

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matériaux en génie civil

Intitulé :

**Prédiction de la portance d'un sol renforcé par
géosynthétiques en utilisant l'Apprentissage Automatique**

Soutenue le : 28/05 /2025

Présenté par :

- 1. MESSAOUDI OUAHIDA**
- 2. GUESSOUM IMANE**

Encadré par :

Dr : FARIK Ali

Année académique : 2024/2025

الإهداء

من قال انا لها "نالها"

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون،
لم يكن الحلم قريبا ولا طريق كان محفوا بالتسهيلات،
لكني نلتها وفعلتها.

الحمد لله على لذة الإنجاز والحمد لله عند البدء وعند الختام.
الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا، الذي بفضلها ها نحن اليوم ننظر
الى حلما طال انتظاره وقد أصبحا واقعا افتخر به.
الى ملاكي الطاهر، وقوتي بعد الله، داعمتي الأولى والأبدية "امي"
اهديك هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود، ممتنة لأن
الله قد اصطفاك لي من البشر، أما يا خير سند وعوض
الى من دعمني بلا حدود واعطاني بلا مقابل "ابي"
الى من قيل فيهم:

(سنشد عضدك بأخيك)

الى من مد يده دون كلل ولا ملل وقت ضعفي
اخوتي

ومن كانوا لنا نصيب في دنيا صديقاتي.

إيمان

وحيدة

شكر و عرفان

أعبر عن خالص شكري وامتناني للأستاذ الدكتور علي فريك ،
مشرفي الكريم، على دعمه المتواصل وتوجيهاته السديدة طوال
فترة إعداد مذكرة التخرج. لقد كان لخبرته العلمية ونصائحه القيمة
الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل بأفضل صورة ممكنة.

كما نشكر أعضاء اللجنة الموقرة على ملاحظاتهم القيمة،
وعلى ما بذلتموه طيل سنوات تدريسنا وعلى الوقت الذي
خصصتموه لمتابعة كل تفاصيل البحث، مما كان له بالغ الأثر في
تطوير مهاراتي العلمية والبحثية.

أتمنى لكم دوام الصحة والتوفيق، وأتطلع إلى الاستفادة من علمكم
في المستقبل.

إيمان

وحيدة

Résumé

Résumé

Les projets de construction rencontrent des défis importants lorsqu'ils s'implantent sur des sols faibles comme les sables lâches, dont la faible capacité portante peut provoquer des tassements excessifs ou des instabilités structurelles. Le renforcement des sols par géosynthétiques s'impose comme une solution efficace pour améliorer cette capacité. Toutefois, évaluer précisément la capacité portante reste une tâche complexe en raison du comportement non linéaire des sols, surtout lorsqu'ils sont renforcés.

Ce mémoire propose une approche combinant la méthode des éléments finis (à l'aide du logiciel PLAXIS 3D) et l'apprentissage automatique pour prédire de manière rapide et fiable la capacité portante des sols renforcés par géosynthétiques. Un total de 359 simulations numériques a été réalisé, couvrant un large éventail de configurations géométriques et géotechniques afin de constituer une base de données.

Deux modèles d'intelligence artificielle ont été développés à partir de ces données : les réseaux de neurones artificiels (RNA) et la régression à vecteurs de support (SVR). Les résultats obtenus montrent une précision satisfaisante, avec une légère supériorité du modèle SVR. L'angle de frottement interne (ϕ) a été identifié comme le paramètre le plus influent sur la capacité portante.

L'approche proposée constitue une alternative rapide, fiable et automatisée aux méthodes numériques classiques, grâce à l'implémentation d'un programme Python simple et accessible pour la prédiction de la capacité portante.

Mot clés : Renforcement du sol, capacité portante, fondation superficielle, modélisation numérique, intelligence artificielle, apprentissage automatique.

Abstract:

Construction projects face significant challenges when built on weak soils such as loose sands, whose low bearing capacity can lead to excessive settlements or structural instabilities. Soil reinforcement using geosynthetics is an effective solution to enhance bearing capacity. However, accurately determining bearing capacity remains complex due to the nonlinear behavior of soils, especially when reinforced.

This thesis proposes an approach combining the finite element method (using PLAXIS 3D) and machine learning to quickly and reliably predict the bearing capacity of geosynthetic-reinforced soils. A total of 359 numerical simulations were conducted, covering a wide range of geometric and geotechnical configurations to build a comprehensive dataset.

Two artificial intelligence models were developed from this dataset: artificial neural networks (ANN) and support vector regression (SVR). The results showed good prediction accuracy, with SVR performing slightly better. The internal friction angle (ϕ) was identified as the most influential parameter affecting bearing capacity.

The proposed approach provides a fast, reliable, and automated alternative to traditional numerical methods, enabled by a simple and accessible Python program for bearing capacity prediction.

Keywords: Soil reinforcement, bearing capacity, shallow foundation, numerical modeling, artificial intelligence, machine learning.

ملخص

تواجه مشاريع البناء تحديات كبيرة عند تنفيذها على تربة ضعيفة مثل الرمال الرملية، حيث يمكن لسعة التحمل المنخفضة أن تؤدي إلى هبوطات مفرطة أو عدم استقرار هيكلي. يُعتبر تعزيز التربة باستخدام الجيوسينثتيك حلاً فعالاً لتحسين قدرة التحمل. ومع ذلك، تبقى عملية تحديد قدرة التحمل بدقة معقدة بسبب السلوك غير الخطي للتربة، خاصة عند تعزيزها.

يقترح هذا البحث نهجاً يجمع بين طريقة العناصر المحددة (باستخدام برنامج PLAXIS 3D) والتعلم الآلي للتنبؤ بسرعة وبدقة بقدرة التحمل للتربة المعززة بالجيوسينثتيك. تم إجراء 359 محاكاة رقمية شملت مجموعة واسعة من التكوينات الهندسية والجيوتقنية لبناء قاعدة بيانات شاملة.

تم تطوير نموذجان من الذكاء الاصطناعي باستخدام هذه البيانات: الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) وانحدار دعم المتجهات (SVR). أظهرت النتائج دقة جيدة في التنبؤ، مع تفوق طفيف لنموذج SVR. كما تم تحديد زاوية الاحتكاك الداخلية (ϕ) كأهم عامل مؤثر على قدرة التحمل.

يوفر النهج المقترح بديلاً سريعاً وموثوقاً ومؤتمناً للطرق العددية التقليدية، مع إمكانية تطبيق برنامج بسيط وسهل الاستخدام بلغة بايثون للتنبؤ بقدرة التحمل.

الكلمات المفتاحية: تدعيم التربة، قدرة التحمل، الأساسات السطحية، النمذجة العددية، الذكاء الاصطناعي، التعلم الآلي.

I. Liste d'abréviation

σ_h : Contrainte horizontale.

σ_v : Contrainte verticale.

σ_a : Contrainte de poussée.

σ_p : Contrainte de butée.

σ_1 : Contrainte principale.

τ : Contrainte tangentielle.

γ : Distorsion.

γ : Poids volumique.

K_0 : Coefficient de pression de terre au repos.

K_a : Coefficient de poussée.

K_p : Coefficient de butée.

K_q : Coefficient de pression due à la surcharge.

K : Matrice de rigidité.

R_0 : Rapport de sur consolidation.

C : La cohésion.

ν : Coefficient de poisson.

E : Module d'Young.

φ : Angle de frottement.

ψ : Angle de dilatance.

δ : Angle de frottement sol - Mur.

θ : Angle de rupture.

λ : Angle du parement incliné.

β : l'inclinaison du remblai d'arrière le mur.

e : Excentricité.

F_a : Force de poussée.

F_p : Force de butée.

q : Surcharge uniformément répartie.

F_r : Coefficient de sécurité au renversement

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Généralités sur les fondations et les Techniques de l'amélioration du sol	
I.1. Introduction	4
I.2. Rôle des Fondations dans les Ouvrages	4
I.3. Facteurs Influent dans la Conception des Fondations	5
I.3.1. La composition géologique du site	5
I.3.2. Charge Structurale	6
I.4 Les différents types de Fondations en Génie Civil	6
I.4.1 Fondations Superficielles	6
I.4.2 fondations Profondes	7
I.5. Conception des fondations	8
I.6. Fonctionnement des fondations superficielles	9
I.6.1. Comportement d'une semelle chargée	9
I.6.2. Mécanismes de rupture d'une fondation superficielle	11
I.6.3. Types de rupture dans le sol à une charge ultime	12
I.7. Calculs de la capacité portante des fondations superficielles	13
I.7.1. Définition de la capacité portante des fondations	14
I.7.2. Détermination de ql à partir des essais de laboratoire (méthode "φ-c")	15
I.7.3. Méthode pressiométrique	17
I.7.4. Logiciels de Calcul Couramment Utilisés	21
I.8. Tendances Futures et Innovations dans les Fondations	22
I.8.1. Digitalisation et Modélisation Avancée	22
I.8.2. Matériaux Innovants	23
I.9. Techniques de renforcement des sols	23
I.10. Renforcement des sols à faible capacité portante à l'aide de techniques géosynthétiques	25
I.10.1. Types de géosynthétiques	25
I.10.2. Avantages des géosynthétiques	29
I.11. Conclusion	32

CHAPITRE II : Introduction à l'apprentissage automatique	
II.1. Introduction	34
II.2. Classification des algorithmes d'intelligence artificielle	35
II.2.1. Apprentissage supervisé (Supervised Learning)	35
II.2.2. Apprentissage non supervisé (Unsupervised Learning)	35
II.2.3. Apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning)	36
II.2.4. Apprentissage profond (Deep Learning)	37
II.3. Applications de l'intelligence artificielle en génie civil	37
II.3.1 Conception et Analyse Structurale	37
II.3.2 Gestion de Projets de Construction	38
II.3.4 Ingénierie Géotechnique	38
II.4 Réseau de neurones artificiels	39
II.4.1 Modèle d'imitation mathématique, perceptron	39
II.4.2 Caractéristique non linéaire, fonction d'activation	40
II.4.3 Construction d'un modèle de réseau, perceptron multicouche	41
II.5. Bref du Principe des Machines à vecteurs de support Pour Classification et régression	42
II.5.1. Introduction	42
II.5.2 Qu'est-ce que la machine à vecteur de support	42
II.5.3 Description de l'algorithme SVM	43
II.5.4. Support Vector Regression	44
II.5.4.1 Qu'est-ce qu'une régression vectorielle de support	44
II.5.4.2 Le principe de SVR	44
II.5.4.3 Terminologies importantes dans la régression des vecteurs de support	44
II.5.4.4 Les paramètres de support vectors regressions (SVR)	47
II.6. Conclusion	48
CHAPITRE III : Presentation des outils de simulation numerique	
III.1.Introduction	50
III.2. Concepts fondamentaux	50
III.3. Le code de calcul PLAXIS	52
III.3.1. Unité et convention de signe	52
III.3.2 Convention de signe	53
III 4. Les sous-programmes de Plaxis	54
III 4.1. Le programme d'entrée de données (Input)	54
III.4.1.1. Barre de menu (bar menu)	54

III.4.2. Les modes géométriques disponibles sont	56
III.4.2.1. Programme de calcul :	56
III .4.3. Le programme de résultats (Output)	61
III.4.4. Le programme courbe (Curves)	62
III.5. Les modèles de comportements utilisés dans PLAXIS	63
III.5. 1.Comportement élastoplastique	63
III.5.2. Modèle élastique linéaire	64
III.5.3. Le modèle de Mohr-Coulomb(MC)	64
III.5.3.1. Le module de Young	64
III.5.3.2. Le coefficient de poisson	65
III.5.3.3. L'angle de frottement interne ϕ	65
III.5.3.4. La cohésion	66
III.5.3.5. L'angle de dilatance ψ	66
III.5.3.6. Les contraintes de traction	66
III.5.3.7. Paramètres avancés	67
III.6. Modèle de sol durcissant (Hardening Soil model - HS)	67
III.6.1. Modèle de sol durcissant avec rigidité à faible déformation (HSsmall)	68
III.6.2. Modèle pour sols mous (Soft Soil model - SS)	68
III.6.3. Modèle pour sols mous avec effet du temps (Soft Soil Creep model - SSC)	68
III.6.4. Modèle Jointed Rock	68
III.6.5. Modèle Cam-Clay modifié (Modified Cam-Clay - MCC)	68
III.6.6. Modèle NGI-ADP	69
III.6.7. Modèle Hoek-Brown (HB)	69
III.6.8. Modèles définis par l'utilisateur (User-defined soil models - UDSM)	69
III.7. Conclusion	69
CHAPITRE IV : Application des méthodes d'apprentissage automatique pour la prédiction de la capacité portante	
IV.1. Introduction	71
IV.2. Présentation du modèle de référence	71
IV.2.1 Géométrie	71
IV.2.2 Caractéristiques des éléments du modèle	72
IV.2.3. Processus de modélisation numérique	72
IV.2.4. Maillage et conditions aux limites	73
IV.2.5. Les résultats	74

IV.2.5.1. Déplacement verticale	74
IV.2.5.2. Capacité portante	75
IV3.2. Amélioration de la portance du sol par des nappes géogrilles	76
IV.4. Elaboration d'un modèle d'intelligence artificielle pour la prédiction de la portance d'un sol renforcé par géogrilles (cas d'une semelle carrée)	77
IV.4.1. Introduction	77
IV.4.2. Collecte des données	78
IV.4.3. Développement du modèle de Réseau de Neurones Artificiels (RNA)	87
IV.4.3.1. Architecture du modèle RNA	87
IV.4.3.2. Optimisation de la configuration du réseau de neurones artificiels	89
IV.4.3.3. Analyse des résultats	90
IV.4.4. Développement du modèle du modèle SVR (Support Vector Regression)	93
IV.4.4.1. Architecture du modèle SVR	93
IV.4.4.2. Optimisation de la configuration du SVR	94
IV.4.4.3. Analyse des résultats (SVR)	95
IV.5. Conclusion	98
Conclusion générale	100
Bibliographique	

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I : Généralités sur les fondations et les Techniques de l'amélioration du sol		
Figure 1	<i>Composants de la structure porteuse et charges en construction</i>	5
Figure 2	<i>Chargement d'une semelle superficielle</i>	10
Figure 3	<i>Schéma de rupture du sol sous une fondation superficielle</i>	11
Figure 4	<i>Mécanisme général de rupture</i>	12
Figure 5	<i>Mécanisme de cisaillement localisé.</i>	12
Figure 6	<i>Rupture par poinçonnement</i>	13
Figure 7	<i>Schématisation de l'évolution des déplacements verticaux Sous une fondation.</i>	14
Figure 8	<i>Définition de la pression limite nette pl^* équivalente dans le cas d'une couche porteuse homogène.</i>	20
Figure 9	<i>Définition de l'encastrement équivalent d'une fondation superficielle.</i>	21
Figure 10	<i>Application de géogridde dans la construction routière</i>	25
Figure11	<i>Application des géonets dans le drainage des sols</i>	26
Figure12	<i>Pose de géomembrane par une équipe sur un site de confinement</i>	26
Figure 13	<i>Pose de géosynthétique sur le sol</i>	27
Figure14	<i>Géoconduites en polyéthylène haute densité (PEHD)</i>	27
Figure 15	<i>Stockage de matériaux pour les revêtements d'argile géosynthétiques</i>	28
Figure 16	<i>Exemple de géocomposite : géotextile associé à une géonatte</i>	28
Figure 17	<i>Installation de géotextile lors de travaux de terrassement</i>	29
Chapitre II : Introduction à l'apprentissage automatique		
Figure 1	<i>Concepts fondamentaux de l'apprentissage automatique</i>	34
Figure 2	<i>Structure d'un neurone et modèle de perceptron</i>	39
Figure 3	<i>fonction step, fonction sigmoïde, sa dérivée et fonction RLU</i>	41
Figure 4	<i>Structure de perceptron multicouche</i>	42
Figure 5	<i>machine a vecteurs de support</i>	43
Figure 6	<i>hyperplane</i>	46
Figure 7	<i>Support vector</i>	47
Chapitre III : Presentation des outils de simulation numerique		
Figure 1	<i>Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte Positive.</i>	54
Figure 2	<i>Fenêtre principale du programme input</i>	55
Figure 3	<i>Fenetre de calculations</i>	57

Figure 4	<i>Vue de tous les panneaux de la fenêtre Phases.</i>	58
Figure 5	<i>Fenêtre principale du programme Output.</i>	61
Figure 6	<i>Courbes dans le programme output</i>	62
Figure 7	<i>Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique</i>	63
Figure 8	<i>Représentation du comportement élastique parfaitement plastique</i>	63
Figure 9	<i>Définition des modules E_0 et E_{50}</i>	65
Figure 10	<i>Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$.</i>	67
Figure 11	<i>Fenêtre des paramètres avancés du Mohr-Coulomb</i>	67
CHAPITRE IV : Application des méthodes d'apprentissage automatique pour la prédiction de la capacité portante		
Figure 1	<i>Présentation du cas de référence</i>	71
Figure 2	<i>Génération du maillage</i>	74
Figure 3	<i>Maillage déformé du modèle (sans renforcement)</i>	74
Figure 4	<i>Déplacement vertical du sol (sans renforcement)</i>	75
Figure 5	<i>Évolution du tassement vertical au centre de semelle (sans renforcement)</i>	75
Figure 6	<i>Le principe de renforcement du sol par des géogrilles</i>	76
Figure 7	<i>Présentation de la géométrie du modèle (cas d'un sol renforcé par géogrilles)</i>	77
Figure 8	<i>Architecture adoptée du RNA</i>	89
Figure 9	<i>Extrait du code Python (RNA) pour le prétraitement des données (Importation, répartition (split) et normalisation de la base de données)</i>	90
Figure 10	<i>L'évolution de la fonction de perte (MSE) pendant l'entraînement du RNA</i>	91
Figure 11	<i>Corrélation entre les valeurs de capacité portante cibles et simulées pour la phase de d'apprentissage, de test et pour toute la base de données (RNA)</i>	92
Figure 12	<i>Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle RNA pour toute la base de données</i>	92
Figure 13	<i>Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle RNA pour toute la base de données</i>	93
Figure 14	<i>Extrait du code Python pour le prétraitement des données et la configuration du modèle SVR</i>	95
Figure 15	<i>Corrélation entre les valeurs de capacité portante cibles et simulées pour la phase de d'apprentissage, de test et pour toute la base de données (SVR)</i>	96
Figure 16	<i>Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle SVR pour toute la base de données</i>	96
Figure 17	<i>Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle SVR pour toute la base de données</i>	97

LISTE DES TABLEAUX

Page

Chapitre I : Généralités sur les fondations et les Techniques de l'amélioration du sol		
Tableau 1	<i>Comparaison entre Fondations Superficielles et Profondes</i>	8
Tableau 2	<i>coefficients de la capacité portante.</i>	16
Tableau 3	<i>Facteur de la capacité portante suivant DTU. 13.12.</i>	17
Tableau 4	<i>Définition des catégories conventionnelles des sols.</i>	18
Tableau 5	<i>Facteur de portance pressiométrique (fascicule 62-V, 1993).</i>	19
Chapitre III : Présentation des outils de simulation numerique		
Tableau 1	<i>Différents paramètres et unités.</i>	53
CHAPITRE IV : Application des méthodes d'apprentissage automatique pour la prédiction de la capacité portante		
Tableau 1	<i>Caractéristiques de sol de fondation et de la semelle</i>	72
Tableau 2	<i>Description de la base de données utilisée</i>	78-87

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine de la géotechnique, l'amélioration de la capacité portante des sols faibles constitue l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les concepteurs et ingénieurs en structures. Ce problème revêt une importance particulière lorsqu'il s'agit de fondations superficielles qui transmettent les charges des structures aux couches de sol superficielles aux caractéristiques mécaniques limitées. Les sables lâches présentent en effet une faible capacité portante et un tassement élevé, les rendant inadaptés à la réception directe des charges structurelles sans traitement.

Les méthodes traditionnelles d'amélioration des sols font appel à diverses techniques allant du compactage mécanique à l'injection de coulis. Cependant, le renforcement par géosynthétiques, et particulièrement par géogrilles, s'est imposé comme une solution pratique et économiquement viable. Cette technique repose sur un principe d'interaction tridimensionnelle entre les particules du sol et les éléments de renforcement polymériques, créant un mécanisme complexe qui améliore la résistance au cisaillement, modifie la distribution des contraintes et réduit les déplacements verticaux.

Dans ce contexte, la présente étude propose une méthodologie intégrée combinant des techniques avancées de modélisation numérique et des algorithmes d'apprentissage automatique. La première phase repose sur la méthode des éléments finis, mise en œuvre à l'aide du logiciel PLAXIS 3D, pour simuler avec précision le comportement du système sol-renforcement sous l'effet des charges appliquées. Cette phase permet d'analyser l'influence des paramètres clés de conception tout en générant une base de données destinée à l'entraînement de deux modèles d'intelligence artificielle : un réseau de neurones multicouches (RNA) et une régression à vecteurs de support (SVR).

L'organisation du mémoire suit une progression logique :

- Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique et présente les bases théoriques sur les fondations, la portance des sols, et les méthodes de renforcement.
- Le second chapitre introduit les concepts fondamentaux de l'apprentissage automatique et les principes des algorithmes utilisés.
- Le troisième chapitre décrit le processus de modélisation numérique avec PLAXIS 3D et les différentes fonctionnalités essentielles pour l'estimation numérique de la capacité portante des fondations.

- Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des résultats issus des modèles prédictifs développés. Il évalue la performance des approches RNA et SVR en termes de précision et de robustesse, valide les résultats à l'aide d'indicateurs statistiques appropriés, et réalise une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres les plus influents : la largeur de la semelle (B), la longueur des géogrilles (L), le rapport L/B , la rigidité axiale des géogrilles (EA), l'espacement entre la première nappe et la base de la semelle (e/b), l'espacement entre les nappes (h/b), l'angle de frottement du sol (φ), la cohésion (C) et le nombre de nappes (N).

Chapitre I

Généralités sur les fondations et les Techniques de l'amélioration du sol

I.1. Introduction :

Une fondation, dans le contexte du génie civil, est bien plus qu'un simple élément structurel. Elle représente le lien vital entre le sol et la superstructure, jouant un rôle crucial dans la stabilité et la longévité de tout ouvrage. Mais pour vraiment saisir son importance, il faut comprendre ses fonctions multiples et ses interactions complexes avec le sol et la structure qu'elle supporte.

Une fondation peut être définie comme la partie inférieure d'une construction, en contact direct avec le sol, chargée de transmettre et de répartir les charges de la structure au terrain d'assise. Cette définition, bien que technique, ne capture pas pleinement la complexité et l'importance de cet élément structurel. En réalité, une fondation est un système ingénieux conçu pour répondre à plusieurs exigences simultanément [1] .

I.2. Rôle des Fondations dans les Ouvrages

Les fondations remplissent plusieurs fonctions vitales, chacune contribuant à la stabilité, la sécurité et la fonctionnalité de l'ouvrage [2] :

- 1. Transfert des charges :** Répartition du poids de la structure et des charges sur une surface suffisante du sol pour éviter les tassements excessifs.
- 2. Stabilité :** Ancrage de la structure dans le sol et résistance aux forces latérales (vent, poussées des terres, séismes), notamment dans les zones à risque.
- 3. Isolation :** Protection contre l'humidité du sol et les remontées capillaires pour préserver l'intégrité du bâtiment et le confort intérieur.
- 4. Nivellement :** Compensation des irrégularités du terrain pour offrir une base plane et une répartition uniforme des charges.
- 5. Adaptation aux mouvements du sol :** Absorption des mouvements dans les zones sismiques ou à sols instables pour protéger la superstructure.

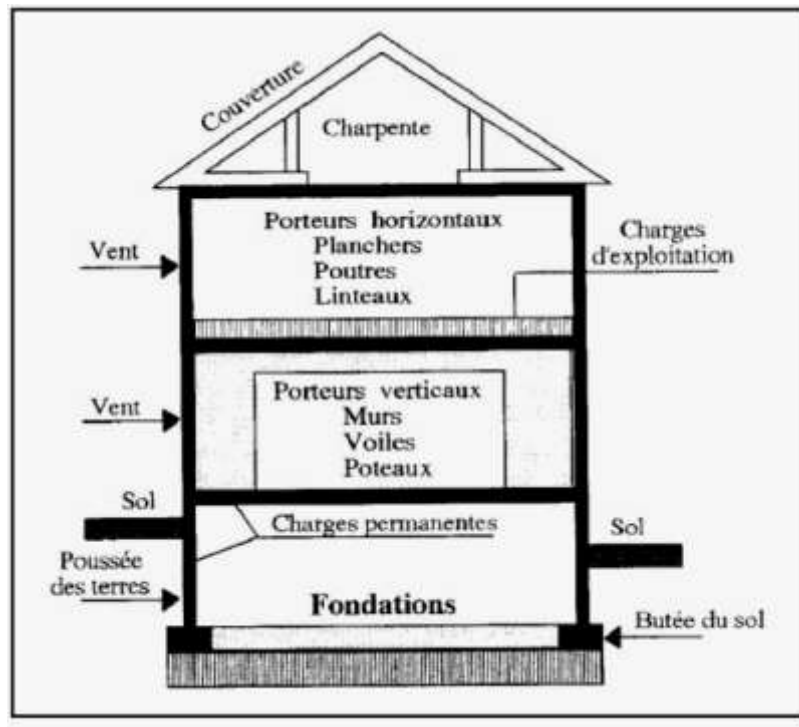


Figure I.1 : Composants de la structure porteuse et charges en construction[2]

I.3. Facteurs Influent dans la Conception des Fondations

La conception des fondations est un exercice complexe qui nécessite la prise en compte de nombreux facteurs interdépendants. Chaque projet présente ses propres défis et spécificités, et le géotechnicien doit savoir naviguer entre ces différentes contraintes pour proposer une solution optimale. Examinons les principaux facteurs qui influencent la conception des fondations. [3]

I.3.1. La composition géologique du site est le facteur le plus crucial dans la conception des fondations, car **les propriétés mécaniques du sol** déterminent le type de fondations, leurs dimensions et leur profondeur. Parmi ces propriétés clés [3] :

- **Cohésion** : Cette propriété mesure la force qui lie les particules du sol entre elles, indépendamment de la pression appliquée. Les sols cohérents, comme les argiles, ont un comportement très différent des sols non cohérents comme les sables.
- **Angle de frottement interne** : Il caractérise la résistance au cisaillement du sol et joue un rôle crucial dans la capacité portante des fondations.
- **Module de déformation** : Cet indicateur de la rigidité du sol sous charge est essentiel pour estimer les tassements potentiels.

- **Stratification** : La disposition des différentes couches de sol peut grandement influencer le choix du type de fondation. Un sol hétérogène avec des couches de résistance variable peut nécessiter des solutions plus complexes qu'un sol homogène.
- **Résence P d'eau** : Le niveau de la nappe phréatique et les fluctuations saisonnières peuvent affecter significativement les propriétés mécaniques du sol et doivent être pris en compte dans la conception.

Un sol rocheux ou un sol dense et homogène permettra généralement l'utilisation de fondations superficielles, tandis qu'un sol meuble, compressible ou hétérogène nécessitera souvent des fondations profondes ou des techniques de renforcement du sol.

I.3.2. Charge Structurale

- **Charges permanentes** : Poids des éléments structurels (murs, planchers) et équipements fixes. Varient selon les matériaux de construction.
- **Charges d'exploitation** : Liées à l'usage du bâtiment (mobilier, équipements, occupants). Définies par les normes selon le type de structure.
- **Charges environnementales** : Neige, vent et séismes. Variables selon la localisation géographique.

I.4 Les différents types de Fondations en Génie Civil

Il est important de noter que le domaine des fondations est en constante évolution, avec l'émergence régulière de nouvelles techniques et technologies. Cependant, les types de fondations peuvent généralement être classés en trois grandes catégories : les fondations superficielles, les fondations semi-profondes, et les fondations profondes. Nous examinerons également une catégorie spéciale de fondations conçues pour résister aux forces sismiques : les fondations parasismiques. [4]

I.4.1 Fondations Superficielles

Les fondations superficielles, comme leur nom l'indique, sont des ouvrages peu profonds qui transmettent les charges de la structure aux couches supérieures du sol.

Les fondations superficielles sont typiquement situées à une profondeur inférieure à 3 mètres sous la surface du sol, bien que cette définition puisse varier selon les normes et les pratiques locales. Elles sont particulièrement adaptées aux structures légères à moyennes, construites sur des sols de bonne qualité. [1]

I.4.2 fondations Profondes

Les fondations profondes se situent généralement à une profondeur supérieure à 10 mètres sous la surface du sol, bien que cela puisse varier en fonction des caractéristiques du site et des exigences du projet. Elles sont utilisées lorsque le sol de surface n'a pas une capacité portante suffisante ou lorsque les tassements prévus sont trop importants. [5]

a) Pieux :

Description : Ce sont des éléments verticaux ou légèrement inclinés, en béton, acier ou bois, qui transmettent les charges en profondeur.

Applications : Grands bâtiments, ponts, structures offshore, fondations dans des sols difficiles.

Avantages : Grande capacité portante, adaptation à diverses conditions de sol.

b) Micropieux :

Description : Pieux de petit diamètre (généralement < 250 mm), souvent renforcés par des barres d'armature ou des tubes métalliques.

Applications : Renforcement de fondations existantes, terrains difficiles d'accès, reprise en sous-œuvre.

(Généralement < 250 mm), souvent renforcés par des barres d'armature ou des tubes métalliques.

Pour aider à la décision entre fondations superficielles et profondes, voici un tableau comparatif [6]:

Tableau I.1: Comparaison entre Fondations Superficielles et Profondes

critère	Fondations superficielles	Fondations profondes
Profondeur	>3 mètres	< 3mètres
Cout	Généralement moins couteuses	Plus couteuses
Conditions du sol	Sols de bonne qualité en surface	Sols médiocres en surface
Charges supportées	Légères à moyennes	lourdes
Mise en œuvre	Plus simple et rapide	Plus complexe et longue
Tassements	Plus sensibles aux tassements	Moins sensibles aux tassements
Adaptabilité	Moins flexibles	Plus adaptables aux variations du sol
Contrôle qualité	Relativement	Plus complexe, nécessiter des essais spéciaux
Impact environnemental	Généralement moindre	Peut être plus important (bruit, vibrations)

I.5. Conception des fondations

L'étude géotechnique constitue l'étape fondamentale dans la conception des fondations, fournissant les données nécessaires pour garantir la durabilité et la sécurité des structures. Cette étude comprend des essais in situ et de laboratoire pour évaluer les caractéristiques du sol. [4]

Les essais in situ incluent notamment :

- **L'essai de pénétration standard (SPT)** qui mesure la densité des sols granulaires et la consistance des sols cohérents, permettant d'estimer la capacité portante et le risque de liquéfaction.

- **L'essai pressiométrique**, qui évalue la déformation du sol sous pression pour déterminer le module pressiométrique et la pression limite, contribuant à un dimensionnement précis des fondations superficielles et profondes.
- **L'essai de pénétration au cône (CPT)**, utilisé pour mesurer la résistance du sol, le frottement latéral et la pression interstitielle, facilitant l'analyse stratigraphique et l'estimation des tassements.
- **L'essai à la plaque**, qui permet d'évaluer le module de déformation et la capacité portante des couches superficielles, essentiel pour le dimensionnement des fondations superficielles.

Les essais de laboratoire comprennent[7] :

- **L'analyse granulométrique**, servant à classer le sol et évaluer sa perméabilité.
- **L'essai de cisaillement direct**, mesurant la cohésion et l'angle de frottement interne pour le calcul de la capacité portante et l'analyse de stabilité des pentes.
- **L'essai œdométrique**, déterminant le coefficient de consolidation et l'indice de compression pour prévoir les tassements à long terme.
- **L'essai triaxial**, analysant la résistance au cisaillement et le module de déformation, aidant à comprendre le comportement sol-structure et à optimiser le dimensionnement des fondations.

Ainsi, la conception optimale des fondations repose sur une analyse approfondie des propriétés du sol à travers ces essais, permettant de choisir le type de fondation adéquat (superficielle ou profonde) et d'éviter des problèmes futurs tels que des tassements excessifs ou des ruptures du sol. [1]

I.6. Fonctionnement des fondations superficielles

I.6.1. Comportement d'une semelle chargée

Les tassements qui vont se produire sous une semelle superficielle sont en fonction de l'intensité de la charge appliquée et qui ont l'allure de la Figure (I.2). [8]

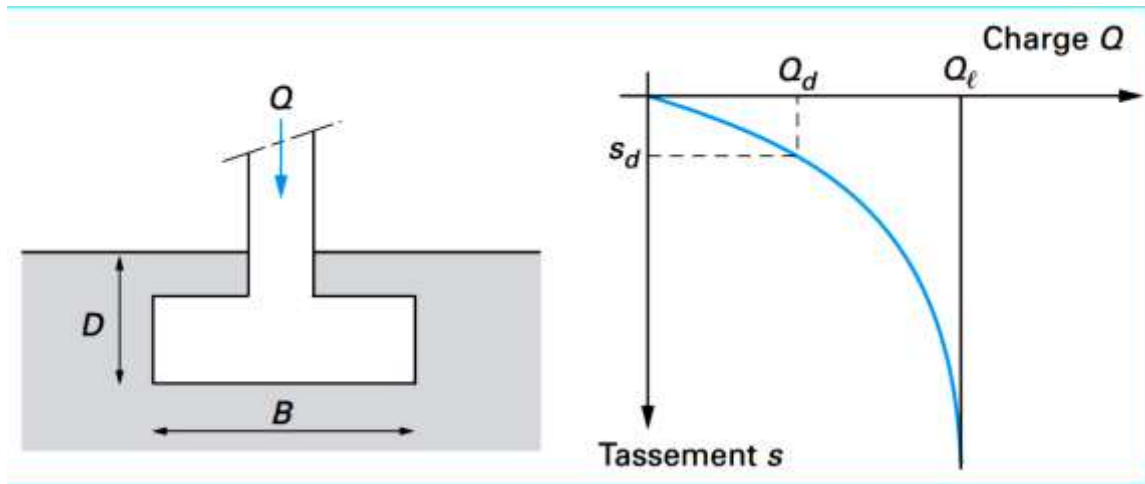


Figure I.2: Chargement d'une semelle superficielle[8]

➤ **Définition de la charge limite (Ql)**

Ql (charge limite de la fondation) : C'est la charge maximale que peut supporter la fondation avant d'atteindre la rupture. Étant donné que cette valeur n'est pas toujours clairement définie, on considère généralement Ql comme la charge correspondant à un tassement prédéterminé de la fondation. [9]

➤ **Calcul de la contrainte de rupture (ql)** : Si A représente l'aire de la fondation, la contrainte de rupture ql est calculée par la relation :

$$ql = \frac{Ql}{A} \quad (I.1)$$

Où :

- ql : Contrainte de rupture (contrainte maximale que le sol peut supporter sous la fondation).
 - Ql : Charge limite.
 - A : Aire de la fondation.
- **Détermination de la contrainte admissible (qa)** La contrainte admissible qa est la valeur utilisée par le bureau d'études pour dimensionner les fondations. Elle doit satisfaire deux conditions principales :
- **Critère de rupture (condition de sécurité)** : qa est déterminée en fonction d'un coefficient de sécurité fs (généralement pris égal à 3) pour éviter tout risque de rupture:

$$qa = \frac{ql}{fs} \quad (I.2)$$

- **Critère de tassement (condition de déformation) :** Même si la condition de sécurité est satisfaite, la fondation subira un tassement S (comme illustré dans la figure I.3) lorsque la contrainte admissible qa est appliquée sur le sol.

I.6.2. Mécanismes de rupture d'une fondation superficielle

Avant l'application de la charge sur une semelle, le sol de fondation est en état d'équilibre élastique. Lorsque la charge augmente au-delà d'une certaine valeur critique, le sol est en état d'équilibre plastique. Au moment de la rupture on peut distinguer sous une semelle trois zones principales[10]

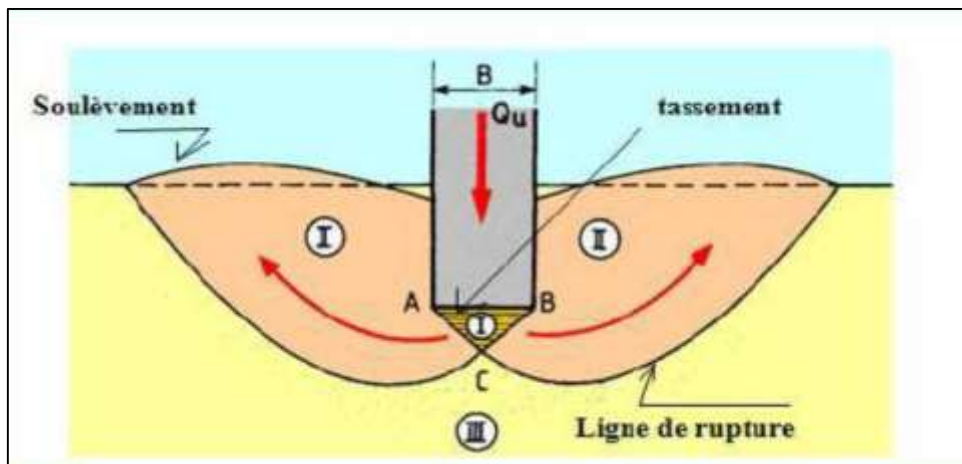


Figure I.3: Schéma de rupture du sol sous une fondation superficielle[10]

Le comportement mécanique du sol sous une fondation superficielle se répartit en trois zones distinctes[11] :

- La Zone I, située directement sous la semelle, où le sol est fortement comprimé et se déplace solidairement avec la fondation comme un bloc rigide, atteignant un état de rupture plastique ;
- La Zone II, entourant la Zone I, caractérisée par un refoulement du sol vers la surface avec des cisaillements intenses et une rupture généralisée ;
- La Zone III, plus éloignée, où le sol reste peu perturbé avec des déformations purement élastiques.

Le tassement total résulte de la combinaison de ces mécanismes : compression dans la Zone I, déformations plastiques dans la Zone II (zones critiques en rupture), et déformations élastiques mineures dans la Zone III. Cette modélisation zonale est essentielle pour prédire le comportement des fondations et assurer leur dimensionnement sécuritaire[11].

I.6.3. Types de rupture dans le sol à une charge ultime

Les résultats d'essais sur des semelles rigides montrent l'existence de trois mécanismes potentiels [12]:

- De rupture mobilisant un volume limité de sol (Vesic, 1963) ;

a- un mécanisme général ;

Il est caractérisé par la formation d'un coin sous la base de la fondation, qui refoule le sol.

- Latéralement selon des lignes de glissement débouchant à la surface ;

L'enfoncement de la fondation provoque généralement un soulèvement du sol d'autant plus important, et que la structure est moins déformable. C'est le cas pour les sols résistants.

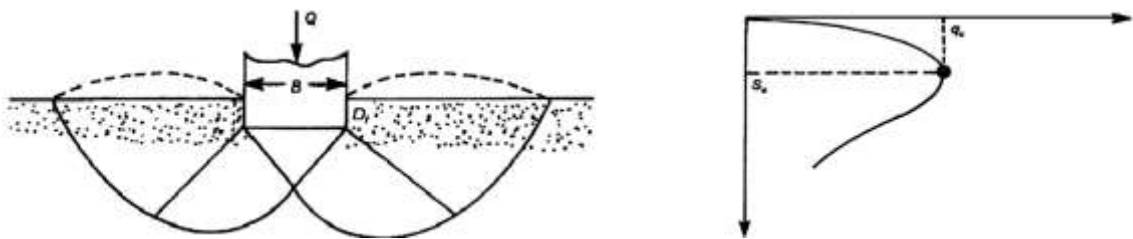


Figure I.4: Mécanisme général de rupture[12]

b. Un mécanisme de cisaillement localisé

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

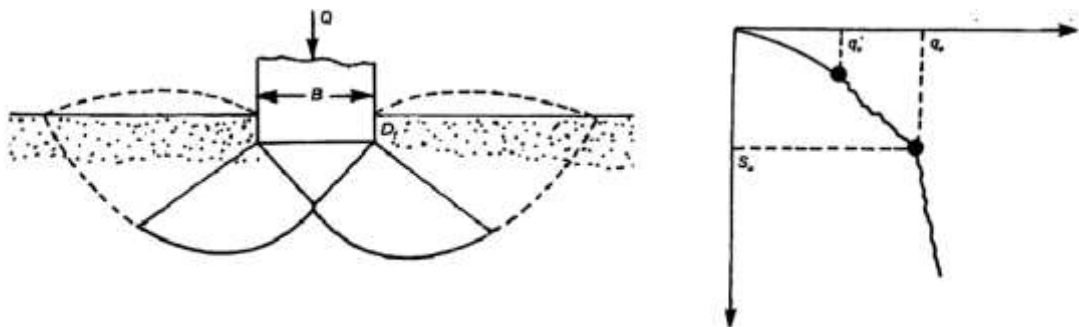


Figure I.5: Mécanisme de cisaillement localisé. [12]

c. Mécanisme de rupture par poinçonnement

Dans ce mode de rupture, la fondation s'enfonce verticalement dans le massif sans provoquer de perturbations significatives dans le sol environnant. Le comportement diffère selon le type de sol:

➤ **Pour les sols cohérents:**

- Développement de surpressions interstitielles sous chargement
- Conditions généralement non drainées (déformation à volume constant)
- Vitesse de chargement excédant la vitesse de dissipation des pressions

➤ **Pour les sols pulvérulents:**

- Réorganisation des particules sous chargement
- Variation volumique par :
 - Désenchevêtrement des grains (faibles contraintes)
 - Compactage (fortes contraintes)

La capacité portante peut être évaluée par des méthodes analytiques simples, sous réserve de connaître les paramètres de résistance du sol au voisinage immédiat de la fondation. Cette approche suppose une déformation localisée sans influence des zones périphériques. [13]

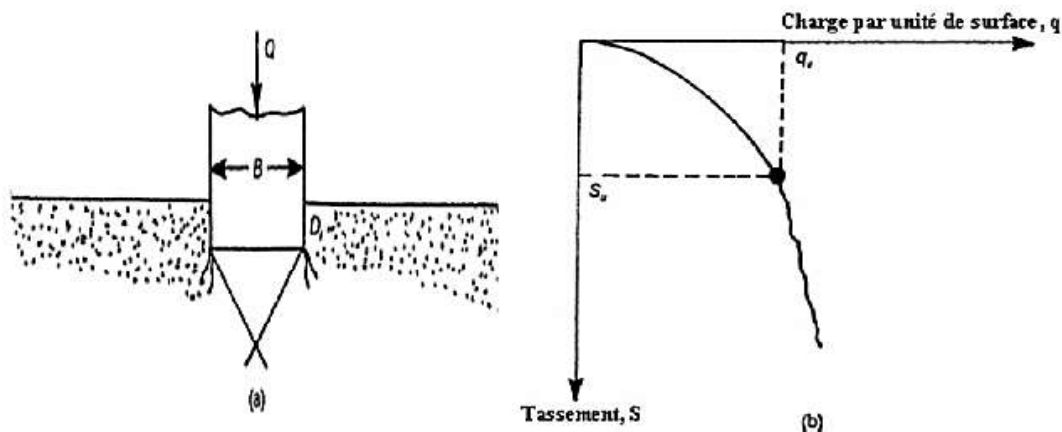


Figure I.6: Rupture par poinçonnement[13]

I.7. Calculs de la capacité portante des fondations superficielles

La capacité portante peut être déterminée selon deux approches principales [14]:

- **Méthodes directes** : Elles reposent sur des essais in situ tels que l'essai de chargement par plaque (essai de plaque), bien que rarement utilisé pour les fondations superficielles.

- **Méthodes indirectes** : Elles consistent à analyser les propriétés mécaniques du sol, mesurées en laboratoire ou sur le terrain à travers des essais tels que le pénétromètre (CPT ou SPT) ou les essais de cisaillement.

Les méthodes indirectes sont les plus couramment employées en raison de leur efficacité et de leur précision dans l'estimation de la capacité portante, tandis que les méthodes directes sont réservées à des cas particuliers nécessitant une validation des résultats ou dans des conditions géotechniques complexes.

I.7.1. Définition de la capacité portante des fondations

La capacité portante d'une fondation désigne la charge verticale maximale (Q_l) que le sol peut supporter avant d'atteindre un état de rupture géotechnique. Le système fondation-sol passe par trois phases distinctes sous l'effet de charges croissantes[11] :

- Phase élastique linéaire : Relation proportionnelle entre la charge et le tassement
- Phase de déformation plastique (au-delà de la charge de fluage Q_e) : Apparition de zones de cisaillement localisées
- Phase de rupture (à la charge critique Q_l) : Rupture par cisaillement généralisé dans la masse du sol

Les caractéristiques comportementales de ces phases varient selon :

- Le type de sol (sableux, argileux, rocheux)
- Les conditions de saturation en eau
- L'histoire des contraintes antérieures

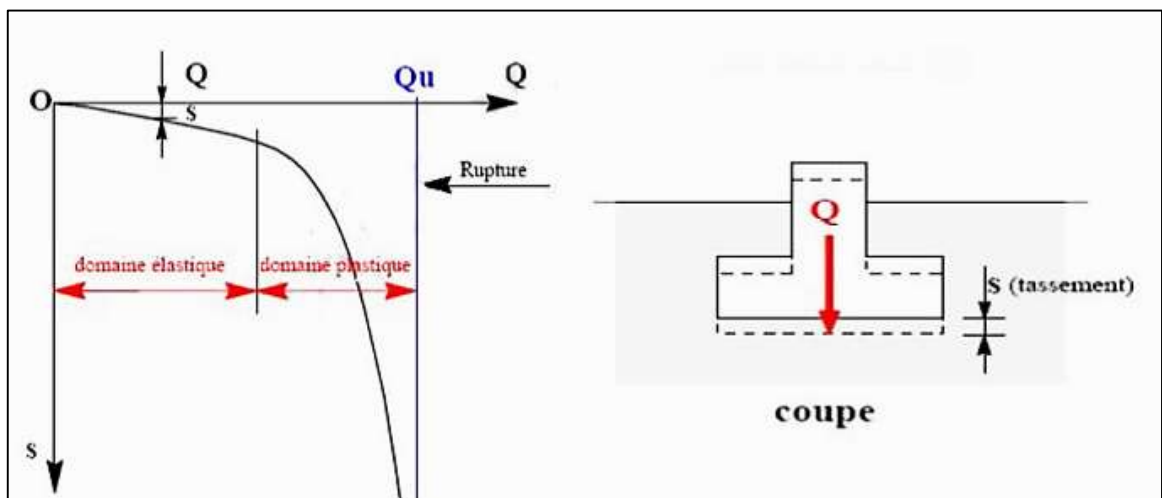


Figure I.7 : Schématisation de l'évolution des déplacements verticaux sous une fondation. [11]

I.7.2. Détermination de q_l à partir des essais de laboratoire (méthode " ϕ -c")

En 1943, Terzaghi a perfectionné les travaux initiés par Prandtl (1920) en intégrant deux paramètres essentiels :

- La rugosité de l'interface fondation-sol
- L'effet du poids des zones de rupture

Cette approche novatrice a conduit à la première théorie complète pour l'évaluation de la capacité portante ultime des fondations superficielles. Le modèle repose sur le principe de superposition de trois composantes mécaniques[12]:

- Résistance due au sol pulvérulent sous la fondation
- Effet de surcharge des terres au-dessus du niveau de base
- Contribution de la cohésion du sol
- **Méthodologie expérimentale** : Les paramètres géotechniques critiques (angle de frottement interne ϕ et cohésion c) sont déterminés par :
 - Essai de cisaillement direct (boîte de Casagrande)
 - Essai triaxial (conditions drainées ou non drainées)
- **Formulation théorique** : Pour une semelle de largeur B soumise à une charge verticale centrée, la contrainte limite ultime s'exprime par l'équation fondamentale :

$$q_l = \frac{1}{2} S_\gamma \gamma_1 B N_\gamma + S_q \gamma_2 D N_q + S_c c N_c \quad (I.3)$$

- N_c, N_q, N_γ : facteurs de capacité portante dépendant de ϕ
- q : pression de terres en amont
- γ : poids volumique du sol
- q_l : Contrainte de rupture (capacité portante par unité de surface) ;
- S_γ, S_q, S_c : Coefficients de forme de la semelle ;
- N_γ, N_q, N_c : Facteurs de portance (fonction de ϕ) ;
- γ_1 : Poids volumique du sol sous la base de la fondation ;
- γ_2 : Poids volumique du sol latéralement à la fondation ;
- c : Cohésion du sol sous la base de fondation.

En présence d'une charge q verticale latérale à la fondation, la formule devient :

$$ql = \frac{1}{2} S_{\gamma} \gamma_1 B N_{\gamma} + S_q (\gamma_2 D + q) N_q + S_c c N_c \quad (I.4)$$

La formule comporte trois termes : Le premier terme $S_{\gamma} \gamma_1 B N_{\gamma}$ appelé terme de surface (ou de pesanteur), proportionnel à la largeur B . C'est la charge limite pour un massif pesant et frottant uniquement,

Le deuxième terme $c N_c$ appelé terme de cohésion, proportionnel à la cohésion c . C'est la charge limite pour un sol frottant et cohérent, mais non pesant.

Le troisième terme $(\gamma_2 D + q) N_q$ est le terme de surcharge de profondeur, proportionnel à la profondeur D . C'est la charge limite pour un sol uniquement frottant et chargé latéralement (γ_1 est le poids volumique du sol latéralement à la fondation et au dessus du niveau de base) [15].

$D = 0$: pour une fondation dont la base est en contact directe avec la surface du sol.

Pour une semelle filante $S_{\gamma} = S_q = S_c = 1$ et la formule devient :

$$\text{Sans surcharge : } ql = \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma} + \gamma_2 D N_q + c N_c \quad (I.5)$$

$$\text{Avec surcharge } q : ql = \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma} + (\gamma_2 D + q) N_q + c N_c \quad (I.6)$$

Pour une semelle isolée

$$S_{\gamma} = 1 - 0.2 \frac{B}{L}; \quad S_q = 1; \quad S_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L} \quad (I.7)$$

Selon le DTU 13.12, ces coefficients prennent les valeurs suivantes[16]:

Tableau I.2 : coefficients de la capacité portante.

Forme	S_{γ}	S_q	S_c
carrée	0.8	1	1.2
circulaire	0.6	1	1.3

Les valeurs des facteurs de portance N_{γ} , N_q et N_c selon DTU. 13.12 sont encadrés ci-dessous :

Tableau I.3 : facteur de la capacité portante suivant DTU. 13.12.

$\varphi(^{\circ})$	N_c	N_{γ}	N_q
0	5.14	0	1.00
5	6.50	0.10	1.60
10	8.40	0.50	2.50
15	11.00	1.40	4.00
20	14.80	3.50	6.40
25	20.70	8.10	10.70
30	30.00	18.10	18.40
35	46.00	41.10	33.30
40	75.30	100.00	34.20
45	134.00	254.00	135.00

I.7.3. Méthode pressiométrique

Certains essais *in situ* sont utilisés pour le calcul des fondations superficielles et profondes. Ces calculs reposent sur des analogies entre le comportement du sol lors d'un essai *in situ* et son comportement sous les sollicitations d'une fondation. Des recherches récentes ont démontré une analogie étroite entre le comportement du sol lors d'un essai d'expansion d'une cavité cylindrique (essai pressiométrique) et celui autour de la pointe d'un pieu. Par ailleurs, le pressiomètre est largement employé pour déterminer les pressions de rupture des fondations superficielles ainsi que pour estimer les tassements. [17]

La méthode de conduite et d'interprétation des essais pressiométriques est définie par la norme AFNOR NF P 94-110, relative à l'essai pressiométrique Ménard.

➤ Calcul de la capacité portante à partir de l'essai au pressiomètre Ménard

a) Classification des sols

Pour le calcul de la portance à partir du pressiomètre Ménard et du pénétromètre statique, on distingue les catégories de sols suivantes :

Tableau I.4: Définition des catégories conventionnelles des sols.

Classe de sol		Pressiomètre P_l (MPa)	Pénétromètre q_c (MPa)
Argile, limons	A- Argile et limons mous	<0.7	<3.0
	B- Argile et limons fermes	1.2à2.0	3.0à6.0
	C- Argiles très fermes à dures	>2.5	>6.0
Sables, Graves	A- Lâches	<0.5	<5
	B- Moyennement compacts	1.0à2.0	8.0à15.0
	C- Compacts	>2.5	>20.0
Craies	A- Molles	<7	<5
	B- Altérées	1.0à2.5	>5
	C- compactes	>3	
Marnes	A- Tender	1.5à4.0	
	B- compacts	>4.5	
Roches	A- Altérées	2.5à4.0	
	B- Fragmentées	>4.5	

Pour le dimensionnement des fondations à partir du pressiomètre Ménard ou du pénétromètre statique, le fascicule 62, titre V (1993), définit les catégories conventionnelles de sols données par le tableau I.3, en fonction de la pression limite P_l mesurée par le pressiomètre Ménard ou de la résistance de pointe q_c mesurée par le pénétromètre statique.

b) Charge verticale centrée

Selon le fascicule 62, titre V (1993), la contrainte de rupture (capacité portante unitaire) sous charge verticale centrée est donnée par la formule[11] :

$$q_l = q_0 + k_p p_{le} \quad (I.8).$$

Avec :

q_l : Contrainte de rupture,

q_0 : Contrainte totale verticale au niveau de la base de la fondation (après travaux),

k_p : Facteur de portance pressiométrique,

p_{le} : Pression limite nette équivalente.

Pour les fondations superficielles et pour les fondations semi profondes dont les méthodes d'exécution sont similaires à celles des fondations superficielles, les valeurs du facteur de portance k_p sont données par le tableau I.4 :

Tableau I.5: Facteur de portance pressiométrique (fascicule 62-V, 1993).

Type de sol	Expression de k_p	$k_{p \max}$ (semelle carrée)	$k_{p \max}$ (semelle filante)
Argiles et limons A, craies A	$0.8 \left[1 + 0.25 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	1.30	1.10
Argiles et limons B	$0.8 \left[1 + 0.35 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	1.50	1.22
Argiles C	$0.8 \left[1 + 0.50 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	1.80	1.40
Sables A	$\left[1 + 0.35 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	1.88	1.53
Sables et Graves B	$\left[1 + 0.50 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	2.25	1.75
Sables et Graves C	$\left[1 + 0.80 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	3.00	2.20
Craies B et C	$1.3 \left[1 + 0.27 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	2.18	1.83
Marnes, Marno_calcaires, Roches altérées	$\left[1 + 0.27 \left(0.6 + 0.4 \frac{B}{L} \right) \frac{De}{B} \right]$	1.68	1.41

c) Pression limite nette équivalente au pressiomètre Ménard

Dans le cas d'une couche porteuse homogène, d'épaisseur au moins égale à 1,5 B au dessous de la base de la fondation (c'est-à dire que le sol est de nature unique et les pressions limites sont dans un rapport de 1 à 2, au plus, dans la couche), on établit un profil linéaire de la pression limite nette et l'on prend pour pression limite nette équivalente la valeur à la profondeur $D + 2/3 B$, comme indiqué sur la figure ci dessous[18] :

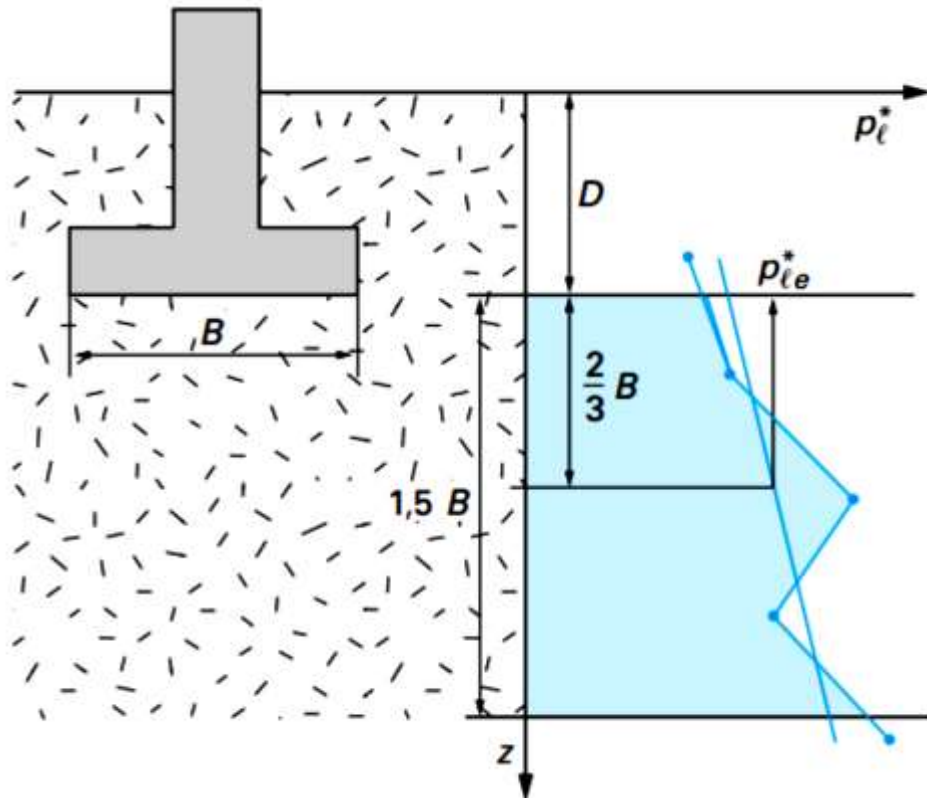


Figure I.8 : Définition de la pression limite nette p_{le}^* équivalente dans le cas d'une couche porteuse homogène[18].

d) Hauteur d'encastrement équivalente D_e

Elle est définie à partir des résultats des essais de sols en place. Si l'on considère la courbe représentant, la pression limite en fonction de la profondeur z (figures ci-dessous) [14]:

La hauteur d'encastrement équivalente D_e dans le cas d'un pressiomètre est définie par :

$$D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_0^D p_{le}^*(Z) dz \quad (I.8)$$

p_{le}^* : Étant la pression limite nette équivalente définie ci-après.

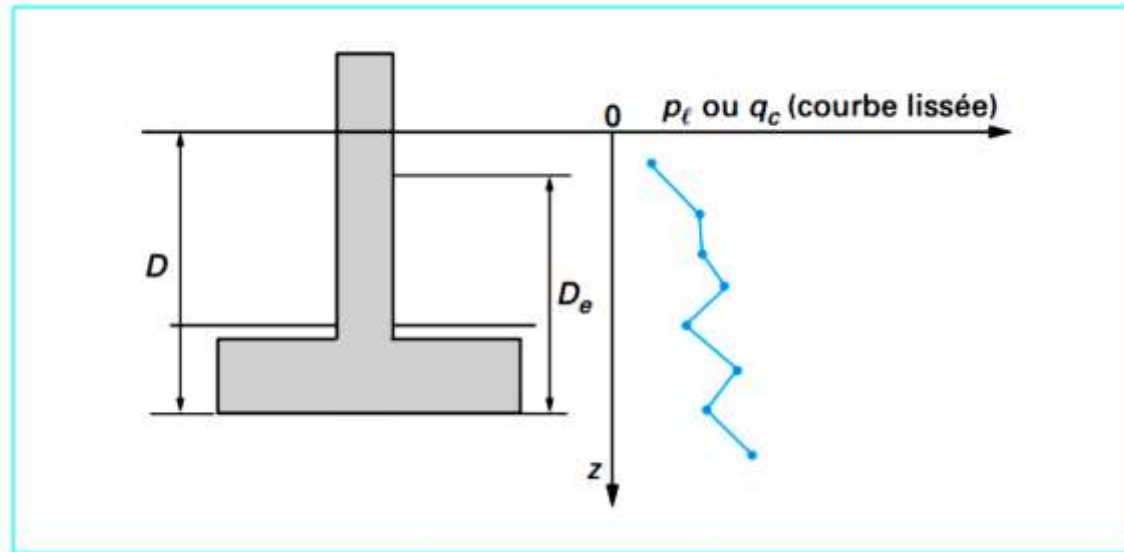


Figure I.9 : Définition de l'encastrement équivalent d'une fondation superficielle[11].

La pression limite nette: $p_l^* = p_l - p_0$

p_l : Pression limite mesurée,

p_0 : Contrainte totale horizontale au même niveau dans le sol avant essai.

I.7.4. Logiciels de Calcul Couramment Utilisés

Pour faciliter et optimiser le dimensionnement, plusieurs logiciels spécialisés sont disponibles [8]:

- **TALREN :**

Spécialité : Analyse de stabilité des pentes et dimensionnement des ouvrages de soutènement

Avantages : Interface conviviale, prise en compte de nombreux types de renforcements

- **Plaxis :**

Spécialité : Modélisation par éléments finis pour l'analyse géotechnique

Avantages : Analyses complexes du comportement sol-structure, modèles constitutifs avancés

- **FOXTA :**

Spécialité : Dimensionnement des fondations superficielles et profondes

Avantages : Intégration des méthodes pressiométriques, interface avec les essais in situ

- **GEO5 :**

Spécialité : Suite logicielle complète pour la géotechnique

Avantages : Modules variés (stabilité de pente, mur de soutènement, fondations)

Dans la prochaine section, nous aborderons la mise en œuvre pratique des fondations sur le terrain, y compris les techniques de construction, le contrôle qualité, et la gestion des pathologies potentielles.

I.8. Tendances Futures et Innovations dans les Fondations

Le domaine des fondations, comme tout le secteur du génie civil, est en constante évolution. Les défis croissants liés à l'urbanisation, au changement climatique et à la durabilité poussent les ingénieurs à innover continuellement. [7]

I.8.1. Digitalisation et Modélisation Avancée

- **BIM (Building Information Modeling) pour les fondations :**

Intégration des données géotechniques dans les modèles BIM.

Amélioration de la coordination entre la conception des fondations et la superstructure.

Facilitation de la maintenance à long terme grâce à des modèles numériques complets.

- **Intelligence Artificielle et Machine Learning :**

Prédiction plus précise du comportement des sols à partir de données limitées.

Optimisation automatique des conceptions de fondations.

Analyse en temps réel des données de surveillance pour la détection précoce des problèmes.

- **Jumeaux numériques :**

Création de répliques virtuelles des fondations pour simuler leur comportement en temps réel.

Amélioration de la maintenance prédictive et de la gestion du cycle de vie des structures.

I.8.2. Matériaux Innovants

➤ **Bétons à haute performance :**

Développement de bétons ultra-résistants pour des fondations plus minces et durables.

Utilisation de bétons auto-cicatrisants pour réduire les problèmes de fissuration. [11]

➤ **Géosynthétiques avancés :**

Nouveaux matériaux pour le renforcement des sols et l'amélioration de la capacité portante.

Géomembranes intelligentes capables de détecter les fuites ou les contraintes excessives.

➤ **Matériaux biosourcés :**

Exploration de l'utilisation de matériaux naturels renforcés pour certaines applications de fondations.

Développement de liants alternatifs à faible empreinte carbone pour remplacer partiellement le ciment.

I.9. Techniques de renforcement des sols

Les techniques contemporaines de renforcement des sols instables visent à améliorer leurs propriétés géotechniques et augmenter leur capacité portante. Voici les principales méthodes [4]:

1. Injection par jet (Jet Grouting)

Des coulis à haute pression (jusqu'à 600 bars) sont injectés pour former des colonnes ou parois rigides. Applicable aux sols argileux, sableux et meubles.

2. Colonnes de sol-ciment (Soil Cement Columns)

Mélange mécanique du sol avec des liants hydrauliques pour créer des éléments structuraux. Particulièrement adapté aux argiles molles et sols organiques.

3. Clouage des sols (Soil Nailing)

Insertion de barres d'acier combinée à un béton projeté pour stabiliser les massifs. Efficace pour les talus et excavations profondes.

4. Géosynthétiques (Geosynthetics)

Utilisation de textiles techniques polymères (géogrilles) pour répartir les charges. Employé dans les routes, barrages et terrains instables.

5. Congélation des sols (Ground Freezing)

Solidification temporaire par abaissement cryogénique de la température. Utilisé pour les travaux souterrains complexes.

6. Micropieux (Micropiles)

Colonnes de petit diamètre (10-30 cm) en acier rempli de béton. Solution pour espaces restreints et sols hétérogènes.

7. Electro-osmose (Electro-Osmosis)

Mobilisation de l'eau interstitielle par champ électrique. Réduction de la teneur en eau des argiles.

8. Préchargement avec drains (Preloading + Sand Drains)

Application de surcharges avec système de drainage accéléré. Optimise le processus de consolidation. [11]

Avantages principaux:

- Amélioration significative de la portance
- Réduction des tassements différentiels
- Adaptabilité aux différents types de sols
- Gain de temps comparé aux méthodes traditionnelles

Le choix technique dépend des paramètres du sol, de la profondeur requise, des contraintes budgétaires et temporelles, avec possibilité de combinaison de méthodes pour des résultats optimaux.

I.10. Renforcement des sols à faible capacité portante à l'aide de techniques géosynthétiques

Le principal défi des fondations superficielles sur des sables lâches est leur faible portance et leur tassement excessif, compromettant la durabilité et les performances de la superstructure. Les solutions classiques (remplacement des sols, élargissement des semelles, ou une combinaison des deux) améliorent les propriétés mécaniques mais augmentent les coûts. [18]

Une alternative efficace et économique est le renforcement par géosynthétiques. Ces matériaux polymères, aux fonctions multiples (renforcement, drainage, protection contre l'érosion), améliorent la capacité portante et réduisent le tassement. Leur utilisation s'étend aux projets géotechniques, transports, et infrastructures hydrauliques, avec un potentiel croissant grâce aux innovations. [19]

I.10.1. Types de géosynthétiques :

a) Géogrilles

Il s'agit de plastiques qui sont fabriqués sous une forme très large, en forme de grille, par exemple, avec d'énormes ouvertures entre chaque nervure dans le sens machine et dans le sens transversal. Ce type de matériau géosynthétique est fabriqué de diverses manières : Allongé dans une ou deux directions pour des propriétés physiques améliorées Créé à l'aide de machines à tisser ou à tricoter utilisant les meilleures procédures. Il est formé par la fusion de tiges et de sangles. [19]



Figure I.10 : Application de géogrille dans la construction routière[19]

b) Géonets

Ce matériau est fabriqué par l'extrusion continue d'ensembles parallèles de nervures polymères à 90 degrés les unes par rapport aux autres.

Lorsqu'elles sont ouvertes, les nervures forment une très grande ouverture en forme de filet. Elles sont principalement destinées aux applications de drainage, où elles servent au transport de liquides[19]



Figure I.11 : Application des géonets dans le drainage des sols[19]

c) Géomembranes

Figure I.12 : Pose de géomembrane par une équipe sur un site de confinement[19]

Ce matériau géosynthétique est très fin et se compose de couches imperméables de matériaux polymères qui sont principalement utilisés pour le revêtement et la couverture de structures de stockage ou de liquides telles que les décharges, les canaux, y compris d'autres installations de confinement. [19]

d) Revêtements d'argile géosynthétiques

Les GCL, également connus sous le nom de revêtements d'argile géosynthétiques, sont simplement une comparaison de matériaux polymères et d'huile naturelle.

Ces matériaux sont des plis d'une fine couche d'argile bentonite fabriquée en usine, enroulée entre deux géotextiles ou fusionnée à une géomembrane.

Les GLC peuvent être utilisés pour des raisons environnementales et de confinement ; nous pouvons voir leur application dans les transports, la géotechnique, l'hydraulique, etc.



Figure I.13 : Pose de géosynthétique sur le sol[19]

e) Géoconduites

Le géopipe est considéré comme un type de géosynthétique en raison de son application dans tous les domaines de l'ingénierie géotechnique, environnementale, hydraulique, y compris l'ingénierie du développement privé.



Figure I.14 : Géoconduites en polyéthylène haute densité (PEHD) [19]

f) Géomousse

Ce produit est fabriqué à partir d'un processus d'expansion polymère et le produit final est une mousse composée de plusieurs cellules fermées remplies de gaz. La structure squelettique des parois cellulaires est un matériau polymère qui n'a pas encore été développé.



Figure I.15 : Stockage de matériaux pour les revêtements d'argile géosynthétiques[19]

g) Géocomposites

Les géocomposites sont une fusion de géotextiles, de géofilets, de géogrilles et de géomembranes.

De plus, les matériaux mentionnés ci-dessus peuvent être fusionnés avec d'autres matériaux synthétiques comme des feuilles de plastique déformées ou des câbles en acier.

Ce matériau a plusieurs fonctions, qui vont du renforcement, de la séparation, du drainage, etc. [20]



Figure I.16 : Exemple de géocomposite : géotextile associé à une géonatte[20]

h) Géotextiles

Comme leur nom l'indique, les géotextiles sont des textiles au sens traditionnel du terme.

Cependant, ce matériau est composé de fibres synthétiques plutôt que de fibres naturelles comme la soie, le coton ou la laine. Elles sont relativement biodégradables et ont une durée de vie limitée. L'installation du géotextile est une étape facile, même si cela dépend de son domaine d'application. Les géotextiles sont également apparentés aux géotubes. Ces derniers sont utilisés pour des projets de déshydratation des boues de différentes tailles. Tout comme l'installation de géotextiles, l'installation de géotubes n'est pas non plus un processus compliqué, même si cela dépend également de son domaine d'utilisation. [21]



Figure I.17 : Installation de géotextile lors de travaux de terrassement[21]

I.10.2. Avantages des géosynthétiques :

➤ Filtration de l'eau :

Il existe plusieurs problèmes liés à la mauvaise gestion de l'eau sur les sites, et l'un de ces problèmes dangereux est l'érosion. Les érosions conduisent souvent à des dépressions irréparables ; pour éviter ce phénomène, on peut utiliser un matériau géosynthétique, le géocomposite clay liner, plus précisément, en le plaçant sous l'ouvrage hydraulique. [19]

➤ Travaux de drainage :

L'érosion peut survenir si le ruissellement n'est pas géré ou canalisé correctement. Lorsque l'eau n'est pas efficacement retenue des deux côtés d'une structure comme un remblai, on observe une remontée de la nappe phréatique, ce qui entraîne une pression interstitielle. [19]

Pour stopper l'augmentation de la pression interstitielle, un renforcement de 50 % est nécessaire. Un revêtement géocomposite est particulièrement avantageux à cet égard.

➤ **Contrôle de l'érosion des sols :**

C'est là que réside l'un des principaux avantages des matériaux géosynthétiques : les gabions, les géotextiles et les matelas sont efficaces pour prévenir l'érosion.

De plus, le filtre géotextile, y compris le renforcement géotextile, garantit que le sol reste stable et solide pendant les périodes de fortes pluies.

Les matériaux géosynthétiques présentent de nombreux avantages et utilités, c'est pourquoi ils sont souvent utilisés dans la plupart des projets de construction.

Ce matériau est doté de caractéristiques qui lui permettent d'effectuer certaines tâches importantes dans des structures telles que les murs de soutènement, les canaux, les fondations, etc. [20]

➤ **Amélioration de la stabilité du sol :**

Ils peuvent améliorer la stabilité du sol et des structures géotechniques.

Les géosynthétiques, tels que les géogrilles, répartissent les charges plus efficacement en les transférant sur une zone plus large.

➤ **Protection de l'environnement :**

Les géosynthétiques contribuent à la protection de l'environnement en agissant comme barrières contre la contamination et en empêchant la migration des polluants.

➤ **Rentabilité :**

Les géosynthétiques permettent de réaliser des économies dans les projets de construction. Ils réduisent souvent les besoins en excavation et l'utilisation de ressources naturelles.

➤ **Polyvalence et personnalisation :**

Les géosynthétiques offrent une large gamme de matériaux, de types et de configurations, permettant aux ingénieurs de sélectionner les produits les plus adaptés aux exigences spécifiques du projet.

➤ **Longévité et durabilité :**

Les géosynthétiques sont conçus pour résister aux conditions environnementales difficiles et présentent une excellente résistance à la dégradation due aux produits chimiques, à l'exposition aux UV et aux facteurs biologiques.

Réduction du temps de construction : Les géosynthétiques sont souvent des matériaux préfabriqués qui peuvent être installés rapidement, réduisant ainsi le temps de construction et les délais de réalisation des projets. Cela peut entraîner des économies de temps et d'argent considérables. [20]

➤ **Contrôle de l'érosion :**

Les géotextiles et les couvertures anti-érosion stabilisent la surface du sol, réduisent la vitesse d'écoulement de l'eau et protègent contre l'érosion causée par le vent ou l'eau.

➤ **Confinement :**

Les géosynthétiques, en particulier les géomembranes et les revêtements d'argile géosynthétiques (GCL), agissent comme des barrières imperméables pour contenir les liquides, les gaz ou les contaminants.

➤ **Protection :**

Ils agissent comme un coussin ou une barrière pour absorber les forces d'impact, répartir les charges et protéger contre les perforations ou l'abrasion.

Structures en terre renforcée : Les géosynthétiques sont des composants essentiels des structures en terre renforcée, telles que les murs de soutènement et les talus.

➤ **Applications environnementales :**

Elles aident à contrôler la pollution en agissant comme des barrières pour empêcher la migration des contaminants, assurent le contrôle de l'érosion dans les zones sensibles et facilitent le drainage et la filtration appropriés dans les systèmes de gestion des eaux pluviales. [21]

I.11. Conclusion

Les **fondations** et les **géosynthétiques** représentent deux piliers fondamentaux du génie civil, œuvrant ensemble pour garantir la durabilité et la stabilité des ouvrages. D'un côté, les fondations constituent la pierre angulaire de tout projet, assurant la résistance aux défis temporels et environnementaux. De l'autre, les géosynthétiques émergent comme une solution innovante pour renforcer les sols, améliorer la capacité portante et lutter contre l'érosion ou les infiltrations, devenant ainsi indispensables pour les terrains fragiles ou les projets complexes.

En tant qu'ingénieurs, notre responsabilité ne se limite pas à appliquer des normes traditionnelles, mais s'étend à l'adoption de **technologies modernes**, comme le renforcement des sols par géosynthétiques, tout en répondant aux enjeux environnementaux croissants. Allier **rigueur dans la conception** et **innovation dans l'exécution** est la clé pour bâtir des infrastructures durables, capables de défier le temps tout en servant les besoins sociétaux sans nuire à l'environnement.

Au final, la réussite d'un projet repose sur **l'équilibre entre force et intelligence** — la force des fondations qui portent les charges, et l'intelligence des matériaux qui optimisent leur performance. Ainsi, nous nous engageons à construire un avenir où l'ingénierie rime avec sécurité et durabilité.

Chapitre II

Introduction à l'apprentissage automatique

II.1. Introduction

L'intelligence artificielle (IA) représente une avancée majeure dans l'évolution technologique, passant d'un simple concept académique à une réalité tangible qui transforme le monde moderne. Sur le plan scientifique, elle est définie comme une branche avancée de l'informatique visant à développer des systèmes capables d'imiter les processus cognitifs humains, tels que l'apprentissage, le raisonnement et la prise de décision.

Cette technologie s'appuie sur une convergence pluridisciplinaire, intégrant l'informatique, les mathématiques avancées, les neurosciences et la psychologie cognitive. Ses applications s'étendent à divers domaines, notamment la robotique et le big data, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives en matière d'innovation.

L'IA joue un rôle central dans la résolution des défis mondiaux en proposant des solutions innovantes dans les secteurs de la santé, de l'éducation, de l'énergie et bien d'autres. Cependant, cette progression rapide soulève également des enjeux scientifiques et éthiques qui nécessitent une coopération internationale pour garantir son utilisation responsable. [23]

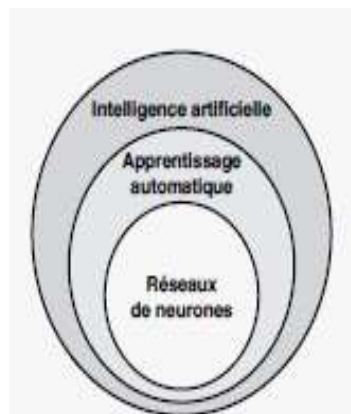


Figure 1. $'RN' \subseteq 'AA' \subseteq 'IA'$

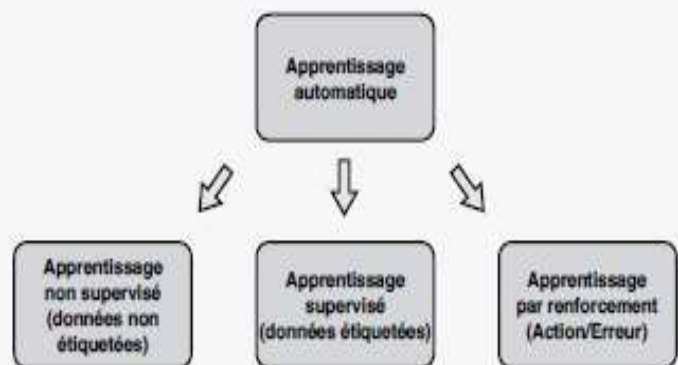


Figure 2. Trois types d'algorithmes d'apprentissage automatique

Figure II.1 : Concepts fondamentaux de l'apprentissage automatique[24]

II.2. Classification des algorithmes d'intelligence artificielle

II.2.1. Apprentissage supervisé (Supervised Learning)

Définition : Ces algorithmes s'appuient sur des données d'entraînement étiquetées (Labeled Data), où le modèle reçoit des entrées et des sorties attendues pour apprendre la relation entre elles. [24]

Principaux algorithmes :

➤ **Régression linéaire (Linear Regression)**

- **Fonction :** Prédire des valeurs numériques continues (comme les prix des logements).
- **Équation de base :** $y = \beta_0 + \beta_1 x$
- **Application :** Prévisions économiques, analyse des risques.

➤ **Régression logistique (Logistic Regression)**

- **Fonction :** Classer les données en deux catégories (oui/non).
- **Application :** Diagnostic médical, détection de spam.

➤ **Machines à vecteurs de support (SVM)**

- **Fonction :** Trouver la frontière optimale entre les classes.
- **Application :** Reconnaissance d'images, analyse des sentiments.

➤ **Arbres de décision (Decision Trees)**

- **Fonction :** Diviser les données via une série de décisions successives.
- **Application :** Évaluation des prêts, analyse des clients.

Défis :

- Nécessite de grandes quantités de données étiquetées.
- Peut souffrir de **surapprentissage (Overfitting)** si le modèle est trop complexe.

II.2.2. Apprentissage non supervisé (Unsupervised Learning)

Définition : Utilisé lorsque les données ne sont pas étiquetées, visant à découvrir des motifs cachés ou à regrouper les données. [25]

Principaux algorithmes :**➤ Algorithme K-Means pour le clustering**

- **Fonction** : Diviser les données en groupes similaires.
- **Application** : Segmentation de clientèle, analyse génomique.

➤ Analyse en composantes principales (PCA)

- **Fonction** : Réduire la dimension des données en préservant la variance.
- **Application** : Traitement d'images, détection d'anomalies.

➤ Règles d'association (Apriori)

- **Fonction** : Découvrir des relations entre variables (ex : produits en supermarché).
- **Application** : Systèmes de recommandation, analyse du comportement des consommateurs.

Défis :

- Difficulté à évaluer la performance en l'absence de réponses correctes préalables.
- Sensibilité de certains algorithmes aux valeurs aberrantes.

II.2.3. Apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning)

Définition : L'agent interagit avec un environnement et apprend par essais et erreurs basés sur un système de récompenses. [26]

Principaux algorithmes:**➤ Q-Learning**

- **Fonction** : Apprendre une politique optimale pour se déplacer dans un environnement limité.
- **Application** : Jeux vidéo, contrôle de robots.

➤ Deep Q-Networks (DQN)

- **Fonction** : Combiner l'apprentissage profond et l'apprentissage par renforcement.
- **Application**: AlphaGo, voitures autonomes.

Défis:

- Nécessite un temps d'entraînement long.
- Peut souffrir d'instabilité dans des environnements complexes.

II.2.4. Apprentissage profond (Deep Learning)

Définition : Utilisation de réseaux neuronaux profonds pour traiter des données non structurées (images, textes, sons).

Principaux algorithms :**➤ Réseaux neuronaux convolutifs (CNN)**

- **Fonction :** Traiter les images via des filtres successifs.
- **Application :** Reconnaissance faciale, diagnostic médical.

➤ Réseaux neuronaux récurrents (RNN)

- **Fonction :** Traiter des séquences temporelles.
- **Application :** Traduction automatique, prévision boursière.

➤ Transformers

- **Fonction :** Traiter le langage naturel via un mécanisme d'attention.
- **Application:** ChatGPT, BERT.

Défis:

- Requier des ressources informatiques importantes.
- Difficulté à interpréter les décisions (boîte noire).

II.3. Applications de l'intelligence artificielle en génie civil**II.3.1 Conception et Analyse Structurale :**

- **Amélioration de la conception :** Les algorithmes d'intelligence artificielle peuvent analyser un grand nombre de conceptions structurales et proposer la solution optimale en termes de coût, de sécurité et de durabilité. [22]

- **Analyse avancée** : L'intelligence artificielle peut effectuer des simulations et des analyses complexes du comportement structural sous différentes conditions de charge, y compris les séismes et le vent.
- **Détection des dommages** : Les techniques de vision par ordinateur et d'apprentissage automatique peuvent être utilisées pour analyser des images et des données de capteurs afin de détecter les fissures, la corrosion et d'autres dommages dans les structures.
- **Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM)** : L'intelligence artificielle peut automatiser certains aspects de la création de modèles BIM et améliorer la gestion des informations.

II.3.2 Gestion de Projets de Construction :

- **Estimation des coûts et des délais** : L'intelligence artificielle peut analyser des données historiques pour prévoir les coûts des projets et les délais avec une plus grande précision.
- **Planification des ressources** : L'intelligence artificielle peut optimiser l'allocation de la main-d'œuvre, des équipements et des matériaux sur les chantiers de construction.
- **Surveillance de la sécurité** : La vision par ordinateur et l'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour surveiller les chantiers de construction, détecter les dangers potentiels et s'assurer du port des équipements de sécurité.
- **Prévision des retards et des risques** : L'intelligence artificielle peut analyser les données pour identifier les risques potentiels et les retards dans les projets et prendre des mesures proactives. [25]

II.3.4 Ingénierie Géotechnique :

- **Analyse des sols** : L'intelligence artificielle peut analyser les données des sols pour déterminer leurs propriétés et leur comportement avec plus de précision.
- **Prédiction des glissements de terrain** : Des modèles d'apprentissage automatique peuvent être utilisés pour prévoir la probabilité de glissements de terrain en fonction des données géologiques et hydrologiques.
- **Conception des fondations** : L'intelligence artificielle peut améliorer la conception des fondations en fonction des propriétés du sol et des conditions de charge.
- **Analyse de la stabilité des pentes** : L'intelligence artificielle peut évaluer la stabilité des pentes et prévoir le risque d'effondrement. [26]

II.4 Réseau de neurones artificiels

En tant qu'algorithme d'apprentissage automatique le plus représentatif, le réseau neuronal artificiel est largement utilisé dans divers scénarios d'application et mène continuellement le développement de l'IA. Il est intéressant de noter que le RNA a été inspiré et conçu à partir de la structure du cerveau humain. Cette section commence par

les neurones du cerveau humain, lève le voile sur le mystère des réseaux neuronaux artificiels étape par étape, et présente certaines techniques clés. [22]

II.4.1 Modèle d'imitation mathématique, perceptron

Le perceptron (Figure II.2) est créé pour imiter mathématiquement les principes de fonctionnement du neurone [3]. Il possède plusieurs entrées binaires $x_1, x_2, \dots, x_n$ (dendrites), à chaque entrée correspond un poids $w_1, w_2, \dots, w_n$ (sensibilité des synapses). La somme de chaque entrée multipliée par son poids est ensuite comparée à un seuil $-b$ (potentiel de seuil). La sortie est égale à 1 si la somme est supérieure au seuil (neurone actif). Sinon, la sortie est égale à 0 (neurone inhibé) :

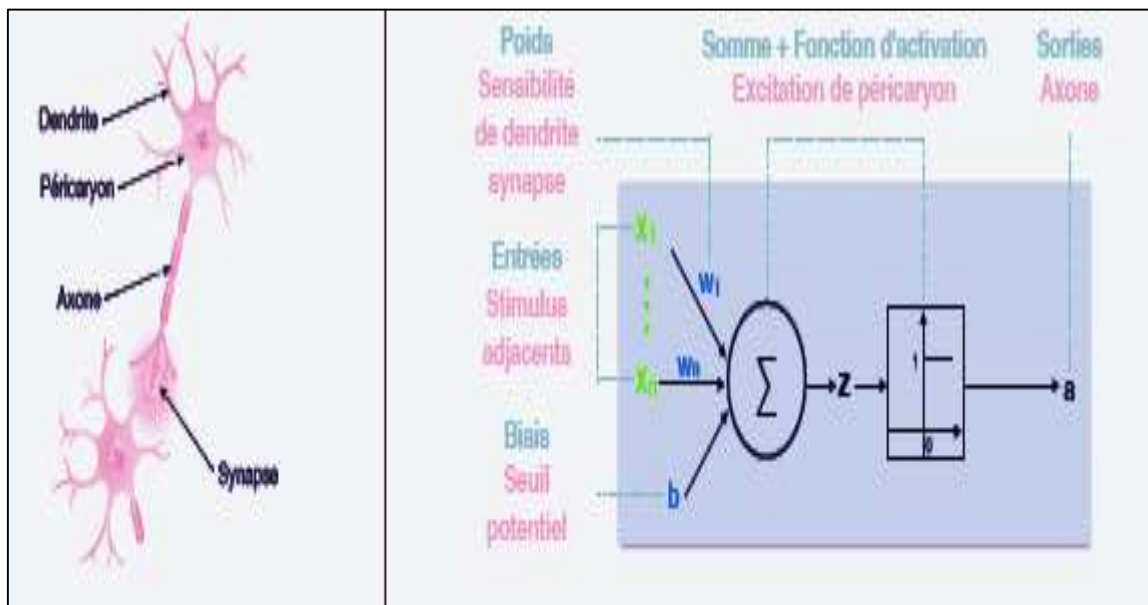


Figure II.2 : Structure d'un neurone et modèle de perceptron[25]

$$a = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_{i=1}^n \omega_i x_i + b \leq 0 \\ 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n \omega_i x_i + b > 0 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

II.4.2 Caractéristique non linéaire, fonction d'activation

Cependant, dans les applications algorithmiques, la fonction d'échelon s'avère compliquée à utiliser avec le développement des perceptrons et des RNA. Par conséquent, de nombreuses variantes de fonctions d'activation offrant des performances encore meilleures ont été découvertes. La fonction sigmoïde est une fonction de type "S" couramment utilisée, qui peut faire correspondre des variables à l'intervalle (0,1) [23] :

$$S(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (\text{II.2})$$

et sa dérivée peut être facilement calculée :

$$S'(x) \frac{e^{-x}}{(1+e^{-x})^2} = S(x)(1 - S(x)) \quad (\text{II.3})$$

On observe que lorsque l'entrée de la fonction sigmoïde est très grande ou très petite, la sortie entre dans la zone "plate", et le gradient "disparaît". Alors que lorsque l'entrée est proche de 0, la valeur de la dérivée sigmoïde est plus grande. En outre, la fonction sigmoïde produit directement un état de demi-saturation (sortie = 0,5) lorsque le seuil d'activation est tout juste atteint (entrée = 0), ce qui ne correspond pas aux véritables réseaux neuronaux biologiques. En général, seuls 1% – 4% des neurones du cerveau sont actifs (sortie > 0) simultanément et ne sont pas facilement saturés. Par conséquent, la fonction unité linéaire rectifiée (ReLU) est plus conforme aux modèles physiologiques et est plus adaptée pour éviter les gradients qui explosent et disparaissent. En outre, elle peut également simplifier le calcul et accélérer la convergence car sa dérivée est toujours égale à 1 si l'entrée est positive [26]:

$$R(x) = \max(0, x) \quad (\text{II.4})$$

Les fonctions d'activation non linéaires ci-dessus peuvent introduire des caractéristiques non linéaires dans le modèle RNA. Dans certaines conditions, ces fonctions peuvent aider le modèle à se rapprocher de n'importe quelle relation de mappage non linéaire continue entre l'entrée et la sortie avec une certaine précision s'il y a suffisamment de neurones et de couches cachées [24].

II.4.3 Construction d'un modèle de réseau, perceptron multicouche

Le perceptron multicouche (Figure II.3) est un modèle RNA à anticipation entièrement connecté qui peut faire correspondre un ensemble de données d'entrée à un ensemble de données de sortie. Par exemple, les entrées peuvent être les valeurs des caractéristiques d'images ou de documents, tandis que les sorties du modèle réaliseront une tâche de prédiction spécifique, telle que l'identification d'un objet[26].

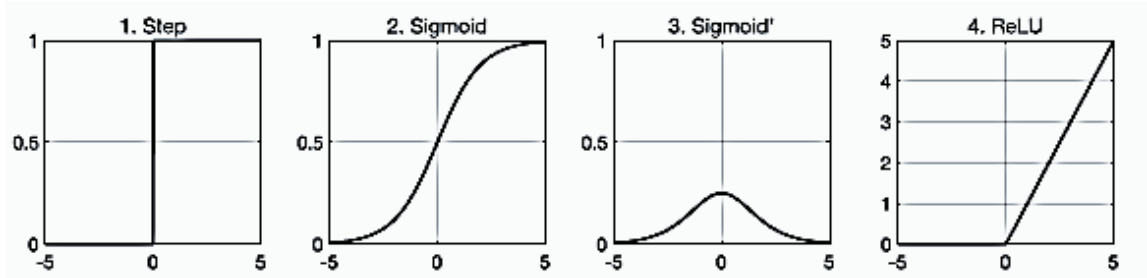


Figure II.3: fonction step, fonction sigmoïde, sa dérivée et fonction ReLU

Le modèle se compose de la couche d'entrée (variables d'entrée), des couches cachées (noeuds intermédiaires) et de la couche de sortie (variables de sortie). Les neurones sont entièrement connectés, ce qui signifie que les neurones de la dernière couche sont connectés à chaque neurone de la couche précédente. Une fois que nous avons compris comment les perceptrons individuels reçoivent, traitent et transmettent les signaux, il est temps de voir comment calculer les valeurs couche par couche de l'entrée à la sortie dans un modèle entièrement connecté pour réaliser la propagation vers l'avant [27]:

$$\{\alpha_1 = \sigma(z_1) = \sigma(x_1w_1 + x_2w_3 + b_1)\}$$

$$\{\alpha_2 = \sigma(z_2) = \sigma(x_1w_2 + x_2w_4 + b_2)\}$$

$$\{\alpha_3 = \sigma(z_3) = \sigma(\alpha_1w_5 + \alpha_2w_7 + b_3)\}$$

....

$$\{\alpha_n = (z_n) = \sigma(a * w + b_n) \quad (II.5)$$

où α_n est la sortie du neurone courant, σ est la fonction d'activation, $\mathbf{a}$ et $\mathbf{W}$ sont les formes matricielles des sorties et de leurs poids correspondants de la couche précédente, b_n est le biais.

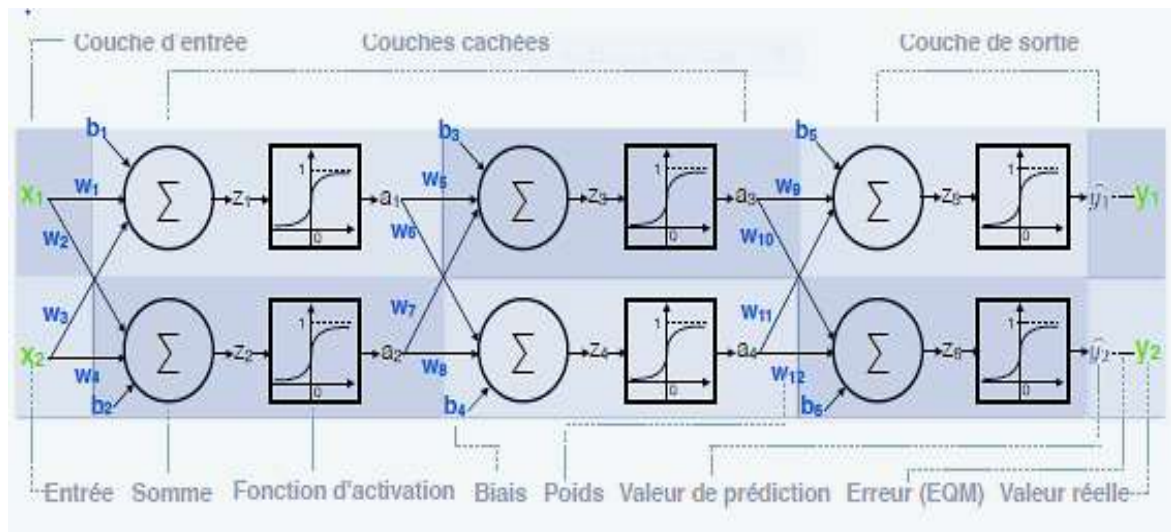


Figure II.4 : Structure de perceptron multicouche [27]

II.5. Bref du Principe des Machines à vecteurs de support Pour Classification et régression

II.5.1. Introduction

La régression vectorielle de support (SVR) est une technique d'apprentissage automatique utilisée pour prédire des valeurs continues plutôt que des catégories discrètes. Elle est dérivée des machines à vecteurs de support (SVM) et partage certains principes de base. La SVR utilise le concept de marge pour déterminer la meilleure approximation. Cette marge permet de tolérer certaines erreurs de prédiction, tout en limitant également les valeurs aberrantes. [22]

Dans ce chapitre, nous explorons ce qu'est l'algorithme de machine à vecteurs de support (SVM), et nous étudierons en détail l'algorithme de régression vectorielle de support (SVR). Nous verrons comment cela fonctionne, ses avantages et ses limites, ainsi que quelques autres algorithmes de régression.

II.5.2 Qu'est-ce que la machine à vecteur de support

Les machines à vecteurs de support, ou support vector machine (SVM), sont des modèles de machine learning supervisés centrés sur la résolution de problèmes de discrimination et de régression mathématiques. Elles ont été conceptualisées dans les années 1990 à partir d'une théorie d'apprentissage statistique développée par les informaticiens

russes Vladimir Vapnik et Alexey Chervonenkis : la théorie de Vapnik-Chervonenkis. Ce modèle a été rapidement adopté en raison de sa capacité à travailler avec des données de grandes dimensions, ses garanties théoriques et les bons résultats réalisés en pratique [22].

Il s'avère particulièrement efficace de par le fait qu'il peut traiter des problèmes mettant en jeu de grands nombres de descripteurs, qu'il assure une solution unique et il a fourni de bons résultats sur des problèmes réels [23].

II.5.3 Description de l'algorithme SVM

L'image dans la figure suivante montre la forme générale de SVM en cas de ligne médiane droite (L'hyperplan) :

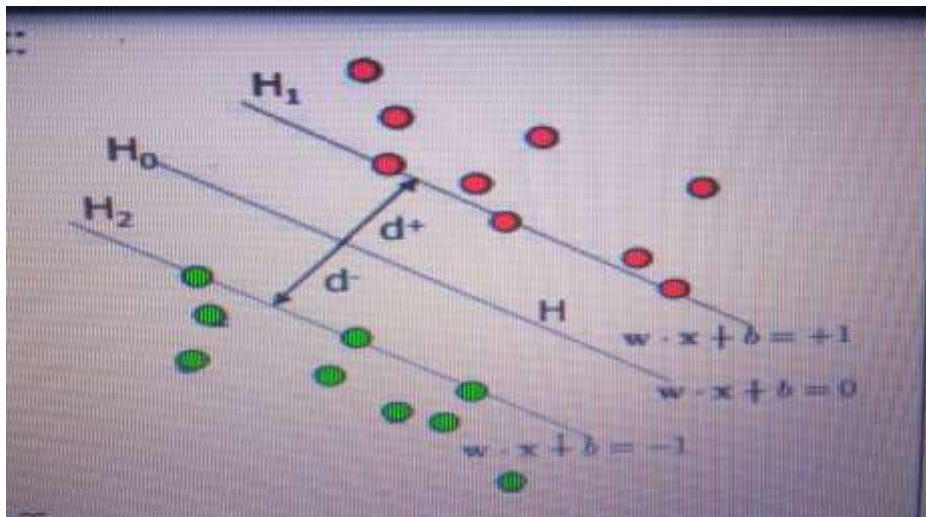


Figure II.5: machine a vecteurs de support.

Définir les hyperplans H tels que :

$$w x_i + b \geq +1 \text{ si } y_i = +1 \quad (\text{II.6})$$

$$w x_i + b \leq -1 \text{ si } y_i = -1 \quad (\text{II.7})$$

h_1 et h_2 sont les plans :

$$H_1 : w x_i + b = +1 \quad (\text{II.8})$$

$$H_2 : w x_i + b = -1 \quad (\text{II.9})$$

Les points sur les plans h_1 et h_2 sont les extrémités des vecteurs de support.

Le plan h_0 est la médiane entre les deux, où :

$$w x_i + b = 0 \quad (\text{II.10})$$

d^+ = la distance la plus courte jusqu'au point positif le plus proche.

d^- = la distance la plus courte jusqu'au point négatif le plus proche.

II.5.4. Support Vector Regression

SVR (support vector regression) est moins populaire que SVM (support vector machine). Mais, SVR s'est avéré être un outil efficace dans l'estimation de la fonction de valeur réelle. En tant qu'approche d'apprentissage supervisé, SVR s'entraîne à l'aide d'une fonction de perte symétrique, qui pénalise également les estimations élevées et basses [29] et le SVR est défini comme un problème d'optimisation par construire d'abord une fonction de perte insensible au convexe à réduire puis déterminer le tube le plus aplati qui comprend la majorité des cas d'apprentissage.

II.5.4.1 Qu'est-ce qu'une régression vectorielle de support :

La régression vectorielle de support (SVR) est un modèle d'apprentissage supervisé qui permet de réaliser des régressions linéaires et non linéaires. En régression linéaire, l'objectif est de minimiser l'erreur entre la prédiction et les données. Cependant, avec la méthode SVR, l'objectif est de garantir que les erreurs ne dépassent pas un seuil spécifié pour un ensemble de données donné.

Un modèle SVR utilise des hyperparamètres tels que le noyau (Kernel), la décision de l'hyperplan (HyperPlane), la ligne de démarcation (Boundary line) et les vecteurs de support (Support Vectors) pour régler ses performances. Ces hyperparamètres jouent un rôle crucial dans la façon dont le modèle SVR s'adapte aux données et parvient à trouver la meilleure solution.

II.5.4.2 Le principe de SVR

L'algorithme cherche à trouver le super-niveau optimal qui sépare de manière optimale les données. Cependant, contrairement à la classification où le but est de trouver un super niveau qui sépare les classes, le but de la régression est de trouver un super niveau qui minimise l'erreur entre les prédictors et les valeurs cibles. En d'autres termes, le but des SVR est de trouver l'hyperplan qui minimise la distance entre les points de données et la droite de régression. [30]

II.5.4.3 Terminologies importantes dans la régression des vecteurs de support

Les principaux paramètres nécessaires pour soutenir la régression vectorielle sont

a) Kernel

La fonction de conversion d'un ensemble de données de dimension inférieure en un ensemble de données de dimension supérieure un noyau aide à la recherche d'un hyperplan dans un espace de dimension supérieure tout en réduisant le coût de calcul. La fonctionnoyau pour la régression du vecteur de support (SVR) est un composant crucial qui détermine la relation entre les données d'entrée et les valeurs de sortie prévues. Le choix de la fonction du noyau affecte les performances et la flexibilité du modèle SVR. Voici quelques fonctions de noyau couramment utilisées pour SVR[31] :

1. Linear kernel : Le noyau linéaire est la fonction noyau la plus simple et fonctionne bien lorsque la relation entre les variables d'entrée et de sortie doit être linéaire. Il est défini comme:

$$K(x, x') = x * x' \quad (II.11)$$

2. Polynomial kernel : La fonction de noyau polynomial introduit la non-linéarité en transformant les caractéristiques d'origine en un espace de dimension supérieure à l'aide de fonctions polynomiales. Il est défini comme:

$$K(x, x') = (\text{gamma} * x * x' + \text{coef0})^{\text{degree}} \quad (II.12)$$

Ici, gamma et coef0 sont des paramètres définis par l'utilisateur qui contrôlent la forme du polynôme, et degree spécifie le degré du polynôme.

3. Radial Basis Function (RBF) Kernel : Le noyau RBF est un choix populaire pour SVR en raison de sa flexibilité dans la capture de relations complexes. Il mappe les données d'entrée dans un espace de dimension infinie à l'aide de fonctions gaussiennes. Le noyau RBF est défini comme suit [32] :

$$K(x, x') = \exp(-\text{gamma} * \|x - x'\|^2) \quad (II.13)$$

Ici, gamma est un paramètre défini par l'utilisateur qui détermine l'influence de chaque exemple de formation. Des valeurs plus élevées de gamma conduisent à une frontière de décision plus localisée et ondulée.

4. Sigmoid Kernel : Le noyau sigmoïde est un autre noyau non linéaire qui est utile lorsqu'il s'agit de relations non linéaires. Il est défini comme:

$$K(x, x) = \tanh(\text{gamma} * x * x + \text{coef0}) \quad (\text{II.14})$$

Les paramètres gamma et coef0 contrôlent la forme et la non-linéarité de la fonction sigmoïde.

b) Hyperplane

C'est la ligne de séparation entre les classes de données dans SVM. Bien que, dans SVR, nous le décrirons comme une ligne qui nous aidera à prédire une valeur continue ou une valeur d'objectif [33].

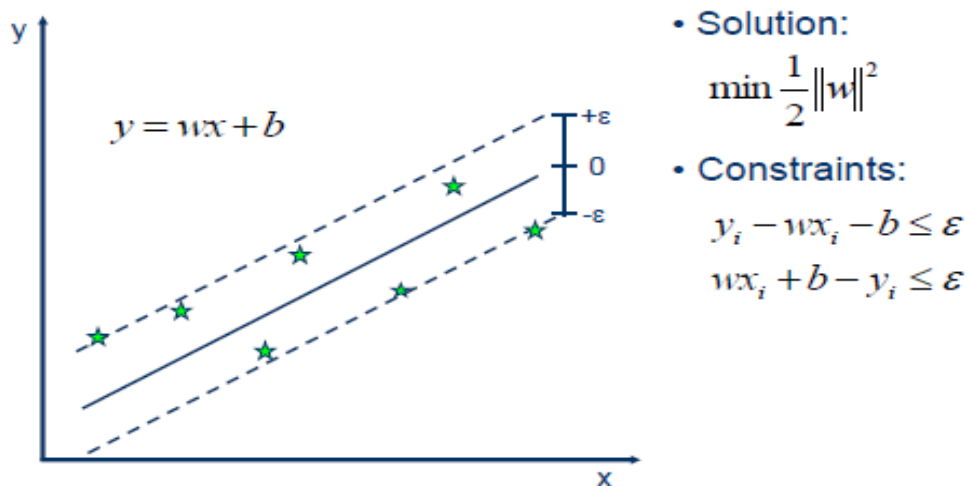


Figure II.6 : hyperplane

c) Boundaryline

Outre HyperPlane, il existe deux lignes dans SVM qui produisent une marge. Les vecteurs de support peuvent être à l'intérieur ou à l'extérieur des lignes de délimitation. Les deux classes sont séparées par cette ligne. Le principe est le même dans SVR. Une ligne de démarcation de décision peut être conçue comme une ligne de démarcation (pour simplifier), avec des exemples positifs d'un côté et des exemples négatifs de l'autre. Les instances sur cette ligne peuvent être qualifiées de positif ou de négatives. La même approche SVM sera également utilisée dans la régression vectorielle de support [34].

d) Support vector

Les vecteurs de support sont des emplacements situés à l'extérieur du tube dans SVR. Plus la valeur est petite, plus il y a de points à l'extérieur du tube, et donc plus il y a de vecteurs de support [35].

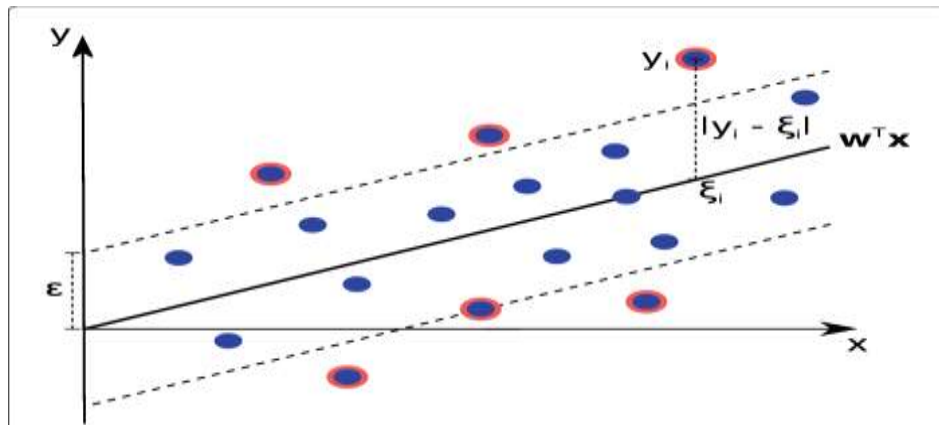


Figure II.7 : Support vector. [35]

Formulation d'un problème d'optimisation en SVR :

$$\min_{w, \xi, \xi^*} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (\text{II.15})$$

Sous cette forme w c'était le vecteur de pondération de la fonction de décision, c'est un paramètre de régularisation qui contrôle le compromis entre le modèle complexe et l'erreur de prédiction, et ξ_i et ξ_i^* sont les variables qui existent mesurent les violations de marge.

II.5.4.4 Les paramètres de support vectors regressions (SVR)

Les paramètres de SVR comprennent [28] :

➤ Kernel

Spécifie le type de noyau à utiliser dans l'algorithme. Il doit s'agir de (linéaire, poly, rbf, sigmoïde), précalculé ou callable. Si aucun n'est donné, 'rbf' sera utilisé. Si un callable est donné, il est utilisé pour précalculer la matrice du noyau. [25]

➤ Degré

Degré de la fonction noyau polynomiale ('poly'). Ignoré par tous les autres noyaux

➤ **Gamma**

Le paramètre gamma, spécifique au noyau RBF, contrôle le lissage de la frontière de décision. Lorsque la valeur gamma est plus petite, la limite devient plus lisse, tandis qu'une valeur gamma plus grande rend la limite plus complexe et flexible.

➤ **Le paramètre de régularisation C**

La force de la régularisation est inversement proportionnelle à C. Doit être strictement positive. La pénalité est une pénalité de l_2 au carré.

➤ **Epsilon**

Epsilon dans le modèle epsilon-SVR. Il spécifie le tube epsilon dans lequel aucune pénalité n'est associée dans la fonction de perte d'entraînement avec des points prédits à une distance epsilon de la valeur réelle. Doit être non négatif.

II.6. Conclusion

En conclusion de cette recherche, il apparaît clairement que l'intelligence artificielle est devenue la pierre angulaire de l'infrastructure technologique moderne, où ses divers algorithmes s'harmonisent pour former un tissu complexe de solutions intelligentes. L'étude a mis en évidence la complémentarité fonctionnelle entre les modèles d'apprentissage profond comme les réseaux de neurones artificiels (ANN) qui excellent dans le traitement des modèles complexes, et les algorithmes tels que les machines à vecteurs de support pour la régression (SVR) réputés pour leur précision avec des jeux de données de taille moyenne.

La vision future réside dans le développement de systèmes hybrides intelligents tirant parti des avantages complémentaires de ces modèles, tout en mettant l'accent sur l'amélioration de l'efficacité des performances et de la transparence des décisions. Il est également crucial de surmonter les défis informatiques et éthiques pour assurer une évolution responsable de ces technologies. Les progrès dans ce domaine promettent des avancées qualitatives dans la capacité des systèmes à appréhender différentes complexités, faisant de l'IA un pilier fondamental pour façonner l'avenir numérique.

Le défi fondamental reste d'atteindre un équilibre optimal entre précision et performance d'une part, et flexibilité et crédibilité d'autre part, tout en préservant les principes éthiques dans le développement et l'application. Cet équilibre délicat est ce qui nous permettra d'exploiter le potentiel immense de l'intelligence artificielle au service du progrès humain.

Chapitre III
Presentation des outils
de simulation
numerique

III.1. Introduction

Avec l'évolution technologique l'ingénieur est amené à concevoir des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des exigences de sécurité renforcées. Face à la complexité croissante des méthodes analytiques en résistance des matériaux, il se tourne vers des approches permettant de simuler le comportement de systèmes physiques complexes. Grâce aux progrès en informatique ainsi qu'aux avancées mathématiques dans la théorie de l'énergie, les méthodes de projection et d'approximation, la méthode des éléments finis s'est imposée progressivement comme la méthode numérique la plus performante en raison de son large champ d'application. Elle est ainsi largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, le nucléaire, le génie civil, la construction navale, la mécanique, les technologies offshore, etc. [30]

La méthode des éléments finis représente ainsi une technique récente à vocation pluridisciplinaire, faisant appel à des connaissances provenant de trois domaines fondamentaux :

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

III.2. Concepts fondamentaux

La méthode des éléments finis (MEF) repose sur la substitution de la structure physique étudiée par un ensemble fini d'éléments discrets, organisés en un maillage. Ces éléments sont reliés entre eux par des points appelés nœuds. L'approche consiste d'abord à analyser le comportement mécanique de chaque élément de manière isolée, puis à assembler ces éléments afin de garantir à la fois l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements, en considérant la structure comme un continuum la méthode des éléments finis (MEF) se distingue par sa grande puissance analytique, car elle permet une modélisation précise des structures continues présentant des géométries complexes ainsi que des conditions de chargement variées. Cette méthode nécessite un volume important de calculs, mais son caractère itératif et répétitif la rend particulièrement adaptée à l'implémentation informatique.

Sur le plan théorique, la MEF constitue l'approche la plus rigoureuse et efficace pour la modélisation des problématiques géotechniques complexes[36]

Elle nécessite :

La définition rigoureuse de la géométrie du problème, afin d'éviter que les conditions aux limites n'affectent les résultats du calcul.

Le choix d'un modèle constitutif du sol adapté (par exemple : Mohr-Coulomb, Duncan, Cam-Clay, etc.).

- La caractérisation des ouvrages et des interfaces pour modéliser précisément l'interaction sol-structure ainsi que les conditions hydrauliques associées.
- La prise en compte des propriétés des butons ou tirants d'ancrage.
- La connaissance de l'état initial des contraintes

ELLE PERMET

- De réaliser les calculs d'écoulement, de prendre en considération les variations des caractéristiques des de simuler l'ensemble des phases des travaux, ouvrages, des couches de sol ainsi que des lits de butons ou de tirants, de déterminer un coefficient de sécurité

Résultats fournis pour les ouvrages et le sol

- Pour les ouvrages :
- Les déplacements des ouvrages.
- Les sollicitations internes au sein des ouvrages.
- Les efforts appliqués dans les butons ou tirants.

Pour le sol :

- Les contraintes totales et effectives dans le sol.
- Les pressions interstitielles.
- Le calcul du coefficient de sécurité.
- Les déformations du sol
- Les déplacements du sol

III.3. Le code de calcul PLAXIS :

PLAXIS 3D est un logiciel tridimensionnel d'éléments finis conçu pour analyser la déformation, la stabilité et l'écoulement des eaux souterraines en génie géotechnique. Il fait partie de la suite PLAXIS, largement utilisée mondialement pour la modélisation et la conception géotechnique. [36]

Le développement de PLAXIS a débuté en 1987 à l'Université de technologie de Delft, initié par le ministère néerlandais des Travaux publics, avec pour objectif initial la création d'un code 2D simple pour l'analyse des digues sur sols mous. Après plusieurs extensions et la création de la société PLAXIS en 1993, la version 3D complète, combinant une interface conviviale et des capacités avancées de modélisation, a été lancée en 2010.

PLAXIS 3D permet de simuler des interactions complexes entre sol, roches et structures, en intégrant des modèles variés de comportement des sols, des analyses couplées écoulement-déformation, ainsi que des calculs de sécurité. Il est utilisé pour des projets tels que tunnels, fondations, barrages, et prend en compte des conditions statiques, dynamiques et hydrologiques complexes [34]

III.3.1. Unité et convention de signe :

Il est essentiel, dans toute analyse, d'adopter un système cohérent d'unités. Lors de la saisie initiale d'une géométrie, il convient de sélectionner un ensemble approprié d'unités de base. Ces unités fondamentales comprennent une unité de longueur, une unité de force et une unité de temps.

Ces unités de base sont définies dans la feuille de l'onglet Modèle de la fenêtre Propriétés du projet du logiciel Input. Par défaut, les unités utilisées sont le mètre [m] pour la longueur, le kilonewton [kN] pour la force, et le jour [jour] pour le temps.

Cette convention garantit la cohérence et la précision des calculs tout au long de l'analyse [38].

Tableau III.1 : Différents paramètres et unités.

		Système International
Unité De Base	Longueur	(m)
	Force	(KN)
	Temps	(jour)
Géométries	Coordonnées	(m)
	Déplacements	(m)
Propriétés de Matériaux	Module De Young	(KN/m ²)=(kPa)
	Cohésion	(KN/m ²)
	Angle De Friction	(deg)
	Angle De Dilatation	(deg)
	Poids volumique	(KN/m ³)
	Perméabilité	(m/jour)
Forces et Contraintes	Charges ponctuelles	(KN)
	Charges linéaire	(KN/m)
	Charges réparties	(KN/m ²)
	Contraintes	(KN/m ²)

Les unités sont généralement utilisées uniquement comme référence pour l'utilisateur. Cependant, dans une certaine mesure, la modification des unités de base dans la fenêtre des Propriétés du projet entraîne une conversion automatique des valeurs d'entrée existantes vers les nouvelles unités. Cette conversion concerne les paramètres des propriétés des matériaux dans le module Input du programme. En revanche, elle ne s'applique pas aux valeurs d'entrée relatives à la géométrie, telles que les données géométriques, les charges, les déplacements prescrits ou les niveaux phréatiques, ni à toute autre valeur en dehors du module Input. Ainsi, si l'utilisateur souhaite adopter un autre système d'unités dans un projet déjà existant, il devra modifier manuellement toutes les données géométriques et recalculer intégralement le projet.[35]

III.3.2 Convention de signe

Les contraintes calculées dans PLAXIS 3D sont basées sur le système de coordonnées cartésiennes présenté à la figure III.1. Dans toutes les données de sortie, les contraintes et forces de compression, y compris les pressions interstitielles, sont considérées comme négatives, tandis que les contraintes et forces de traction sont considérées comme positives. La figure III.1 illustre les directions positives des contraintes. [37]

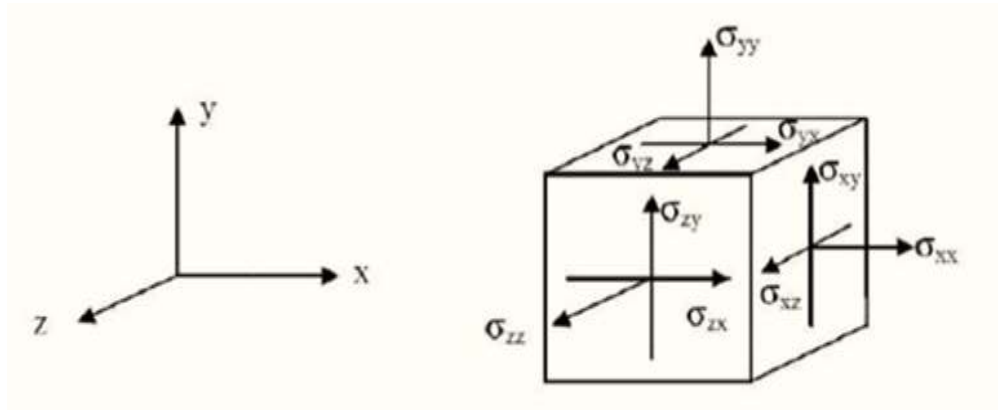


Figure III.1 : Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte Positive. [37]

III 4. Les sous-programmes de Plaxis

L'utilisation de PLAXIS repose sur quatre sous-programmes principaux : Input, Calculations, Output et Curves. [38]

III 4.1. Le programme d'entrée de données (Input)

Ce module est destiné à définir la géométrie du problème, à créer le maillage par éléments finis et à spécifier les phases de calcul. Pour réaliser une analyse par éléments finis avec PLAXIS 3D, l'utilisateur doit construire un modèle géométrique tridimensionnel composé de points, lignes, surfaces, volumes ainsi que d'autres composants, puis définir les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. Ces opérations s'effectuent dans les deux premiers onglets, correspondant aux modes « Géométrie », du programme Input. La génération du maillage et la définition des phases de calcul sont réalisées dans les trois derniers onglets, correspondant aux modes « Calcul », du même programme. [38]

III.4.1.1. Barre de menu (bar menu)

La barre de menu comprend des menus déroulants qui regroupent toutes les options disponibles dans un fichier. Le programme d'entrée (figure III.2) se compose des menus suivants :

- File (Fichier)
- Edit (Édition)
- View (Affichage)
- Soil (Sol)
- Structures (Structures)
- Mesh (Maillage)

- Water Levels (Niveaux d'eau)
- Options (Options)
- Expert (Expert)
- Help (Aide)

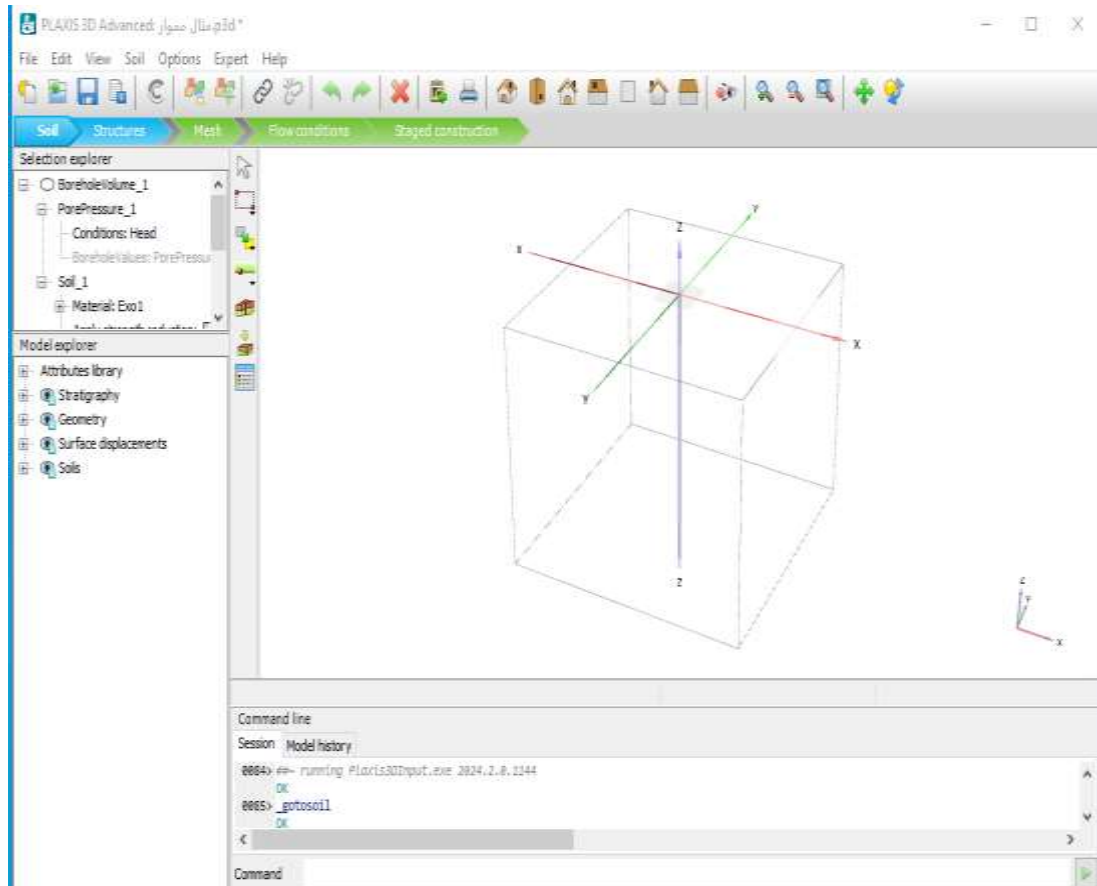


Figure III.2: Fenêtre principale du programme input

Mode de géométrie :

La configuration géométrique du projet est définie dans les modes Géométrie, identifiables par des onglets bleus dans le logiciel Input. Toutes les modifications relatives à la géométrie - telles que la création, le déplacement, la modification ou la suppression d'entités - ne peuvent être effectuées que dans ces modes. Les éléments fonctionnels, comme les structures (plaques, poutres), les interfaces ou les charges, ne peuvent être assignés aux entités géométriques qu'en mode Structures. [39]

III.4.2. Les modes géométriques disponibles sont :

- **Soil (Sol)**
- **Structure**
- **Programme de calcul (Calculations)**

Le processus de calcul est géré dans les modes de calcul, également signalés par des onglets bleus dans le programme d'entrée. Dans ces modes, il n'est pas possible de créer de nouvelles entités ni d'en affecter à la géométrie existante. Toutefois, les propriétés des entités déjà définies, telles que les caractéristiques des matériaux ou les valeurs des charges, peuvent être modifiées. [40]

Les modes de calcul comprennent:**Mesh (Maillage):**

En mode maillage, le modèle géométrique est discrétisé et converti en un maillage d'éléments finis. La configuration géométrique est figée et ne peut être modifiée dans ce mode. Il est nécessaire de régénérer le maillage à chaque modification de la géométrie du projet. [40]

Staged Construction (Construction par étapes) :

Ce mode permet d'activer ou de désactiver certaines parties du modèle géométrique et de modifier leurs propriétés. Le calcul du projet est réalisé en mode Construction par étapes.

III.4.2.1. Programme de calcul :**III.4.2.1.1 Maillage et calculs**

Une fois la modélisation géométrique achevée, il est possible de procéder aux calculs numériques. Cette étape comprend la génération du maillage ainsi que la définition des phases de construction.

Génération du maillage

Pour réaliser des calculs par la méthode des éléments finis, la géométrie doit être subdivisée en éléments discrets. L'ensemble de ces éléments constitue ce que l'on appelle un maillage d'éléments finis. La création du maillage s'effectue en mode « mesh ». Il est essentiel que le maillage soit suffisamment raffiné afin d'assurer une précision numérique

satisfaisante. Cependant, un maillage trop fin doit être évité, car il engendrerait des temps de calcul prohibitifs. [38]

Le logiciel PLAXIS 3D offre une génération automatique complète du maillage d'éléments finis. Ce processus intègre la stratigraphie du sol ainsi que tous les objets structurels, les charges appliquées et les conditions aux limites. [40]

Types d'éléments utilisés

Éléments de sol : Les éléments de base du maillage 3D sont des tétraèdres à 10 nœuds (voir Figure III.3).

Éléments structurels :

Pour la modélisation des poutres, des éléments linéaires à 3 nœuds sont employés, compatibles avec les bords à 3 nœuds des éléments de sol. Des éléments de plaques à 6 nœuds sont utilisés pour simuler le comportement des dalles. Des éléments de géogrilles modélisent les renforts géosynthétiques. [38]

Éléments d'interface : Des éléments à 12 nœuds sont mis en œuvre pour représenter l'interaction entre le sol et la structure. Cette approche permet une modélisation précise et intégrée du comportement couple sol-structure dans le cadre des analyses par éléments finis

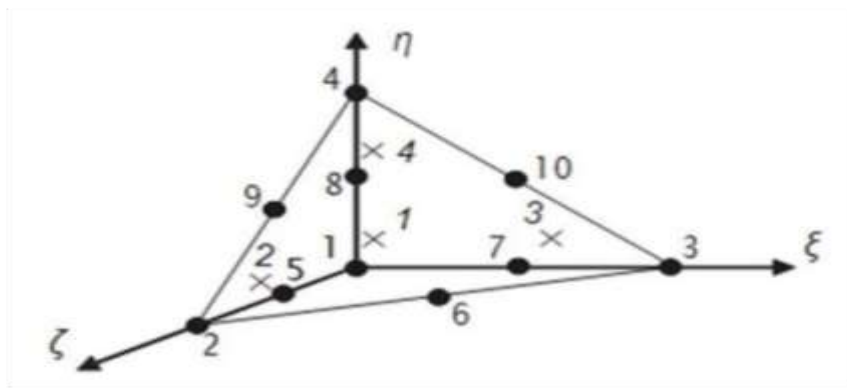


Figure III.3 : Fenêtre de calculations[38]

Calculs dans la pratique de l'ingénierie et dans PLAXIS

Dans le domaine de l'ingénierie, un projet est généralement divisé en plusieurs phases distinctes. De la même manière, dans PLAXIS, un processus de calcul est également segmenté en différentes phases de calcul (voir Figure III.3). Par exemple, ces phases peuvent correspondre à l'activation d'un chargement spécifique à un moment donné, la simulation

d'une étape de construction, l'introduction d'une période de consolidation, le calcul d'un coefficient de sécurité, etc. [40]

Chaque phase de calcul est habituellement subdivisée en plusieurs étapes de calcul. Cette subdivision est nécessaire car le comportement non linéaire des sols impose d'appliquer les charges progressivement, en petites proportions appelées « étapes de charge ». Dans la plupart des cas, il suffit cependant de définir la situation finale à atteindre à l'issue de chaque phase de calcul. PLAXIS intègre des procédures automatiques et robustes qui gèrent la subdivision en étapes de charge appropriées. [40]

Les étapes de construction peuvent être configurées selon deux modes : « Water levels » (niveaux d'eau) et « Staged construction » (construction par étapes). La première phase de calcul, appelée phase initiale, consiste toujours en un calcul du champ de contraintes initiales, basé sur la configuration géométrique de départ, en utilisant soit le chargement par gravité, soit la procédure K0. Il est également possible de définir que les calculs portent uniquement sur l'écoulement souterrain [41]

Après cette phase initiale, l'utilisateur peut définir les phases de calcul suivantes. Pour chaque phase, il est impératif de sélectionner le type de calcul approprié.

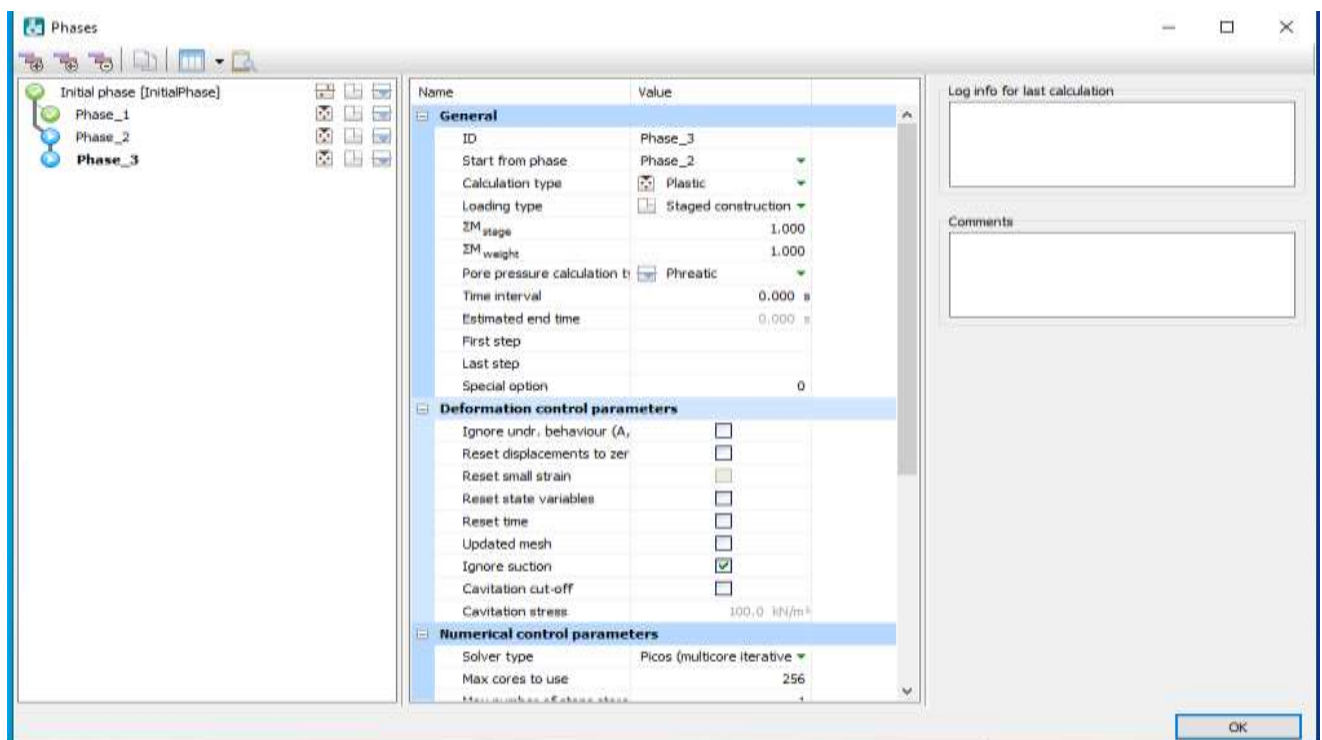


Figure III.4 : Vue de tous les panneaux de la fenêtre Phases.

Types de calculs :

A. Calcul de Sécurité (Réduction Phi-c)

Le calcul de sécurité, disponible dans PLAXIS, permet d'évaluer les facteurs globaux de sécurité d'une structure. Ce type de calcul est sélectionné comme option distincte dans l'onglet général du logiciel.

Dans cette approche, les paramètres de résistance du sol, à savoir l'angle de frottement interne ($\tan \phi$) et la cohésion (c), sont progressivement réduits jusqu'à l'apparition d'une rupture structurelle. L'angle de dilatance (ψ) n'est en principe pas modifié lors de la réduction phi/c. Toutefois, ψ ne peut jamais dépasser ϕ . Lorsque ϕ est réduit jusqu'à atteindre ψ , toute réduction supplémentaire de ϕ entraîne une réduction équivalente de ψ .

La résistance des interfaces (si utilisées) est également réduite proportionnellement. En revanche, la résistance des éléments structurels tels que les plaques ou ancrages reste inchangée lors de ce calcul.

Le multiplicateur total ΣMsf permet de définir la valeur des paramètres de résistance du sol à chaque étape de l'analyse. Les paramètres « input » correspondent aux valeurs initiales saisies dans les propriétés des matériaux, tandis que les paramètres « reduced » correspondent aux valeurs réduites appliquées dans le calcul. Initialement, ΣMsf est fixé à 1,0 pour utiliser les valeurs d'entrée. [38]

$$\sum Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}}$$

Le calcul de sécurité s'effectue par une procédure incrémentale, où le multiplicateur Msf définit la taille de chaque réduction de résistance à chaque étape. Par défaut, cet incrément est fixé à 0,1, ce qui constitue une valeur généralement appropriée.

$$Fs = \frac{\text{résistance disponible}}{\text{résistance à la rupture}} = \text{Valeur de } SMsf \text{ à la rupture}$$

B. Calcul de Consolidation

Le calcul de consolidation est utilisé pour analyser l'évolution et la dissipation des pressions interstitielles excessives dans un sol argileux saturé en fonction du temps. PLAXIS réalise une véritable analyse de consolidation élasto-plastique.

Généralement, une analyse de consolidation sans chargement supplémentaire est effectuée après un calcul plastique non drainé. Il est également possible d'appliquer des charges pendant l'analyse de consolidation, mais il faut être vigilant en cas de situation proche de la rupture, car la convergence des itérations peut être compromise.

Ce type d'analyse nécessite la définition de conditions aux limites spécifiques sur les pressions interstitielles excessives. [40]

C. Calcul Plastique

Le calcul plastique permet une analyse élasto-plastique des déformations sans prise en compte de l'évolution temporelle des pressions interstitielles. Si le paramètre « maillage mis à jour » n'est pas activé, le calcul repose sur la théorie des petites déformations, avec une matrice de rigidité basée sur la géométrie initiale non déformée.

Ce mode de calcul est adapté à la majorité des applications géotechniques pratiques. Bien qu'un intervalle de temps puisse être spécifié, le calcul plastique ne modélise pas les effets temporels, sauf dans le cas de l'utilisation du modèle Soft Soil Creep.

Pour les chargements rapides sur sols saturés argileux, le calcul plastique peut modéliser un comportement entièrement non drainé, correspondant à la limite ultime. À l'inverse, une analyse drainée complète permet d'évaluer les tassements à long terme, offrant ainsi une estimation fiable de la situation finale[40]

D. Calcul de la pression d'eau : La pression de l'eau peut être une pression d'eau 'externe' ou une pression d'eau 'interne' appelée pression d'eau interstitielle. La pression interstitielle de l'eau est incluse dans ce qui est désigné dans PLAXIS comme pression interstitielle active. La pression interstitielle active est composée d'une pression interstitielle à l'état d'équilibre et d'une pression interstitielle excessive, et peut également inclure une aspiration.

En général, la composante en régime permanent de la pression de l'eau (à la fois la partie "externe" et ("interne") est considérée comme des données d'input et supposée connue au début d'une analyse de déformation, alors que la surpression interstitielle est le résultat de chargement ou consolidation non drainé. Cette section traite du calcul de la pression de l'eau en régime permanent comme entrée pour une analyse de déformation, qui peut être générée selon les options disponibles dans la fenêtre Phases. [41]

E. Calcul Dynamique : L'option dynamique doit être sélectionnée lorsqu'il est nécessaire de prendre en compte ondes de stress et vibrations dans le sol. Avec PLAXIS 3D, il est possible d'effectuer une analyse dynamique après une série de calculs plastiques.

III .4.3. Le programme de résultats (Output) :

Le programme de résultats (Output) contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis.

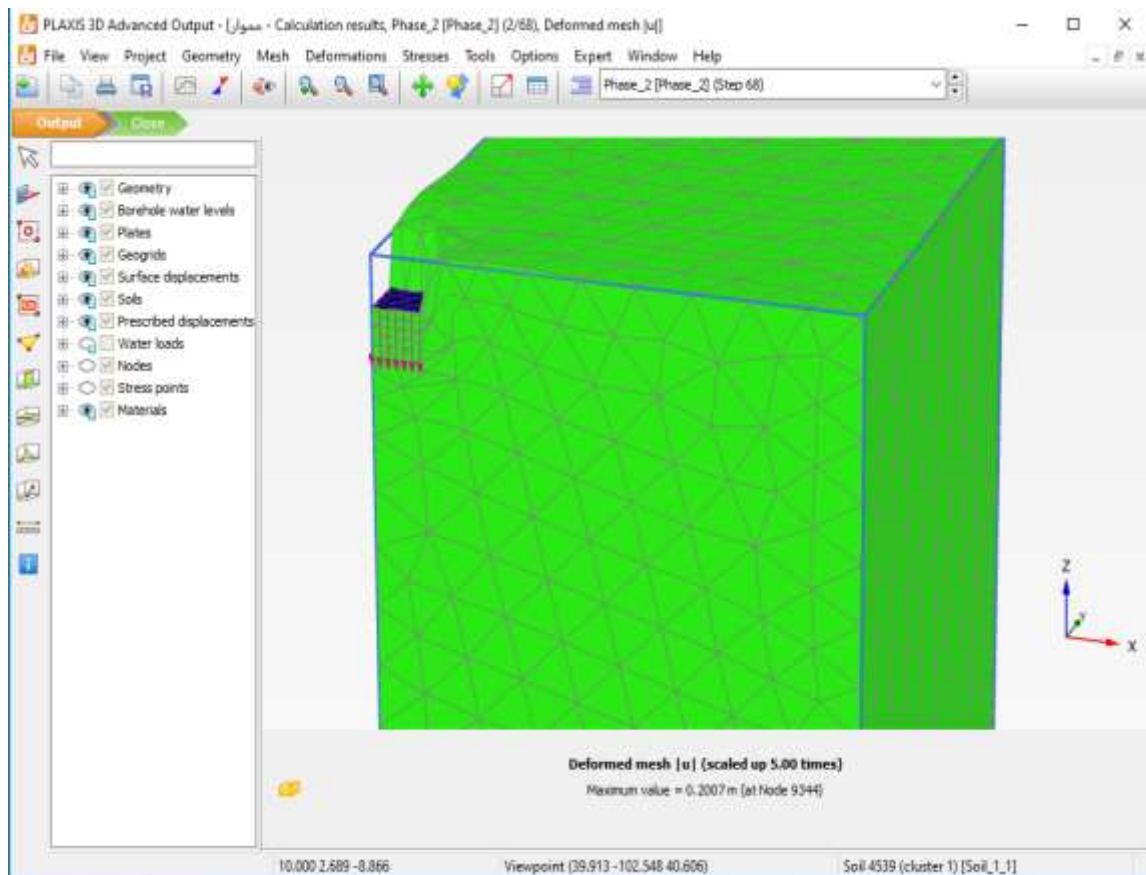


Figure III.5 : Fenêtre principale du programme Output.

La fenêtre principale du programme de résultats contient les éléments suivants :

1. Le menu file
2. Le menu view
3. Le menu project
4. Le menu geometry
5. Le menu mesh

6. Le menu deformations
7. Le menu stress
8. Le menu forces
9. Le menu tools
10. Le menu window
11. Le menu help

III.4.4. Le programme courbe (Curves) :

Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes chargedéplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

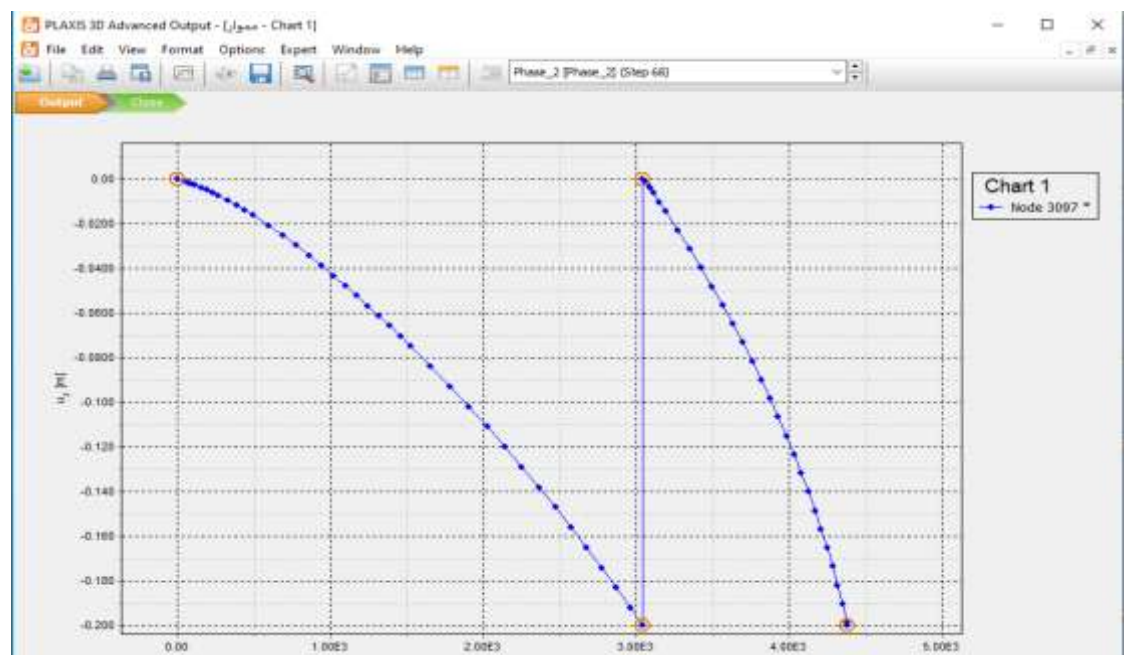


Figure III.6 : Courbes dans le programme output.

La fenêtre principale du programme Curves contient les éléments suivants :

1. Le menu file
2. Le menu edit
3. Le menu view
4. Le menu format
5. Les menus window et help

III.5. Les modèles de comportements utilisés dans PLAXIS

L'un des objectifs principaux de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un logiciel d'éléments finis à la fois robuste et facile d'utilisation. Ce logiciel permet de résoudre des problèmes géotechniques réels dans des délais raisonnables, en s'appuyant sur des modèles de comportement des sols dont les paramètres peuvent être déterminés à partir d'une étude géotechnique classique. Il couvre une large gamme de modèles, depuis le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus avancées, capables de représenter presque tous les aspects du comportement des sols

III.5. 1.Comportement élastoplastique :

Le comportement élastoplastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur K , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil

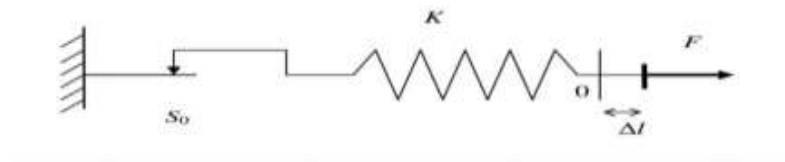


Figure.III.7. Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la (figure III.8)

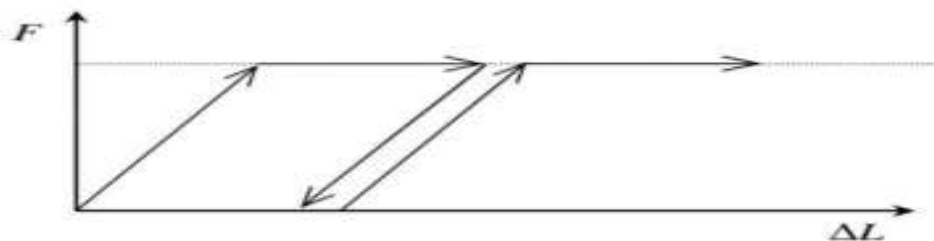


Figure III.8 : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

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

Le type de comportement représenté par les figures (III.7) et (III.8) est un comportement élastiqueplastique sans écrouissage. La figure (III.9) représente un comportement élastique-plastique avec écrouissage.

III.5.2. Modèle élastique linéaire :

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique, il représente la loi de Hook relative à l'élasticité linéaire isotrope.

Les tableaux de rentrée des données demandent : le module de Young E et le coefficient de Poisson ν .

La relation entre le module de Young E et Le module de cisaillement G est donnée par :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Le modèle linéaire élastique peut être utilisé surtout pour modéliser des éléments de structure en béton ou en métal en interaction avec le sol et pour certains problèmes de mécanique des roche

III.5.3. Le modèle de Mohr-Coulomb(MC) :

Ce modèle, largement reconnu, est couramment utilisé comme première approximation pour décrire le comportement mécanique des sols. Il s'agit d'un modèle élastique parfaitement plastique, sans prise en compte de l'écrouissage. Pour son application, cinq paramètres essentiels doivent être déterminés : le module d'Young E , le coefficient de Poisson ν , la cohésion C , l'angle de frottement ϕ , l'angle de dilatance ψ .

III.5.3.1. Le module de Young :

Dans Plaxis, le module d'Young est employé comme référence pour le module de déformation dans les modèles élastiques et de Mohr-Coulomb. Cependant, d'autres modules de déformation peuvent également être pris en compte. Ce module, qui a la dimension d'une contrainte (force par unité de surface), varie en fonction de la déformation ainsi que de la contrainte moyenne appliquée. Il est crucial de choisir avec soin les valeurs de raideur utilisées dans les calculs, car la majorité des géomatériaux présentent un comportement non linéaire dès les premières phases de chargement, notamment lorsque la différence entre les contraintes principales $|\sigma_1 - \sigma_3|$

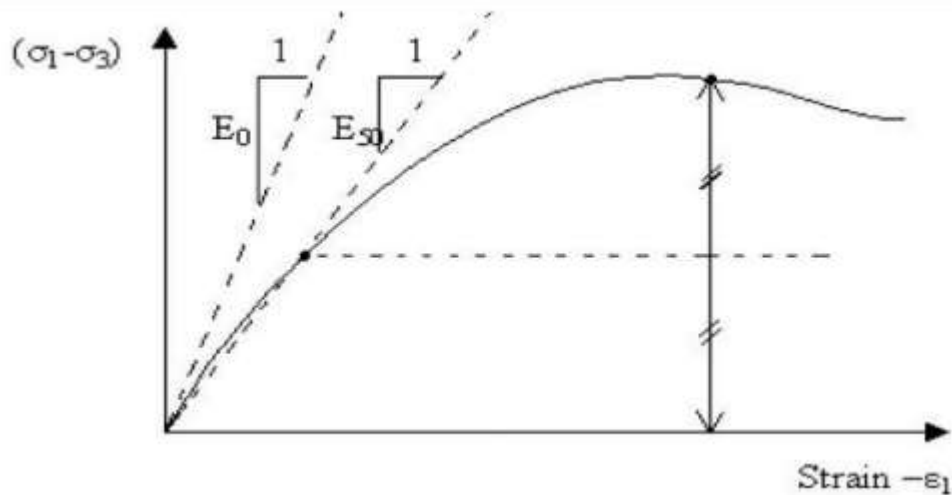


Figure III.9: Définition des modules E_0 et E_{50}

En mécanique des sols, la pente initiale est appelée E_0 et le module sécant à 50% de la résistance en compression est noté E_{50} (voir Fig III.10). Pour des argiles très sûrs consolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, il est réaliste d'utiliser E_0 alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre E_{50} .

III.5.3.2. Le coefficient de poisson

Il est recommandé d'adopter une valeur comprise entre 0,2 et 0,4 pour le coefficient de Poisson. Cette plage est réaliste pour les cas d'application du poids propre, comme dans la procédure K_0 ou les chargements gravitaires. Pour certains cas particuliers, notamment en situation de décharge, il est possible d'utiliser des valeurs plus faibles. Dans le cas des sols incompressibles, le coefficient de Poisson tend vers 0,5, mais cette valeur n'est généralement pas utilisable dans les calculs.

III.5.3.3. L'angle de frottement interne ϕ

L'angle de frottement ϕ s'exprime en degrés. Des valeurs élevées, souvent rencontrées dans les sables denses, augmentent considérablement la complexité numérique des calculs plastiques. En effet, le temps de calcul croît de manière exponentielle avec l'augmentation de cet angle. Par conséquent, il est conseillé d'éviter les angles de frottement trop élevés lors des calculs préliminaires d'un projet. Le temps de calcul devient particulièrement important lorsque l'angle dépasse 35 degrés.

III.5.3.4. La cohésion

La cohésion correspond à une contrainte. Le logiciel PLAXIS peut gérer des sables sans cohésion ($c = 0$), mais certaines fonctionnalités risquent de ne pas fonctionner correctement dans ce cas. Pour éviter ce genre de problème, il est recommandé d'entrer au minimum une faible valeur de cohésion, par exemple $c > 0,2$ kPa. Par ailleurs, PLAXIS propose une option spécifique pour modéliser des couches où la cohésion augmente avec la profondeur.

III.5.3.5. L'angle de dilatance ψ

L'angle de dilatance ψ est une caractéristique propre aux sols granulaires, tels que les sables et les graviers, qui présentent une dilatance (augmentation de volume) sous cisaillement. Il est lié à une loi d'écoulement spécifique. La valeur de ψ peut être déterminée simplement à partir de la pente de dilatance observée lors des essais triaxiaux

Il peut cependant être évalué par la règle grossière suivante:

- . $\psi = 0$ pour $\Psi < 30^\circ$.
- . $\psi = 30^\circ$ pour $\Psi > 30^\circ$.

Les cas où $\Psi < 0$: PLAXIS accepte des angles de dilatance négatifs cela correspond à des sables lâches. La valeur de $\Psi = 0$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densités faibles ou moyennes sous contraintes assez fortes.

III.5.3.6. Les contraintes de traction :

La pyramide de Mohr-Coulomb permet des contraintes de traction (figure III.11). Celles-ci sont souvent peu réalistes pour les sols et il est possible de « couper » ces contraintes de traction (tension cut-off) ou de les diminuer (tensile strength).

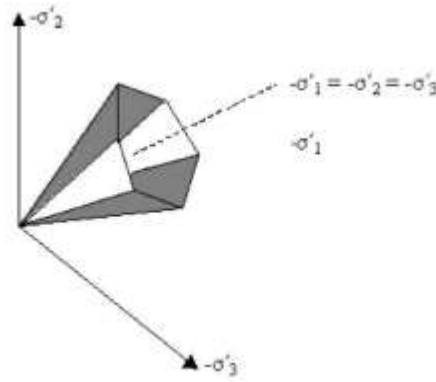


Figure III.10: Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$.

III.5.3.7. Paramètres avancés :

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

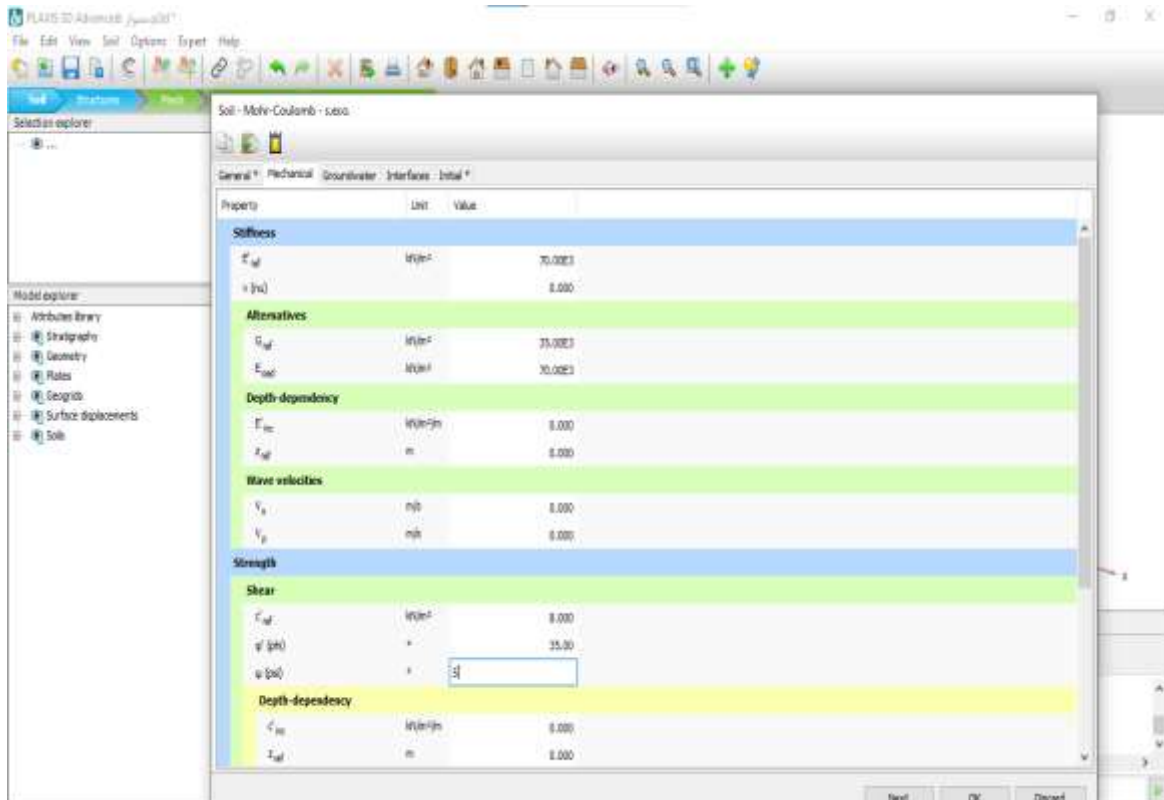


Figure III.11: Fenêtre des paramètres avancés du Mohr-Coulomb

III.6. Modèle de sol durcissant (Hardening Soil model - HS)

Ce modèle avancé permet de simuler le comportement des sols en combinant une formulation élastoplastique hyperbolique avec un durcissement par cisaillement. Il intègre également un durcissement par compression pour représenter le compactage irréversible du sol lors de la compression primaire. Ce modèle de second ordre est adapté aussi bien aux sols

granulaires comme les sables et graviers qu'aux sols plus cohésifs tels que les argiles et limons.

III.6.1. Modèle de sol durcissant avec rigidité à faible déformation (HSsmall)

Similaire au modèle HS, ce modèle hyperbolique élastoplastique prend en compte la variation de la rigidité en fonction de la déformation, ce qui permet de mieux représenter le comportement des sols sous très petites déformations (par exemple les vibrations avec des déformations inférieures à 10^{-5}), par opposition aux grandes déformations.

III.6.2. Modèle pour sols mous (Soft Soil model - SS)

Basé sur le modèle Cam-Clay, ce modèle est conçu pour simuler le comportement des sols mous, tels que les argiles et la tourbe normalement consolidées, et est particulièrement efficace pour les phénomènes de compression primaire.

III.6.3. Modèle pour sols mous avec effet du temps (Soft Soil Creep model - SSC)

Ce modèle de second ordre, formulé dans le cadre de la viscoplasticité, permet de modéliser le comportement temporel des sols mous normalement consolidés, incluant à la fois la compression primaire et secondaire de type logarithmique.

III.6.4. Modèle Jointed Rock

Ce modèle anisotrope élastoplastique est spécifiquement développé pour simuler le comportement des formations rocheuses stratifiées avec des directions de failles définies. La plasticité est limitée à trois directions de cisaillement, chacune caractérisée par ses propres paramètres de résistance (ϕ et c). La roche intacte est considérée comme parfaitement élastique avec des propriétés constantes de rigidité (E et ν), tandis que des rigidités réduites peuvent être assignées selon la stratification.

III.6.5. Modèle Cam-Clay modifié (Modified Cam-Clay - MCC)

Ce modèle d'état critique bien connu est utilisé pour représenter le comportement des sols mous normalement consolidés, en supposant une relation logarithmique entre la déformation volumétrique et la contrainte effective moyenne.

III.6.6. Modèle NGI-ADP

Ce modèle est adapté à l'analyse de la capacité portante, des déformations et de l'interaction sol-structure sous charge d'argile non drainée, avec la possibilité de définir des contraintes anisotropes distinctes selon différents chemins de chargement.

III.6.7. Modèle Hoek-Brown (HB)

Modèle élastique parfaitement plastique, il sert à simuler le comportement isotrope de la roche. La rigidité de la masse rocheuse est constante, et la rupture en cisaillement ou traction est décrite par une courbe de contrainte non linéaire.

III.6.8. Modèles définis par l'utilisateur (User-defined soil models - UDSM)

Cette option offre la possibilité d'utiliser des modèles constitutifs personnalisés, autres que ceux standards proposés par PLAXIS.

III.7. Conclusion

Ce panorama des modèles disponibles dans PLAXIS 3D montre qu'ils sont suffisamment simples pour que leurs paramètres puissent être déterminés à partir d'études géotechniques classiques ou de corrélations. Ces modèles n'incluent pas de paramètres arbitraires sans signification physique, contrairement à certains modèles sophistiqués. Leur calibration peut nécessiter des techniques d'optimisation, domaine toujours en recherche active. La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans PLAXIS 3D s'apparente à un choix manuel de paramètres pour des calculs classiques de tassement ou de stabilité, permettant ainsi de construire un modèle géotechnique représentatif du terrain. Bien que certains paramètres soient exprimés différemment, ils restent liés aux grandeurs géotechniques classiques. L'utilisation de la modélisation numérique est souvent recommandée en géotechnique, car elle intègre les interactions entre éléments, assurant ainsi une simulation fiable et réaliste du comportement du sol

Chapitre IV

Application des méthodes d'apprentissage automatique pour la prédiction de la capacité portante

IV.1. Introduction :

Ce chapitre présente l'application de méthodes d'apprentissage automatique pour la prédiction de la capacité portante des fondations superficielles renforcées par géogrilles. Il s'articule en deux volets complémentaires.

Dans un premier temps, un modèle numérique a été élaboré sous Plaxis 3D afin de générer une base de données à partir de plusieurs scénarios de renforcement. Dans un second temps, deux modèles d'intelligence artificielle (un réseau de neurones artificiels (RNA)) et une régression à vecteurs de support (SVR) ont été développés à partir de ces données.

L'objectif est de proposer une approche rapide et précise pour estimer la portance, tout en identifiant les paramètres les plus influents, sans recourir systématiquement aux simulations numériques.

IV.2. Présentation du modèle de référence :

IV.2.1 Géométrie :

Dans cette étude, le cas de référence concerne une semelle carrée de 2 m de côté et de 0,5 m d'épaisseur, posée sur un sol sableux. Pour simplifier la simulation tout en conservant la représentativité du système, seul un quart du modèle complet a été pris en compte, soit une surface de 1 m $\times$ 1 m. Cette approche permet de réduire le temps de calcul sans affecter la précision des résultats, grâce à la symétrie du problème.

Le domaine de calcul utilisé mesure 20 m en hauteur, ce qui correspond à dix fois la largeur de la semelle ($H = 10b$). La longueur et la largeur du modèle sont aussi fixées à 10 m chacune ($L = B = 10b$). Ces dimensions ont été choisies de manière à éloigner suffisamment les frontières du modèle de la zone influencée par la semelle, afin de minimiser les effets des conditions aux limites.

La figure IV.1 montre la configuration adoptée dans ce cas de référence.

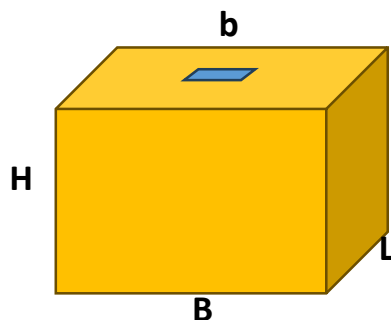


Figure IV.1 : Présentation du cas de référence

IV.2.2 Caractéristiques des éléments du modèle :

Le sol est modélisé à l'aide d'un comportement élastique parfaitement plastique, basé sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb. Les propriétés géotechniques utilisées dans cette étude correspondent à un sol sableux. Elles ont été choisies en se référant aux classifications proposées par Bowles (1997) [22], afin d'assurer une cohérence avec les données de la littérature.

Les caractéristiques des matériaux retenus pour le sol et la semelle sont présentées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Caractéristiques de sol de fondation et de la semelle

Élément	Sol de fondation (sol cohésive)	Semelle (Plates)
Modèle de comportement	Mohr coulomb	Élastique Linéaire
Type	Drained	Non-porous
Épaisseur (m)	/	0.5
Angle de frottement (degrés)	10	-
Cohésion, c (kPa)	15	-
Angle de dilatance, Ψ (degrés)	0	-
Poids spécifique γ (kN/m ³)	16.3	24
Poids spécifique saturé γ (kN/m ³)	17	/
Module de rigidité E (kPa)	5000	23500000
Coefficient de Poisson ν	0,3	0.2

On considère une semelle superficielle isolée carrée de côté B reposant directement sur le sol. Cette fondation est soumise à un déplacement imposé vertical égale à $0.2m$ ($\approx 0.1B$).

IV.2.3. Processus de modélisation numérique

Dans cette étude, on modélise une semelle superficielle isolée, de forme carrée, posée directement sur un sol sableux. La semelle est soumise à un déplacement vertical imposé équivalant à 10 % de sa largeur, soit $0,1B$. Cette approche permet d'analyser son comportement sous un enfoncement progressif.

La simulation est réalisée avec le logiciel PLAXIS 3D, en suivant une procédure bien définie. Elle débute par la construction du modèle géométrique représentant la semelle et le sol environnant. Les propriétés mécaniques sont ensuite assignées en fonction des caractéristiques du sol et de la fondation.

Une fois la géométrie définie, un maillage adapté est généré pour garantir la précision des calculs. Les conditions aux limites sont appliquées, de même que le déplacement vertical

imposé à la semelle. L'analyse peut alors être lancée pour observer la réponse du sol sous chargement.

La fondation est représentée comme une fondation rigide, et le chargement est introduit sous forme d'un déplacement vertical appliqué sur la zone de contact avec le sol. Le tassement prescrit est de 0,2 m, ce qui correspond à $0,1B$.

Au cours de la simulation, la charge transmise au sol est calculée à partir de la somme des forces verticales exercées sur les nœuds situés sous la semelle. Cette méthode permet d'évaluer précisément la portance mobilisée en fonction du déplacement appliqué.

IV.2.4. Maillage et conditions aux limites

La modélisation numérique a été réalisée en cherchant un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul. L'objectif est d'obtenir une représentation suffisamment détaillée du modèle tout en gardant une simulation stable et efficace.

Un maillage standard (de densité moyenne) a été utilisé, ce qui permet de couvrir correctement les zones critiques sans alourdir inutilement le calcul. Le domaine a été discrétisé avec des éléments finis tétraédriques à 10 nœuds. Le maillage complet comprend 5519 éléments et 9200 nœuds (Figure IV.2).

Les conditions aux limites ont été définies comme suit :

- Les déplacements horizontaux sont bloqués sur les parois verticales du modèle
- Tous les déplacements (horizontaux et verticaux) sont empêchés à la base

Cette configuration permet de limiter les effets de bord et d'assurer une bonne stabilité du modèle pendant la simulation.

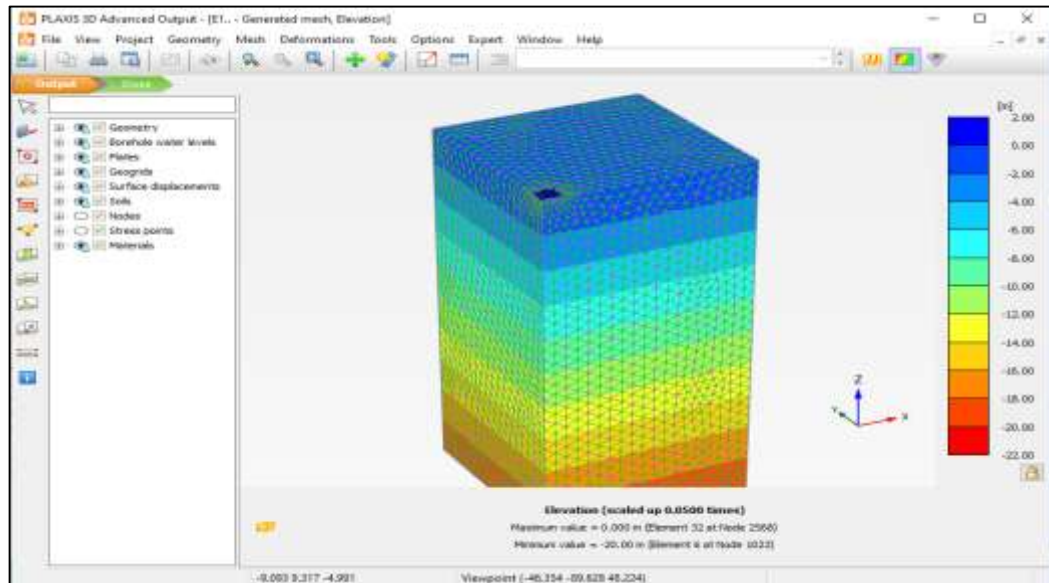


Figure IV.2. Génération du maillage

IV.2.5. Les résultats :

IV.2.5.1. Déplacement verticale :

Les figures IV.3 et IV.4 illustrent respectivement l'état déformé du maillage et le déplacement vertical du sol pour le cas de référence, c'est-à-dire sans renforcement du sol.

Comme le montre la figure IV.3, le déplacement vertical maximum atteint la valeur prescrite de 0,2 mètre, correspondant au tassement imposé à la semelle dans le cadre de la simulation.

La distribution du déplacement dans le sol suit une répartition cohérente avec la forme classique des bulbes de contrainte décrits par les théories de la mécanique des sols. La zone de forte déformation se concentre directement sous la semelle, puis s'atténue progressivement avec la profondeur et la distance, conformément au comportement attendu pour ce type de sollicitation.

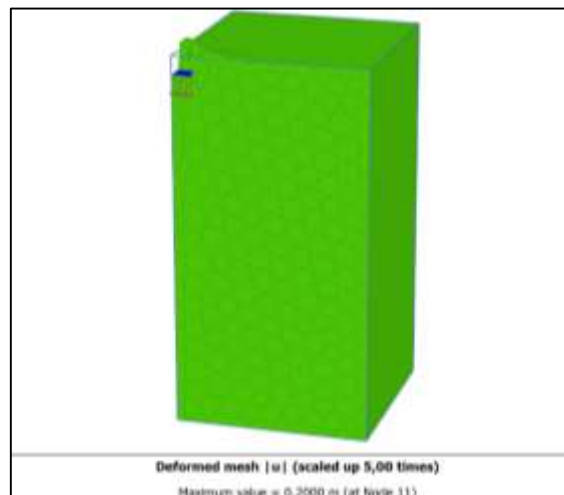


Figure IV.3 Maillage déformé du modèle (sans renforcement)

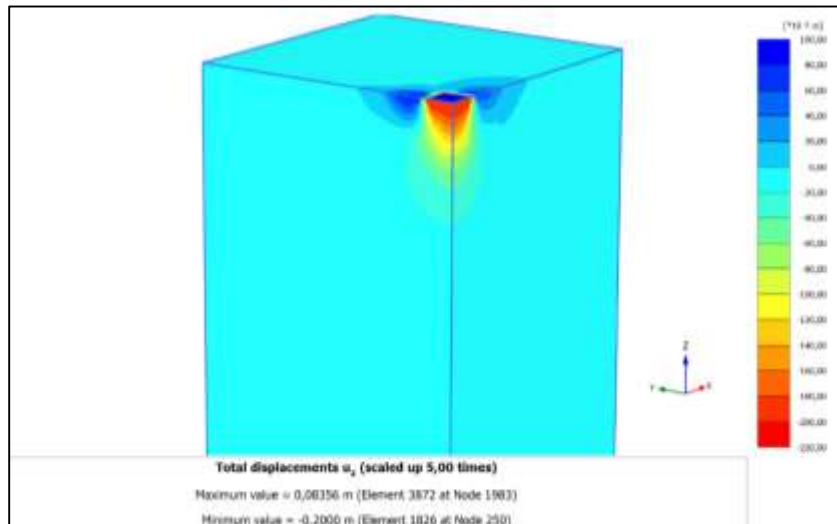


Figure IV.4 Déplacement vertical du sol (sans renforcement)

IV.2.5.2. Capacité portante :

La figure IV.5 présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du tassement vertical de la semelle. Cette courbe permet de suivre la réponse du sol sous chargement progressif.

D'après cette représentation, on peut estimer que la capacité portante du sol non renforcé atteint environ 1622 Kpa. Cette valeur correspond à la charge mesurée lorsque le déplacement vertical prescrit de 0,2 m (soit 0,1B) a été atteint, marquant le début d'un comportement plastique prononcé du sol.

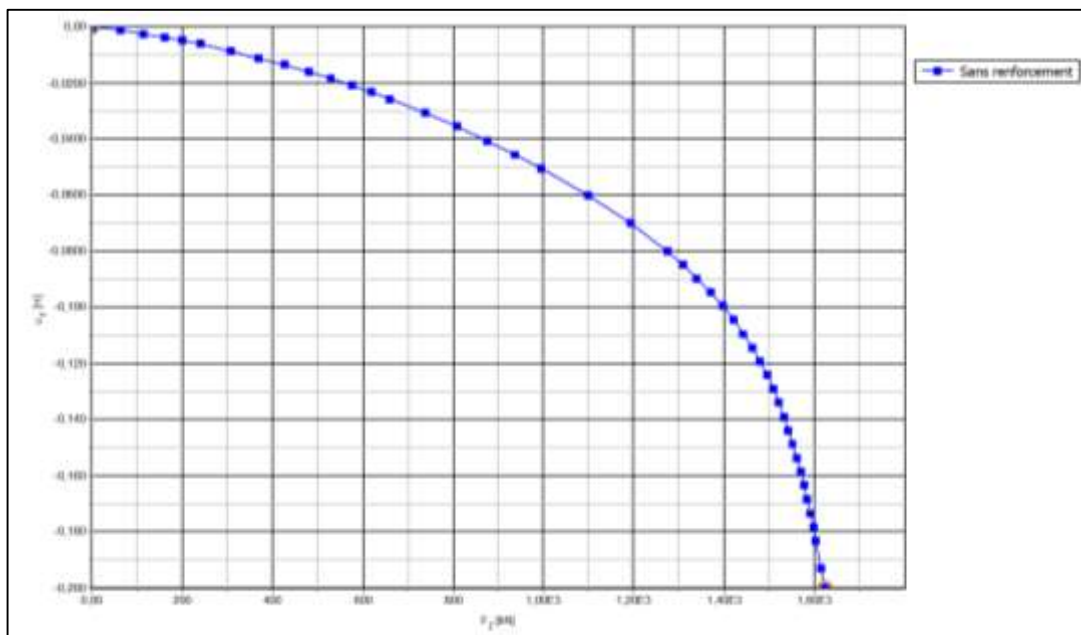


Figure IV.5. Évolution du tassement vertical au centre de semelle (sans renforcement)

IV3.2. Amélioration de la portance du sol par des nappes géogrilles

L'amélioration de la capacité portante du sol par l'utilisation de nappes de géogrilles est une méthode fréquemment employée en génie civil pour renforcer les sols et augmenter leur résistance portante. Les nappes géogrilles sont des géosynthétiques constitués de fibres synthétiques entrecroisées formant une structure en forme de grille.

Le principe de cette technique consiste à disposer une ou plusieurs nappes sous la fondation, généralement parallèles à sa base, en les espaçant verticalement de manière régulière (figure IV.6). Ces nappes, ancrées dans le sol, contribuent à redistribuer les efforts verticaux sur une surface plus large, ce qui améliore notablement la stabilité et la portance globale du système. La distance entre les nappes (h), le nombre de nappes (N), la longueur des nappes (L) ainsi que leur profondeur d'insertion sous la semelle (d), sont des paramètres essentiels qui influencent directement l'efficacité du renforcement.

La section suivante examine l'impact du renforcement du sol par des géogrilles sur sa capacité portante. Deux configurations ont été analysées à cette fin. Dans la première, une seule nappe de géogrille est ajoutée sous la semelle. Dans la seconde, deux nappes sont disposées de manière superposée. Les propriétés mécaniques des renforts sont identiques dans les deux cas, avec une rigidité axiale fixée à 2000 kN/m. Chaque nappe mesure 8 mètres de longueur, soit l'équivalent de quatre fois la largeur de la semelle ($L = 4B$). Pour le cas à deux nappes, celles-ci sont espacées verticalement de 0,2 mètre ($h = 0,1B$), tandis que la première est placée à 0,2 mètre sous la base de la semelle ($e = 0,1B$).

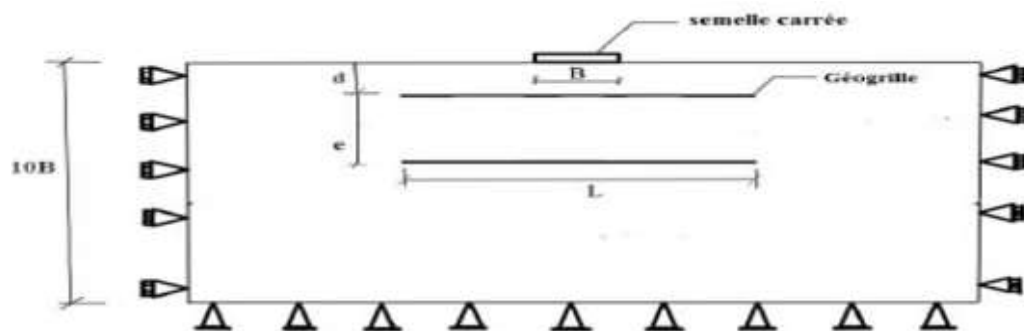


Figure IV.6 : Le principe de renforcement du sol par des géogrilles

La figure IV.7 illustre l'évolution du tassement vertical au centre de la semelle pour trois configurations : sans renforcement, avec une nappe, et avec deux nappes de géogrille.

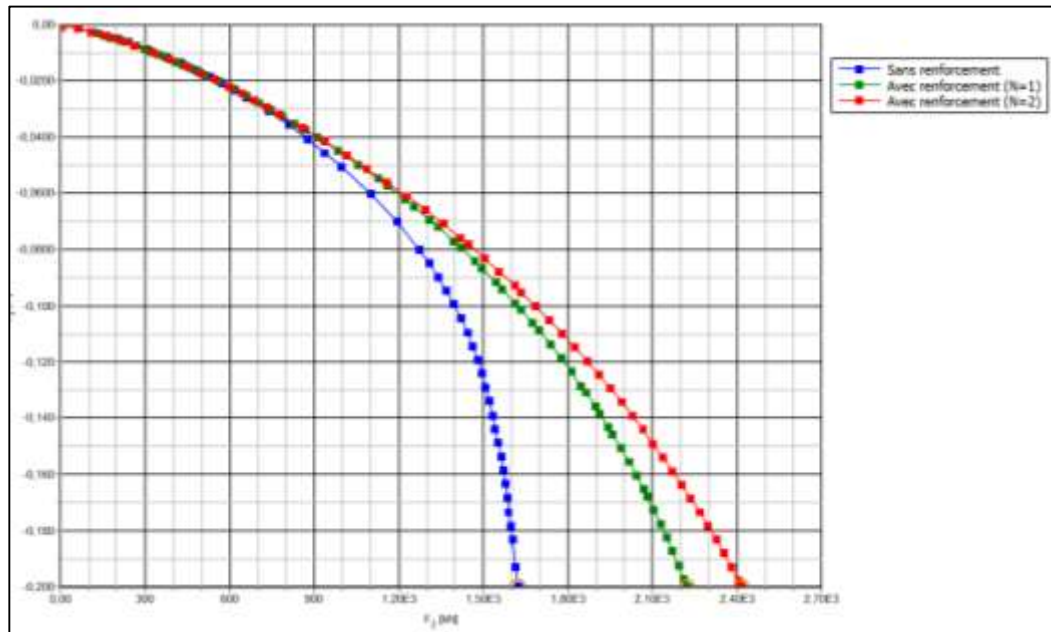


Figure IV.7 : Présentation de la géométrie du modèle (cas d'un sol renforcé par géogrilles)

Les résultats montrent que l'ajout de nappes géogrilles améliore significativement la capacité portante du sol. Dans le cas sans renforcement, la capacité portante est de 1622 kPa. Elle atteint 2223 kPa avec une nappe, puis 2418 kPa avec deux nappes, soit une augmentation de 37 % et 49 % respectivement par rapport au cas non renforcé (voir Figure IV.8). Ces résultats confirment l'effet positif du renforcement par des nappes géosynthétique, et montrent que l'efficacité dépend de la configuration de renforcement choisie comme le nombre de nappes mises en place.

IV.4. Elaboration d'un modèle d'intelligence artificielle pour la prédiction de la portance d'un sol renforcé par géogrilles (cas d'une semelle carrée)

IV.4.1. Introduction

Dans le contexte des avancées rapides de l'intelligence artificielle et de ses applications en géotechnique, cette recherche se présente comme une étude innovante visant à développer un modèle d'IA capable d'analyser des données et de prédire la capacité portante des sols renforcés par des couches de géogrille dans le cas d'une fondation carrée. Ce modèle s'appuie sur deux algorithmes principaux : les réseaux de neurones artificiels (ANN) et les machines à vecteurs de support pour la régression (SVR), implémentés dans l'environnement de programmation Python. La capacité portante des sols est un paramètre crucial dans la conception des fondations, et le renforcement des sols par des géogrilles améliore leurs propriétés mécaniques. Cependant, les méthodes de calcul traditionnelles restent complexes et chronophages. D'où l'importance de cette étude, qui propose un modèle intelligent alliant

précision et rapidité d'analyse, en exploitant les techniques d'apprentissage automatique pour traiter des données relatives aux caractéristiques du sol et des couches de géogridde, telles que l'angle de frottement, la cohésion, le nombre de couches et la résistance à la traction. Le modèle a été développé à l'aide de bibliothèques Python comme TensorFlow et Scikit-learn, suivant une méthodologie complète incluant la collecte des données, leur prétraitement, la construction du modèle, son entraînement et son évaluation via des métriques de performance telles que l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de détermination (R^2). Ce modèle est censé offrir une grande efficacité dans les prédictions, avec la possibilité d'être étendu à d'autres configurations, comme les fondations rectangulaires ou circulaires, en faisant un outil précieux pour les ingénieurs et chercheurs en géotechnique. Il ouvre également la voie à des études futures basées sur des algorithmes plus avancés.

IV.4.2. Collecte des données

La base de données a été créée par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis 3D. Cette base de données représente huit entrées et une sortie (capacité de charge q_l).

Les huit entrées sont dans l'ordre : la largeur de la semelle B , la longueur de géogridde L (le rapport entre la longueur de géogridde et la largeur de la semelle L/b), la rigidité axiale de géogridde EA , l'espacement entre la 1^{ère} nappe et la base de la semelle e (e/b), l'espacement entre les nappes géogridde h (h/b), l'angle de frottement du sol ϕ , la cohésion du sol C , et le nombre de géogridde N (Tableau IV.2). Notre base de données contient 359 éléments

Tableau IV.2 : Description de la base de données utilisée.

B	L	EA	e	h	ϕ	C	N	q_l
1.0	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	5,476.00
1.0	7	3500	0.60	0.60	50	1	1	15,524.00
1.0	1	3500	0.10	0.60	30	1	1	392.84
1.0	1	500	0.60	0.60	50	1	7	10,940.00
1.0	7	500	0.60	0.60	30	15	7	1,528.80
1.0	1	3500	0.60	0.60	50	15	7	14,644.00
1.0	7	500	0.10	0.60	30	2	7	572.00
1.0	1	500	0.10	0.60	50	15	7	15,356.00
1.0	7	500	0.10	0.10	50	2	7	14,216.00
1.0	7	3500	0.10	0.60	30	15	7	1,586.40
1.0	7	500	0.60	0.60	50	15	1	17,552.00
1.0	1	500	0.10	0.10	50	15	1	15,408.00

1.0	7	3500	0.10	0.60	50	15	1	16,252.00
1.0	7	500	0.10	0.60	50	1	1	13,564.00
1.0	1	500	0.60	0.10	30	1	7	294.12
1.0	7	3500	0.60	0.10	50	1	7	12,176.00
1.0	1	3500	0.60	0.60	30	15	1	1,529.20
1.0	1	3500	0.10	0.10	50	1	1	12,808.00
1.0	7	3500	0.10	0.10	30	15	1	1,485.20
1.0	1	500	0.60	0.10	50	1	1	12,732.00
1.0	1	3500	0.60	0.10	30	15	7	1,428.80
1.0	1	3500	0.10	0.60	50	1	7	12,264.00
1.0	7	3500	0.60	0.10	30	1	1	548.40
1.0	7	500	0.10	0.10	30	1	1	454.80
1.0	7	3500	0.60	0.60	30	5	7	1,176.00
1.0	7	500	0.60	0.10	30	15	1	1,252.80
1.0	1	500	0.10	0.10	30	15	7	1,355.60
1.0	1	500	0.60	0.60	30	1	1	467.20
1.0	1	3500	0.10	0.10	30	1	7	898.00
1.0	7	500	0.60	0.10	50	15	7	14,300.00
1.0	1	500	0.10	0.60	30	15	1	1,289.20
1.0	1	3500	0.60	0.10	50	15	1	14,880.00
1.0	7	3500	0.10	0.10	50	15	7	17,504.00
1.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	1	3,968.40
1.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	6	5,636.00
1.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	1	901.20
1.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	6	1,379.60
1.0	1	2000	0.10	0.10	45	8	1	8,356.00
1.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	1	8,992.00
1.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	6	10,848.00
1.0	7	800	0.10	0.50	30	15	3	1,366.80
1.0	1	500	0.10	0.35	30	1.00	2	345.44
1.0	4	2000	0.35	0.10	30	4.00	7	1,166.80
1.0	4	3500	0.60	0.35	30	15.00	5	1,673.60
2.0	4	2000	0.35	0.35	50	8	4	16,410.00
2.0	7	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,895.00
2.0	4	2000	0.35	0.35	40	15	4	5,398.00
2.0	4	2000	0.10	0.35	40	8	4	5,597.00
2.0	4	500	0.35	0.35	40	8	4	4,419.00

2.0	4	2000	0.35	0.35	40	8	1	5,200.00
2.0	4	3500	0.35	0.35	40	8	4	4,979.00
2.0	1	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,617.00
2.0	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	4,721.00
2.0	4	2000	0.35	0.60	40	8	4	5,064.00
2.0	4	2000	0.35	0.35	40	1	4	3,914.00
2.0	4	2000	0.60	0.35	40	8	4	4,693.00
2.0	4	2000	0.35	0.35	40	8	7	4,726.00
2.0	4	2000	0.35	0.10	40	8	4	5,446.00
2.0	4	2000	0.35	0.35	30	8	4	1,281.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	1	5,301.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	2	5,455.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	3	5,593.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	4	5,901.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	6	6,221.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	40	8	1	5,027.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	40	8	2	5,277.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	40	8	6	6,322.00
2.0	5	2000	0.10	0.10	40	8	1	4,989.00
2.0	2	2000	0.10	0.35	40	8	1	5,301.00
2.0	2	2000	0.10	0.35	40	8	6	5,572.00
2.0	2	2000	0.60	0.35	40	8	6	4,617.00
2.0	2	2000	0.60	0.10	40	8	6	4,896.00
2.0	2	2000	0.60	0.60	40	8	6	5,098.00
2.0	1	2000	0.10	0.10	30	8	1	1,042.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	1	1,140.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	2	1,252.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	3	1,354.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	4	1,462.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	6	1,560.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	30	8	1	1,160.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	30	8	2	1,276.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	30	8	6	1,645.00
2.0	5	2000	0.10	0.10	30	8	1	1,157.00
2.0	2	2000	0.10	0.35	30	8	1	1,140.00
2.0	2	2000	0.10	0.35	30	8	6	1,325.00
2.0	2	2000	0.60	0.35	30	8	6	1,072.00
2.0	2	2000	0.60	0.10	30	8	6	1,154.00
2.0	2	2000	0.60	0.60	30	8	6	1,188.00
2.0	2	1000	0.10	0.10	40	8	1	5,156.00
2.0	2	1000	0.10	0.10	40	8	2	5,250.00
2.0	2	1000	0.10	0.10	40	8	3	5,348.00

2.0	2	1000	0.10	0.10	40	8	4	5,565.00
2.0	2	1000	0.10	0.10	40	8	6	5,782.00
2.0	3	1000	0.10	0.10	40	8	1	4,954.00
2.0	3	1000	0.10	0.10	40	8	2	5,104.00
2.0	3	1000	0.10	0.10	40	8	6	5,932.00
2.0	5	1000	0.10	0.10	40	8	1	4,899.00
2.0	2	500	0.10	0.10	40	8	1	5,013.00
2.0	2	500	0.10	0.10	40	8	2	5,056.00
2.0	2	500	0.10	0.10	40	8	3	5,098.00
2.0	2	500	0.10	0.10	40	8	4	5,237.00
2.0	2	500	0.10	0.10	40	8	6	5,323.00
2.0	3	500	0.10	0.10	40	8	1	4,884.00
2.0	3	500	0.10	0.10	40	8	2	4,930.00
2.0	3	500	0.10	0.10	40	8	6	5,530.00
2.0	5	500	0.10	0.10	40	8	1	4,813.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	15	1	6,010.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	15	2	6,197.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	15	3	6,293.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	15	4	6,523.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	40	15	6	6,679.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	40	15	1	5,743.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	40	15	2	5,906.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	40	15	6	6,714.00
2.0	5	2000	0.10	0.10	40	15	1	5,717.00
2.0	1	2000	0.10	0.10	35	8	1	2,189.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	35	8	1	2,342.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	35	8	2	2,497.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	35	8	3	2,650.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	35	8	4	2,830.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	35	8	6	3,048.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	35	8	1	2,362.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	35	8	2	2,555.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	35	8	6	3,189.00
2.0	5	2000	0.10	0.10	35	8	1	2,353.00
2.0	1	2000	0.10	0.10	45	8	1	9,496.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	1	10,750.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	2	11,010.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	3	11,030.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	4	11,440.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	6	11,660.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	45	8	1	9,999.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	45	8	2	10,440.00

2.0	3	2000	0.10	0.10	45	8	6	11,760.00
2.0	5	2000	0.10	0.10	45	8	1	10,180.00
2.0	1	2000	0.10	0.10	50	5	1	15,440.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	50	5	1	17,280.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	50	5	2	17,440.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	50	5	3	17,270.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	50	5	4	17,660.00
2.0	2	2000	0.10	0.10	50	5	6	17,750.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	50	5	1	16,110.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	50	5	2	16,640.00
2.0	3	2000	0.10	0.10	50	5	6	1,820.00
2.0	5	2000	0.10	0.10	50	5	1	16,600.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	40	8	1	4,866.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	30	8	1	1,230.00
2.0	2	1000	0.35	0.35	40	8	1	5,622.00
2.0	2	500	0.35	0.35	40	8	1	5,556.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	40	15	1	5,705.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	35	8	1	2,285.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	35	8	2	2,330.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	45	8	2	9,830.00
2.0	2	2000	0.35	0.35	50	5	1	16,720.00
2.0	2	2000	0.10	0.35	50	5	2	17,210.00
2.0	4	2000	0.10	0.60	40	1	1	4,105.00
2.0	4	2150	0.10	0.10	50	8.00	4	17,650.00
2.0	4	3500	0.35	0.35	30	8.00	1	1,397.00
2.0	4	3500	0.35	0.35	30	8.00	1	1,397.00
2.0	1	2000	0.35	0.35	50	15.00	1	16,230.00
2.0	4	2000	0.35	0.35	40	8.00	4	4,711.00
2.0	1	3500	0.35	0.10	40	1.00	5	4,068.00
3.0	1	3500	0.60	0.10	30	1	1	680.44
3.0	7	500	0.60	0.10	50	1	1	15,373.33
3.0	7	500	0.60	0.60	30	1	1	837.78
3.0	1	500	0.10	0.60	30	1	7	699.11
3.0	1	500	0.60	0.60	30	15	7	1,531.11
3.0	7	500	0.60	0.60	50	1	7	15,560.00
3.0	1	3500	0.10	0.60	50	15	1	17,791.11
3.0	1	500	0.10	0.10	50	1	7	15,284.44
3.0	4	2000	0.35	0.35	40	8	4	5,591.11
3.0	7	500	0.10	0.10	50	15	1	18,266.67
3.0	7	3500	0.10	0.10	50	1	1	17,160.00
3.0	1	3500	0.60	0.10	50	1	7	15,586.67
3.0	7	3500	0.10	0.60	30	1	1	864.44

3.0	7	3500	0.10	0.10	30	1	7	1,437.78
3.0	7	3500	0.10	0.60	50	1	7	17,946.67
3.0	7	500	0.10	0.60	30	15	1	1,550.22
3.0	1	3500	0.60	0.60	50	1	1	16,706.67
3.0	7	500	0.10	0.60	50	15	7	18,608.89
3.0	1	3500	0.10	0.10	50	15	7	16,782.22
3.0	1	500	0.60	0.10	30	15	1	1,519.11
3.0	7	500	0.10	0.10	30	15	7	1,680.89
3.0	1	3500	0.10	0.60	30	15	7	1,591.56
3.0	1	500	0.10	0.10	30	1	1	760.00
3.0	7	3500	0.60	0.60	30	15	1	1,638.67
3.0	1	500	0.60	0.10	50	15	7	17,777.78
3.0	7	3500	0.60	0.10	30	15	7	1,520.89
3.0	1	500	0.60	0.60	50	15	1	18,551.11
3.0	7	500	0.60	0.10	30	2	7	591.11
3.0	1	3500	0.60	0.60	30	1	7	654.22
3.0	1	500	0.10	0.60	50	1	1	16,582.22
3.0	7	3500	0.60	0.10	50	15	1	18,324.44
3.0	1	3500	0.10	0.10	30	15	1	1,596.89
3.0	7	3500	0.60	0.60	50	15	7	18,320.00
3.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	1	5,377.78
3.0	2	2000	0.10	0.10	40	8	6	6,515.56
3.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	1	1,236.44
3.0	2	2000	0.10	0.10	30	8	6	1,671.11
3.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	1	10,542.22
3.0	2	2000	0.10	0.10	45	8	6	12,097.78
3.0	4	3500	0.30	0.10	40	8.50	7	5,800.00
3.0	7	2000	0.35	0.60	50	7.50	3	17,866.67
3.0	1	2060	0.10	0.35	40	7.50	7	5,235.56
3.0	7	3500	0.60	0.40	35	1.00	6	2,026.67
1.5	1	2000	0.10	0.35	30	5.00	1	767.11
1.5	1	2000	0.10	0.35	30	8.00	1	974.22
1.5	1	2000	0.10	0.35	30	15.00	1	1,346.13
1.5	1	2000	0.10	0.35	40	5.00	1	3,914.67
1.5	1	2000	0.10	0.35	40	8.00	1	4,396.44
1.5	1	2000	0.10	0.35	40	15.00	1	5,242.67
1.5	1	2000	0.10	0.35	50	5.00	1	14,599.11
1.5	1	2000	0.10	0.35	50	8.00	1	15,143.11
1.5	1	2000	0.10	0.35	50	15.00	1	16,030.22
1.5	1	500	0.10	0.35	30	5.00	1	753.24
1.5	1	500	0.10	0.35	50	5.00	1	14,515.56
1.5	1	3500	0.10	0.35	30	5.00	1	774.76

1.5	1	3500	0.10	0.35	50	5.00	1	14,622.22
1.5	1	2000	0.10	0.10	30	5.00	1	767.11
1.5	1	2000	0.10	0.60	30	5.00	1	767.11
1.5	1	2000	0.10	0.30	30	5.00	1	767.11
1.5	1	2000	0.10	0.10	30	15.00	1	1,346.13
1.5	1	2000	0.10	0.60	30	15.00	1	1,346.13
1.5	1	2000	0.10	0.30	30	15.00	1	1,346.13
1.5	4	2000	0.10	0.30	30	5.00	1	908.27
1.5	4	2000	0.10	0.30	30	15.00	1	1,479.47
1.5	4	2000	0.10	0.30	40	5.00	1	4,291.56
1.5	4	2000	0.10	0.30	40	15.00	1	5,582.22
1.5	4	2000	0.10	0.30	50	5.00	1	15,368.89
1.5	4	2000	0.10	0.30	50	15.00	1	16,837.33
1.5	4	500	0.10	0.30	30	5.00	1	858.49
1.5	4	500	0.10	0.30	50	5.00	1	15,072.00
1.5	4	3500	0.10	0.30	30	5.00	1	926.22
1.5	4	3500	0.10	0.30	50	5.00	1	15,450.67
1.5	4	2000	0.10	0.10	30	5.00	1	908.27
1.5	4	2000	0.10	0.10	30	15.00	1	1,479.47
1.5	4	2000	0.10	0.10	50	5.00	1	15,368.89
1.5	4	2000	0.10	0.10	50	15.00	1	16,837.33
1.5	4	2000	0.10	0.30	50	15.00	1	16,837.33
1.5	4	2000	0.10	0.30	30	5.00	2	1,025.42
1.5	4	2000	0.10	0.30	30	15.00	2	1,560.36
1.5	4	2000	0.10	0.30	40	5.00	2	4,776.89
1.5	4	2000	0.10	0.30	40	15.00	2	5,918.22
1.5	4	2000	0.10	0.30	50	5.00	2	16,444.44
1.5	4	2000	0.10	0.30	50	15.00	2	17,395.56
1.5	4	500	0.10	0.30	30	5.00	2	866.49
1.5	4	500	0.10	0.30	50	5.00	2	15,708.44
1.5	4	3500	0.10	0.30	30	5.00	2	1,092.27
1.5	4	3500	0.10	0.30	50	5.00	2	16,780.44
1.5	7	2000	0.10	0.30	30	5.00	2	1,025.78
1.5	7	2000	0.10	0.30	40	5.00	2	4,871.11
1.5	7	2000	0.10	0.30	40	15.00	2	5,941.33
1.5	7	2000	0.10	0.30	50	5.00	2	16,446.22
1.5	7	2000	0.10	0.30	50	15.00	2	17,397.33
1.5	7	3500	0.10	0.30	50	5.00	2	16,782.22
1.5	7	2000	0.10	0.30	30	5.00	7	1,183.64
1.5	7	2000	0.10	0.30	30	15.00	7	1,678.58
1.5	7	2000	0.10	0.30	40	5.00	7	5,271.11
1.5	7	2000	0.10	0.30	40	15.00	7	6,154.67

1.5	7	2000	0.10	0.30	50	5.00	7	16,588.44
1.5	7	2000	0.10	0.30	50	15.00	7	17,438.22
1.5	7	500	0.10	0.30	30	5.00	7	898.13
1.5	7	500	0.10	0.30	50	5.00	7	15,751.11
1.5	7	3500	0.10	0.30	30	5.00	7	1,322.84
1.5	7	3500	0.10	0.30	50	5.00	7	17,016.89
1.5	7	2000	0.10	0.10	30	5.00	7	1,557.87
1.5	7	2000	0.10	0.60	30	5.00	7	913.96
1.5	7	2000	0.60	0.10	30	5.00	7	816.00
1.5	7	2000	0.60	0.30	30	15.00	7	1,436.98
1.5	7	2000	0.60	0.60	30	5.00	7	882.13
1.5	7	2000	0.10	0.10	50	5.00	7	16,869.33
1.5	7	2000	0.10	0.60	50	5.00	7	16,471.11
1.5	7	2000	0.60	0.10	50	5.00	7	15,052.44
1.5	7	2000	0.60	0.30	50	5.00	7	14,748.44
1.5	7	2000	0.60	0.60	50	5.00	7	14,227.56
1.5	7	500	0.10	0.10	50	5.00	7	15,726.22
1.5	7	3500	0.10	0.10	50	5.00	7	17,320.89
1.5	7	3500	0.10	0.10	50	15.00	7	17,749.33
1.5	7	500	0.60	0.60	50	5.00	7	14,042.67
1.5	7	3500	0.60	0.60	50	5.00	7	14,366.22
1.5	7	3500	0.60	0.60	50	15.00	7	16,752.00
2.5	1	2000	0.10	0.35	30	5.00	1	992.00
2.5	1	2000	0.10	0.35	30	8.00	1	1,163.52
2.5	1	2000	0.10	0.35	30	15.00	1	1,477.12
2.5	1	2000	0.10	0.35	40	5.00	1	4,661.76
2.5	1	2000	0.10	0.35	40	8.00	1	5,033.60
2.5	1	2000	0.10	0.35	40	15.00	1	5,691.52
2.5	1	2000	0.10	0.35	50	5.00	1	16,076.80
2.5	1	2000	0.10	0.35	50	8.00	1	16,422.40
2.5	1	2000	0.10	0.35	50	15.00	1	17,024.00
2.5	1	500	0.10	0.35	30	5.00	1	943.36
2.5	1	500	0.10	0.35	50	5.00	1	16,044.80
2.5	1	3500	0.10	0.35	30	5.00	1	1,007.36
2.5	1	3500	0.10	0.35	50	5.00	1	16,096.00
2.5	1	2000	0.10	0.10	30	5.00	1	992.00
2.5	1	2000	0.10	0.60	30	5.00	1	992.00
2.5	1	2000	0.10	0.30	30	5.00	1	992.00
2.5	1	2000	0.10	0.10	30	15.00	1	1,477.12
2.5	1	2000	0.10	0.60	30	15.00	1	1,477.12
2.5	1	2000	0.10	0.30	30	15.00	1	1,477.12
2.5	4	2000	0.10	0.30	30	5.00	1	1,100.80

2.5	4	2000	0.10	0.30	30	15.00	1	1,607.68
2.5	4	2000	0.10	0.30	40	5.00	1	5,043.20
2.5	4	2000	0.10	0.30	40	15.00	1	6,048.00
2.5	4	2000	0.10	0.30	50	5.00	1	16,793.60
2.5	4	2000	0.10	0.30	50	15.00	1	17,952.00
2.5	4	500	0.10	0.30	30	5.00	1	1,036.80
2.5	4	500	0.10	0.30	50	5.00	1	16,524.80
2.5	4	3500	0.10	0.30	30	5.00	1	1,125.12
2.5	4	3500	0.10	0.30	50	5.00	1	16,883.20
2.5	4	2000	0.10	0.10	30	5.00	1	1,100.80
2.5	4	2000	0.10	0.10	30	15.00	1	1,607.68
2.5	4	2000	0.10	0.10	50	5.00	1	16,793.60
2.5	4	2000	0.10	0.10	50	15.00	1	17,952.00
2.5	4	2000	0.10	0.35	50	15.00	1	17,952.00
2.5	4	2000	0.10	0.30	30	5.00	2	1,199.36
2.5	4	2000	0.10	0.30	30	15.00	2	1,646.08
2.5	4	2000	0.10	0.30	40	5.00	2	5,189.12
2.5	4	2000	0.10	0.30	40	15.00	2	6,131.20
2.5	4	2000	0.10	0.30	50	5.00	2	17,715.20
2.5	4	2000	0.10	0.30	50	15.00	2	18,496.00
2.5	4	500	0.10	0.30	30	5.00	2	1,041.28
2.5	4	500	0.10	0.30	50	5.00	2	17,017.60
2.5	4	3500	0.10	0.30	30	5.00	2	1,264.00
2.5	4	3500	0.10	0.30	50	5.00	2	18,073.60
2.5	7	2000	0.10	0.30	30	5.00	2	1,256.96
2.5	7	2000	0.10	0.30	40	5.00	2	5,601.92
2.5	7	2000	0.10	0.30	40	15.00	2	6,438.40
2.5	7	2000	0.10	0.30	50	5.00	2	17,984.00
2.5	7	2000	0.10	0.30	50	15.00	2	18,732.80
2.5	7	3500	0.10	0.30	50	5.00	2	18,323.20
2.5	7	2000	0.10	0.30	30	5.00	7	1,336.32
2.5	7	2000	0.10	0.30	30	15.00	7	1,782.40
2.5	7	2000	0.10	0.30	40	5.00	7	5,640.96
2.5	7	2000	0.10	0.30	40	15.00	7	6,476.80
2.5	7	2000	0.10	0.30	50	5.00	7	17,996.80
2.5	7	2000	0.10	0.30	50	15.00	7	18,733.44
2.5	7	500	0.10	0.30	30	5.00	7	1,075.20
2.5	7	500	0.10	0.30	50	5.00	7	17,209.60
2.5	7	3500	0.10	0.30	30	5.00	7	1,472.64
2.5	7	3500	0.10	0.30	50	5.00	7	18,387.20
2.5	7	2000	0.10	0.10	30	5.00	7	1,526.40
2.5	7	2000	0.10	0.60	30	5.00	7	949.12

2.5	7	2000	0.60	0.10	30	5.00	7	948.48
2.5	7	2000	0.60	0.30	30	15.00	7	1,596.16
2.5	7	2000	0.60	0.60	30	15.00	7	1,415.68
2.5	7	2000	0.10	0.10	50	5.00	7	17,868.80
2.5	7	2000	0.10	0.60	50	5.00	7	17,356.80
2.5	7	2000	0.60	0.10	50	5.00	7	16,569.60
2.5	7	2000	0.60	0.30	50	5.00	7	17,056.00
2.5	7	2000	0.60	0.60	50	5.00	7	17,401.60
2.5	7	500	0.10	0.10	50	5.00	7	16,902.40
2.5	7	3500	0.10	0.10	50	5.00	7	18,316.80
2.5	7	3500	0.10	0.10	50	15.00	7	18,713.60
2.5	7	500	0.60	0.60	50	5.00	7	17,260.80
2.5	7	3500	0.60	0.60	50	5.00	7	17,536.00
2.5	7	3500	0.60	0.60	50	15.00	7	18,777.60
2.5	7	2000	0.60	0.60	35	15.00	7	2,671.36
2.5	7	2000	0.60	0.60	45	15.00	7	10,246.40

IV.4.3. Développement du modèle de Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

IV.4.3.1. Architecture du modèle RNA

Le modèle de réseau neuronal employé ici adopte une structure classique composée de quatre couches principales : une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie.

- Couche d'entrée : comprenant les huit paramètres d'entrées (correspondant aux paramètres B, L, EA, e, h, ϕ , C, N), représentant les variables indépendantes du modèle.
- Couches cachées : Son rôle est crucial, car elle permet au réseau de capturer des relations non linéaires entre les entrées et la sortie :
 - 1^{re} couche : 32 neurones avec fonction d'activation ReLU
 - 2^e couche : 16 neurones avec ReLU
- Couche de sortie : Elle fournit la capacité portante (q_i) comme résultat final, conformément à la figure (VI.8).

Le choix du nombre de couches cachées et de neurones par couche dépend de la complexité du problème à résoudre.

La détermination du nombre optimal de neurones dans la couche cachée repose sur un processus itératif d'essais et d'erreurs. Cette approche permet d'identifier la configuration offrant la meilleure précision.

Le choix du nombre de couches cachées et de neurones par couche a été optimisé par une approche systématique combinant analyse de complexité et validation empirique. Plusieurs architectures (de 1 à 3 couches avec 8 à 64 neurones) ont été comparées, conduisant à la sélection d'un modèle à deux couches (32 puis 16 neurones). Cette configuration offre le meilleur compromis entre performance et stabilité, tout en maintenant un écart R^2 train-test inférieur à 0.05 par rapport les autres architectures testées. Le modèle final présente une bonne capacité à capturer les non-linéarités tout en évitant le surapprentissage.

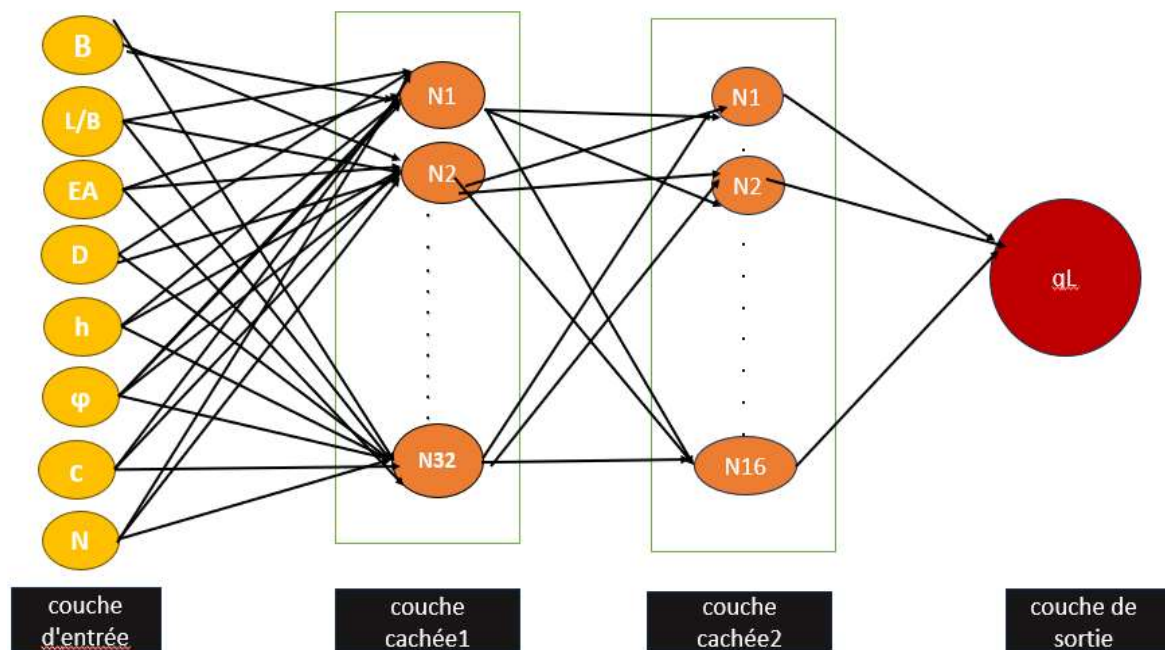


Figure IV.8 : Architecture adoptée du RNA

IV.4.3.2. Optimisation de la configuration du réseau de neurones artificiels

➤ **Répartition des données :**

Dans cette étude, la base de données a été divisée en deux ensembles distincts :

- **80%** des données : allouées à la phase d'apprentissage
- **20%** des données : dédiées à la phase de test

➤ **Processus d'apprentissage :**

L'apprentissage constitue un problème d'optimisation numérique visant à calculer les poids optimaux des connexions neuronales en utilisant l'échantillon d'entraînement. Une fois

le réseau neuronal construit, des tests sont effectués pour évaluer la qualité des prédictions du modèle.

➤ **Phase de validation :**

Cette étape cruciale permet d'évaluer les performances du réseau à travers :

- Le test sur des exemples exclus de l'ensemble d'apprentissage
- La vérification de la précision des prédictions sur de nouvelles données
- L'ajustement de l'architecture du réseau ou de la base de données si les résultats sont insatisfaisants

➤ **Critères de performance :**

Plusieurs métriques permettent d'évaluer les performances des modèles neuronaux. Dans cette étude, nous avons utilisé :

La Racine Carrée de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) - selon l'équation mentionnée mse =

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (q_l - p_l)^2}{n}}$$

Ce critère représente l'une des mesures les plus précises pour évaluer les modèles prédictifs

• **Le Coefficient de détermination R^2 :**

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Avantages de la méthodologie :

- ✓ Garantie d'une évaluation objective grâce à la division des données
- ✓ Possibilité d'amélioration du modèle basée sur les résultats de validation
- ✓ Utilisation de métriques quantitatives précises pour l'évaluation des performances

```
# Step 1: Load and prepare the data
data = pd.read_excel('data example.xlsx')
print("Data loaded successfully. Sample:")
print(data.head())

# Step 2: Split features and target
X = data[['B', 'L', 'EA', 'e', 'h', 'φ', 'C', 'N']]
y = data['ql']

# Split data into training and testing sets
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
print(f"\nTraining set size: {X_train.shape[0]}")
print(f"Testing set size: {X_test.shape[0]}")

# Step 3: Scale the data
scaler = RobustScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)
```

Figure IV.9 : Extrait du code Python (RNA) pour le prétraitement des données (Importation, répartition (split) et normalisation de la base de données)

IV.4.3.3. Analyse des résultats

La Figure IV.10 montre l'évolution de la fonction de perte (MSE) pendant l'entraînement du RNA. Les courbes d'apprentissage (bleue) et de validation (orange) convergent harmonieusement, avec une stabilisation après 100 époques. Le modèle optimal (marqué en rouge) est sélectionné à l'époque 487, démontrant une bonne généralisation sans surapprentissage.

Cette représentation graphique permet d'évaluer la performance et la convergence du modèle à chaque étape du processus.

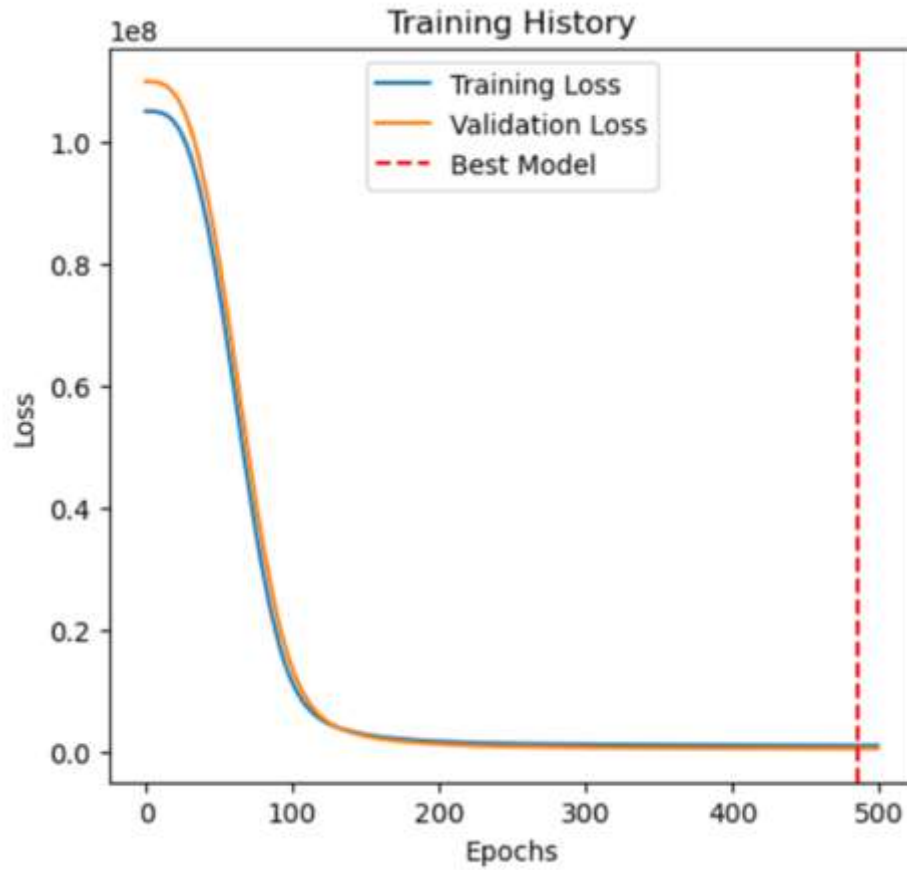


Figure IV.10 : L'évolution de la fonction de perte (MSE) pendant l'entraînement du RNA

La figure IV.11 représente la corrélation entre les valeurs de capacité portante cibles et simulées, dans les deux phases (d'apprentissage et de test) et pour toute la base de données.

Le modèle démontre d'excellentes performances, avec un R^2 de 0,9748 et une RMSE de 1056,68 sur les données d'entraînement. Il généralise encore mieux aux données de test ($R^2 = 0,9810$, RMSE = 838,80), confirmant sa robustesse sans surapprentissage.

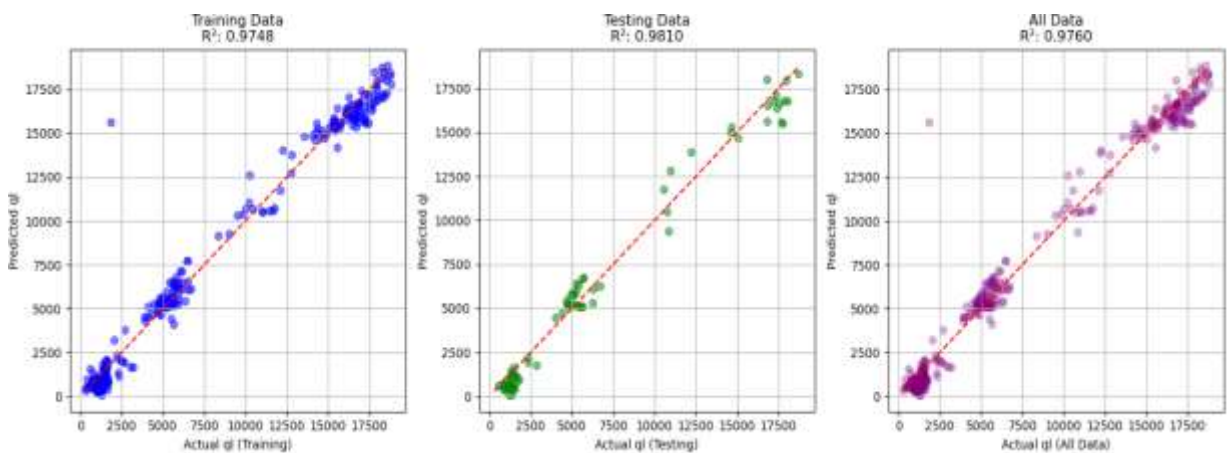


Figure IV.11 : Corrélation entre les valeurs de capacité portante cibles et simulées pour la phase de d'apprentissage, de test et pour toute la base de données (RNA)

La figure IV.12 représente comparaison entre les valeurs réelles et prédites par notre modèle neuronal (le rapport de capacité portante calculée par plaxis3d/ capacité portante prédites par RNA) pour toute la base de données.

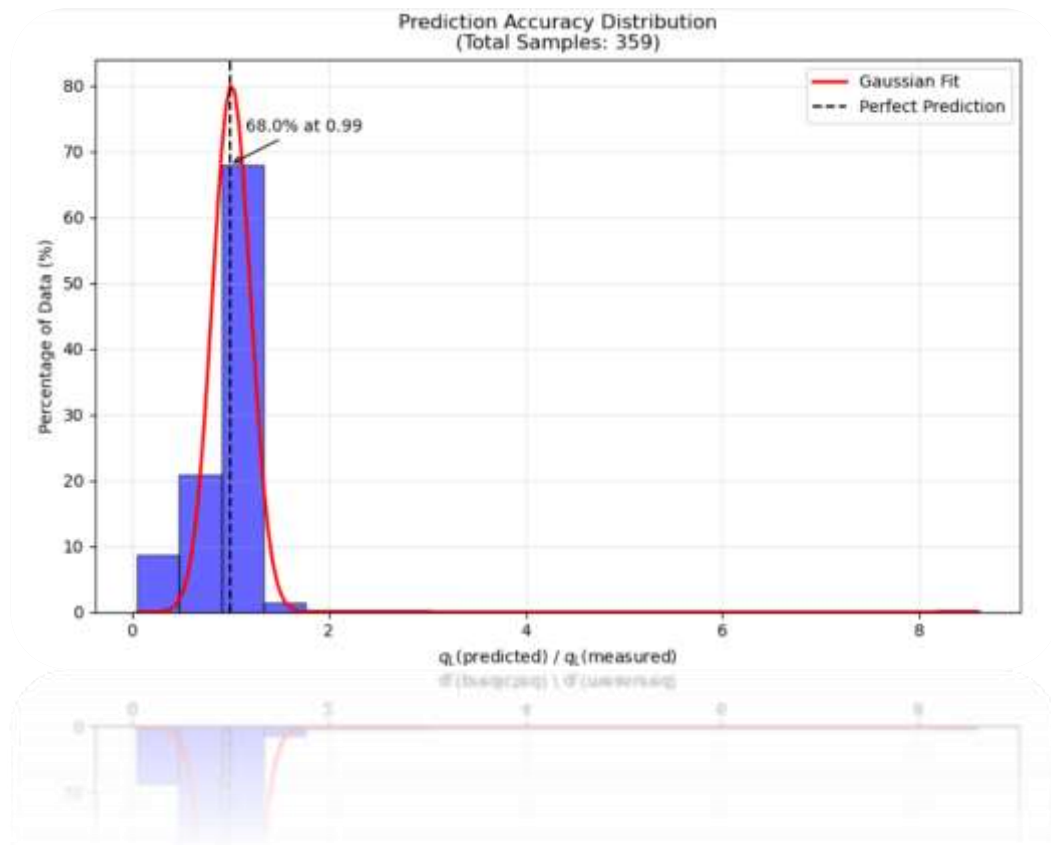


Figure IV.12 : Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle RNA pour toute la base de données

- **Analyse d'importance des paramètres d'entrée**

La méthodologie combine permutation aléatoire et analyse de sensibilité. La Figure IV.13 montre l'importance relative normalisée. A partir ces résultats on peut constater que les paramètres dominants sont l'angle de frottement (ϕ), la largeur de la semelle (B) et la cohésion (C), tandis que les autres (la rigidité axiale EA, profondeur h ...) ont un effet secondaire. Cette hiérarchie valide les principes géotechniques.

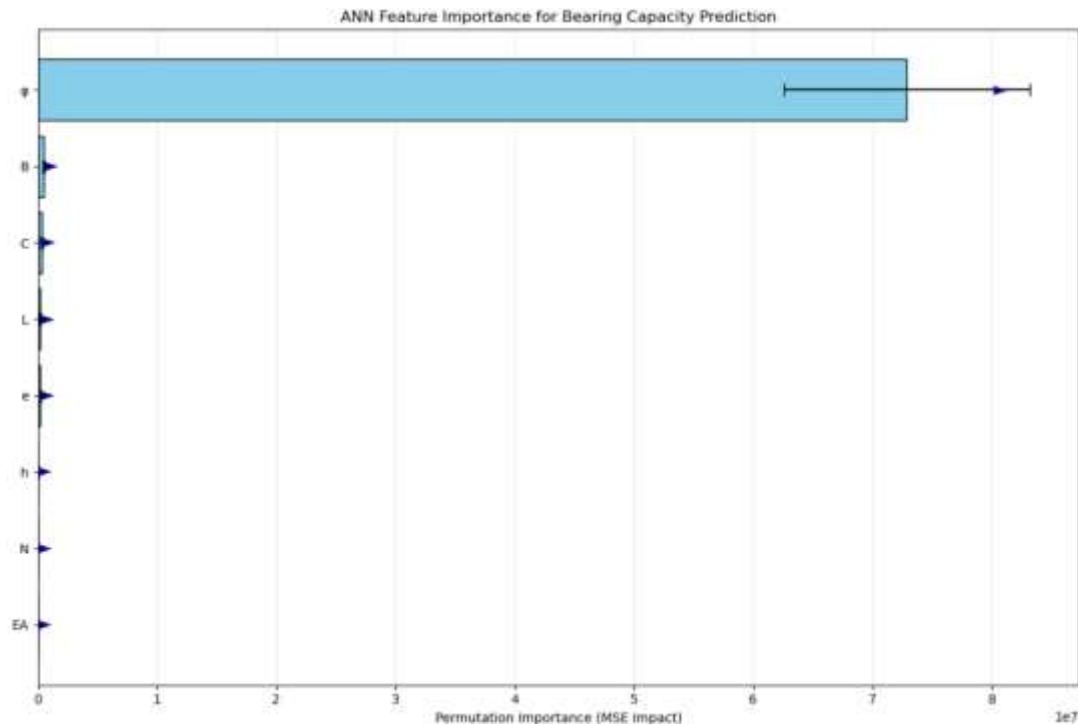


Figure IV.13 : Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle RNA pour toute la base de données

IV.4.4. Développement du modèle du modèle SVR (Support Vector Regression)

IV.4.4.1. Architecture du modèle SVR

Le Support Vector Regression (SVR) est une méthode d'apprentissage supervisé qui prédit la capacité portante (q_l) dans notre étude, à partir des huit paramètres d'entrée : la largeur de la semelle B , la longueur de géogrilles L , la rigidité axiale de géogrilles EA , l'espacement entre la 1^{ère} nappe et la base de la semelle e , l'espacement entre les nappes géogrilles h , l'angle de frottement du sol ϕ , la cohésion du sol C , et le nombre de géogrilles N , en créant une fonction de régression tout en minimisant l'erreur globale. Le SVR construit une fonction de régression en minimisant l'erreur globale tout en se focalisant sur les points critiques (vecteurs de support) et en autorisant une marge d'erreur (ϵ) pour éviter le surajustement.

Notre modèle SVR est caractérisé par les paramètres suivants :

- **Noyau (kernel)** : Nous utilisons un noyau polynomial (*degree=3, coef0=0.8*), adapté pour capturer les relations non linéaires complexes entre les paramètres géotechniques.
- **Marge de tolérance (ϵ)** : Fixée à 0.1, ce qui définit une zone de tolérance où les petites erreurs de prédiction sont ignorées, améliorant ainsi la robustesse du modèle.

- **Paramètre de régularisation (C)** : $C=800$, ce qui permet un contrôle strict des erreurs dépassant ϵ , assurant un bon équilibre entre précision et généralisation.

IV.4.4.2. Optimisation de la configuration du SVR

➤ Répartition des données

Pour permettre une comparaison équitable entre les modèles RNA et SVR, nous avons conservé la même méthodologie de répartition :

- **80%** des données pour l'entraînement
- **20%** des données pour le test (strictement réservé à l'évaluation finale)

➤ Processus d'entraînement

Le SVR repose sur une approche d'optimisation unique :

- 1- Maximisation de la marge : Le modèle cherche une fonction de régression qui tolère des écarts inférieurs à $\epsilon=0.1$ (en unités normalisées).
- 2- Focalisation sur les points critiques : Seuls les vecteurs de support (points en dehors de la marge ϵ) influencent l'apprentissage.

➤ Phase de validation

Tout comme pour le RNA, la validation du modèle SVR s'appuie sur le même découpage des données (80% pour l'apprentissage, 20% pour le test) et les mêmes métriques d'évaluation (RMSE et R^2), garantissant ainsi une comparaison équitable entre les deux approches.

Cependant, le SVR introduit des spécificités notables dans son processus de validation : l'optimisation ciblée des hyperparamètres clés que sont $C=800$ (contrôlant la rigueur face aux erreurs), $\epsilon=0.1$ (définissant la marge de tolérance aux écarts), et le choix stratégique d'un noyau polynomial de degré 3 ($\text{degree}=3$) pour modéliser les interactions complexes entre paramètres géotechniques. Cette combinaison permet au SVR de cibler spécifiquement les relations non-linéaires critiques tout en conservant une robustesse aux variations mineures des données.

➤ Critères de performance

Pour évaluer objectivement les modèles et permettre une comparaison scientifique entre les approches RNA et SVR, nous avons conservé les deux mêmes métriques complémentaires (déjà utilisées pour le RNA) :

1. RMSE (Root Mean Square Error ou Erreur Quadratique Moyenne Racine) : Mesure l'erreur absolue moyenne entre les valeurs prédites ($\hat{y}$) et les valeurs de référence.
2. R^2 (Coefficient de Détermination) : Indique la proportion de variance expliquée par le modèle (une valeur proche de 1 indique une excellente adéquation).

```
# 1. Load data
data = pd.read_excel('data example.xlsx')
X = data[['B', 'L', 'EA', 'e', 'h', 'phi', 'C', 'N']]
y = data['qi']

# 2. Split data
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 3. Scale data
scaler = StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)

# 4. Optimized Parameters
svr_params = {
    'kernel': 'poly',
    'C': 800,
    'epsilon': 0.1,
    'gamma': 'scale',
    'degree': 3,
    'coef0': 0.8
}
```

Figure IV.14 : Extrait du code Python pour le prétraitement des données et la configuration du modèle SVR

IV.4.4.3. Analyse des résultats (SVR)

La Figure IV.15 représente la corrélation entre les valeurs de capacité portante cibles et simulées par le modèle SVR, couvrant à la fois les phases d'apprentissage et de test ainsi que l'ensemble complet de données. Les résultats révèlent une performance exceptionnelle : le modèle atteint un R^2 de 0.980 avec une erreur moyenne (RMSE) de 948 kPa lors de l'apprentissage, et surpasse légèrement ces résultats en phase de test ($R^2 = 0.984$, RMSE = 781 kPa). Cette progression, combinée à une cohérence remarquable sur l'ensemble des données (R^2 global = 0.981), démontre non seulement la précision du SVR mais aussi sa capacité à généraliser sans surapprentissage. Particulièrement adapté aux problématiques géotechniques, le modèle excelle dans la capture des relations non-linéaires entre les paramètres, comme en témoigne sa performance stable quelles que soient les configurations de fondations analysées.

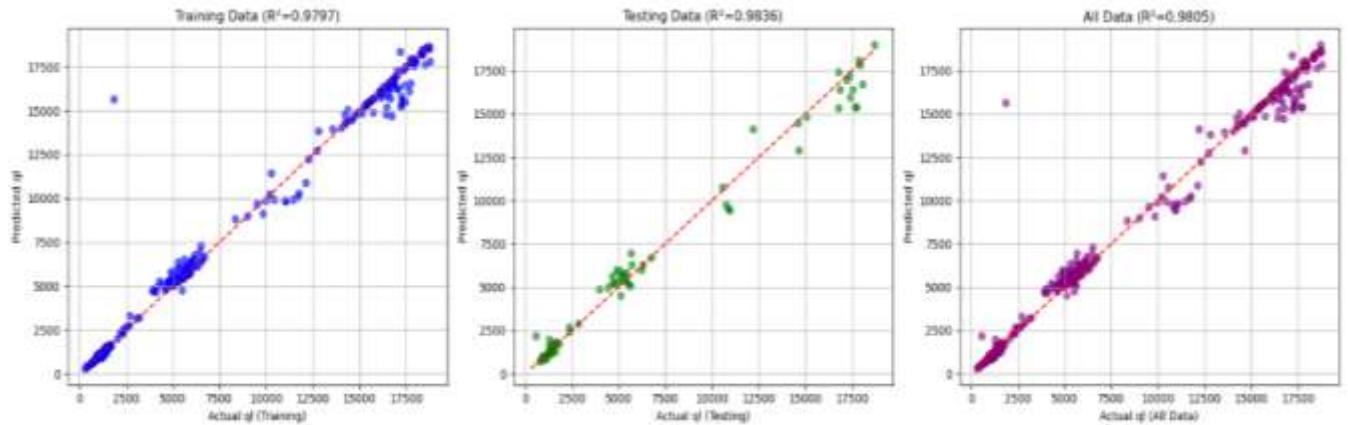


Figure IV.15 : Corrélation entre les valeurs de capacité portante cibles et simulées pour la phase de d'apprentissage, de test et pour toute la base de données (SVR)

La Figure IV.16 représente la comparaison entre les valeurs réelles et prédites par notre modèle SVR (le rapport entre la capacité portante calculée par PLAXIS 3D et la capacité portante prédite par SVR) pour toute la base de données. À partir de ces résultats, on peut constater que la plupart des valeurs prédites du modèle SVR sont proches des valeurs réelles (près de 80% des valeurs de la base de données présentent une erreur inférieure à 10%), ce qui signifie que notre modèle SVR a une bonne précision."

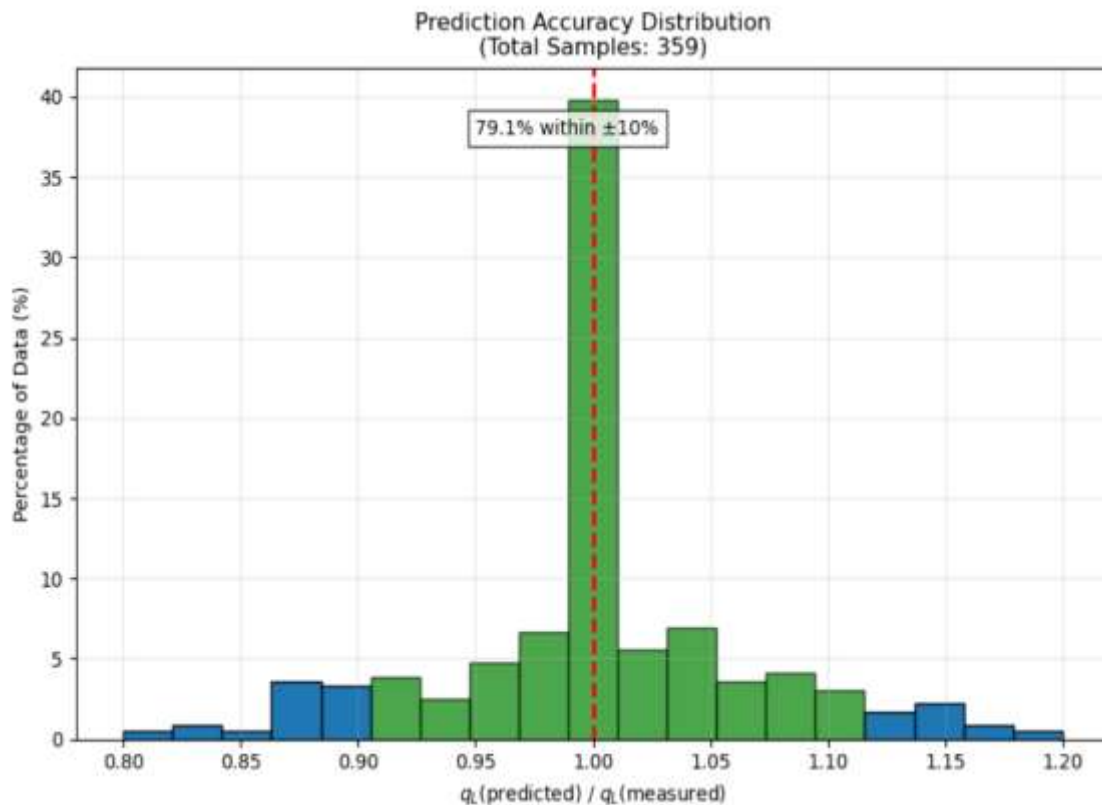


Figure IV.16 : Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle SVR pour toute la base de données

- **Analyse d'importance des paramètres d'entrée**

La Figure IV.17 montre l'importance relative normalisée pour le modèle SVR, basée sur une méthodologie combinant permutation aléatoire et analyse de sensibilité. À partir de ces résultats, on constate que le paramètre dominant est l'angle de frottement (ϕ), comme dans le cas du RNA, suivi de la longueur des géogrilles (L), de la largeur de la semelle (B), de la profondeur (e) et de la cohésion (C), tandis que les autres paramètres (la rigidité axiale EA, la distance h et le nombre de géogrilles N) ont un effet secondaire. Cette hiérarchie confirme l'importance prépondérante des propriétés du sol (ϕ , C) et des dimensions clés (L, B) dans la prédiction de la capacité portante par le SVR.

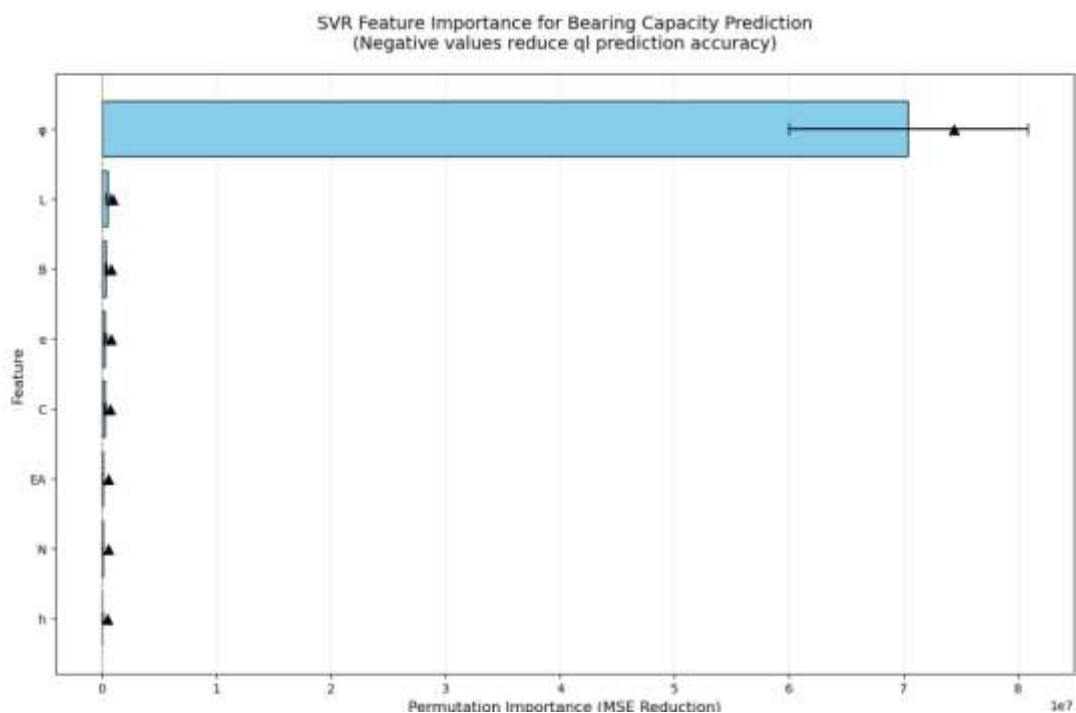


Figure IV.17 : Comparaison des capacités portantes mesurées (PLAXIS 3D) et prédites par le modèle SVR pour toute la base de données

- **Résumé comparatif entre les deux modèles (RNA et SVR)**

À partir des résultats présentés ci-dessous, on constate que les modèles démontrent des performances similaires en précision (RNA : RMSE=1057 kPa, $R^2=0.975$; SVR : RMSE=781 kPa, $R^2=0.984$), avec un léger avantage pour le SVR. Les deux identifient l'angle de frottement (ϕ) comme paramètre dominant, mais divergent sur les paramètres secondaires : le RNA surestime l'impact de la cohésion (C), tandis que le SVR accorde plus d'importance aux géogrilles (L). Cette différence reflète leur approche distincte.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthodologie intégrée en deux volets pour la prédiction de la capacité portante des fondations superficielles renforcées par géogrilles. La première partie s'est appuyée sur la modélisation numérique par éléments finis à l'aide du logiciel PLAXIS 3D. Cette démarche a permis de générer une base de données riche composée de 359 cas de simulation, couvrant différentes configurations géométriques et mécaniques. Les résultats obtenus ont clairement mis en évidence l'effet bénéfique du renforcement, avec des gains significatifs de capacité portante en fonction du nombre, de la position et de la longueur des nappes de géogrilles.

La seconde partie a été consacrée au développement de modèles d'intelligence artificielle, en particulier un réseau de neurones artificiels (RNA) et un modèle de régression à vecteurs de support (SVR), pour prédire la portance d'un sol renforcé par géogrilles sous une semelle carrée. L'objectif est d'offrir une alternative rapide et accessible au calcul conventionnel via PLAXIS, en automatisant les prédictions à l'aide d'un programme simple sur Python. Ces modèles ont permis de réduire le temps de calcul tout en maintenant une précision satisfaisante.

Les performances obtenues ont montré que les deux approches d'apprentissage automatique apportent une valeur ajoutée importante. Le modèle SVR a obtenu des résultats légèrement supérieurs, avec un coefficient de détermination plus élevé et une erreur réduite. L'analyse des variables d'entrée a confirmé l'influence majeure de l'angle de frottement interne (ϕ), identifié comme paramètre le plus déterminant dans les deux modèles, bien que les contributions secondaires diffèrent légèrement. Ces résultats confirment l'intérêt des outils d'IA pour appuyer la conception géotechnique, en complément des méthodes numériques traditionnelles.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le renforcement des sols par géosynthétiques représente une solution technique efficace pour améliorer la capacité portante des fondations superficielles, en particulier lorsque les caractéristiques géotechniques naturelles du sol sont insuffisantes. Ce mémoire aborde cette problématique sous un angle innovant, en intégrant les avancées en apprentissage automatique à la modélisation numérique, dans l'objectif de développer une méthode rapide, précise et accessible pour la prédiction de la portance des sols renforcés. À cette fin, le logiciel PLAXIS 3D, basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé pour générer une base de données destinée à l'apprentissage des deux modèles d'intelligence artificielle.

La première partie du mémoire a été consacrée à une recherche bibliographique approfondie portant sur les fondations superficielles, les méthodes de calcul de leur capacité portante et les techniques d'amélioration du sol, avec un focus particulier sur le renforcement par géosynthétiques. Elle a également introduit les bases des méthodes d'apprentissage automatique, en exposant les principes des algorithmes utilisés et leur potentiel dans le domaine du génie civil.

Dans la deuxième partie, une modélisation numérique a été réalisée à l'aide de PLAXIS 3D pour simuler 359 cas de fondations superficielles renforcées. Plusieurs paramètres ont été variés, tels que la largeur de la semelle, la longueur et le nombre des nappes de géogrilles, leur espacement vertical, ainsi que les propriétés géotechniques du sol. Cette base de données a ensuite été exploitée pour l'élaboration de modèles prédictifs.

Deux approches d'apprentissage automatique ont été mises en œuvre : les réseaux de neurones artificiels (RNA) et la régression à vecteurs de support (SVR). Les modèles développés ont permis d'estimer la capacité portante avec une précision élevée. Le modèle SVR a légèrement surpassé le RNA en termes de coefficient de détermination.

❖ Recommandations

- **Renforcer la méthodologie :**
 - Augmenter le nombre de simulations numériques pour inclure des cas plus variés (types de sols supplémentaires, conditions de chargement différentes).
 - Comparer des modèles supplémentaires (comme Random Forest ou XGBoost) avec les modèles actuels (RNA et SVR).

- **Améliorer les modèles :**

- Effectuer une analyse de sensibilité détaillée des paramètres des modèles pour optimiser leurs performances.
- Proposer des essais en laboratoire ou sur le terrain pour valider les résultats numériques.

- **Applications pratiques :**

- Développer une interface utilisateur simplifiée (application web, par exemple) pour faciliter l'utilisation des modèles par les ingénieurs.
- Fournir des recommandations de conception claires basées sur les résultats.

- **Analyse des résultats :**

- Expliquer l'influence d'autres variables (comme les propriétés des géosynthétiques) en plus de l'angle de frottement interne (ϕ).
- Discuter des limites des modèles et suggérer des améliorations futures.

- **Recommandations futures :**

- Explorer des techniques plus avancées (comme l'apprentissage profond).
- Étudier l'intégration des modèles avec des logiciels de conception géotechnique courants

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Le renforcement par géogrilles améliore significativement la capacité portante, en fonction de la configuration adoptée (nombre, position et longueur des nappes).
- L'utilisation de l'intelligence artificielle, à travers les modèles RNA et SVR, offre une alternative rapide et fiable aux simulations numériques classiques. Ces modèles permettent d'automatiser les prédictions via des scripts simples en Python, réduisant ainsi considérablement le temps de calcul.
- Les deux approches apportent une réelle valeur ajoutée. Le modèle SVR a montré de meilleures performances, avec un coefficient de détermination plus élevé et une erreur plus faible.
- L'analyse des variables d'entrée a confirmé l'influence majeure de l'angle de frottement interne (ϕ), identifié comme le paramètre le plus déterminant dans les deux modèles.

Ces résultats confirment l'intérêt de l'intégration des outils d'intelligence artificielle dans la conception géotechnique, en complément des méthodes numériques traditionnelles. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour l'optimisation rapide et fiable des fondations renforcées.

Références

Références

- [1] N. Djebbar, « Fiabilité des fondations superficielles et méthode de calcul de la capacité portante », Thèse doctora Université des frères Mentouri- Constantine.
- [2] BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-211-SEPTEMBRE-OCTOBRE 1997 - RÉF. 4134.
- [3] A. Salahedinne, « Analyse numérique de la rupture et du tassement d'un remblai renforcé par géotextile sur sol compressible », Mémoire Mastère Géotechnique, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2021.
- [4] Rababe NADIR, Les Fondations en Génie Civil : Types, Conception et Méthodologie
- [5] GSSB GATEWAY STRUCTURE SDN BHD, <https://gssb.com.my/what-is-geosynthetic>, Date de la visite du site 22/03/2025.
- [6] Mescoursdegeniecivil, <http://mescoursdegeniecivil.wifeo.com/documents/Ptech3.pdf>), Date de la visite du site 05/02/2025.
- [7] cours-genie-civil.com, <http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/cours-fondations-superficielles1-procedes-generaux-deconstruction>. Date de la visite du site 16/02/2025.
- [8] <http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/cours-fondations-superficiellesradiers-procedes-generaux->
- [9] M. Omar, « Capacité portante d'une fondation de grande longueur sur un sol cohérent non homogène par Maître », Mémoire de Master Génie Civil et d'Hydraulique Université Mohamed khider – Biskra, 2020.
- [10] HELIS RIMA, « Maillage d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique ». MÉMOIRE Présenté pour obtenir le diplôme de Magistère en Génie Civil OPTION : Géotechnique, Université El Hadj Lakhdar Batna, 1997
- [11] A Bond and A Harris, 2008; Decoding Eurocode 7 first published, by Taylor & Francis.
- [12] Vesic A.S. (1973). « Analysis of ultimate loads of shallow foundations. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 99, n° SM1, 45-73
- [13] Terzaghi K., Peck R.B. (1967). Soil mechanics in engineering practice. Second edition. John Wiley and Sons, New York, 1967, 729 pages.
- [14] ISO TR 20432 (2007). Guidelines to the determination of long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement Gourc J.P., (1993). Keynote lecture: Geosynthetics in embankments, review of theory Earth Reinforcement Practice. Balkema, 2, 773-800.
- [15] Préparé par Richard J. Bathurst Traduit par François Caquel
- [16] Préparé par J. Otani et E.M. Palmeira Traduit par L. Briançon
- [17] Claude Touzet. Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme.
- [18] EC2, 1992, Collection de l'EERIE, N. Giambiasi. hal-01338010
- [19] Claude Touzet. LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS, INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME. EC2, 1992, Collection de l'EERIE, N. Giambiasi. hal-01338010
- [20] Nilsson, N. J., Nilsson, N. J. (1998). Artificial intelligence : a new synthesis. Morgan Kaufmann.
- [21] Stephenson Smith, S. (2003). The new international webster's comprehensive dictionary of the english language: deluxe encyclopedic edition (No. REF 428.03 STE. CIMMYT).

- [22] Rosenblatt, F. (1958). «The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain». *Psychological review*, 65(6), 386.
- [23] Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H. (1989). «Multilayer feedforward networks are universal approximators». *Neural networks*, 2(5), 359-366.
- [24] Machine learning course: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning>
- [25] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J. «Learning representations by back-propagating errors». *nature*, 323(6088), 533-536. (1986).
- [26] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- [27] ILSVRC data: <http://www.image-net.org/challenges/LSVRC/>
- [28] Lake Campus, Kolkata Department of Instrumentation and Electronics Engineering, Jadavpur University, Salt– 700098, INDIA.
- [29] E. Osuna, R. Freund and F. Girosi. An Improved Training Algorithm for Support Vector Machines. To appear in *Proc. of IEEE NNSP'97*, Amelia Island, FL, 24-26 Sep., 1997.
- [30] E. Osuna, R. Freund and F. Girosi. (1997). Improved Training Algorithm for Support Vector Machines. To appear in: *NNSP'97*.
- [31] A. Smola and B. Schölkopf. (1997). On a Kernel-based Method for Pattern Recognition, Regression, Approximation and Operator Inversion. GMD Technical Report No. 1064. (To appear in *Algorithmica*, special issue on Machine Learning)
- [32] Chikha Asma, « Etude numérique de l'amélioration de la portance des sols par différentes techniques », diplôme de Master en Génie Civil Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2023,
- [33] *Journal of GeoEngineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 99-109, September 2021
- [34] Chia-Nan Liu, Wen-Wei Huang, Yu-Hsien Ho, and Bo-Hung Lin, FINITE ELEMENT ANALYSES OF GEOSYNTHETIC-REINFORCED SOIL GROUND UNDER SURCHARGE AND PROBABILISTIC ESTIMATION OF THE BEARING CAPACITY, *Journal of GeoEngineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 99-109, September 2021
[http://dx.doi.org/10.6310/jog.202109_16\(3\).3](http://dx.doi.org/10.6310/jog.202109_16(3).3), Date de la visite du site 28/04/2025.
- [35] Bentley Systems, <https://www.bentley.com/software/plaxis>, Date de la visite du site 29/04/2025.
- [36] Bentley Communities, <https://communities.bentley.com>, Date de la visite du site 08/05/2025.