables. Les résultats de la modélisation ont montré que les réseaux de neurones artificiels (ANN) offrent une précision prédictive supérieure par rapport à la méthode de surface de réponse (RSM), les réseaux de neurones artificiels (ANN) présentant des coefficients de détermination plus élevés et des valeurs plus faibles de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de l'erreur absolue moyenne (MAE).

Enfin, Les résultats de l'optimisation ont démontré l'efficacité de cette méthodologie pour déterminer les valeurs optimales des variables Y, X et B, aboutissant à une capacité portante maximale. Cette étude souligne l'importance de l'intégration des techniques avancées de modélisation et d'optimisation pour améliorer la conception des fondations au-dessus des excavations. Les résultats obtenus peuvent servir de référence pour des applications pratiques et des recherches futures dans ce domaine.

A decorative frame consisting of a horizontal bar with rounded ends and a vertical bar on the left side, all with rounded ends. The frame is drawn with a thin black line and contains the title text in the center.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion générale et perspectives

La sécurité et la stabilité des excavations souterraines sont essentielles pour assurer la durabilité des projets et la protection des personnes et des biens. Dans cette étude, nous avons exploré les possibilités offertes par l'intelligence artificielle (IA) pour optimiser la localisation et les dimensions des excavations souterraines, ce qui représente une avancée majeure dans le domaine de l'ingénierie géotechnique.

En combinant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) avec le logiciel de calcul par éléments finis Plaxis 2D, nous avons développé une approche novatrice pour relever les défis complexes liés à la conception des excavations souterraines. Cette approche nous a permis de traiter de vastes ensembles de données géotechniques, d'analyser des modèles complexes et de prédire avec une précision accrue le comportement futur des structures souterraines.

L'objectif principal de cette étude était de confirmer la méthode d'optimisation proposée en optimisant les paramètres géométriques qui influencent la capacité portante des fondations au-dessus des excavations. En utilisant des plans d'expériences numériques et le logiciel Plaxis 2D, nous avons pu analyser la capacité portante non drainée des fondations au-dessus des excavations et déterminer les paramètres de comportement fréquemment utilisés dans la modélisation.

Un plan d'expériences numériques a été adopté pour étudier les paramètres géométriques qui influencent la capacité portante des fondations au-dessus des excavations souterraines, à savoir la profondeur des excavations (Y), la distance entre les excavations (X) et la largeur des excavations (B). L'utilisation de plans d'expériences permet d'établir un plan qui maximise la précision des résultats avec un minimum d'expériences.

Dans notre cas d'étude, nous avons utilisé un plan d'expériences factoriel complet (L_{64}), ce qui signifie que nous avons réalisé 64 modèles numériques en utilisant le logiciel Plaxis. Les résultats de cette étude ont été structurés en six chapitres, comprenant une recherche bibliographique exhaustive, la présentation des plans d'expériences, l'utilisation de méthodes avancées de prédiction, l'exploration du logiciel Plaxis 2D, la validation de la modélisation et une étude statistique des résultats. Chaque chapitre a contribué à une compréhension approfondie et à une validation de notre approche.

Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent la voie à plusieurs perspectives stimulantes pour la recherche future et les applications pratiques dans le domaine des excavations souterraines :

- Amélioration des modèles prédictifs : en intégrant des techniques de machine learning plus avancées et en exploitant de nouvelles sources de données géotechniques, il serait possible d'améliorer la précision des modèles prédictifs.
- Élargissement des domaines d'application : cette approche pourrait être étendue à d'autres types de structures géotechniques telles que les digues, les barrages et les remblais. En adaptant la méthodologie à des contextes géotechniques spécifiques, tels que les sols sablonneux ou les terrains rocheux, il serait possible de proposer des solutions sur mesure pour différents projets d'ingénierie.
- Collaboration interdisciplinaire : un renforcement de la collaboration entre les experts en géotechnique, les spécialistes de l'IA et les développeurs de logiciels favoriserait l'innovation et le développement de nouvelles solutions pour la conception et la construction d'infrastructures souterraines.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Abdelhak MABROUKI, « MODELISATION NUMERIQUE DE L'INTERACTION ENTRE UNE FONDATION SUPERFICIELLE ET D'AUTRES CONSTRUCTIONS », thèse de doctotat, **Université Mohamed Khider - Biskra**, juin 2011
- [2] PROF. AMAR KASSOUL – (2015/2016), « cours : ossatures bâtiment-chapitre 02: les fondation-uhbchlef»
- [3] BENDAAS AZEDDINE, Modélisation numérique des fondations superficielles situées au bord d'une pente de talus renforcé, thèse de doctotat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1, 13/01/2024.
- [4] Saifi Insaf, Contribution à l'évaluation de la portance non-drainée des fondations circulaires et annulaires par approche numérique, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 11/05/2017.
- [5] BENDAAS AZEDDINE, Modélisation numérique des fondations superficielles situées au bord d'une pente de talus renforcé, thèse de doctotat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1, 13/01/2024.
- [6] SAADI Djamel, Analyse numérique de l'effet des cavités sur la capacité portante de deux fondations superficielles interférées reposant sur un sol granulaire, Doctorat, Université Batna 2 – Mustapha Ben Boulaid, 18 Février 2021
- [7] Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. I, No. 1, pp. 16326.
- [8] Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *J. Soil mech. Found.Div, ASCE 99*, No. SM1, 45373.
- [9] Abdelhak MABROUKI, « MODELISATION NUMERIQUE DE L'INTERACTION ENTRE UNE FONDATION SUPERFICIELLE ET D'AUTRES CONSTRUCTIONS », thèse de doctotat, **Université Mohamed Khider - Biskra**, juin 2011.
- [10] Jacques Goupy. Lee Creighton, Introduction aux plans d'expériences.
- [11] Taguchi G., Konishi S., Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graph, tools for quality engineering. American supplier institute, pp. 35-38, (1987).
- [12] Özel T., et Karpat Y., Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no 4, p. 467-479.

Bibliographie

- [13] Myers R. H., and Montgomery D. C., Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc.: New York, (2002).
- [14] Bendell A., Disney J., Pridmore W., (1989) Taguchi methods: applications in world industry, IFS Publications, Bedford.
- [15] Rowlands H., Antony J., Knowles G., (2000) An application of experimental design for process optimization. TQM Mag 12(2):78–83.
- [16] Günay M., Kaçal A., Turgut Y., (2011) Optimization of machining parameters in milling of Ti–6Al–4 V alloy using Taguchi method. E-J New World Sci Acad Eng Sci 6(1) : 428–440.
- [17] El Mahdi BRAKNI RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS APPLIQUÉS À LA MÉTHODE ÉLECTROMAGNÉTIQUE TRANSITOIRE InfiniTEM , mémoire magister UNIVERSITÉ DU QUÉBEC -TÉMISCAMINGUE Mai 2011.
- [18] Abdesslem Chamekh. Optimisation des procédés de mise en forme par les réseaux de neurones artificiels. Mécanique [physics.med-ph]. Thèse de doctorat. Université d'Angers, 2007. Français.
- [19] Dreyfus G., Martinez J-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria SS., Hérault L, Réseaux de neurones : Méthodologie et Applications, Eyrolles, 2002.
- [20] Fathi Insaf, Yacef Safa « Prédiction du tassement d'une fondation Superficielle en utilisant les réseaux de Neurones artificiels », Mémoire en Master Académique, Université Mohammed Seddik Ben Yahia -Jijel, juillet 2019
- [21] Mohamed Yessin Ammar. Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch-continu. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2007.
- [22] M. KHEMOUM Imad et M. GUIDOUM Nedjm Eddine, Université OEB, 2017. "Etude paramétrique du comportement d'un mur de soutènement renforcé par la géogrille "
- [23] M. ATTALLAOUI Samir, Université de Biskra, 2017." Analyse numérique du comportement des culées porteuses en sol renforcé "
- [24] SEMACHE Samir, Université d'Oum El Bouaghi, 2019." Analyse numérique des déformations des culées de pont en sol renforcé "
- [25] ABDERRAHIM Zakariya et HACHEMI Abdelaziz , (2019) , Optimisation des paramètres géotechnique des sols par la méthode des surfaces de réponse , Mémoire de master , Université de guelma (algérie) , Département de génie civil et hydrolyque .

Bibliographie

- [26] Monsieur J. Brinkgreve, Manuel de référence Plaxis V8 (Delft University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003).
- [27] Joon Kyu Lee, Sangseom Jeong , Junyoung Ko (2014). "Undrained stability of surface strip footings above voids & quot;. *Computers and Geotechnics* 62(2014) 128–135
- [28] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, Wiley, New York. (2016).
- [29] Zerti, A., Yallese, M.A., Meddour, I. *et al.* (2019). Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness, cutting force, and power, and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations. *Int J AdvManuf Technol***102**, 135–157 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2984-8>
- [30] Y. Nagata, K.H. Chu, (2003). Optimization of a fermentation medium using neural networks and genetic algorithms. *Biotechnol. Lett.* 25, 1837–1842 (2003).
- [31] Meddour, I., Yallese, M.A., Bensouilah, H. *et al.*(2018). Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool.*Int J AdvManuf Technol***97**, 1931–1949 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2026-6>.
- [32] Kalman BL, Kwasny SC (1992). Why Tanh: choosing a sigmoidal function, *Proc. Int. Jt. Conf Neural Network*. Baltimore, 4 578–581.
- [33] Labidi, A., Tebassi, H., Belhadi, S. *et al.*(2018). Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function. *J Fail. Anal. and Preven.***18**, 1017–1033 (2018).<https://doi.org/10.1007/s11668-018-0501-x>
- [34] M. Ramezani, A. Afsari, (2015). Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks. *Manag. Sci. Lett.* 5, 357–362 (2015).
- [35] K.R. Kashyzadeh, E. Maleki, (2017). Experimental investigation and artificial neural network modeling of warm galvanization and hardened chromium coatings thickness effects on fatigue life of AISI 1045 carbon steel. *J. Fail. Anal. Prev.* 17(6), 1276–1287(2017).
- [36] Reddy NSK, Rao PV (2005). Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *Int J Adv Manuf Technol* 26(11–12):1202–1210.