

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire De Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Travaux Publics

Option : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Présenté par : Bouchouk Razika

**Thème: Optimisation Des Paramètres Géométriques Des Parois
Clouées En Utilisant L'intelligence Artificielle.**

Sous la direction de : Pr. LAFIFI Brahim

Juin 2025

Remerciement

*Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de fin d'étude au niveau de
département de génie civil et hydraulique spécialité voies et ouvrages d'art de
L'Université 8 Mai 1945 Guelma.*

*Nous remercions en premier Allah, pour la santé, la volonté d'entamer et de
terminer ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre encadreur **Pr LAFIFI Brahim** pour sa
disponibilité, ces conseil, sa gentillesse et surtout pour la confiance qu'il nous a
témoignée.*

*Nous remerciant aussi **les membres du jury** pour avoir accepté d'honorer par
leur présence.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à toutes personne ayant contribué de près
ou de loin à la réalisation de ce travail.*



Dédicace

Premièrement et avant tout الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات ويشكره تدوم النعم

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail de fin d'étude À moi-même avant tout ;

En mémoire de ma mère الله يرحمها

A mes adorable frère

Aux enfants de mes frères

A mes chères amies

A tous mes collègues

A tous mes proches

A tous ceux qui m'aiment

A tous ceux que m'aimons

BOUCHOUK Razika

Résumé

L'objectif de ce travail de fin d'études est la modélisation numérique et l'optimisation des paramètres géométrique des parois clouées, par l'utilisation de la méthode des surfaces de réponse et des réseaux de neurones artificiels .la modélisation numérique du problème sera effectuée a l'aide du logiciel plaxis 2D, basé sur la méthode des éléments finis.

Pour atteindre cet objectif, un plan d'expériences numérique sera utilisés pour la modélisation, en prenant en compte les paramètres géométriques des parois clouées , tels que l'espacement vertical entre les clous, l'espacement horizontale, sa longueur, l'angle d'inclinaison des clous et leur diamètres. afin d'estimer le coefficient de sécurité des parois .la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux neurones artificiels (ANN) serrant utilises pour développer des modèles mathématiques reliant les paramètres d'entrée et de sortie ,en vue de futures optimisations. Enfin, le modèle mathématique développé est couplé avec une technique d'optimisation pour améliorer les paramètres de renforcement.

Mots Clés: Modélisation Numérique, Parois Clouées, Stabilisation, RSM, ANN, Optimisation.

Abstract

The aim of this end-of-study work is the numerical modeling and optimization of the engineering parameters of nailed walls using Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Networks (ANN). The numerical modeling of the problem will be carried out using the PLAXIS 2D software based on the finite element method.

To achieve this objective, a digital experimental design will be used for the modeling process, taking into account the geometric parameters of nailed walls such as the vertical and horizontal spacing between nails, their length, inclination angle, and diameter, in order to estimate the safety factor of the walls.

To achieve this goal, both Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Networks (ANN) will be used to develop mathematical models that link input and output parameters, with the aim of future optimization.

Finally, these mathematical models will be integrated with an optimization technique in order to improve the reinforcement parameters.

Keywords: Numerical modeling, nailed walls, ANN, RSM, stability, optimization.

ملخص

الهدف من هذا العمل في نهاية الدراسة هو النمذجة الرقمية و تحسين المعلمات الهندسية للجدران المسمرة ، وذلك باستخدام طريقه سطح الاستجابة والشبكات العصبية الاصطناعية ، سيتم تنفيذ النمذجة الرقمية للمشكلة باستخدام برنامج plaxis 2D اعتمادا على العناصر المحدودة،

ولتحقيق هذا الهدف سيتم استخدام خطه تجربيه للنمذجه مع مراعاة المعلمات الهندسية للجدران المسمرة، مثل المسافة العمودية والأفقية بين المسامير ، وطولها وزاوية ميل المسامير وقطرها . من اجل تقدير معامل السلامة للجدران .

ولتحقيق هذا الهدف ، نستخدم منهجيه أسطح الاستجابة(RSM)والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)لتطوير نماذج رياضية تربط بين معايير الإدخال والإخراج بهدف تحسينها مستقبلا .

أخيرا ، سيتم دمج هذه النماذج الرياضية مع تقنيه تحسين من اجل تحسين معايير التدعيم .

كلمات مفتاحيه:

النمذجة العددية ،الجدران المثبتة بالمسامير ،ANN،RSM،الاستقرار ،التحسين.

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xviii
Liste des symboles	xii
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Techniques de renforcement des sols.

I.1 Introduction.....	4
I.2.Principe de soutènement	4
I.3. Différents types de soutènement.....	5
I.3.1 Soutènement des excavations.....	5
I.3.2.Sol renforcé et amélioré	11
I.4 Problèmes apparus lors la construction des remblais sur les sols compressibles	14
I.4.1 Problème de stabilité	14
I.4.2 Problème de tassement	14
I.5.Procédé de construction et de mise en place du massif de soutènement	14
I.6.Techniques d'Amélioration et renforcement des sols.....	15
I.6.1.Types de renforcements	15
I.7 Conclusion	18

Chapitre II :Notions théoriques et Pratiques sur la technique du clouage

II.1. Introduction	21
II.2. Définition de clouage du sol.....	21
II.3.Utilisation des parois clouées	23
II .3.1 Stabilisation des pentes naturelles	23
II .3.2 Le soutènement des excavations (pentes artificielles).....	23
II .4 Soutènement par clouage.....	23
II .4.1Historique.....	23
II .4.2 Méthode de construction et application de clouage du sol	24
II.5.Catégories de soutènement	29
II.5.1- Le soutènement par barres courtes « Turinoise »	29
II.5.2 Le soutènement par barres longues.....	29
II.6. Procèdes de construction de la paroi clouée	29
II.6.1 Définition	29
II.7. Éléments de la structure clouée	30
II.7.1 Les barres de renforcement en acier	30
II.7.2 Centreurs	31
II.7.3 Injection du coulis de ciment	31
II.7.4 Tête de clou.....	32
II.7.5 Caractéristiques du parement.....	33
II.8. Types de rupture	35
II.8.1 Ruptures internes	35
II.8.2 Rupture globale.....	35
II.9. Avantages du clouage du sol	36
II.9.1. Économie	36
II.9.2.Taux de construction.....	36
II.9.3. Inclinaisons de parement.....	36

II.9.4. Comportement à la déformation	36
II.9.5. Flexibilité de conception.....	36
II.9.6. Fiabilité de conception dans les sols meuble	36
II.10 Conclusion.....	37

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

III.1 Introduction	39
III.2 Notion d'espace expérimental.....	39
III.2.1 Choix de la méthode d'expérimentation.....	40
III.2.2 Analyse des résultats	40
III.3. Terminologie	40
III.4 Différents types des plans d'expériences	41
III.4.1 Plans factoriels complets	41
III.4.2 Avantages et inconvénients des plans factoriels complets	41
III.5. Plans factoriels fractionnaires	42
III.5.1 Mise en œuvre	42
III.5.2 Plan d'expériences de surface de réponse	42
III.6. La méthodologie des surfaces de réponse	45
III.6.1 Les principes généraux	45
III.6.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse	45
III.6.3. Réseaux de neurones artificiels	48
III.6.4 Types de modèles de neurones	51
III.7. Conclusion.....	53

Chapitre IV: Validation du modèle numérique utilisé

IV.1Présentation du logiciel Plaxis	55
IV. 2.Organigramme du code Plaxis 2D	55
IV.3 Modélisation par le logiciel Plaxis.....	56
IV.3.1 Introduction	56

IV.3.2 Modélisation numérique.....	56
IV.3.3 La démarche de modélisation.....	56
IV.3.3.1 Entrée des données	56
IV.4.4 Procédure de calcul	60
IV.3.5 Résultats analysés.....	60
IV.4 Validation du modèle d'étude.....	61
IV.5 Conclusion	64

Chapitre V : Optimisation des paramètres de renforcement

V.1 Introduction	66
V.2 Choix d'un plan d'expériences	66
V.3 Interprétation des résultats par la méthode des surface de réponse.....	67
V.3.1 Introduction.....	67
V.3.2 Analyse de la variance ANOVA.....	68
V.3.3 Analyse de régression	69
V.3.4 Résultats.....	70
V.3.4.1 Analyse de la variance ANOVA	71
V.3.4.2 Analyse de régression	72
V.3.4.3 Validation graphique des modèles.	73
V.4 Prédiction par les réseaux de neurones artificiels	74
V.4.1 Modélisation des résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels.....	75
V.4.2 Comparaison des modèles RSM et ANN	78
V.5. Optimisation par l'utilisation de l'algorithme génétique.....	79
V.6 Conclusions	82
Conclusion générale et perspectives	84
Perspectives.....	85
Références bibliographiques	87

Liste des figures

Chapitre I : Techniques de renforcement des sols.

Figure I.1: Différents types de soutènement.	5
Figure I.2: Mode de fonctionnement du rideau ancré ou butonné	7
Figure I.3: Paroi ancrée par des tirants.....	7
Figure I.4: Murs partiellement ou totalement ancrés	8
Figure I.5: Paroi parisienne ancrée par des tirants précontraints.	9
Figure I.6: Murs parois moulée.....	9
Figure I.7: Panneaux autostables.	10
Figure I.8: Panneaux ancrés par des tirants d’ancrage <i>précontraints</i>	10
Figure I.9: Panneaux ancrés par des tirants précontraints.....	11
Figure I.10: Treillis soudés sous forme de grillage en fil métallique tressé.....	12
Figure I.11: Exemple de géogrille.....	12
Figure I.12: L’amélioration de sol	12
Figure I.13: Amélioration des sols par préchargement.	13
Figure I.14: Amélioration des sols par drainage vertical[5].....	13
Figure I.15: Amélioration des sols par compactage dynamique	13
Figure I.16: Applications des murs en terre armée dans les routes.....	15
Figure I.17: Renforcement de remblai par géotextile.....	16
Figure I.18: Renforcement de remblai par géotextile	17
Figure I.19: Schéma de réalisation de colonne ballastées.....	18
Figure I.20: Schéma de réalisation les micros pieux.....	18

Chapitre II: Notions théoriques et pratiques sur la technique du clouage

Figure II. 1: Schématisation de la zone active et de la zone résistante (d’après les recommandations Clou-terre 91).	22
Figure II. 2: Zone d’influence - terrains associés.	22
Figure II. 3: Stabilisation d’une pente instable par clouage.....	23
Figure II. 4: Stabilisation d’une Excavation (pente artificielles).	23
Figure II. 5: Etapes de construction d’un mur cloué.....	24
Figure II. 6: Forage des trous.....	25
Figure II. 7: Battage d’une cornière.	25
Figure II. 8: Forage pour mise en place et scellement d’une barre.....	26
Figure II. 9: Mise en place d’une barre d’acier après forage.	26
Figure II. 10 : Exemple de machine à injection.	27
Figure II. 11: L’installation de la bande de drainage avant la première mise en place du.....	27

Figure II. 12: Application de béton projeté avec treillis soudé.	28
Figure II. 13: Technique d'excavation par niveau ; niveau 1 terminé, niveau 2 commencé.....	28
Figure II. 14: Procédure de réalisation.....	28
Figure II. 15: Exemple d'Hurpinoise, Schéma d'implantation du chantier des INVALIDES (PARIS) 1974.[11]	29
Figure II. 16: Schéma représenté la paroi clouée.	30
Figure II. 17: Des barres d'acier d'armature pleine ou creuse utilisé dans le clouage.	31
Figure II. 18: Les centreurs PVC typiques attachés à un barre d'acier du clou avant installation.....	31
Figure II. 19: Pompe d'injection et malaxeur de coulis de ciment.	32
Figure II. 20: Section d'une barre creuse injectée.	32
Figure II. 21: Détails sur la tête des clous.....	32
Figure II. 22: Liaison en forme baïonnette entre deux passes de bétonnage.	33
Figure II. 23: Schématisation de la projection par voie sèche et humide.	33
Figure II. 24: Barbacanes placées à plusieurs niveaux.	34
Figure II. 25: Drains non visibles de l'extérieur, reliés à un collecteur interne.....	35
Figure II. 26: Schémas des trois types de rupture.	35
Figure II. 27: Rupture globale.[12].....	35
Figure II. 28: Renforcement du plan faible par clouage.	36

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

Figure III.1: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1.100.....	39
Figure III.2: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental	40
Figure III.3: Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs.	44
Figure III.4: Etapes de méthodologie de surface de réponse.....	45
Figure III.5: Un neurone avec son arborisation dendritique.....	49
Figure III.6: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.	49
Figure III.7: a-Fonction de Heaviside, b-Fonction signe.	50
Figure III.8: a-Fonction linéaire à seuil, b-Fonction sigmoïde.....	50
Figure III.9: Neurone à simple entrée.....	51
Figure III.10: Neurone à entrées multiples.....	52
Figure III.11: Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.	53

Chapitre IV :Validation du modèle numérique utilisé

Figure IV. 1: Organigramme du code Plaxis 2D.	55
Figure IV. 2: Vue en coupe du problème étudié.	57
Figure IV. 3: Maillage en éléments finis du modèle de référence.	58
Figure IV. 4: Conditions initiales hydrauliques du modèle de référence.	59
Figure IV. 5: Conditions initiales mécaniques du modèle de référence.	59
Figure IV. 6: Phases de calcul utilisées pour le modèle de référence.	60
Figure IV. 7: Déplacement latéral de la paroi en fin d'excavation.	60
Figure IV. 8: Soulèvement vertical de l'excavation en fin d'excavation.	61
Figure IV. 9: Coefficient de sécurité.	61
Figure IV. 10: Variation du facteur de sécurité avec la profondeur.	62
Figure IV. 11: Soulèvement de base de l'excavation (U_y).	63
Figure IV. 12: Déplacement latéral du mur avec la profondeur(U_x).	63

Chapitre V:Optimisation des paramètres de renforcement

Figure V. 1: Probabilités normales des résidus du déplacement horizontal U_x	73
Figure V. 2: Surfaces de réponses pour le déplacement horizontal de la paroi U_x	74
Figure V. 3: Architecture du réseau de neurones artificiels (5-5-1) pour le déplacement latéral de la paroi (U_x).	75
Figure V. 4: Valeurs prédites par rapport aux valeurs numériques pour le déplacement latéral U_x	76
Figure V. 5: Comparaison entre les valeurs de la capacité portante numériques et prédites Par RSM et ANN.	79
Figure V. 6: Diagramme de l'algorithme génétique.	80

Liste des tableaux

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

Tableau III. 1: Exemples de plans d'expériences..... 41

Tableau III. 2:Les matrices d'expériences 41

Chapitre IV :Validation du modèle numérique utilisé

Tableau. IV. 1:Paramètres mécaniques et physiques du modèle (Singh and Babu 2009 et Benayoune 2020)..... 57

Tableau. IV. 2: Caractéristiques des clous..... 57

Chapitre V:Optimisation des paramètres de renforcement

Tableau V. 1: Intervalle de variation des paramètres à optimiser. 66

Tableau V. 2: Plan d'expérience type Box-Behnken L41 (5 facteurs, 3 niveaux)..... 66

Tableau V. 3:Analyse des résultats par la méthode des surface de réponse(U_x). 70

Tableau V. 4: Analyse de la variance ANOVA pour le déplacement horizontal U_x 71

Tableau V. 5: Résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels..... 76

Tableau V. 6: Résultat de déplacement latéral U_x par RSM et ANN. 77

Tableau V. 7: Comparaison des modèles RSM et ANN. 79

Tableau V. 8: Conditions d'optimisation. 81

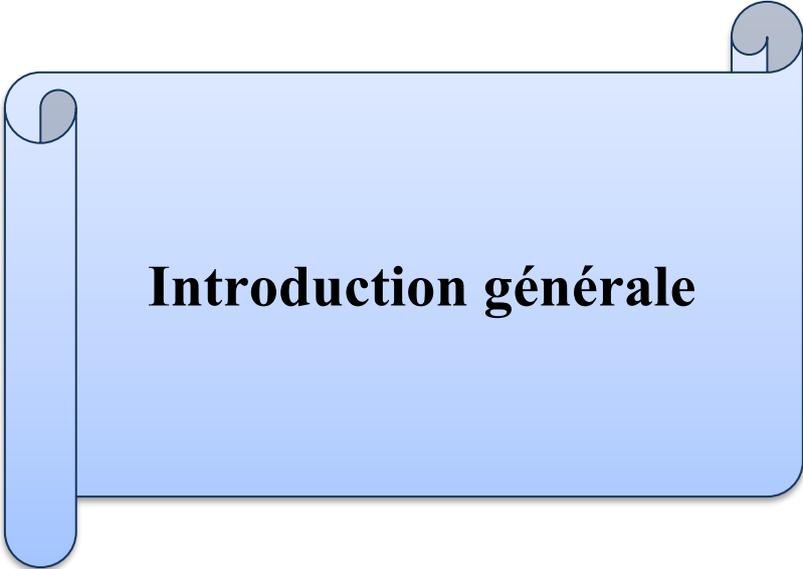
Tableau V. 9: Paramètres de l'algorithme génétique (GA). 81

Tableau V. 10: Résultats de l'optimisation..... 82

Liste des symboles

β :	Vecteur de régression.
ε :	Terme d'erreur.
x_i :	Variation.
y :	Grandeur d'intérêt.
nf :	Essais du plan factoriel.
S :	Réponse.
f_{β} :	La fonction de réponse.
X_i :	Variation de prédiction codées appelées facteurs.
B :	β : Coefficient de régression.
R_i :	Variable courante.
X :	La matrice de terme de modèle évalué aux points de conception.
R^2 :	Coefficient de détermination statistique.
R^2_{adj} :	Coefficient de détermination ajusté.
SS_E :	La somme des carrés de l'erreur.
Sst :	L'erreur totale.
G :	Module de cisaillement.
ν :	Coefficient de Poisson.
K :	K comme second paramètre.
E :	Module d'Young.
C :	Cohésion.
Φ :	L'angle de frottement.
Ψ :	L'angle de dilatance.
σ_n :	où σ_n et τ_t les contraintes normales.
τ :	Contrainte de cisaillement.
Deq :	L'épaisseur équivalente.

J :	Module de rigidité.
N :	La tension interne.
U :	Déformation du sol renforcé.
F_s :	Coefficient de sécurité.
S_v :	L'espace vertical.
B :	Largeur de remblai.
L :	Longueur de renforcement.
Alpha α :	L'angle d'inclinaison du remblai de renforcement.
SC :	La somme des carrés.
N :	Nombre total d'expériences.
N_{nf} :	Niveau de chaque facteur.
MC :	La moyenne des carrés.
df :	degré de liberté.
MC_e :	Les carrés moyens des erreurs.
U_x :	Déplacement horizontal.
Y :	Fonction de réponse.
b₀ :	Le terme constant de l'équation de régression.
X_i :	Paramètres d'entrée.
y_i :	Valeur de la réponse calculée à la <i>i</i> ème expérience.
\bar{y}_i :	Valeur mesurée à la <i>i</i> ème expérience.
\bar{y} :	Valeur moyenne des réponses mesurées.
Y_{i,min} :	Valeur en dessous de laquelle la réponse Y _i ne convient pas (<i>d_i = 0</i>).
Y_{i,max} :	Valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y _i est très satisfaisante (<i>d_i = 1</i>).



Introduction générale

Introduction Générale

La stabilité des ouvrages de soutènement représente un enjeu fondamental dans le domaine de la géotechnique, particulièrement dans les contextes urbains denses et lors de réalisations de fouilles profondes. Ces ouvrages jouent un rôle crucial dans la prévention des glissements de terrain, la protection des infrastructures environnantes et la sécurité des travailleurs sur chantier. Parmi les nombreuses techniques de renforcement des sols, les parois clouées se révèlent être une solution à la fois efficace, flexible et économique, adaptée à une grande variété de types de sols et de conditions géologiques. Néanmoins, malgré leur large utilisation, la maîtrise et l'optimisation des paramètres géométriques qui gouvernent leur comportement mécanique restent un défi majeur. Ces paramètres influencent directement la rigidité, la capacité portante, la sécurité globale et le coût final de l'ouvrage.

Dans ce contexte, cette étude s'inscrit dans une volonté d'amélioration et d'innovation, visant à concevoir un système de soutènement par clouage plus rigide, plus fiable et plus économique. Pour atteindre cet objectif, il est indispensable de combiner des approches traditionnelles de modélisation géotechnique avec des outils modernes d'intelligence artificielle capables de gérer la complexité et la non-linéarité des phénomènes observés. Ainsi, cette recherche explore le potentiel des réseaux de neurones artificiels (ANN) et de la méthode de surface de réponse (RSM) pour modéliser et optimiser le comportement des parois clouées, en tenant compte des interactions complexes entre les variables géométriques et mécaniques.

La méthodologie adoptée s'articule autour de cinq chapitres complémentaires, chacun contribuant à la construction progressive d'une démarche robuste et scientifique :

Le **premier chapitre** présente un état de l'art des différentes techniques de renforcement des sols, retraçant leur évolution historique, leurs principes fondamentaux et leurs domaines d'application spécifiques. Une attention particulière est portée aux avantages et limites des méthodes existantes, pour situer le clouage dans son contexte technique et pratique.

Le **deuxième chapitre** est consacré à l'étude approfondie du clouage, en exposant ses fondements théoriques et ses aspects pratiques. On y détaille les mécanismes de stabilisation mis en jeu, les paramètres clés influençant la performance des parois clouées, ainsi que les normes et recommandations en vigueur pour leur conception et leur dimensionnement.

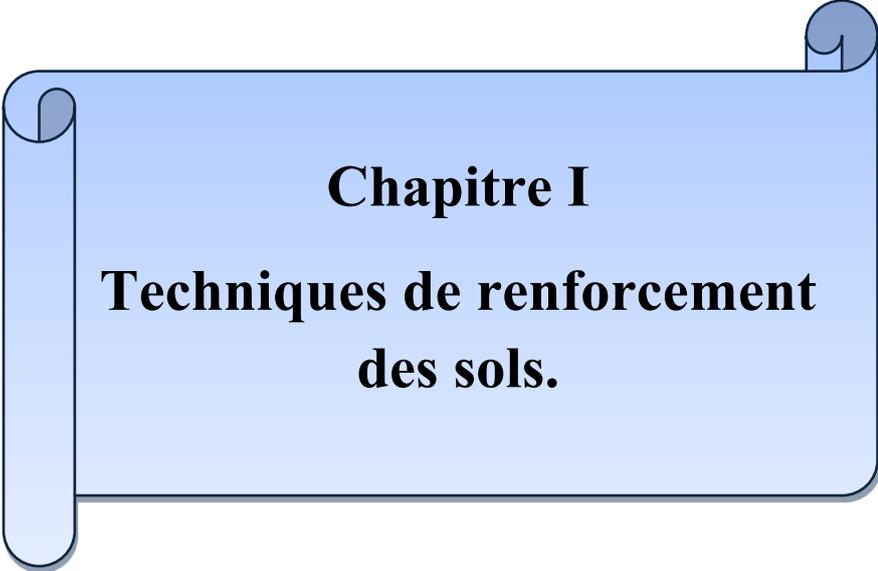
Le **troisième chapitre** introduit les notions essentielles relatives aux plans d'expériences, outils indispensables pour explorer de manière systématique et rigoureuse l'espace des variables. Cette étape permet d'optimiser le nombre d'expérimentations tout en garantissant une couverture efficace des combinaisons possibles, condition sine qua non d'une modélisation fiable.

Le **quatrième chapitre** porte sur la validation du modèle numérique utilisé. Grâce au logiciel Plaxis 2D, reconnu dans le domaine géotechnique, nous simulons le comportement des parois clouées sous diverses configurations de charges et paramètres. Cette validation garantit la crédibilité des résultats et des analyses ultérieures.

Le cinquième chapitre est consacré à la prédiction du comportement des parois clouées par l'application conjointe de la méthode de surface de réponse (RSM) et des réseaux de neurones artificiels (ANN). Dans ce chapitre, nous développons d'abord les modèles prédictifs basés sur ces deux approches, en comparant leur performance et leur capacité à reproduire fidèlement les réponses mécaniques observées.

La seconde partie du chapitre est dédiée à l'optimisation des paramètres géométriques des parois, réalisée grâce à une méthode hybride combinant les réseaux de neurones artificiels (ANN) avec un algorithme génétique. Cette approche innovante tire parti de la puissance des ANN pour modéliser les phénomènes complexes et non linéaires, tandis que l'algorithme génétique explore efficacement l'espace des solutions afin d'identifier les configurations optimales. L'objectif est de minimiser le déplacement latéral de la paroi tout en réduisant le coût de construction, assurant ainsi un compromis optimal entre performance mécanique et rentabilité économique. Enfin, ce chapitre se conclut par une synthèse des résultats obtenus, mettant en lumière l'efficacité de cette méthodologie d'optimisation avancée.

Les conclusions principales de l'étude, ainsi que les perspectives et recommandations pour les travaux futurs, sont présentées en clôture de ce mémoire, ouvrant la voie à des recherches complémentaires et à des applications pratiques dans le domaine du soutènement par clouage.



Chapitre I
Techniques de renforcement
des sols.

I.1. Introduction

Grâce à des techniques innovantes, il est désormais possible de construire sur tous types de sols. Du simple ouvrage à la prouesse architecturale, le savoir-faire des ingénieurs est mobilisé pour analyser, étudier, renforcer et consolider les sols. Le géotechnicien sonde et détermine les caractéristiques des sols afin de concevoir, au sein de bureaux d'études, les fondations des ouvrages.

Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible est la pierre angulaire de tout ouvrage construit sur un sol aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement.

- À la mise en place de remblais derrière l'ouvrage (auquel cas on parle généralement d'ouvrage en remblai ou en élévation),
- Ou par extraction de terres devant celui-ci (auquel cas on parle généralement d'ouvrage en déblai ou en excavation).

I.2.Principe de soutènement

La principale considération dans le dimensionnement des soutènements, quelque soit leur type, est la correcte estimation de la poussée des terres ou du matériau retenu par cette paroi. Dans leur état naturel, les terres tendent à se conformer en un tas pyramidal conique à la façon d'un tas de sable présentant une pente de talus naturel.

L'interposition d'un écran de soutènement dans un massif de terre se substitue à la partie manquante à la base et reçoit une partie du poids des terres restantes en une composante biaise de poussée qui tend à faire basculer et même glisser le mur de soutènement disposé. Pour combattre cette poussée des terres, le mur peut être constitué de différentes façons.

- Opposer un poids supérieur à la partie remplacée en contre balancement de la poussée telle sont les murs-poids;
- Être ancré dans un corps mort fournissant une inertie ou ancré plus loin dans le sol proximité qui ne fait pas partie de l'ensemble susceptible de glissement ou a une meilleure composition afin que la poussée soit contenue, éviter le glissement et annuler le moment de basculement :ce sont les parois ancrées;
- Résister au basculement par une semelle insérée sous les terres, semelle de surface de base en rapport avec la hauteur fournissant le moment de renversement;
- Réduire la poussée par un épaulement des terres retenues entre deux contreforts murs à redans. Les murs de soutènement, quelque soit leur type, doivent en principe être drainés, car la pression de l'eau retenue derrière un mur sans interstices d'évacuation augmente d'autant la poussée sur l'ouvrage et modifie la "consistance" du matériau en le fluidifiant ce qui apporte une transmission de poussée d'une partie plus importante ,la friction (phénomène de s'agripper en résistance au glissement ayant partiellement disparu, la pente naturelle du tas diminue.[1]

I.3. Différents types de soutènement

- Il existe de nombreux types de soutènement, qui ont été conçus pour répondre aux situations les plus diverses. Ils se distinguent principalement par :
 - leur morphologie ;
 - leur mode de fonctionnement ;
 - les matériaux qui les constituent ;
 - leur mode d'exécution ;
 - leur domaine d'emploi privilégié (urbain, montagneux, aquatique,...).

Un ouvrage de soutènement peut retenir d'une part de terre en remblai et d'autre part en déblai. Le massif de sol retenu exerce la force de poussée qui diffère par trois modes principaux :

- La poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement.
- La poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement.
- La poussée est reprise par des ancrages.(FigureI.1)

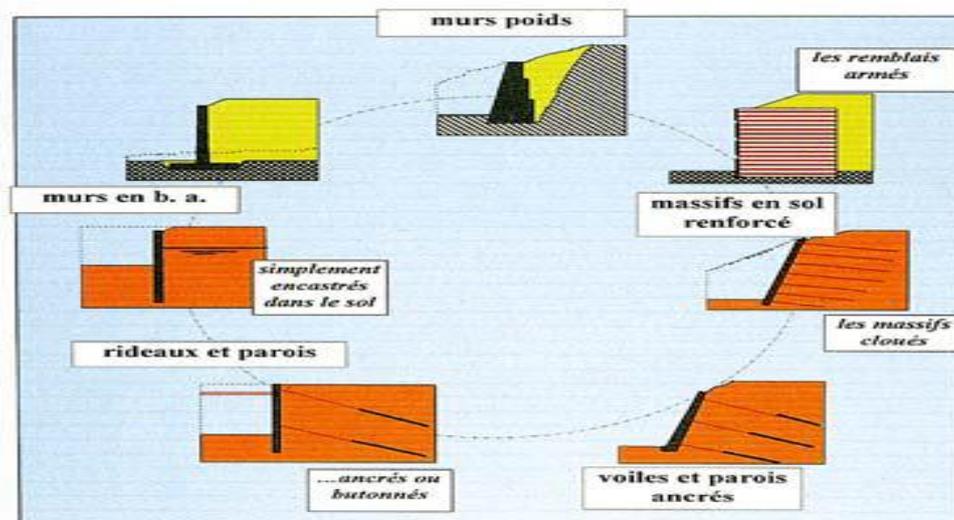


Figure I.1: Différents types de soutènement.

I.3.1 Soutènement des excavations

Le développement en zones urbaines nécessite généralement la réalisation d'excavations profondes à proximité de structures existantes en surface.

Les ouvrages des soutènements des excavations profondes peuvent être des ouvrages temporaires ou permanents qui ont une influence fondamentale sur la sécurité, la qualité, la rapidité et la rentabilité de la construction des projets qui nécessitent les excavations profondes. Les ouvrages de soutènements des excavations incluent tous les moyens et les méthodes de prévention d'un effondrement de terre qui entourent une excavation.

Dans un premier temps, il sera décrit tant en termes d'exécution, de domaine d'emploi que de mode de fonctionnement, les trois familles de soutènement suivante : [2]

- Les rideaux de palplanches
- Les parois composites
- Les parois moulées et préfabriquées

a) Les Rideaux de Palplanches métallique

Ce sont des ouvrages de soutènement flexibles, où l'interaction structure-remblai a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage. (Figure I.2)

► Domaine d'emploi

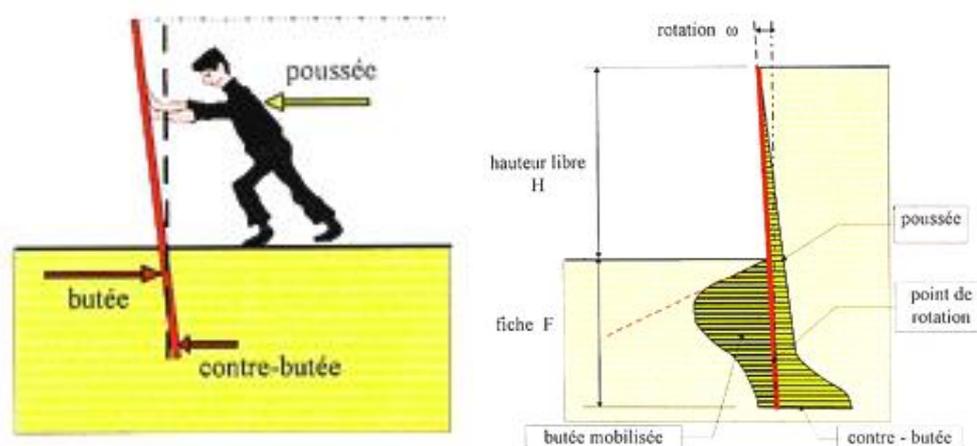
- Bien adaptées en présence d'eau (site aquatique);
- Ouvrages de déblai ou de remblai;
- Limitation : pénétration dans le sol;

► Constitution

- Palplanches (profilés rectilignes) mises en œuvre par battage ou vibrofonçage
- Eventuellement appuis + lierne :
 - Tirants passifs;
 - Tirants actifs (précontraints);
 - Butons;
- Poutre de couronnement;

* *Mode de fonctionnement du rideau encastré ou autostable:*

Les palplanches sont simplement fichées dans le sol.



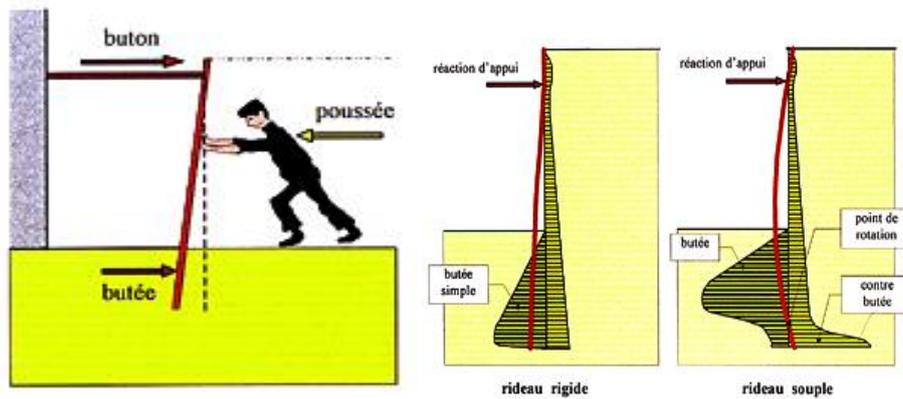


Figure I.2: Mode de fonctionnement du rideau ancré ou butonné[3].

- Rideau de palplanches ancré

L'ouvrage peut comprendre un ou plusieurs lits de tirants d'ancrage(Figure I.3).

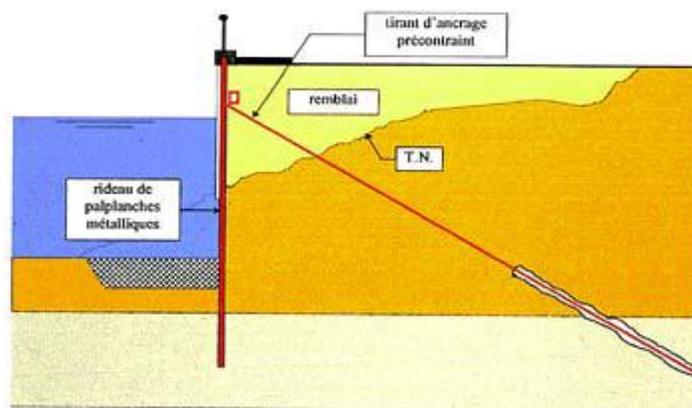


Figure I.3: Paroi ancrée par des tirants[3].

- Avantages des rideaux de palplanches

- La continuité du rideau facilite la gestion de la nappe;
- Peut servir de soutènement définitif (habillage possible pour l'aspect visuel);
- Peut avoir un rôle porteur.

- Inconvénients des rideaux de palplanches

- Effet barrage potentiel sur la nappe;
- Impossibilité de mise en œuvre dans les terrains contenant des blocs ou des bancs durs;
- Mise en œuvre impliquant des nuisances importantes.

b) Parois composites

D'une façon générale, une paroi composite associe des éléments verticaux généralement celles dans des forages à des panneaux de blindage installés entre les poteaux au fur et à mesure de l'excavation.

Cette méthodologie pouvant être réalisée de différentes manières, on distingue différents types de parois composites :

- ✓ Les Berlinoises;
- ✓ Les Micro-berloises;
- ✓ Les Parisiennes.

-Paroi composite berlinoise

Ouvrages constitués de poteaux métalliques espacés, fichés dans le sol et d'un parement (béton projeté sur nappe de treillis soudé, béton armé coffré, bastaings...) réalisé entre les poteaux Ces ouvrages peuvent être ancrés par un ou plusieurs lits de tirants précontraints.

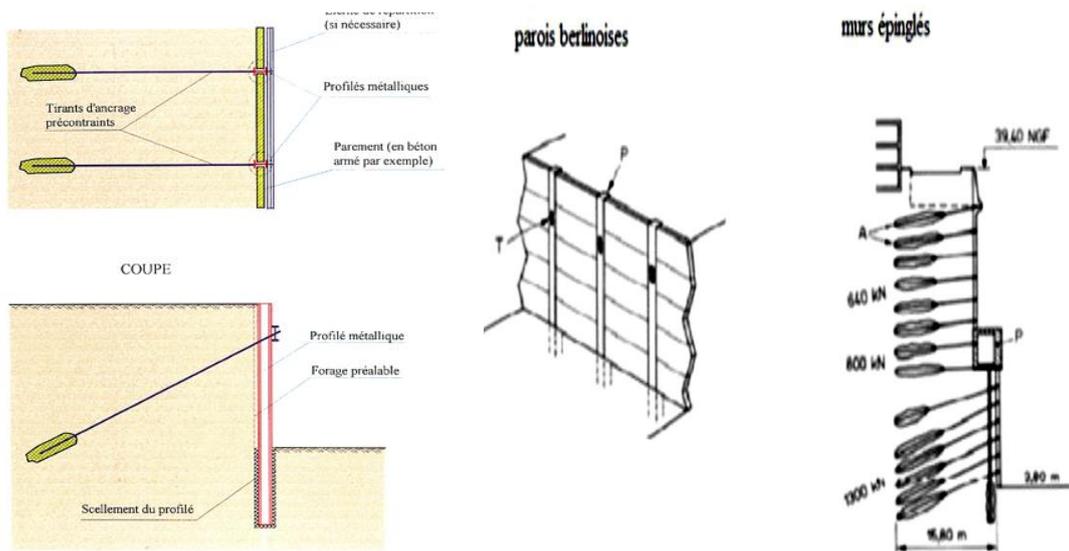


Figure I.4: Murs partiellement ou totalement ancrés [3].

-Paroi composite parisienne

Ouvrages constitués de poteaux en béton armé, espacés et fichés dans le sol et d'un parement (béton projeté sur nappe de treillis soudé, béton armé coffré, bastaings...) réalisé entre les Poteaux Ces ouvrages peuvent être ancrés par un ou plusieurs lits de tirants précontraints.[3]

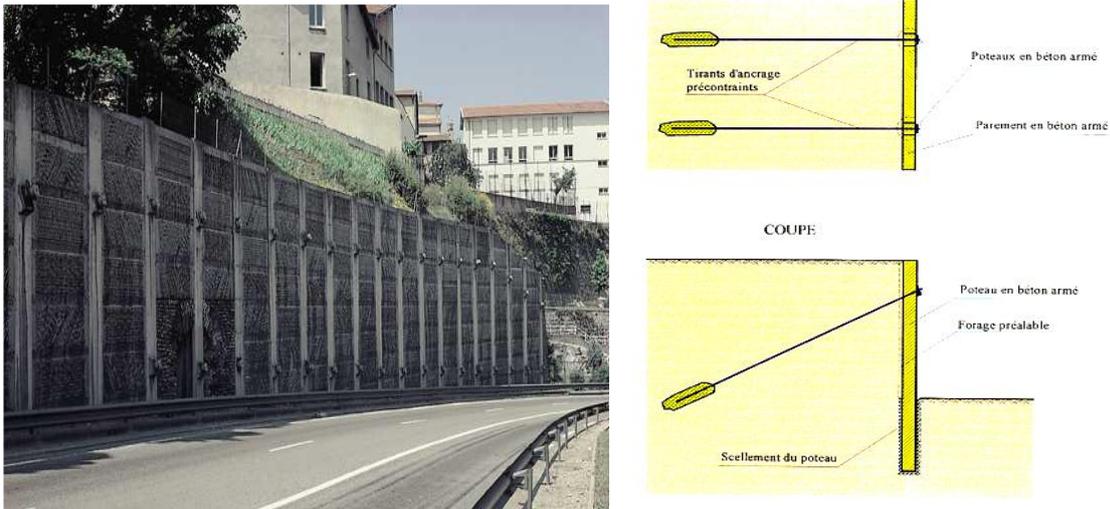


Figure I.5: Paroi parisienne ancrée par des tirants précontraints.

Avantages

- Solution économique au regard des soutènements continus;
- Peut entrer dans la constitution d'ouvrages (paroi parisienne ou Lutétienne).

Inconvénients

- Ne convient pas aux sols bouillants;
- Inadaptée en présence d'une nappe phréatique sur la hauteur libre.

c) Les parois moulées et préfabriquées

Cette technique qui consiste à réaliser le mur au sein du sol en place, avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour assurer la stabilité. Cette dernière est particulièrement utilisée pour les travaux sous la nappe, en zones urbaine et portuaire. Une paroi moulée fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation. [4]



Figure I.6: Murs parois moulée [4].

Une paroi moulée est constituée d'une succession de panneaux verticaux en béton armé, coulés en place dans une tranchée préalablement réalisée.

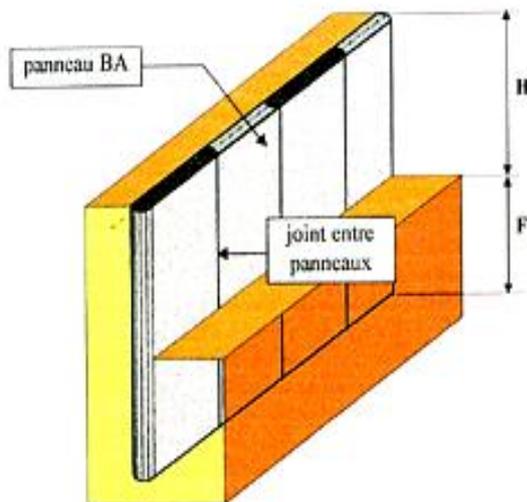


Figure I.7: Panneaux autostables.

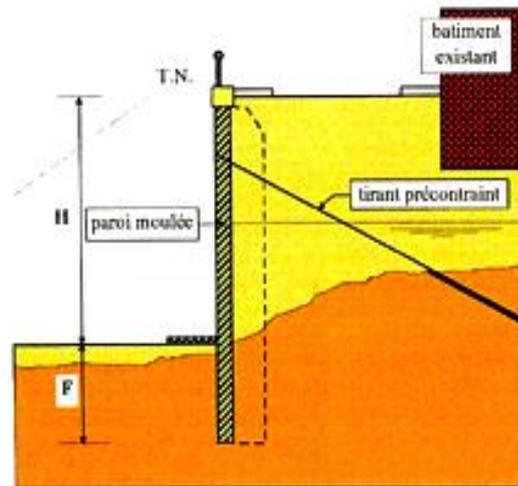


Figure I.8: Panneaux ancrés par des tirants d'ancrage précontraints [3].

► Domaine d'emploi

- En site terrestre;
- Ouvrages de déblai;
- Dans pratiquement tous les terrains;
- Possibles en présence d'eau;
- Bien adaptées en site urbain;
- Assez forte hauteur possible.

► Constitution

- Juxtaposition de panneaux verticaux en béton armé :
 - Excavation d'une tranchée maintenue à l'aide de boue bentonitique;
 - Mise en place de la cage d'armatures et bétonnage ou mise en place de panneaux préfabriqués ;
- Eventuellement tirants actifs ou butons.

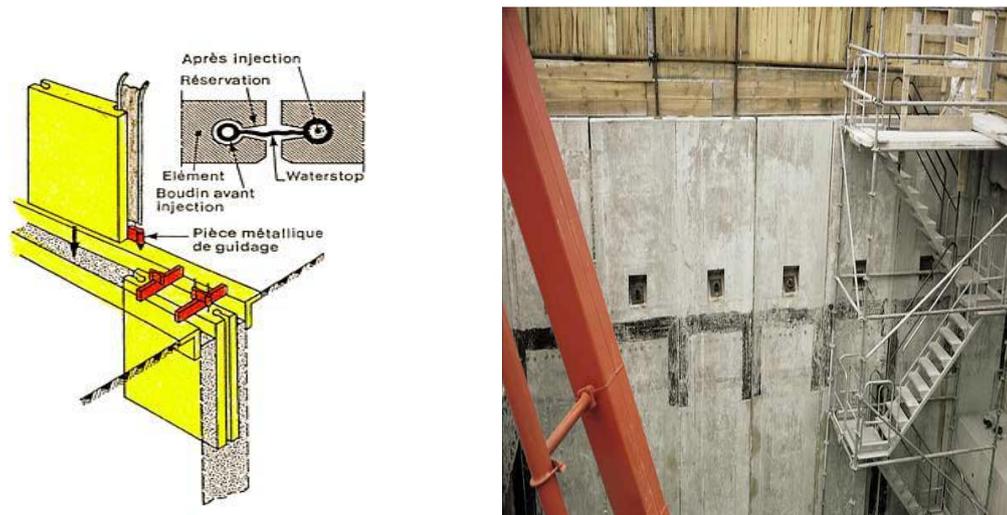


Figure I.9: Panneaux ancrés par des tirants précontraints.

Avantages

- La continuité du rideau facilite la gestion de la nappe;
- Peut servir de soutènement définitif (habillage possible pour l'aspect visuel);
- Peut avoir un rôle porteur.

Inconvénients

- Effet barrage potentiel sur la nappe;
- Impossibilité de mise en œuvre dans les terrains contenant des blocs ou des bancs durs;
- Mise en œuvre impliquant des nuisances importantes.

I.3.2.Sol renforcé et amélioré

a) Renforcement de sol

Regroupe plus particulièrement l'ensemble des techniques conduisant à inclure des éléments dans le sol afin d'en améliorer la tenue sous l'effet d'une charge statique ou dynamique apportée par un ouvrage (fondations superficielles ou remblai) ou sous l'action de la poussée des terres dans le cas des ouvrages de soutènement ou de stabilisation des talus naturels. Le terme « **inclusion** » employé dans ce guide concerne des éléments verticaux regroupant : [5]

- Les inclusions « **souples** » telles que les colonnes ballastées et les plots ballastés ;
- Les inclusions « **rigides** ».

➤ Armatures en acier

Des renforcements métalliques sous forme de bandes, de barres ou de treillis soudés, ou sous forme de grillage en fil métallique tressé (figure I.10)).

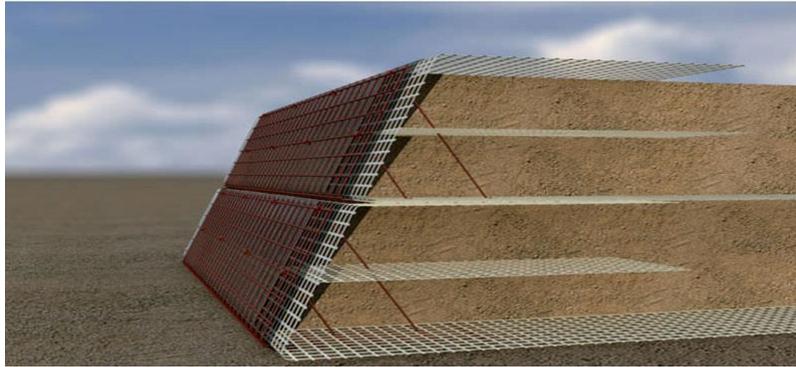


Figure I.10: Treillis soudés sous forme de grillage en fil métallique tressé.

➤ Armatures en polymère

Des renforcements géosynthétiques sous forme de bandes ou de nappes. Les schémas illustrant les différents types des renforcements sont donnés par la figure I.11.



Figure I.11: Exemple de géogrille.

b) Amélioration de sol

Peut se comprendre comme l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques avec ou sans ajout de matériaux en agissant sur la réduction de l'indice des vides : réarrangement des grains par action mécanique, consolidation, injection, vibration ou congélation. [5]

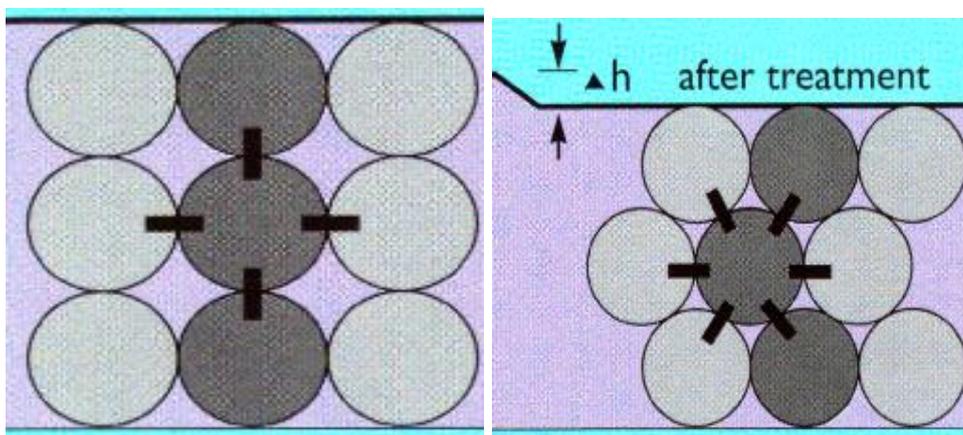


Figure I.12: L'amélioration de sol.[5].

-Amélioration des sols dans la masse

Elle est également employé pour désigner les techniques comme le préchargement avec ou sans drainage, le compactage dynamique, le vibrocompactage. Déformation verticale des sols par amélioration dans la masse : ordres de grandeur préchargement : tassement de quelques dizaines de centimètres(Figure I.12).[5]

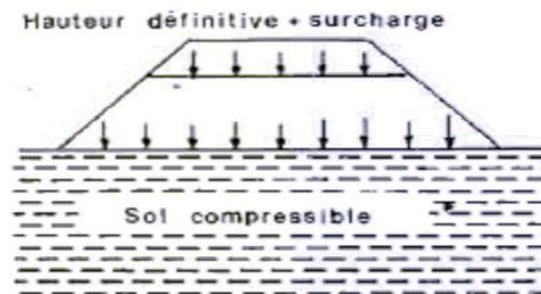


Figure I.13: Amélioration des sols par préchargement.

Drainage vertical et consolidation atmosphérique : tassement métrique à pluri métrique (jusqu'à 4 à 5 m au maximum).(Figure I.13)



Figure I.14:Amélioration des sols par drainage vertical[5].

- Compactage dynamique: tassement métrique à pluri métrique (1 à 2 m voire plus). (Figure I.14)

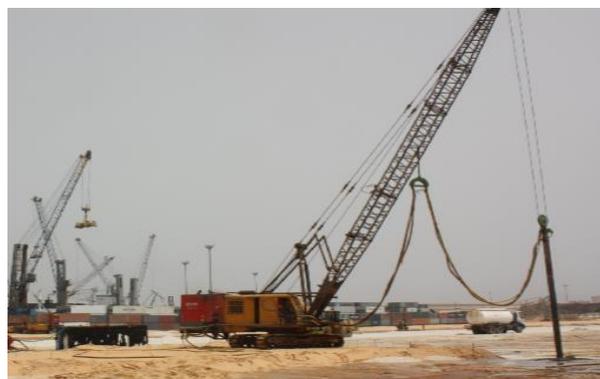


Figure I.15: Amélioration des sols par compactage dynamique.[5].

I.4 Problèmes apparus lors la construction des remblais sur les sols compressibles

La construction des remblais sur sols compressibles posé souvent des problèmes difficiles. Il faut d'abord éviter de provoquer la rupture du sol porteur qui peut compromettre la suite de la construction et créer des dommages importants sur les structures avoisinantes. Il se pose ensuite le problème de tassements, aux effets plus lents mais tout aussi néfastes.

Lorsque ces tassements sont importants et qu'ils n'ont pas été pris en considération dès le début de la construction, ils peuvent :

- Entraîner une déformation du remblai le rendant inapte à son usage initial ;
- Provoquer des poussées parasites sur des structures enterrées proches (pieux, palplanches, ... etc.) jusqu'à leur rupture [6].

I.4.1 Problème de stabilité

La mise en place d'un remblai sur sol mou entraîne une augmentation des contraintes au sein de ce sol. Si cet accroissement des contraintes dépasse un seuil critique qui dépend des caractéristiques mécaniques du sol, ce dernier se rompt en cours de construction et en provoquant un affaissement important et brutal du remblai. Parallèlement à cet affaissement, il se produit des déformations du sol porteur qui se traduisent par des soulèvements importants du terrain naturel autour du remblai.

I.4.2 Problème de tassement

À l'inverse de la rupture par défaut de la stabilité, le tassement est une déformation lente du sol sous le poids du remblai qui se traduit :

- ❖ Au centre du remblai par un enfoncement vertical ;
- ❖ Sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral de sol de fondation ;
- ❖ Hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation jusqu'à une distance fonction de l'épaisseur de sol compressible [6].

I.5. Procédé de construction et de mise en place du massif de soutènement

Si la partie la plus importante du travail des équipes de sol renforcé se passe bien en amont du chantier, dans des bureaux d'étude, il est possible de séquencer un chantier de sol renforcé en trois étapes principales .

La simplicité et la rapidité du montage des ouvrages en sol renforcé résultent, en particulier, de la suppression de tout échafaudage et de lourd matériel de chantier. Chaque panneau s'imbrique automatiquement dans le créneau constitué par les éléments déjà en place.

a) **Montage du parement** : Une fois la première rangée de panneaux mise en place sur une semelle de réglage en béton lissé et bien nivelée pour garantir un positionnement initial correct, les rangées de panneaux supérieures sont montées au fur et à mesure de l'avancement du remblai. Leur verticalité est assurée par des cales provisoires et des serre-joints.

b) **Mise en place des armatures** : Les couches d'armatures sont espacées de 70 à 80cm, ce qui correspond généralement à deux fois l'épaisseur des couches de remblai. Elles sont mises en place sur la couche de remblai compacté et sont reliées aux panneaux de parement par boulonnage dans le cas d'armatures en acier ou sont enfilées dans des gaines scellées dans le parement dans le cas d'armatures synthétiques.

c) **Remblayage et compactage** : Le remblai est placé en couches de 30 à 40 cm d'épaisseur et compacté avec l'équipement adéquat. Il faut éviter le passage direct des engins sur les armatures et empêcher les engins lourds de circuler à moins de 1,50 m des panneaux pour ne pas nuire à leur verticalité.

I.6. Techniques d'Amélioration et renforcement des sols

I.6.1. Types de renforcements

Le renforcement des sols fait partie de l'ensemble des techniques d'amélioration artificielle des sols. Le principe du renforcement est de placer dans le sol, des armatures plus ou moins rigides, en métal, béton, bois, matières plastiques ou autres, dans le but d'améliorer de manière sélective ses capacités de résistance. On distingue cinq types de renforcement.

- La Terre armée,
- Les géotextiles,
- Les colonnes ballastées,
- Les micros pieux,
- Le clouage.

a. La Terre armée

Cette technique consiste en l'association d'un matériau granulaire frottant et d'armatures linéaires flexibles de grande résistance à la traction. Le parement extérieur de l'ouvrage est relativement mince et souple; il est généralement constitué de panneaux en béton. Pour limiter la déformation de la structure on utilise des armatures en acier, ce qui permet de réaliser des parements verticaux.

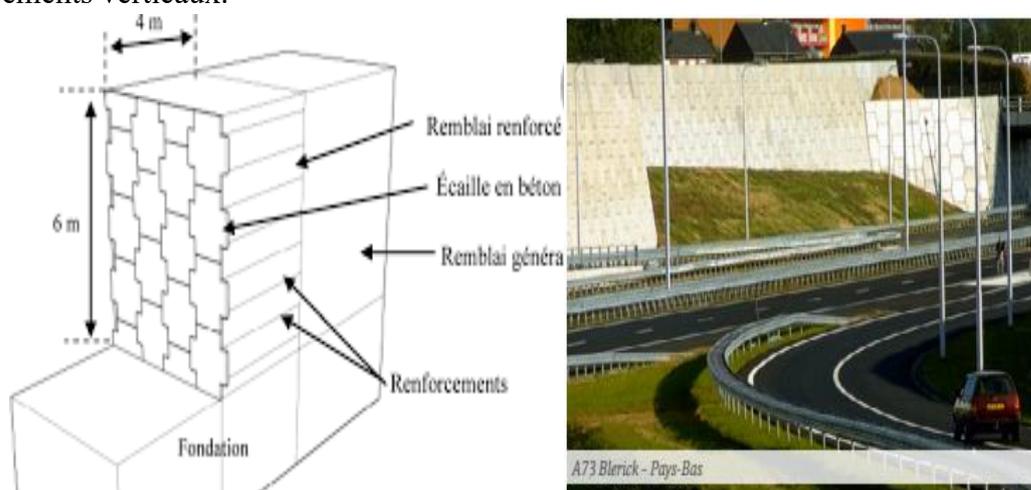


Figure I.16: Applications des murs en terre armée dans les routes.

► Domaine d'emploi

- Ouvrages en remblai;
- En site terrestre, hors d'eau;
- Bien adaptés sur sols de qualité médiocre, si les tassements attendus sont importants;
- Fortes à très fortes hauteurs possibles (ouvrage sur versants) étagés ou à risbermes.

► Constitution

- Armatures disposées horizontalement:
- Bandes métalliques (terre armée Panneaux de treillis soudés nappes de grillage Métallique
- Parement : Ecailles en béton armé, parement métallique, treillis soudé.[5].

Fonctionnement En Ouvrage Poids

- d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées;
- d'éléments de renforcement métalliques (bandes, panneaux de treillis soudé, nappes de treillis soudé, etc.) disposés entre les couches de remblai;
- d'un parement relié aux éléments métalliques et constitué de panneaux ou d'éléments préfabriqués en béton armé ou non, d'éléments métalliques, etc.

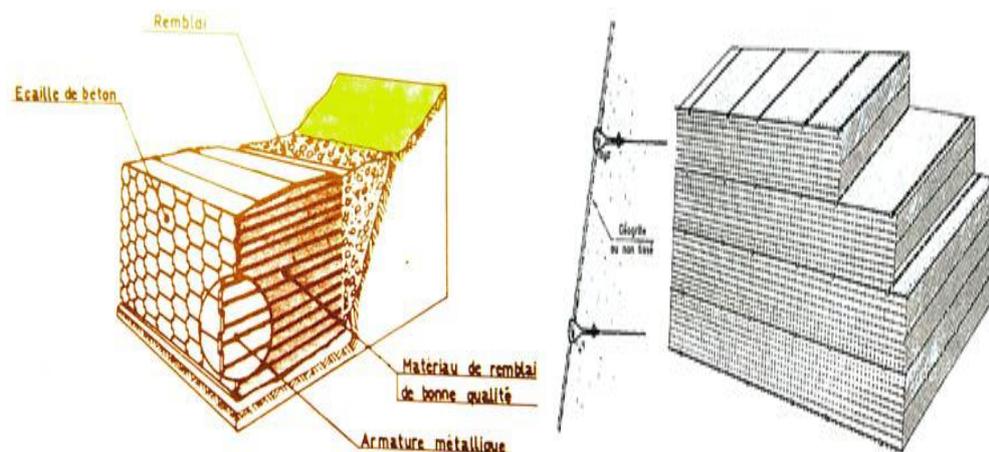


Figure I.17: Renforcement de remblai par géotextile

b. Les géotextiles.

Ce sont des textiles tissés ou non, qui sont commercialisés en rouleaux que l'on déroule par nappe sur le remblai en cours de terrassement, pour améliorer la capacité portante (sous des voies de communication), ou le drainage. On peut aussi les utiliser en tant qu'armature dans la technique de terre armée.

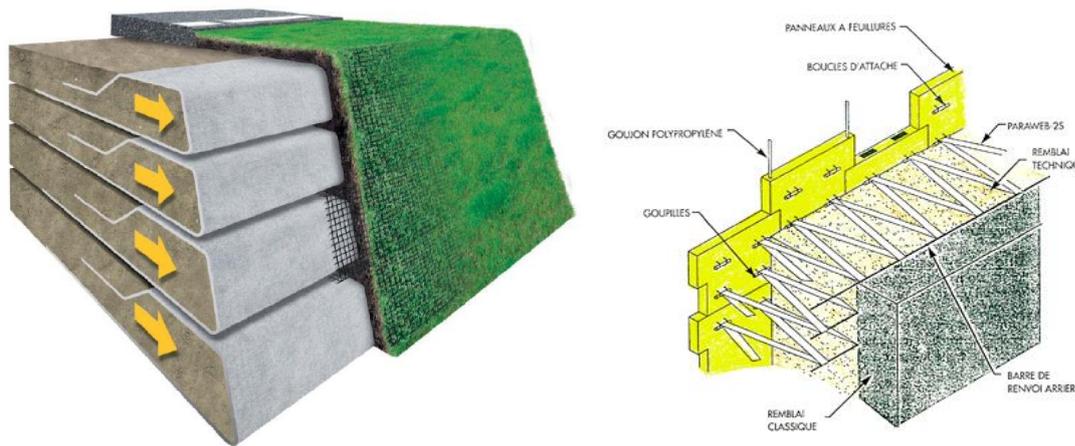


Figure I.18: Renforcement de remblai par géotextile [7].

► Domaine d'emploi

- Ouvrages en remblai;
- En site terrestre, hors d'eau;
- Bien adaptés sur sols de qualité médiocre, si les tassements attendus sont importants;
- Fortes à très fortes hauteurs possibles (ouvrage sur versants) étagés ou à risbermes.

► Constitution

- Nappes disposées horizontalement:
 - Retournées en parement;
 - Avec géogrille en parement;
 - Avec parement indépendant devant;
 - Avec parement de blocs empilés : gabions, béton cellulaire;
- Bandes disposées horizontalement:
 - Avec parement type écailles béton ouvrage constitué:
- d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées;
 - d'éléments de renforcement géosynthétiques (nappes géotextiles, géogrilles, bandes, disposés entre les couches de remblai d'un parement;
 - Soit en béton armé, composé de panneaux ou éléments préfabriqués, reliés aux bandes de géotextile;
 - Soit géotextile et végétalisé, obtenu par retournement des nappes;
 - Soit indépendant, en béton armé ou autre matériau, placé en protection devant les nappes.[5]

c. Les colonnes ballastées

Cette technique est utilisée dans les sols mous; l'inclusion de renforcement est une colonne verticale en sable, gravier ou agrégats fortement compactés. En général, la mise en place par vibration. C'est un renforcement de sols ayant une faible résistance. Le rôle principal de la colonne est d'augmenter la résistance et le module du sol de fondation, en outre la colonne agit comme un drain vertical. [8]

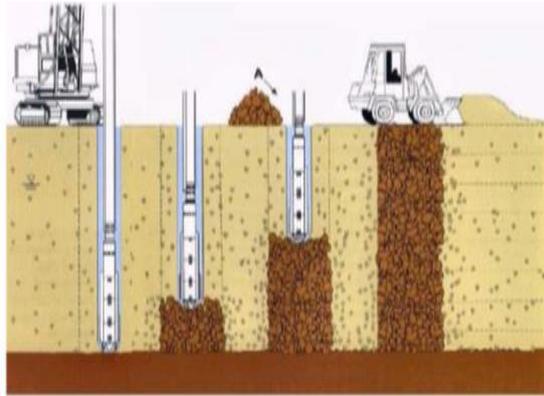


Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide

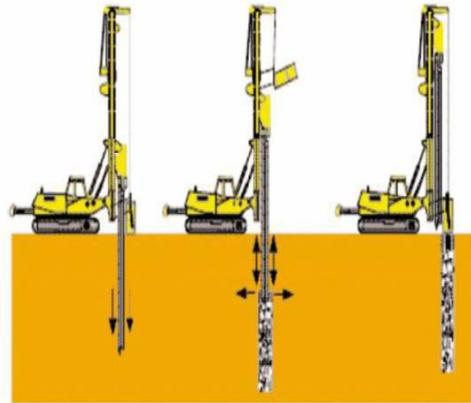


Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche

Figure I.19: Schéma de réalisation de colonne ballastées[8].

d. Les micros pieux

Cette technique consiste à mettre en place dans le sol de petits pieux injectés. Chaque pieu est constitué d'une barre métalliques (ou en bois) ou d'un tube, verticales (ou fortement inclinées), de quelques centimètres de diamètre entouré de coulis sur toute sa longueur. Les efforts principaux sont la traction et la compression, permettent d'améliorer la capacité portante.

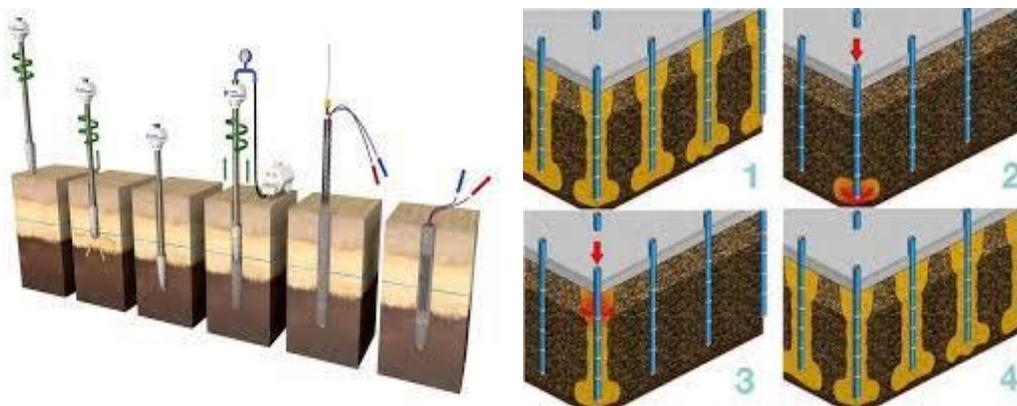


Figure I.20: Schéma de réalisation des micros pieux[8].

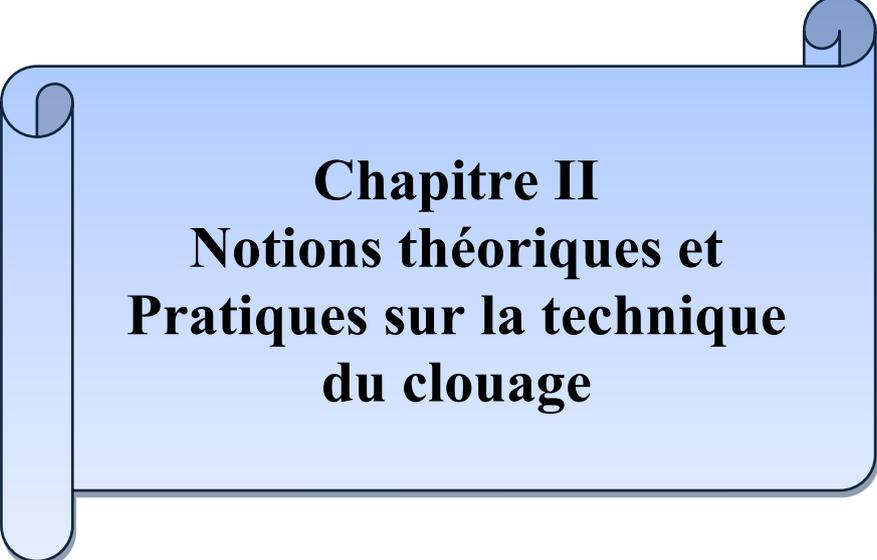
e. **Le clouage** : Cette technique sera traitée en détail dans le chapitre suivant.

I.7 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases essentielles de la compréhension des techniques de renforcement et de soutènement des sols. Il a souligné l'importance cruciale de la géotechnique dans la construction moderne, permettant d'ériger des ouvrages sur des sols de natures diverses grâce à des méthodes innovantes et respectueuses de l'environnement.

Nous avons exploré les principes fondamentaux du soutènement, en mettant en évidence la nécessité de maîtriser la poussée des terres et les différentes solutions pour y parvenir : murs poids, parois ancrées, semelles de fondation, etc. De plus, nous avons passé en revue les principaux types de soutènement utilisés dans les excavations, en distinguant les rideaux de palplanches, les parois composites (berlinoises, parisiennes) et les parois moulées, en soulignant leurs avantages, inconvénients et domaines d'application spécifiques.

Enfin, le chapitre a abordé les problématiques liées à la construction de remblais sur sols compressibles, en mettant en évidence les risques de rupture et de tassements, ainsi que les solutions de renforcement et d'amélioration des sols, telles que la terre armée, les géotextiles, les colonnes ballastées et les micro- pieux.



Chapitre II
Notions théoriques et
Pratiques sur la technique
du clouage

II.1. Introduction

Le clouage est utilisé depuis plus d'un siècle pour la stabilisation des pentes. Cette technique a été utilisée pour la première fois en France, Versailles, en 1972 – 1973 pour la réalisation d'un ouvrage de soutènement provisoire. Elle n'a connu cependant un réel essor que depuis la fin des années 80. Dans les années 1990, des recommandations relatives à la conception, au calcul, à l'exécution et au contrôle des soutènements réalisés par le clouage des sols ont été rédigées dans le cadre du Projet National Clou-terre. Il s'agit des recommandations Clouterre⁹¹ En Algérie, le clouage des sols est très pratiqué dans le domaine des travaux public.

II.2. Définition de clouage du sol

Le clouage des sols. C'est une technique de renforcement des sols in situ, en y installant dans le terrain à l'aide des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, éléments linéaires travaillant à la traction et au cisaillement, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol, Ces éléments (barres, cornières, tubes, etc.) peuvent être soit mis en place par fonçage ou battage, soit mis en place dans des forages et scellés par un coulis. Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement.

Dans un massif renforcé, on qualifie d'active la zone qui se déforme et de résistante, la partie rigide. Les mouvements du sol peuvent être très faibles ou plus étendus, la zone active peut rester stable ou, au contraire, s'effondrer suivant la nature et la qualité du renforcement. Les clous augmentent la cohésion du sol, ainsi que sa résistance à la traction et au cisaillement, et mis en place (par frottement) dans la zone résistante.

La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle. Le lieu géométrique des points de traction maximale T_{ma} permet de séparer le massif soutenu en deux zones (Figure II.1) :

- 1 - une zone active située derrière le parement et où les contraintes de frottement latéral exercées par le sol sur les clous sont dirigées vers l'extérieur.
- 2 - une zone résistante où les contraintes de frottement latéral sont dirigées vers l'intérieur et s'opposent ainsi au déplacement latéral de la zone active

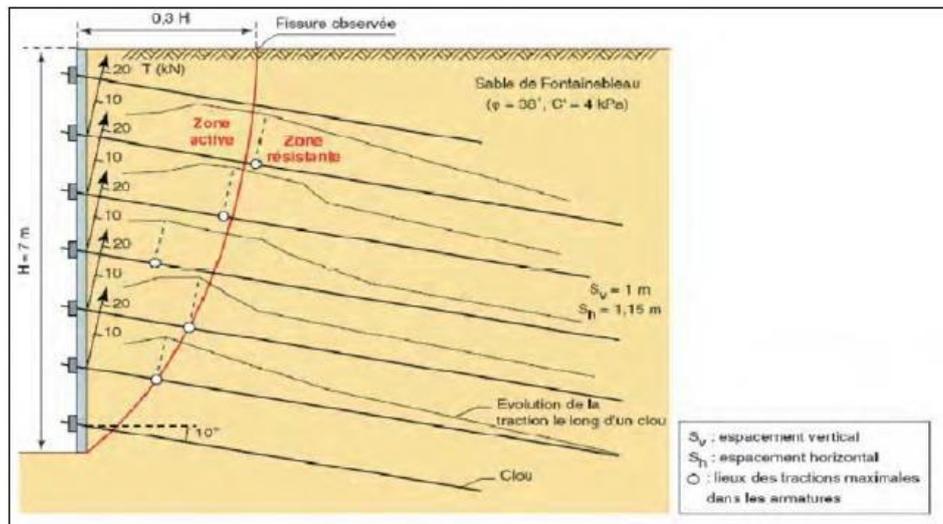


Figure II.1: Schématisation de la zone active et de la zone résistante(d’après les recommandations Clou-terre 91) [9].

- Zone d’influence de stabilité

Le terrain environnant la paroi clouée fait partie intégrante de l’ouvrage. On distingue plusieurs parties (Figure II.2) :

- **Zone 1** : Zone de fortes sollicitations des armatures au sein de laquelle peuvent se manifester des problèmes de stabilité interne du massif cloué. Cette zone de terrain s’étend jusqu’à $0,3 - 0,5 H$ à l’arrière du parement (H étant la hauteur de la paroi).
- **Zone 2** : Zone où l’on peut observer un déplacement d’ensemble du massif cloué. Elle est située à l’arrière de l’ouvrage. Elle s’étend dans un secteur situé entre L (longueur des clous les plus longs) et $1,5 H$, comptés depuis le parement.
- **Zone 3** : Zone dans laquelle peut se manifester un phénomène de stabilité général de grand glissement. Elle s’étend jusqu’à $3 H$ à l’amont ainsi qu’à l’aval du parement [9].

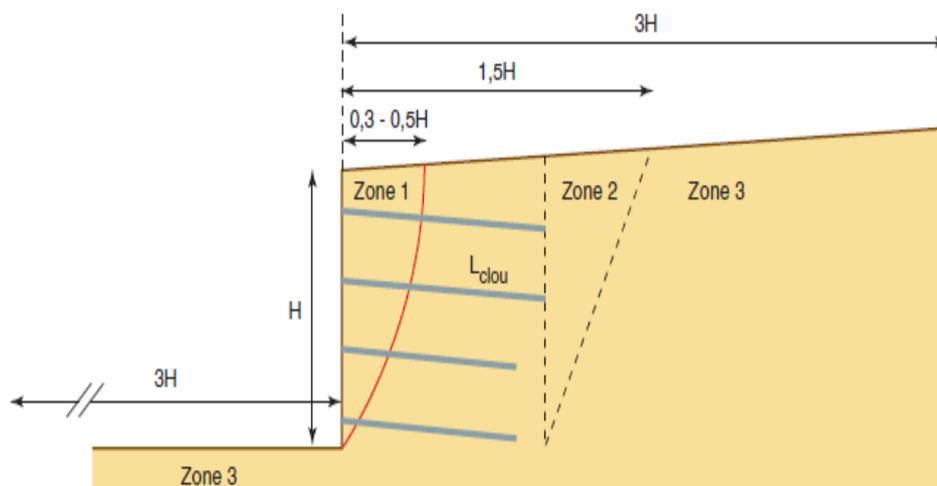


Figure II.2: Zone d’influence - terrains associés [9].

II.3. Utilisation des parois clouées

La technique de clouage s'emploie dans deux domaines (figure II.3):

II .3.1 Stabilisation des pentes naturelles

Le clouage des pentes consiste à améliorer leurs stabilités. Les inclusions sont souvent et habituellement placées perpendiculaires par rapport à la surface de glissement (rupture) potentielle. Elles travaillent essentiellement par cisaillement. Ce type de clouage est souvent utilisé en site montagneux, à titre préventif, et pour les remblais des voies ferrées (inclusions verticales) (Figure II.3).

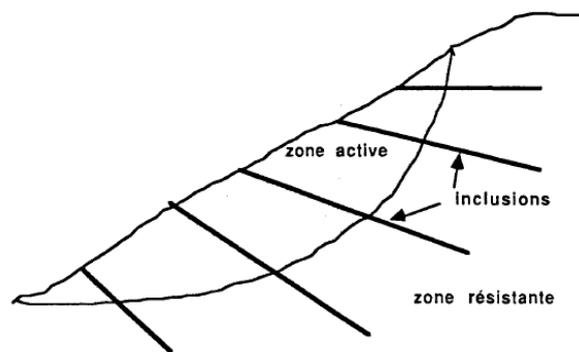


Figure II.3: Stabilisation d'une pente instable par clouage [10].

II .3.2 Le soutènement des excavations (pentes artificielles)

La technique de clouage peut également être utilisée pour soutenir les parois d'une fouille, les éléments linéaires (barres, cornières, tubes..) sont mis en place Horizontalement au fur et à mesure que l'on terrasse l'excavation et sont sollicités par la déformation progressive du massif. Ils travaillent essentiellement en traction ainsi qu'au cisaillement. La figure II.4 montre le schéma d'un mur de soutènement réalisé par clouage.

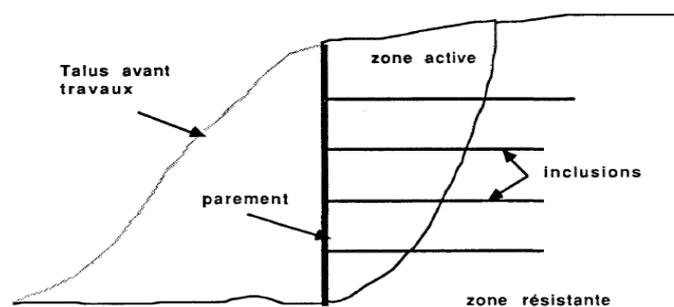


Figure II.4: Stabilisation d'une Excavation (pente artificielles) [10].

II .4 Soutènement par clouage

II .4.1 Historique

Le clouage est utilisé depuis plus d'un siècle pour la stabilisation des pentes, mais plus récemment pour le soutènement de fouille. Deux méthodes en sont à l'origine :

•Le renforcement d'ouvrages miniers où le boulonnage était d'usage courant il y a déjà un demi-siècle.

•La méthode autrichienne de construction de tunnels qui était utilisée dans des matériaux rocheux et que les constructeurs ont appliquée au soutènement des têtes de tunnels dans des sols plus meubles. À également été appliquée à la stabilisation des pentes rocheuses depuis le début des années 1960.

Le premier chantier de clouage, en tant que soutènement de fouille, a été réalisé en France en 1973 (le long d'une voie ferrée semi-enterrée), pour des ouvrages provisoires.

C'est à partir de 1986 que va être réalisé un programme de recherche sur le clouage des sols 3 projet CLOUTERRE, Ce projet s'est conclu en 1990 par la rédaction des "Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols". Une norme expérimentale XP P 94-240 concernant ces ouvrages a également été publiée en août 1998. Depuis, de nombreuses parois clouées ont été réalisées ; quelques-unes sont décrites ci-dessous.

II .4.2 Méthode de construction et application de clouage du sol

La construction d'un mur en sol cloué appliquée au soutènement de fouille sont généralement construits en plusieurs étapes se fait par phases successives de haut en bas et il implique les étapes suivantes : (Figure II.5).

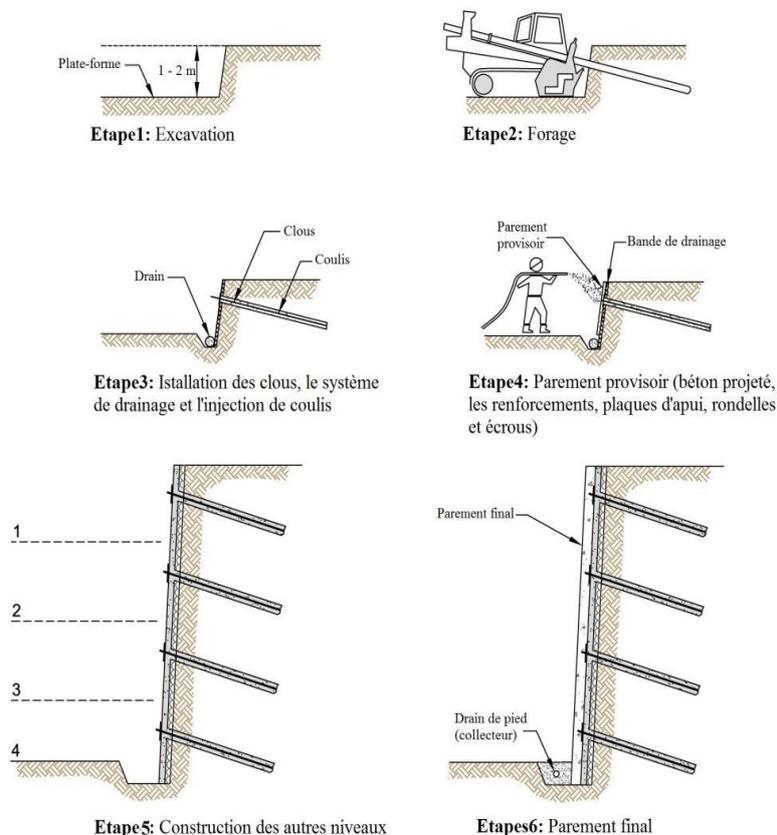


Figure II.5: Etapes de construction d'un mur cloué.

Étape 1 : Terrassement

Un terrassement est tout d'abord effectué sur une hauteur variable suivant la tenue du terrain (de l'ordre de deux mètres). Le terrassement se fait sur une longueur de quelques dizaines de mètres.

Les chantiers de clouage se situent le plus souvent le long des voies de communication (existantes ou futures) et présentent donc une longueur importante comparée à la hauteur terrassée.

Étape 2 : Forage

Le forage des trous se fait à une longueur et un diamètre spécifiés pour installer les clous. Il ya deux types de processus qui peuvent être effectués après terrassement, le clou peut être directement poussé dans le sol à l'aide des équipements appropriés dans lequel le clou lui-même fait son chemin vers l'avant. Alternativement, un trou peut être foré avant de mettre le clou à l'aide d'un équipement de forage. Ce dernier processus est couramment utilisé (Figure II.6).Après l'achèvement du forage, il est procédé au nettoyage des résidus restants dans les trous.



Figure II.6: Forage des trous.

Étape 3 :

a) Installation des clous et injection du coulis de ciment

Les clous sont mis en place par plusieurs techniques (Figure II.7) :

➤ **Le battage** : Un mouton lourd frappe la tête du clou à une fréquence faible (0.3 à 1 Hz).



Figure II.7: Battage d'une cornière.

➤ Le vibrofonçage

C'est l'association du fonçage et des vibrations. Une charge fixe appuie en tête de clou qui est soumis à des vibrations à hautes fréquences (50Hz).

➤ Le forage et le scellement

Un trou est foré à l'aide d'un outil approprié (tarière ,tricône, taillant, couronne diamantée), de diamètre généralement compris entre 6et 15 cm. Le clou muni de centreur est mis en place puis scellé par du coulis de ciment(Figure II.8) .L'injection peut se faire sous différentes pressions qui restent assez basses (100kPa).



Figure II.8: Forage pour mise en place et scellement d'une barre.

Le clou muni de centreur est mis en place puis scellé par du coulis de ciment. L'injection peut se faire sous différentes pressions qui restent assez basses (100 kPa).



Figure II.9: Mise en place d'une barre d'acier après forage.

Le coulis est également injecté dans le trou de forage. À ce stade, un tuyau de jointoiment est normalement fixé à l'armature pendant l'insertion dans le puits foré. Le trou de forage est alors rempli avec un coulis de ciment à travers le tuyau. Le coulis est injecté au niveau du point de trous de forage la plus basse grâce à un tube plongeur. Les trous de forage sont remplis progressivement du bas vers le haut et le tube plongeur est retiré à une vitesse lente même que le trou est rempli d'éviter les vides dans le coulis. Une machine à injection de coulis est présentée sur la figure II.10.



Figure II.10: Exemple de machine à injection.

b) Installation éventuelle d'un système de drainage

Les bandes de drain sont installés sur la face d'excavation, de manière continue à partir de la partie supérieure de l'excavation à légèrement au-dessous du fond de l'excavation. Les drains sont placés entre les clous adjacents et sont déroulés jusqu'à la prochaine levée de l'excavation (Figure II.11).



Figure II.11: L'installation de la bande de drainage avant la première mise en place du béton projeté.

Étape 4 : Construction provisoire de béton projeté

Un système de parement provisoire est ensuite construit pour supporter la section de sol avant la prochaine levée de sol excavé. Le parement le plus typique provisoire est constitué d'une couche de béton projeté renforcé légèrement couramment 100 mm d'épaisseur (Figure II.12). L'armature est constituée généralement d'un treillis soudé métallique, qui est placé à peu près au milieu de l'épaisseur de revêtement. A chaque partie excavée, le drainage vertical est déroulé vers le bas de la partie ultérieure. Au fond de l'excavation, la bande de drainage est liée à un drain de collecte horizontal au pied de l'ouvrage.



Figure II.12: Application de béton projeté avec treillis soudé.

Étape 5: Construction des niveaux suivants

Une fois les différentes phases de la première période sont effectuées, l'excavation de la deuxième peut être entreprise, et ainsi de suite jusqu'à ce que la profondeur totale de l'ouvrage soit atteinte (figure II.13).



Figure II.13: Technique d'excavation par niveau ; niveau 1 terminé, niveau 2 commencé.

Étape 6 : Construction de la finition

Une fois le fond de l'excavation est atteint et les clous sont installés et testés, le revêtement final (parement) est construit. Le revêtement final (parement définitif) peut être constitué de béton armé, de béton projeté renforcé ou de panneaux préfabriqués. Des trous de vidange, un drain de fond et des fossés de drainage sont ensuite installés pour décharger l'eau qui peut se rassembler dans le drain de bande continue.

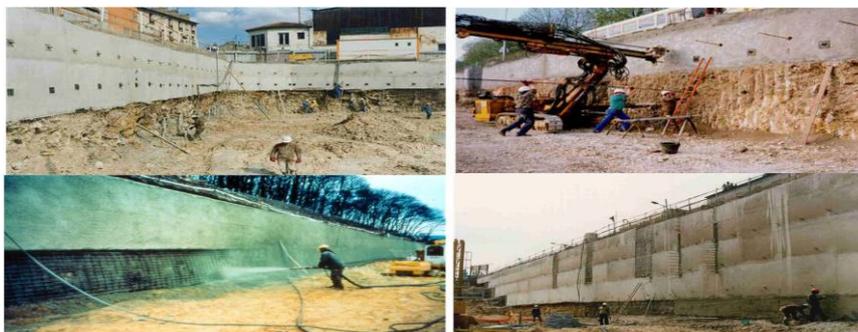


Figure II.14: Procédure de réalisation.

II.5. Catégories de soutènement

Il en ressort que les ouvrages cloués se répartissent en deux grands catégories :

II.5.1 Le soutènement par barres courtes « Turinoise »

($L = 0,5$ à $0,6 H$. L = longueur des armatures, H = hauteur du soutènement) mais relativement serrées: une à deux armatures par mètre carré de parement. Dans cette catégorie se situent principalement les murs de type « Turinoise », où les armatures sont mises en œuvre par battage ou vibrofonçage. Cette technique est utilisée préférentiellement dans les sols pulvérulents. Un ouvrage de type Turinoise est présenté sur la figure II.15.

II.5.2 Le soutènement par barres longues

Par barres scellées ($L = 0,8$ à $1H$) pour un terre-plein horizontal, $L = 1$ à $1,4 H$ pour les ouvrages surmontés d'un talus) mais plus espacées : une armature pour 3 à 6 m² de parement. D'une manière générale on trouve dans cette catégorie les ouvrages à barres scellées dans des forages. Les terrains concernés sont très divers (moraines, schistes, marnes, marne- calcaires) et souvent compacts ou cohérents. Le choix entre ces deux variantes s'effectue d'après les possibilités de l'entreprise, la nature du sol, et bien sûr en fonction du coût de réalisation.

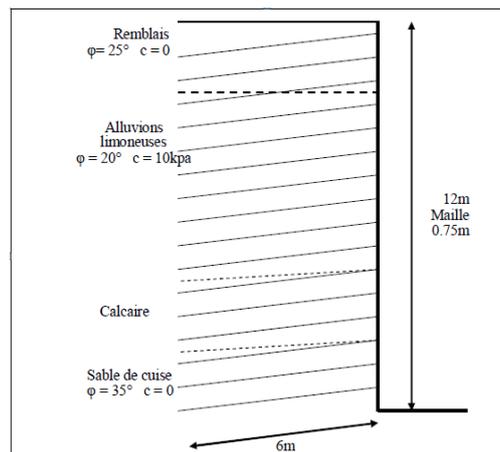


Figure II.15: Exemple d'Hurpinoise, Schéma d'implantation du chantier des INVALIDES (PARIS) 1974[11].

II.6. Procèdes de construction de la paroi clouée

II.6.1 Définition

La technologie de construction des murs cloués consiste à renforcer un sol en déblai, au fur et à mesure de son excavation, par la mise en place de barres passives, peu inclinées sur l'horizontale, travaillant essentiellement à la traction. Ces barres peuvent également travailler partiellement à la flexion et au cisaillement. C'est par le biais du frottement qui s'exerce entre le sol et les barres que ces dernières peuvent se mettre en traction et tenir la structure. On construit ainsi progressivement et de haut en bas un massif de sol renforcé. Pour éviter que la terre ne s'écroule entre les barres, on doit placer un parement généralement constitué d'un treillis soudé et d'un béton projeté. Ce parement peut être vertical, incliné à des angles très variables ou constitué de redans. Le béton n'a ici aucun rôle de soutien de la structure. Il permet

de protéger la terre de l'érosion et empêche des morceaux de terres de tomber de nos jours c'est une technique extrêmement répandue car le comportement des ouvrages est satisfaisant et le coût de la mise en Suivre et inférieur à celui des murs en L pour la de mur.

a) Les parois clouées

Des barres d'acier (clous) sont scellées dans des forages quasi horizontaux, préalablement creusés dans le terrain au moyen d'un coulis ou d'un mortier de ciment. Des treillis soudés sont fixés au parement de la fouille et renforcés au droit des clous. Un voile de béton, d'une épaisseur courante de 15 à 20 cm, est ensuite réalisé en béton projeté. L'excavation de la fouille se fait de haut en bas, par phases successives correspondant à quelques mètres de hauteur. Cette technique, souple d'emploi et économique, permet d'assurer un soutènement provisoire des fouilles dans tous les types de terrains en l'absence d'eau.

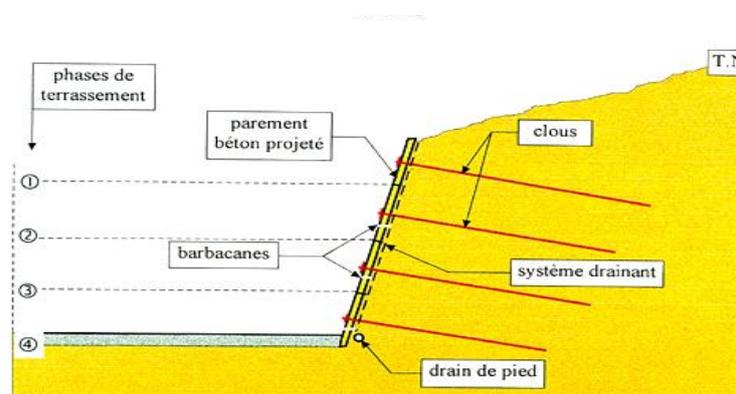


Figure II.16: Schéma représenté la paroi clouée [3].

b) Les parois en panneaux préfabriqués en béton

La technique consiste à mettre en place des éléments résistants (panneaux préfabriqués en béton) dans une saignée remplie d'un coulis liquide à base de bentonite ou auto durcis sable à base de bentonite ciment. Cette saignée est réalisée avec des matériels identiques à ceux utilisés pour les parois moulées. La continuité de la paroi est assurée par des joints de type "water stop" interposés entre chaque panneau. Les parois en panneaux préfabriqués constituent des soutènements définitifs (d'épaisseur réduite compte tenu des performances mécaniques du béton des éléments préfabriqués) présentant, côté intérieur à la tranchée, un aspect de parement homogène et régulier.

II.7. Éléments de la structure clouée

Différentes composantes d'un clou de sol cimenté sont discutées dans cette section. La section transversale d'une paroi clouée ainsi que des photographies de terrain de différents composants.

II.7.1 Les barres de renforcement en acier

Des barres d'acier d'armature pleine ou creuse (avec une force minimale de 415 kPa) sont le composant principal du système de clouage du sol. Ces éléments sont placés dans des trous en place.



Figure II.17: Des barres d'acier d'armature pleine ou creuse utilisées dans le clouage.

II.7.2 Centreurs

Matériau PVC, qui est fixé sur le clou de sol pour garantir que le clou de sol est centré dans le trou de forage, les centreurs en PVC sont disponibles pour tous les diamètres de trous et clou configurations.

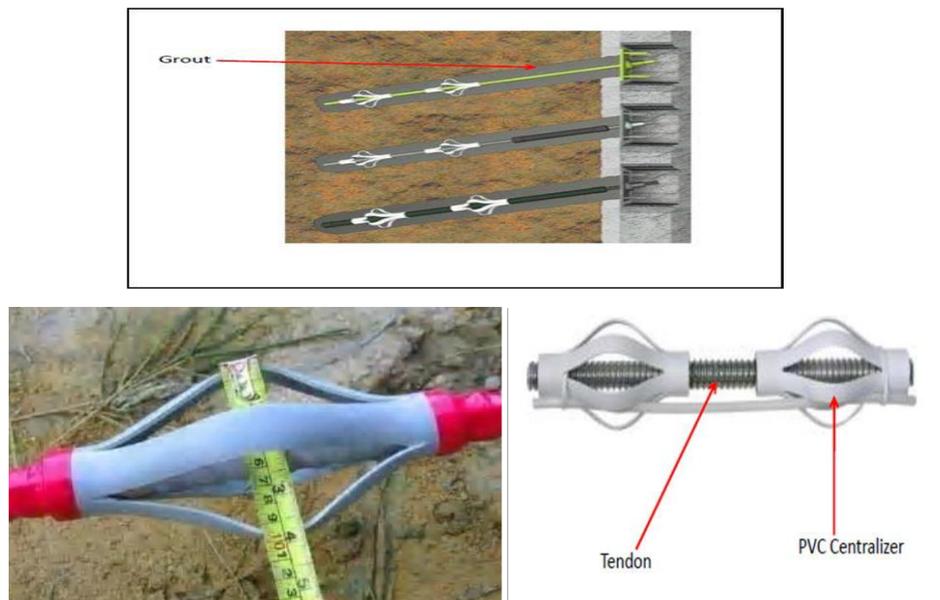


Figure II.18: Les centreurs PVC typiques attachés à une barre d'acier du clou avant installation.

II.7.3 Injection du coulis de ciment

Le coulis est placé dans le trou de forage préalablement percé après le clou est placé. Le coulis a pour fonction principale de transfert de contraintes à partir de la masse de clou. Le coulis fournit également un niveau de protection contre la corrosion de clou du sol. La méthode d'injection du coulis utilisée pour la mise en œuvre des barres, dépend de la technique de forage et de l'application. La méthode la plus utilisée est l'injection simultanée au forage. Elle garantit que le coulis de scellement est présent sur toute la longueur de l'ancrage. L'unité d'injection consiste classiquement en un malaxeur et une pompe.

Le choix de la pompe d'injection dépend de l'application pour un forage à injection simultanée, une pression d'injection maximum de 7 bars est suffisante. Dans l'argile, une pression de 17 bars peut être nécessaire. La consommation du coulis de ciment dépend des facteurs suivants :

- . a) La technique d'injection et de forage utilisée,
- . b) La nature du sol,
- . c) La vitesse



Figure II.19: Pompe d'injection et malaxeur de coulis de ciment.

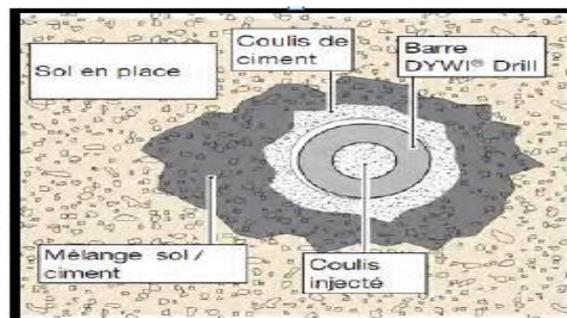


Figure II.20: Section d'une barre creuse injectée.

II.7.4 Tête de clou

La tête du clou est l'extrémité filetée de clou du sol qui dépasse de la paroi opposée. Il s'agit d'une structure de forme carrée en béton qui comprend la plaque d'appui, les écrous hexagonaux, la rondelle et les goujons. Ces derniers sont des éléments en acier, qui relient les clous de sol au revêtement (la face du parement). La plaque d'appui, les écrous hexagonaux et les rondelles assurent une liaison entre la barre d'acier et le parement initial ; tandis que les goujons de tête relient l'extrémité du clou et le parement final (Figure II.21).

Le but de la plaque d'appui est de répartir la force appliquée à l'extrémité du clou sur le revêtement initial et le sol derrière. Elle est placée quand le béton projeté est encore frais, mais pas trop enfoncée dans le coulis.



Figure II.21: Détails sur la tête des clous.

II.7.5 Caractéristiques du parement

Le parement est la partie visible de l'ouvrage, sur laquelle portera l'essentiel des observations au cours de l'inspection. On n'envisage ici que le cas d'un parement en béton armé, qui est le plus fréquent. La réalisation de ce parement s'inscrit dans l'enchaînement des phases de construction et de ce fait son exécution s'effectue de haut en bas avec des reprises correspondant aux passes de terrassement. La mise en œuvre de la première couche de béton de la seconde passe de terrassement doit être exécutée de façon à éviter les infiltrations d'eau du terrain à travers le parement, on pourra réaliser une liaison en forme de baïonnette entre les deux passes de terrassement (Figure II.22). La hauteur de la première couche de béton en contact avec le terrain est supérieure à la seconde, si bien que le raccordement fait pas au même endroit.



Figure II.22: Liaison en forme baïonnette entre deux passes de bétonnage.

a) Béton projeté

Cette technique, la plus couramment utilisée dans les parois clouées, consiste à projeter du béton à prise rapide sur la surface rocheuse brute, à l'aide de jets d'air comprimé et de liquide minéral qui accélère la prise du béton au moment de la projection tout en conservant une bonne plasticité au béton jusqu'au contact du support. Il peut être projeté par voie sèche ou humide. (Figure. II.23).

➤ La projection par voie sèche

Le mélange ciment + granulats est réalisé préalablement sans eau, l'ajout d'eau se faisant directement au niveau de la souplesse et d'atteindre de grandes distances de projection par rapport à la voie humide.

➤ La projection par voie humide

Il s'agit de projeter un béton mouillé mélangé en malaxeur.

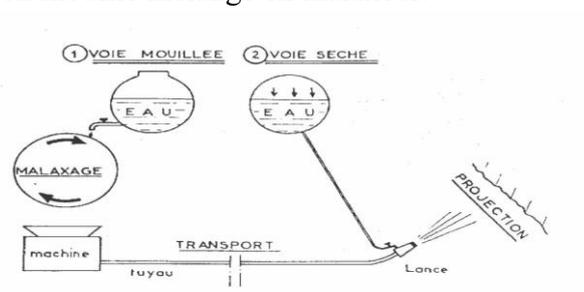


Figure II.23: Schématisation de la projection par voie sèche et humide.

Les avantages du béton projeté

Par rapport au béton coffré, le béton projeté présente plusieurs avantages :

- L'adaptation au sol support est optimale.
- L'exécution de voile mince de grande surface est plus facilement réalisable.
- La protection très rapide des talus récemment terrassés est réalisable (ne nécessite pas la mise en œuvre de coffrage lourd et encombrant).
- L'aspect extérieur d'un parement peut apparaître dans certains cas plus esthétique (adaptabilité à la forme).
- La résistance des bétons projetés est généralement proche de celle des bétons coffrés. Des résistances de 30 MPa sont facilement atteintes.
- Sécurité améliorée.

b) Le ferrailage (treillis soudés)

Des aciers sont mis en œuvre afin de reprendre les efforts de traction développés dans la section. Leur emploi peut s'avérer nécessaire pour reprendre les contraintes de cisaillement lorsque la section de béton est insuffisante. Dans le cas de la réalisation d'un voile béton, le ferrailage est généralement constitué de nappes de treillis soudés. Des filants peuvent être mis en œuvre pour augmenter les sections d'acier. Des renforcements localisés sont positionnés au droit de l'application d'efforts ponctuels lorsque ceux-ci dépassent la capacité de la section de béton.

c) Drainage

Les dispositions adoptées pour le drainage des massifs cloués dépendent de la nature des terrains et l'exposition de l'ouvrage aux circulations aquifères. Les moyens usuels sont les suivants :

Barbacanes : en pied d'ouvrage ou placées à plusieurs niveaux (mais qui peuvent être à l'origine de « coulures » peu esthétique) (Figure II.24).



Figure II.23: Barbacanes placées à plusieurs niveaux.

Ces drains sont conseillés dans les terrains de faible perméabilité ou hétérogènes. Ils sont inclinés vers le haut (le plus courant) ou vers le bas, et nécessitent un entretien. Ils peuvent déboucher en parement ou dans un fossé, mais aussi dans certains cas être reliés à un collecteur enterré, sans être visibles de l'extérieur, comme schématisé sur la (Figure II.25).

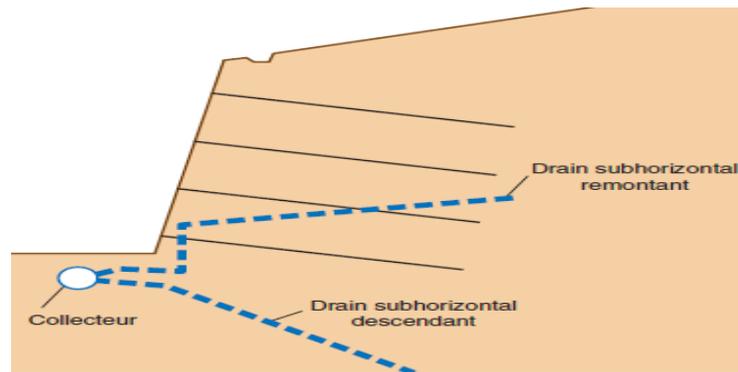


Figure II.24: Drains non visibles de l'extérieur, reliés à un collecteur interne.

II.8. Types de rupture

On distingue les ruptures internes et la rupture externe dans laquelle le mur se comporte comme un bloc monolithique. [12]

II.8.1 Ruptures internes

Les massifs en sol cloué peuvent périr suivant trois modes de rupture principaux(FigureII.26).

- 1) Rupture par cassure des armatures des clous;
- 2) Rupture en cours d'exécution, durant une phase de terrassement de trop grande hauteur;
- 3) Rupture par défaut d'adhérence des clous.

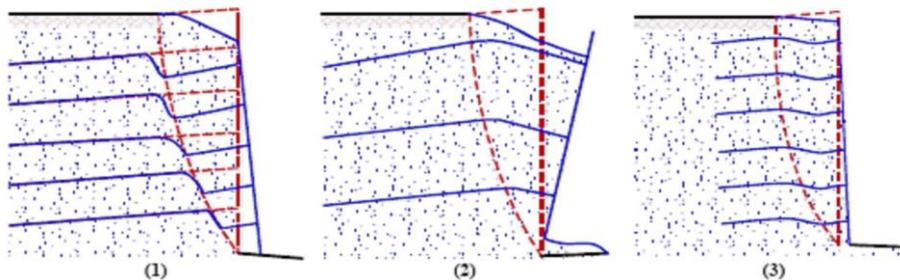


Figure II.25: Schémas des trois types de rupture[12].

II.8.2 Rupture globale

Ce type de rupture est commun à tous les ouvrages de soutènement, elle se produit généralement par glissement le long d'une surface de rupture englobant l'ouvrage et passant dans le sol de fondation (Figure II.27).

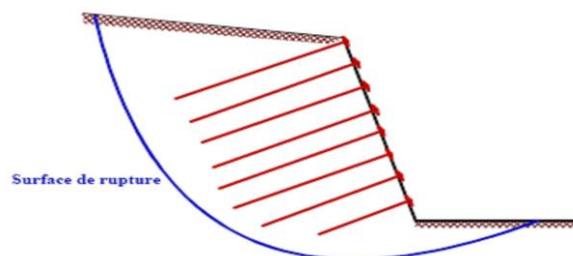


Figure II.27: Rupture globale [12].

II.9. Avantages du clouage du sol

Le clouage du sol présente les avantages suivants qui ont contribué à la généralisation de cette technique dans plusieurs pays :

II.9.1. Économie

L'évaluation économique de quelques projets a permis de conclure que le clouage du sol est définitivement une technique rentable par rapport aux autres techniques de renforcement.

II.9.2. Taux de construction

Des taux de construction rapides peuvent être atteints si un équipement de forage adéquat est utilisé. Le béton projeté est également une technique rapide pour la mise en place du parement.

II.9.3. Inclinaisons de parement

Comme mentionné précédemment, l'utilisation de béton projeté s'adapte facilement à un parement incliné, avec des avantages pour la stabilité globale, l'inclinaison vers l'arrière du parement réduit également les pertes de béton projeté dues au rebond.

II.9.4. Comportement à la déformation

De l'observation de structures clouées réelles a montré que la déformation horizontale au sommet du mur varie de 0,1 à 0,3 % de la hauteur du mur pour des murs bien conçus.

II.9.5. Flexibilité de conception

Une paroi souple clouée au sol peut être intégrée avec des ancrages au sol afin de limiter les déformations au voisinage des structures ou fondations existantes.

II.9.6. Fiabilité de conception dans les sols meubles

Les sols meubles présentent fréquemment des surfaces fragiles reliques qui peuvent ne pas être détectées lors de l'étude du site (Figure II.28). Le clouage du sol sur ces surfaces peut entraîner un facteur de sécurité et une fiabilité accrues, par rapport à d'autres solutions de stabilisation.

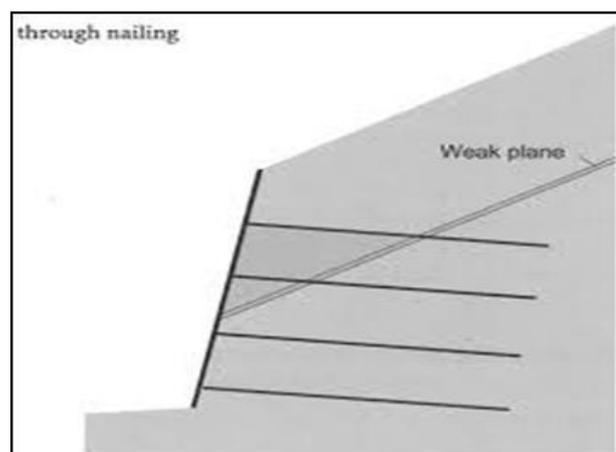
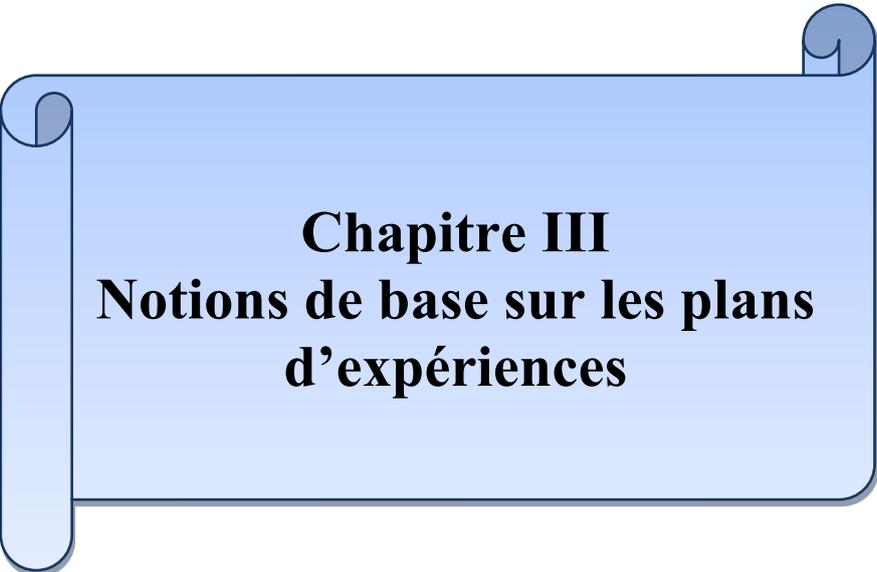


Figure II.26: Renforcement du plan faible par clouage.[13]

II.10 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré en détail la technique du clouage des sols, une méthode de renforcement in situ de plus en plus répandue. Après une introduction historique et une définition précise, le chapitre a mis en lumière les deux principales applications du clouage : la stabilisation des pentes naturelles et le soutènement des excavations. L'accent a été mis sur les étapes de construction d'une paroi clouée, depuis le terrassement initial jusqu'à la finition du parement, en passant par le forage, l'installation des clous, l'injection du coulis, la mise en place du drainage et la projection du béton. Les différents éléments constitutifs d'une structure clouée, tels que les barres d'acier, les centreurs, le coulis de ciment, la tête de clou et le parement, ont été décrits avec précision. Le chapitre a également abordé les différents types de rupture possibles, internes et globales, ainsi que les avantages significatifs du clouage des sols, notamment son économie, sa rapidité de construction, sa flexibilité de conception et sa fiabilité, particulièrement dans les sols meubles. La technique du clouage se présente donc comme une solution efficace et polyvalente pour les projets de génie civil modernes.



Chapitre III
Notions de base sur les plans
d'expériences

III.1 Introduction

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

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

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

III.2 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure III.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut..[14]

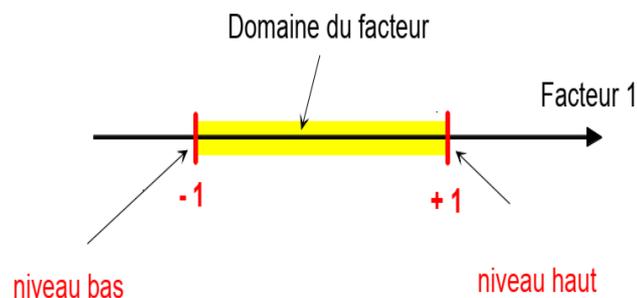


Figure III.1: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1.100[14].

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

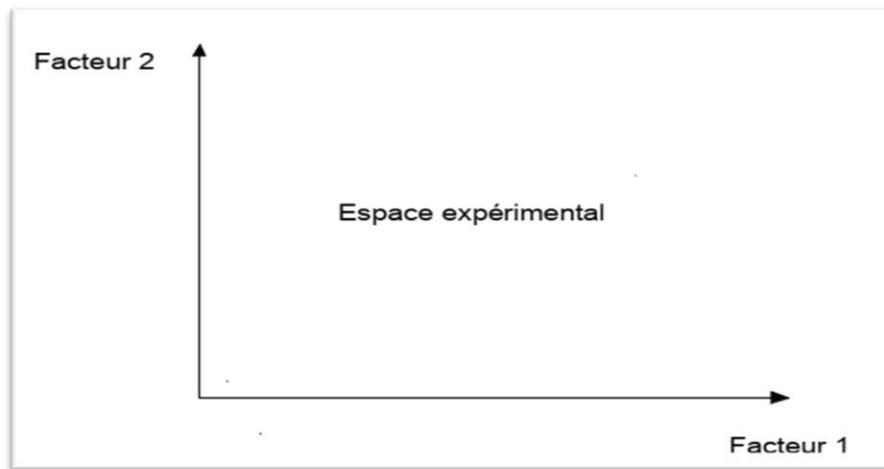


Figure III.2: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental [14].

III.2.1 Choix de la méthode d'expérimentation

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

III.2.2 Analyse des résultats

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

III.3. Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de **réponse**. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées **facteurs**. On parle donc des Facteurs qui influent sur une réponse. Les termes **facteur** et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences [14].

Facteurs continus

Facteurs discrets

Facteurs ordonnables

Facteurs booléens

III.4 Différents types des plans d'expériences

III.4.1 Plans factoriels complets

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

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

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

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

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

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

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

Tableau III. 2: Les matrices d'expériences.

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

III.4.2 Avantages et inconvénients des plans factoriels complets

Les plans factoriels complets sont des plans dits sans risque car ils permettent de déterminer tous les effets et toutes les interactions sans ambiguïtés. Le nombre d'essais nécessaire est au

moins égal au nombre total de coefficients à déterminer. Les essais sont réalisés de telle sorte que les coefficients sont estimés avec une variance minimale. Leur simplicité d'exploitation assure un bon "rendement" par rapport aux résultats obtenus. Néanmoins ils présentent une limite essentielle : le nombre d'essais augmente très rapidement avec le nombre de facteurs. On atteint déjà 128 expériences (2^7) pour 7 facteurs ce qui devient donc très vite difficile à réaliser dans la pratique [15].

III.5. Plans factoriels fractionnaires

III.5.1 Mise en œuvre

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

Néanmoins les plans fractionnaires nécessitent une phase de conception plus longue car l'interprétation qui résultera des résultats dépend essentiellement du choix de p. Plus le nombre p augmente, plus la charge expérimentale va diminuer mais au détriment d'un risque de plus en plus grand sur la qualité des informations tirées du plan. Il faudra donc évaluer les risques avant de démarrer l'expérimentation et les minimiser en construisant le plan fractionnaire adéquat. C'est le pari du plan fractionnaire.

a) Les matrices d'expériences fractionnaires de Taguchi

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

III. 5.2 Plan d'expériences de surface de réponse

a) Les plans composites centrés

Les plans composites centrés font appel à la méthodologie des surfaces de réponses, leur construction consiste à ajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ils sont

cependant assez “gourmands” en termes de nombre d'essais par rapport à d'autres types de plans mais ce nombre reste raisonnable lorsque le nombre de facteurs étudiés est faible (entre 2 et 4). Le nombre d'expériences dans un plan composite centré est donné par la relation suivante:

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

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

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

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

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

b) Les plans de Box-Behnken (BB)

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

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

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

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

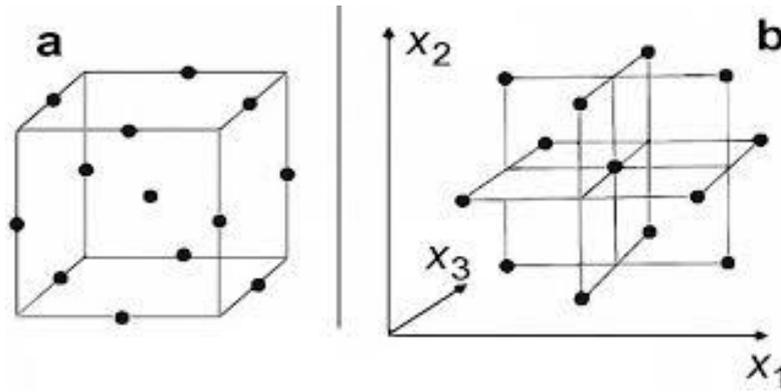


Figure III.3: Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs.

Remarque 1

Les plans de Box-Behnken pour 3 facteurs impliquent trois blocs, dans chacun, un plan factoriel 2² qui est représenté par chaque paire de traitement pendant que le troisième facteur reste fixé à 0. Donc le plan de Box-Behnken de 3 facteurs possède 15 essais (12 arêtes et 3 points au centre). En conséquence, les plans de Box-Behnken pour $m = 3$ sont donnés par :

X_1	X_2	X_3
$\pm b$	$\pm b$	0
$\pm b$	0	$\pm b$
0	$\pm b$	$\pm b$
0	0	0

Dont la représentation graphique est :

Il en est de même pour un nombre de facteurs $m = 4$ et $m = 5$. Dans le cas où $m = 6$ et $m = 7$, les BB sont construits à partir d'un plan d'expérience 2³ avec les $(m-3)$ autres facteurs fixés à la valeur 0 et répartis suivant un plan en blocs incomplets équilibrés pour $m = 7$ et un plan en blocs incomplets partiellement équilibrés pour $m = 6$, ce qui donne dans ce cas-là, un plan d'expériences qui n'est pas symétrique pour tous les facteurs.

Remarque 2:

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

III.6. La méthodologie des surfaces de réponse

III.6.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants. L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.[16]

III.6.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

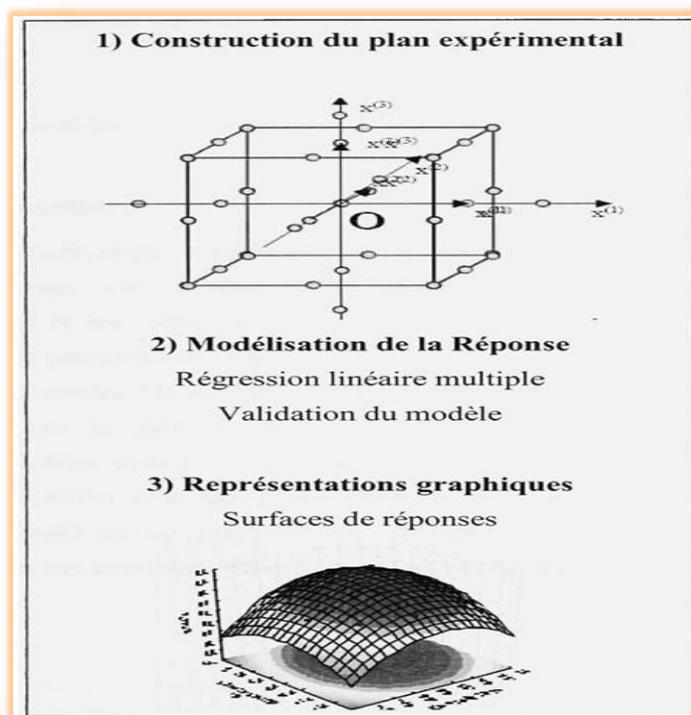


Figure III.4: Etapes de méthodologie de surface de réponse.

La figure III.7 schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses. Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative. Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présumé s'avère inadéquat. Les étapes de la RSM sont les suivantes :

a) Planification expérimentale

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points

pour l'expérimentation permettra de réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans

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

b) Modélisation

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_k à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire [17]:

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_p) + \varepsilon \quad (\text{III.3})$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme. Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme [17] :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (\text{III.4})$$

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

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

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{III.5})$$

Où:

X_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ε : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse.

Dans la phase d'expérimentation de RSM, il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle équation (III.5), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

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

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

Où:

$\hat{y} = [\hat{y}_1 + \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: Estimation de la vectrice réponse des n réponses observées.
 X : la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception
 b est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SSE définie par :

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

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

c) Validation des modèles :

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

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

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

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

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

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

Où :

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

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

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

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

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

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

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

III.6.3. Réseaux de neurones artificiels

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) s'est étendue dans des domaines très divers de l'industrie et des services. En géophysique les RNA ont été utilisés pour plusieurs méthodes, par exemples pour détecter les premières arrivées d'ondes sismiques [18]; [19]; classifier les différents signaux par l'inversion [20]; [21] ; transformer un problème de déconvolution sismique dans un réseau de Hope Field afin de réduire le temps de calcul [22]; pour caractériser la distribution de résistivité du sous-sol par l'inversion de données magnétotelluriques [23]et électromagnétiques [24]. Ils sont particulièrement utilisés pour résoudre des problèmes de classification, de prédiction, de reconnaissance des formes, de catégorisation, de mémoire associative et d'optimisation [25]. Par l'entraînement d'un système non linéaire de multiples variables, les RNA peuvent prédire la variable indépendante [26]. Par conséquent, les RNA constituent une technique d'approximation de systèmes complexes, qui sont difficiles à modéliser par les méthodes statistiques classiques. Puisqu'il existe un grand nombre de structures des réseaux de neurones artificiels, il est nécessaire de faire un résumé de leurs caractéristiques afin de choisir un réseau de neurone approprié au développement de ce mémoire.

a) Du Neurone biologique au neurone artificiel

Un neurone biologique est une cellule vivante consacrée au traitement de l'information (figure III.8). De son corps cellulaire ou soma, rayonnent de nombreuses dendrites (jusqu'à 100000) qui reçoivent des signaux provenant d'autres neurones ou cellules sensorielles. Ces signaux sont traités par le neurone qui transmet à son tour un signal, si certaines conditions sont réunies le long de son axone à d'autres neurones ou à de cellules effectrices (cellule musculaire par exemple) : On dit que le neurone est alors activé.

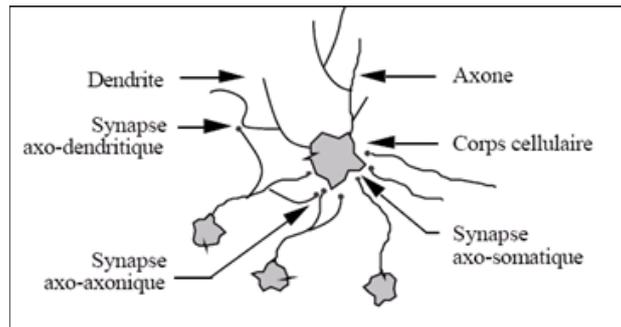


Figure III.5: Un neurone avec son arborisation dendritique.

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

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

Avec :

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

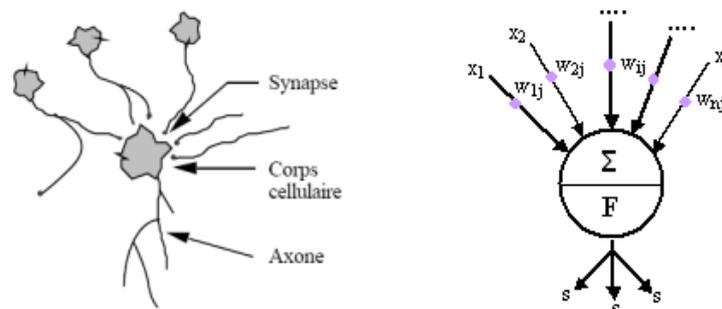


Figure III.6: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.

b) Les réseaux de neurones

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

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

- La nature des entrées et des sorties : Elles peuvent être :
- Binaire : (-1; +1) ou (0,1)
- Réelles.

- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées : Elle peut être :
- Booléenne
- Linéaire
- Affine
- Polynomiale de degré supérieur à deux
- La fonction d'activation du neurone qui définit son état en fonction de son entrée totale:

Elle peut être :

- Une fonction binaire à seuil ; dans ce cas on s'arrange pour que la forme de la fonction soit telle qu'on puisse utiliser la fonction de Heaviside (figure III.7.a) ou la fonction signe(Figure III.7.b) :
- Une fonction linéaire à seuil (figure III.8.a) : Soit SATUR la fonction à seuil
- Une fonction sigmoïde (figure III.8.b).
- La fonction de sortie qui calcule la sortie du réseau en fonction de son état d'activation ; en général cette fonction est considérée comme la fonction identité.

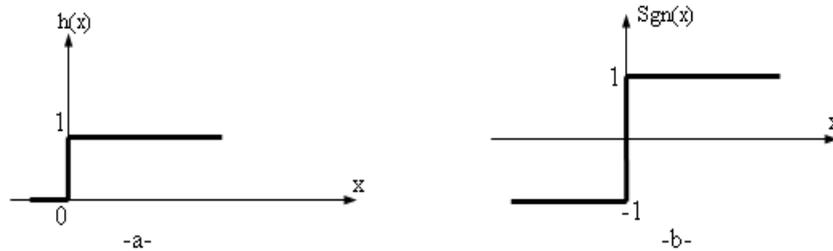


Figure III.7: a-Fonction de Heaviside, b-Fonction signe.

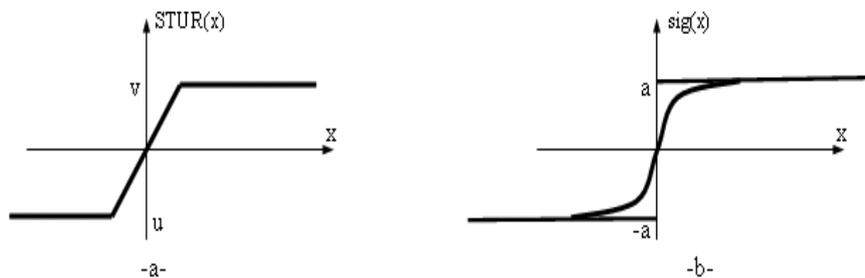


Figure III.8: a-Fonction linéaire à seuil, b-Fonction sigmoïde.

III.6.4 Types de modèles de neurones

a) Modèle d'un neurone à entré simple

Le scalaire d'entrée p est multiplié par le scalaire poids w pour former wp , un des termes de la somme. L'autre entrée, 1, est multipliée par le biais b , puis introduite dans la somme. La somme de sortie n , souvent dénommée entrée du réseau, passe dans la fonction de transfert f qui produit le scalaire de sortie à voir figure III.9.

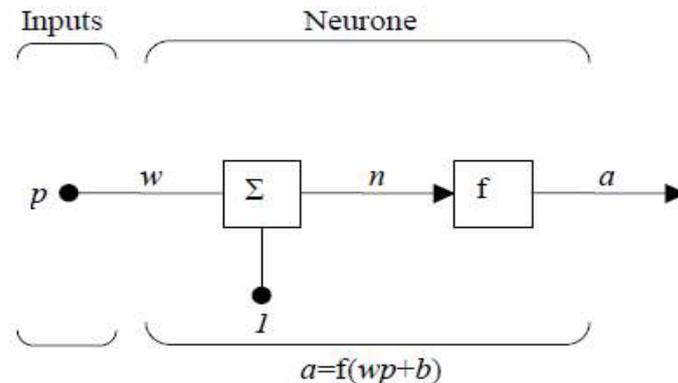


Figure III.9: Neurone à simple entrée.

Le neurone de sortie est calculé par l'équation :

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

Si par exemple

$$w=3$$

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

$$b=-1.5$$

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

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

b) Modèle d'un Neurone à entré multiples

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

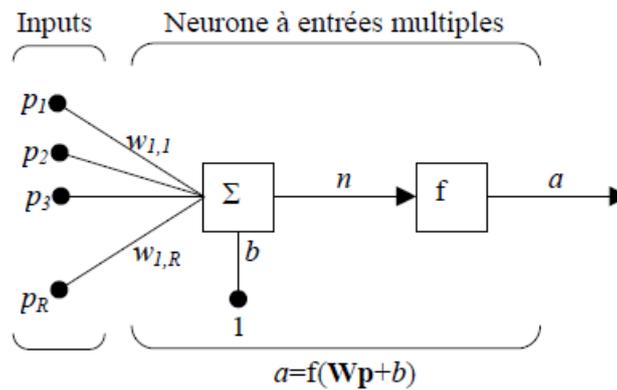


Figure III.10: Neurone à entrées multiples.

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

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

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

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

$$n = Wp + b \quad (\text{III.16}) \quad [27]$$

c) Apprentissage des réseaux de neurones

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

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

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

Sur la figure III.11 ci-dessous, on peut observer qu'au début de l'apprentissage, pour les premières itérations, l'erreur sur la base d'apprentissage est grande et peut légèrement augmenter étant donné que les poids initiaux sont choisis aléatoirement. Ensuite, cette erreur diminue avec le nombre d'itérations. L'erreur sur la base de test diminue puis augmente à partir d'un certain nombre d'itérations. Les poids retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test.

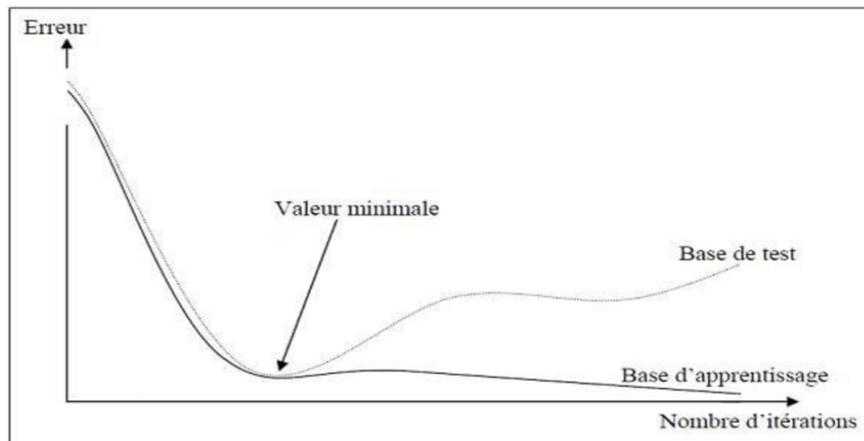


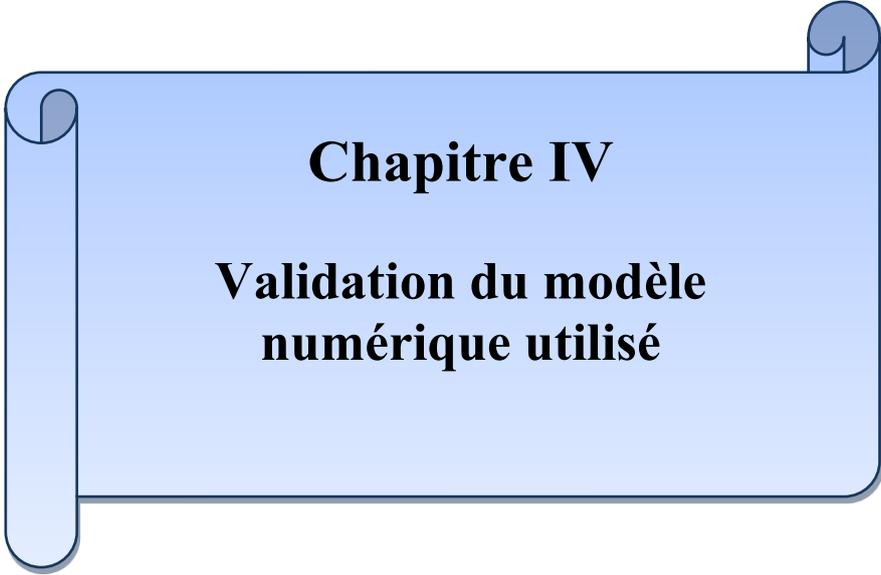
Figure III.11: Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.

III.7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré en profondeur le domaine des plans d'expériences, en soulignant leur importance cruciale dans l'optimisation des recherches scientifiques et des études industrielles. Nous avons examiné les concepts fondamentaux tels que l'espace expérimental, les différents types de facteurs, ainsi que les plans factoriels complets et fractionnaires, sans oublier les plans d'expériences de surface de réponse comme les plans composites centrés et les plans de Box-Behnken.

De plus, nous avons abordé la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) comme outils d'approximation pour les systèmes complexes. L'apprentissage des RNA, avec l'ajustement des poids des connexions, offre une approche prometteuse pour la modélisation et la prédiction.

En somme, ce chapitre fournit une base solide pour comprendre et appliquer les plans d'expériences dans divers domaines, en mettant en évidence leur capacité à maximiser l'information tout en minimisant les ressources et les coûts. La maîtrise de ces techniques permet aux chercheurs et aux ingénieurs d'optimiser les processus, d'améliorer la qualité des produits et de prendre des décisions éclairées basées sur des données expérimentales rigoureuses.



Chapitre IV

Validation du modèle numérique utilisé

IV.1 Présentation du logiciel Plaxis

Plaxis est un logiciel de simulation numérique développé spécifiquement pour les applications en géotechnique. Il repose sur la méthode des éléments finis et permet d’analyser les déformations et la stabilité des sols dans des conditions variées.

Le développement de Plaxis a commencé en 1987 aux Pays-Bas, pour répondre à un besoin d’analyse de l’impact des digues sur des sols argileux mous. Depuis, il a évolué pour inclure des versions 2D et 3D, et il est devenu un outil incontournable dans les études de fondations, de pentes, de tunnels, et d’excavations.

Le logiciel propose une interface graphique intuitive qui facilite la modélisation géométrique, la définition des matériaux, la mise en place des charges et des conditions aux limites, ainsi que la génération automatique du maillage. Les analyses sont basées sur la résolution de systèmes d’équations non linéaires, avec des calculs itératifs qui permettent de simuler le comportement réel des sols et structures.

IV. 2.Organigramme du code Plaxis 2D

Le plan général du programme du logiciel Plaxis 2Dest présenté dans l’organigramme (figure IV.1), il donne une brève description de ce programme.

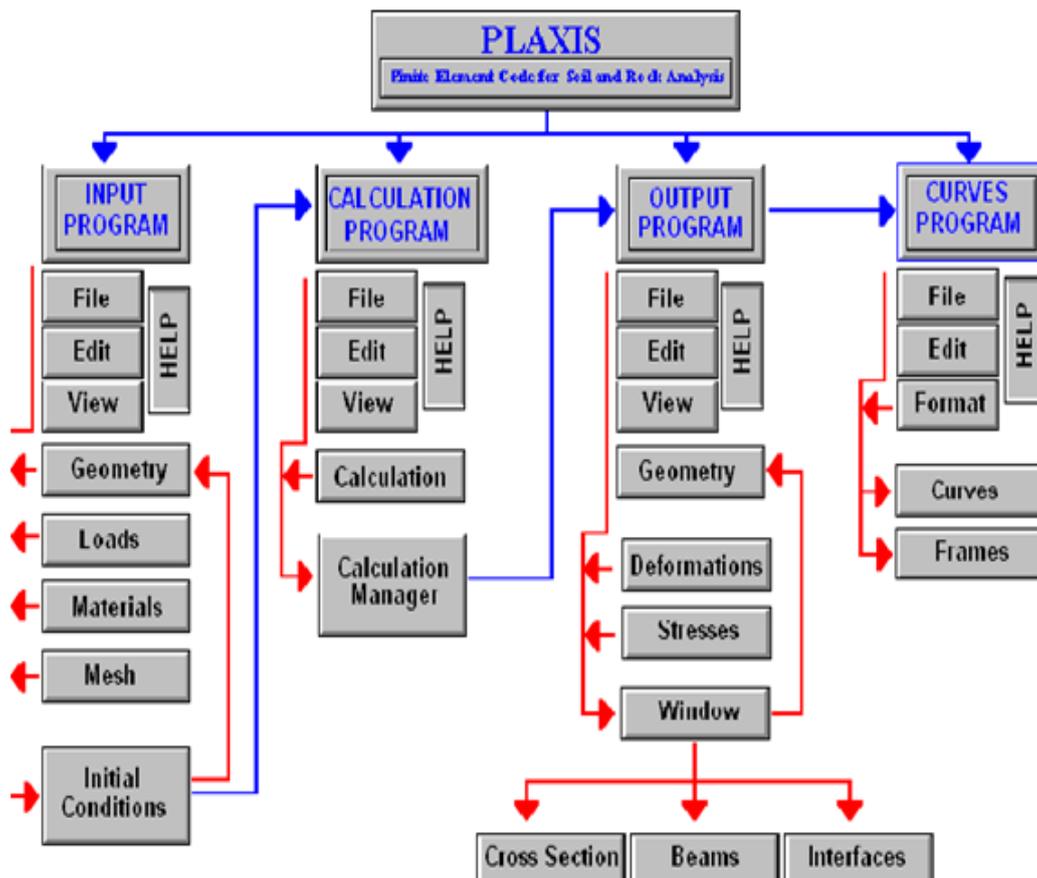


Figure IV.1: Organigramme du code Plaxis 2D[7].

IV.3 Modélisation par le logiciel Plaxis

IV.3.1 Introduction

Le clouage du sol s'est imposé comme une technique performante de renforcement, notamment en cas d'instabilité des pentes. Grâce à cette méthode, des talus instables peuvent être consolidés et stabilisés de manière fiable. Cependant, leur comportement mécanique doit être analysé avec précision.

Dans cette étude, l'analyse de l'interaction sol/clou est réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, qui repose sur la méthode des éléments finis. Cet outil permet de simuler de manière réaliste le comportement des parois renforcées et d'évaluer leur stabilité.

IV.3.2 Modélisation numérique

L'objectif principal de la modélisation est d'étudier l'influence des paramètres géométriques et mécaniques sur la stabilité de l'ouvrage. Le modèle comprend :

- La géométrie du sol et des structures,
- Les propriétés mécaniques des matériaux,
- La modélisation des clous comme éléments de plaque,
- L'application des charges et conditions aux limites.

IV.3.3 La démarche de modélisation

La modélisation comprend plusieurs étapes essentielles :

Pour que le logiciel Plaxis2D puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes les données du projet suivantes :

IV.3.3.1 Entrée des données

a) La géométrie du modèle

Le modèle géométrique adopté est modélisé avec des éléments triangulaires de 15 nœuds, utilisés pour générer un maillage d'éléments finis. La densité de maillage grossier est adoptée globalement mais affinée à une maille de densité fine dans les zones entourant chaque clou.

Le modèle de sol de Mohr-Coulomb et le problème de déformation plane sont utilisés, le comportement à long terme est simulé en utilisant des conditions d'analyse drainées. La figure IV.2 montre le mur de sol cloué simulé avec les dimensions et divers paramètres. Le modèle étudié mesure 30 m de long et 25 m de profondeur, avec une excavation de 10 m. Il comprend une couche de sol caractérisée par des paramètres physiques précis.

b) Caractéristiques des matériaux

- Propriétés des couches de sols et des interfaces

La couche de sol est définie par ses propriétés mécaniques (c , ϕ , E , ν , etc.), (tableau IV.1), les paramètres des clous utilisés sont la rigidité axiale EA et la rigidité en flexion EI (Tableau IV.2), les clous ont été modélisés comme un élément (plaque). La longueur des clous considérés est fixée à 7 m, leur inclinaison à 15° pour l'horizontale et pour les espacements vertical et horizontal, sont fixés à 1,0 m. Les interfaces entre les matériaux sont également prises en compte.

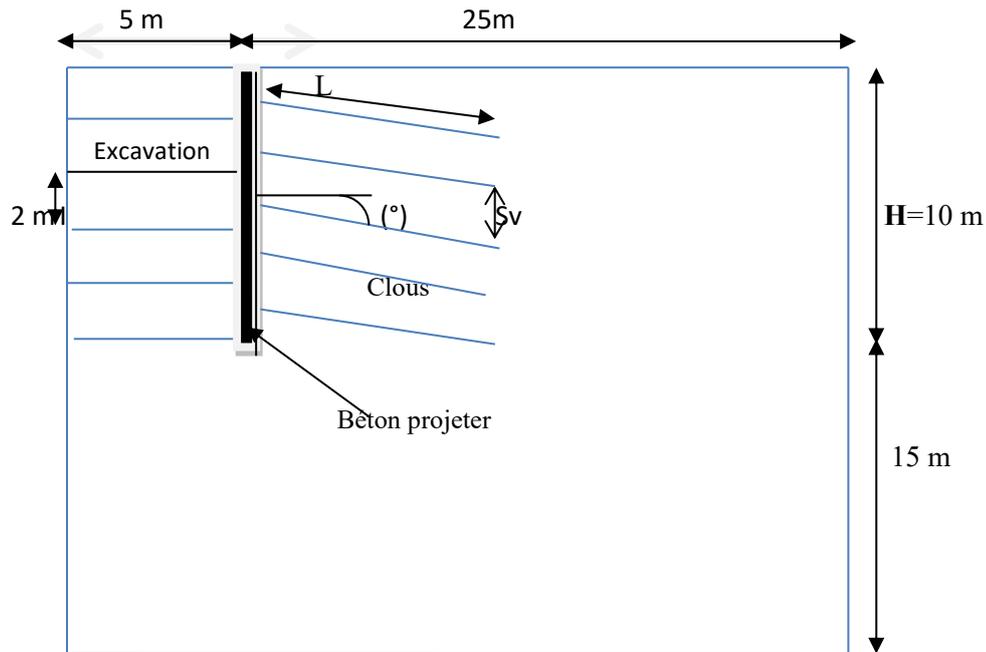


Figure IV.2: Vue en coupe du problème étudié.

Tableau IV.1: Paramètres mécaniques et physiques du modèle [28].et [29].

Paramètres	Modèle Mohr- Coulomb
Cohésion C (kN/m ²)	10
Angle de frottement φ (°)	27.5
Angle de dilatance ψ (°)	0.0
Poids volumique γ (kN/m ³)	19
Module de Young E (kN/m ²)	30.000
Coefficient de Poisson ν	0.3

Le revêtement en béton projeté a été considéré comme ayant une épaisseur de 20 cm, et également modélisé comme un élément (plate) avec une rigidité axiale (EA) de $4,2 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ et une rigidité à la flexion (EI) de $1,4 \times 10^4 \text{ kNm}^2/\text{m}$. L'inclinaison du mur ($\beta = 90^\circ$), le diamètre des clous (20 mm) et le diamètre du trou de forage (100 mm) sont également considérés comme des constantes.

Tableau IV.2: Caractéristiques des clous.

Raideur axial EA (kN / m ²)	Rigidité de flexion EI (kN.m ² /m)
2.29×10^5	$1,43 \times 10^4$

c) Conditions aux limite

Les limites du domaine sont fixées, pour que les conditions aux limites n'aient pas d'influence sur le comportement du modèle. En sélectionnant les blocages standards (Standard fixités), logiciel Plaxis 2D impose automatiquement un réglage standard des conditions aux limites générales du modèle géométrique (figure IV.3). Ces conditions aux limites sont générées suivant les règles suivantes:

- La limite horizontale inférieur comporte des blocages horizontaux et verticaux ($u_x = u_y = 0$).
- Les limites verticales comportent seulement des blocages horizontaux ($u_x = 0$)

d) Génération automatique du maillage

Un maillage plus raffiné est appliqué dans les zones sensibles comme autour des clous. Le modèle adopte le critère de Mohr-Coulomb pour simuler le comportement du sol, avec des analyses en conditions drainées.

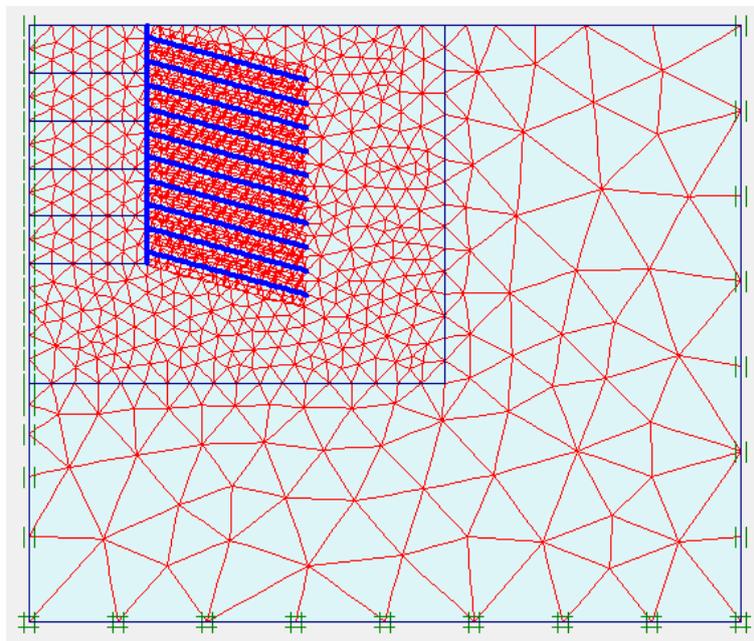


Figure IV.3: Maillage en éléments finis du modèle de référence.

e) Conditions initiales

Les pressions interstitielles et les contraintes initiales sont définies pour simuler l'état naturel du sol. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques)

(figure IV.4) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique)(figure IV.5).

- **Conditions hydrauliques** : La position de la nappe phréatique est considérée profonde et n'a aucun effet sur l'ouvrage.

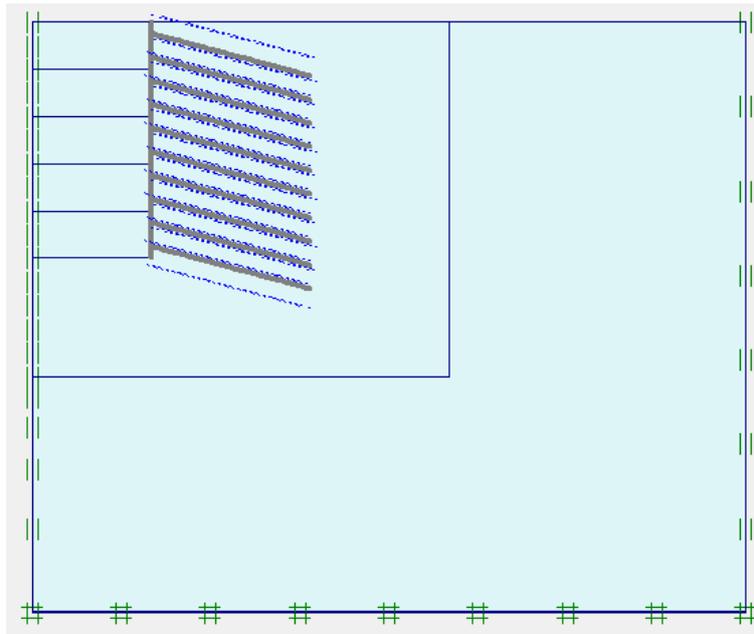


Figure IV.4: Conditions initiales hydrauliques du modèle de référence.

Contraintes initiales

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments de sol crée par défaut.(figure IV.5). On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de K_0 par défaut. La valeur de K_0 est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky. On garde le poids du sol à 1, ce qui correspond à une application totale de la gravité. $K_0 = 1 - \sin\phi$ (la formule de Jaky).

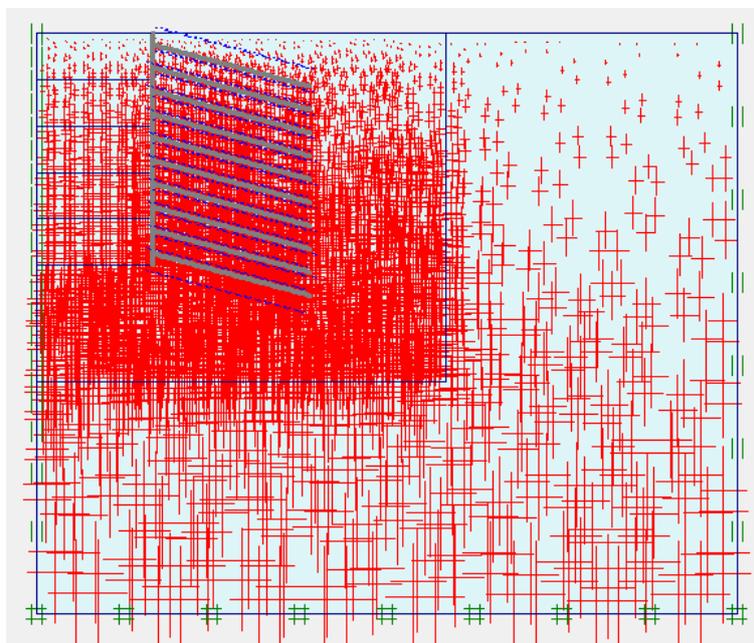


Figure IV.5: Conditions initiales mécaniques du modèle de référence.

IV.4.4 Procédure de calcul

Plusieurs phases sont simulées, y compris le creusement progressif et l'installation des clous. Le programme de calcul conduit des analyses en déformation plane menées soit par un calcul plastique, un calcul de consolidation ou un calcul en grandes déformations et calcul le coefficient de sécurité. Les calculs sont effectués en plusieurs phases, et les résultats sont présentés sous forme de cartes de déformation, déplacements et de coefficient de sécurité.

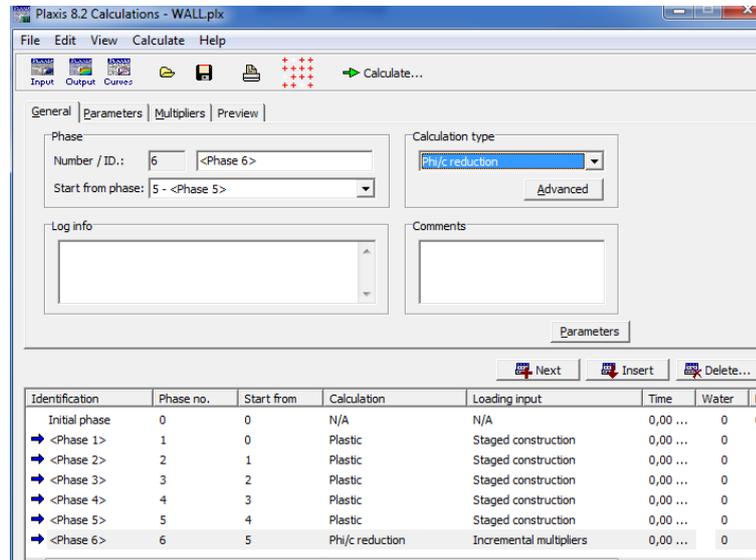


Figure IV.6: Phases de calcul utilisées pour le modèle de référence.

IV.3.5 Résultats analysés

Les déplacements verticaux, horizontaux et le facteurs de sécurité à chaque étape sont évalués et visualisés sous forme de cartes ou de courbes.

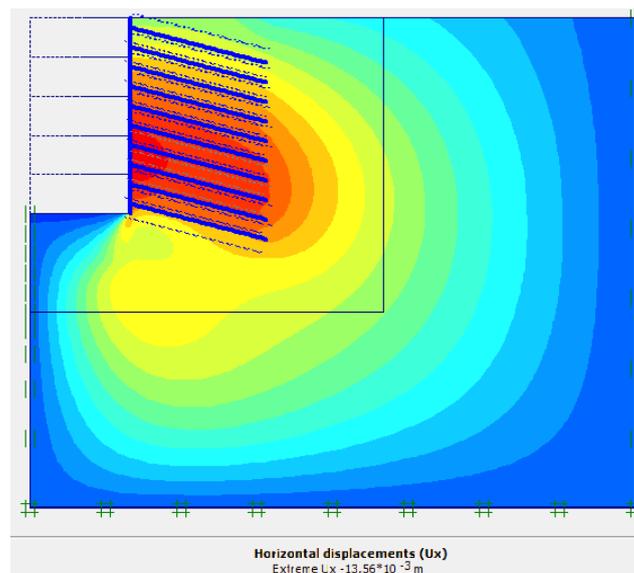


Figure IV.7: Déplacement latéral de la paroi en fin d'excavation.

- Déplacement latéral maximal (Ux) de $13,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (figure IV.7)

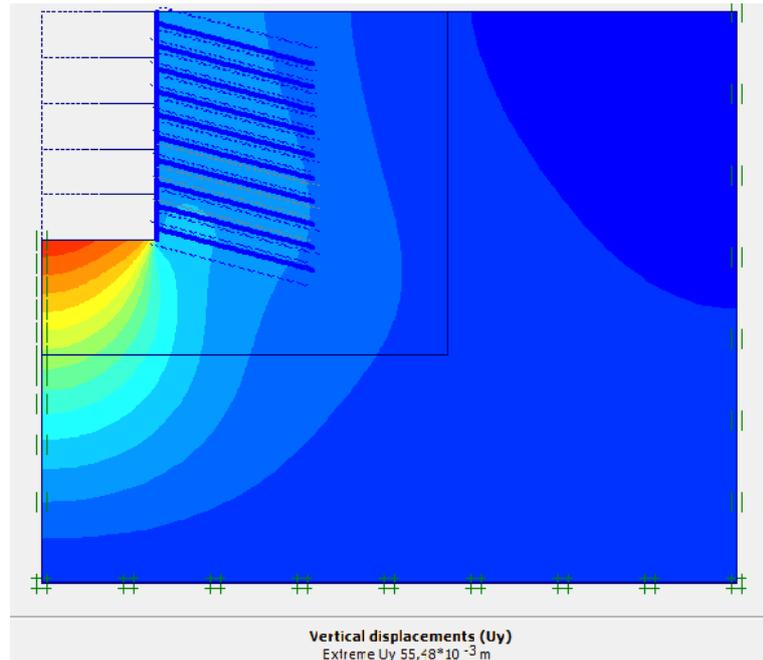


Figure IV.8: Soulèvement vertical de l'excavation en fin d'excavation.

- Soulèvement vertical maximal (U_y) de $55.48 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (figure IV.8).
- Le facteur de sécurité a été calculé à l'aide de la technique de réduction de résistance (phi - c réduction) dans le logiciel Plaxis 2D ,qui consiste à réduire progressivement les paramètres de résistance du sol jusqu'à la rupture. Le graphique suivant représente le développement du coefficient de sécurité en fonction du chargement (figure IV.9).

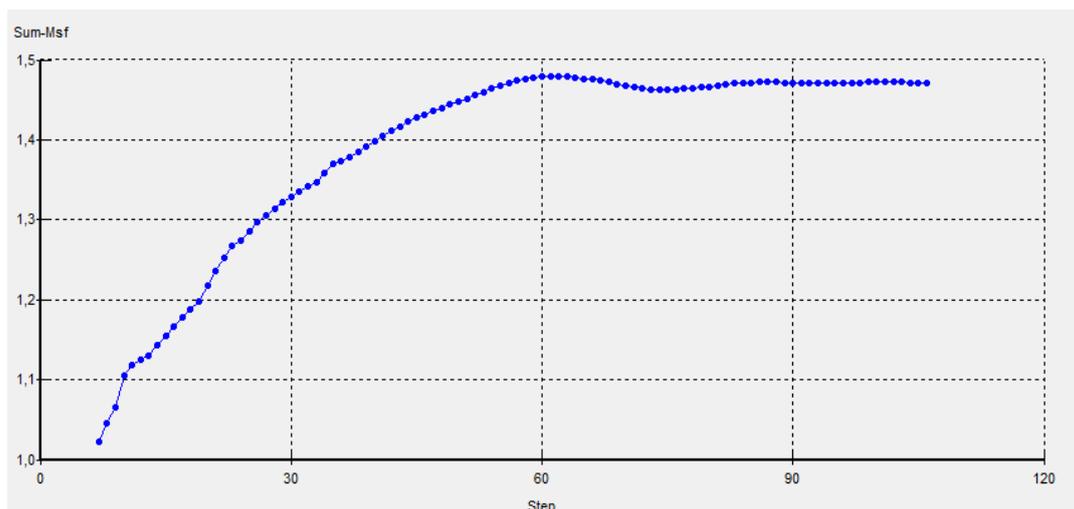


Figure IV.9: Coefficient de sécurité.

IV.4 Validation du modèle d'étude

Les résultats ont été comparés à ceux obtenus par [28]. et [29]. Trois paramètres clés ont été retenus pour cette comparaison :

- Le facteur de sécurité (FOS) ;
- Le soulèvement de la base d'excavation (U_y) ;
- Le déplacement latéral de la paroi (U_x).

- Dans la figure IV.10, on observe une diminution du facteur de sécurité à mesure que l'excavation progresse (pourcentage d'excavation augmente), ce qui est conforme au comportement attendu. Les trois courbes présentent une tendance générale similaire, indiquant que le modèle actuel reproduit le comportement global du facteur de sécurité en fonction de la profondeur. Le modèle actuel montre une bonne concordance avec les études de référence, [28] ainsi que [29], particulièrement dans la plage de facteur de sécurité étudiée.

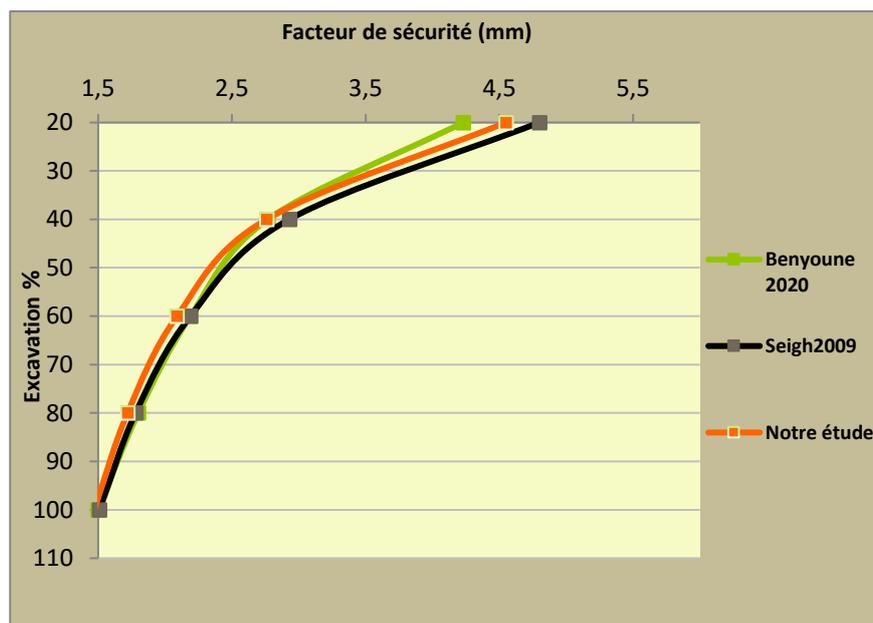


Figure IV.10: Variation du facteur de sécurité avec la profondeur.

Le modèle proposé est validé par la comparaison avec les travaux existants, car il reproduit de manière fiable la variation du facteur de sécurité en fonction de la profondeur d'excavation. Il peut donc être utilisé avec confiance pour l'analyse et la prédiction de la stabilité des excavations clouées.

La validation du modèle de calcul sur le soulèvement d'excavation a été réalisée en le comparant aux résultats de [28] et [29], (voir figure IV.11). Les courbes obtenues montrent une tendance similaire, confirmant que le modèle suit les comportements observés dans les études antérieures. Les résultats de notre étude (courbe verte) s'alignent étroitement avec ceux de [29] et [28], indiquant une bonne fiabilité du modèle, particulièrement à des niveaux de soulèvement faibles. Pour des soulèvements allant jusqu'à 60 mm, le modèle reste généralement fidèle aux données de référence, bien qu'il puisse présenter de légers écarts avec les résultats de [29].

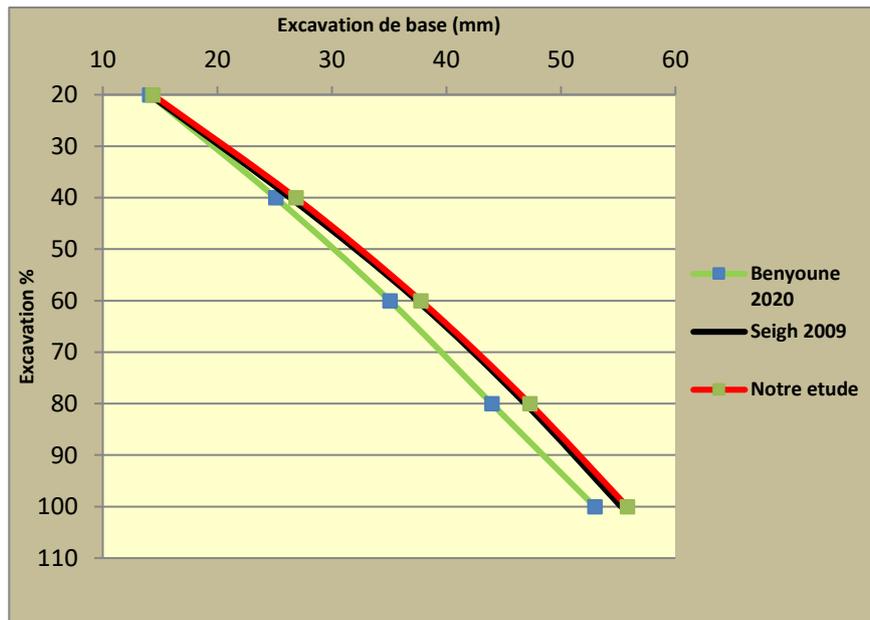


Figure IV.11: Soulèvement de base de l'excavation (Uy).

La figure IV.12 présente la variation du déplacement latéral du mur (Ux) en fonction du pourcentage d'excavation, comparant les résultats de l'étude actuelle avec ceux de [29], et [28]. Aux faibles pourcentages d'excavation, les déplacements latéraux sont plus faibles, puis ils augmentent à mesure que l'excavation progresse. Les trois courbes montrent une tendance décroissante du déplacement latéral avec l'augmentation du pourcentage d'excavation.

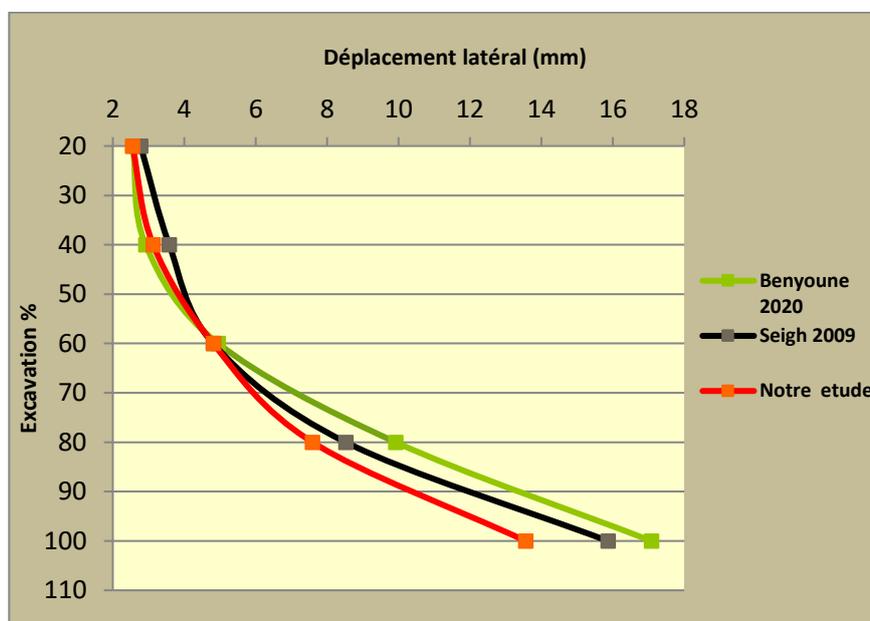


Figure IV.12: Déplacement latéral du mur avec la profondeur(Ux).

La courbe de l'étude actuelle est très proche de celles des références, indiquant une bonne concordance. Une légère divergence est observée entre les courbes pour des pourcentages

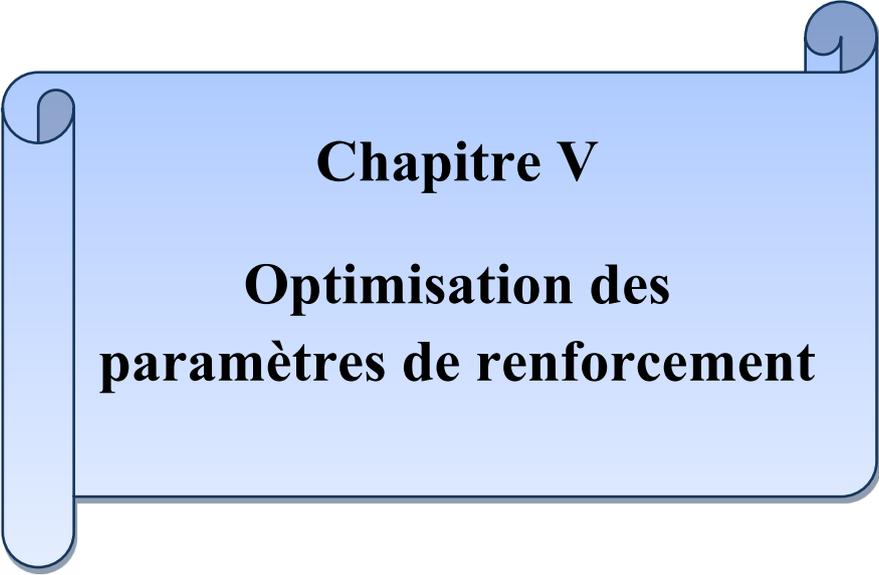
d'excavation intermédiaires, mais reste dans des marges acceptables. Le modèle développé reproduit fidèlement le comportement du déplacement latéral du mur à différentes profondeurs d'excavation, validant ainsi son usage pour l'analyse précise des déformations latérales dans ce contexte.

IV.5 Conclusion

Cette étude a permis d'analyser en détail le comportement d'un système de soutènement renforcé par clouage. En utilisant une modélisation rigoureuse avec logiciel Plaxis 2D, les différentes étapes de construction ont été simulées de manière réaliste.

La comparaison des résultats avec ceux de la littérature a montré que le modèle est capable de prédire fidèlement les déformations. Cela confirme l'utilité de la méthode des éléments finis dans l'analyse de la stabilité des parois renforcés par clouage.

En résumé, une bonne définition des paramètres et une validation rigoureuse permettent d'assurer la fiabilité des simulations numériques dans des contextes géotechniques complexes.



Chapitre V

**Optimisation des
paramètres de renforcement**

V.1 Introduction

Ce chapitre de validation de la méthode d'optimisation proposée a pour objectif d'optimiser les paramètres géométriques influençant sur le comportement de la paroi clouée, à savoir l'espacement vertical entre les clous de renforcement (S_v), l'espacement Horizontal (S_h), la longueur des clous (L), le diamètre des clous (D) et l'angle d'inclinaison (i), à partir des résultats du déplacement horizontal de la paroi en tenant en compte le cout de réalisation de chaque configuration étudiée.

Pour réaliser cette optimisation, nous utilisons la méthode de surface de réponse (RSM) ainsi que les réseaux de neurones artificiels (ANN). La démarche consiste d'abord à choisir, dans un recueil de tables, le plan d'expériences le plus adapté au modèle employé.

Ce modèle comporte 5 facteurs et chaque facteur possède trois niveaux, dont l'intervalle de variation de chaque paramètre est présenté dans le tableau ci-dessous :

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

Paramètres	Niveaux de variation		
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
S_v(m)	1.0	1.5	2.0
L (m)	8	10	12
D (mm)	20	40	60
i (°)	10	20	30
S_h (m)	1.0	1.5	2.0

V.2 Choix d'un plan d'expériences

Il faut maintenant choisir un plan d'expériences, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant d'identifier les paramètres cherchés du problème. Dans ce cas d'étude, un plan fractionnel type Box-Behnken L41 sera adopté (tableau ci-dessous).

Tableau V.2: Plan d'expérience type Box-Behnken L41 (5 facteurs, 3 niveaux).

N° d'essai	Facteurs				
	L (m)	S _v (m)	i (°)	S _h (m)	D (mm)
1	10	1,5	10	2	40
2	7	1,5	20	1	40
3	10	1,5	30	2	40
4	13	1,5	20	1	40
5	10	1	20	1	40
6	10	1,5	20	1,5	40
7	10	2	20	2	40
8	13	1,5	30	1,5	40
9	10	1	20	1,5	20
10	10	1,5	10	1	40
11	10	1,5	20	2	20

12	7	2	20	1,5	40
13	10	1,5	30	1,5	60
14	13	1,5	20	1,5	20
15	10	1,5	20	1	60
16	7	1,5	20	1,5	60
17	10	1	10	1,5	40
18	13	1,5	20	2	40
19	7	1	20	1,5	40
20	10	2	20	1	40
21	13	1,5	10	1,5	40
22	10	1	30	1,5	40
23	7	1,5	20	1,5	20
24	7	1,5	30	1,5	40
25	10	2	10	1,5	40
26	10	1	20	2	40
27	10	1,5	10	1,5	60
28	10	1,5	20	1	20
29	10	1,5	30	1,5	20
30	10	1,5	20	2	60
31	10	2	20	1,5	60
32	10	2	20	1,5	20
33	13	1,5	20	1,5	60
34	10	2	30	1,5	40
35	13	1	20	1,5	40
36	10	1,5	10	1,5	20
37	7	1,5	10	1,5	40
38	7	1,5	20	2	40
39	10	1	20	1,5	60
40	10	1,5	30	1	40
41	13	2	20	1,5	40

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une modélisation à réaliser numériquement par le logiciel Plaxis 2D, donc il faut réaliser 41 modèles numériques conformément aux données du tableau ci-dessus.

V .3 Interprétation des résultats par la méthode des surface de réponse

V.3.1 Introduction

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure visant à déterminer une relation entre les paramètres indépendants d'entrée et les données de sortie (réponse). Cette procédure comprend 5 étapes:

- 1) Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
- 2) Adopter un plan de conception expérimentale,
- 3) Effectuer une analyse statistique de la variance (ANOVA) des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,
- 4) Effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (MSR), et enfin

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

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse.

V.3.2 Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le modèle proposé, et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P-value et F-value d'ANOVA [30].

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

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

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

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

$$\text{Où } \bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i : \text{La moyenne des réponses,} \quad (\text{V.2})$$

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

N : nombre total d'expériences,

N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de Liberté df .

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{V.3})$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice de Fisher F-value est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{V.4})$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

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

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (V.5)$$

V.3.3 Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre les paramètres d'entrées, à savoir l'espacement vertical entre les clous de renforcement (S_v), la longueur du renforcement (L), l'espacement horizontal (Sh), l'angle d'inclinaison (i), le diamètre (D) et les paramètres de sorties (déplacement horizontal de la paroi U_x , ainsi que le cout de construction) est donnée par :

$$Y = f(S_v, L, D, i, Sh) \quad (V.6)$$

Où : Y est la fonction de réponse.

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres du modèle. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par [30]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (V.7)$$

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

X_i représente les paramètres d'entrée (S_v, L, D, i et Sh);

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

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (V.8)$$

Avec :

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

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

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

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P value sont inférieures à 0,05, les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatives. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réels (expérimentales).

V.3.4 Résultats

Le Tableau V.3 présente les résultats de la modélisation en termes de déplacement horizontal de la paroi renforcée, ainsi du cout de réalisation calculé à partir de la formule donnée par l'équation (V.9). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons conformément à la matrice de planification des expériences pour un plan fractionnel type Box-Behnken L 41.

$$C = N \times \frac{\pi \times D^2 \times L}{4 \times S h} \quad (V.9)$$

Avec:

N: nombre de clous pour chaque configuration;

D: diamètre des clous en (mm);

L: longueur des clous en m);

Sh: espacement horizontal entre clous en (m).

Tableau V.3: Analyse des résultats par la méthode des surfaces de réponse(Ux).

N° d'essai	Facteurs						Réponses	
	L (m)	Sv (m)	i(°)	Sh (m)	D (mm)	Ux(mm)	Ux Prédit (RSM)	Cout
1	10	1,5	10	2	40	12,1	12,49	628
2	7	1,5	20	1	40	13,93	13,88	1256
3	10	1,5	30	2	40	14,51	14,36	628
4	13	1,5	20	1	40	10,31	10,28	1256
5	10	1	20	1	40	11,3	11,36	1256
6	10	1,5	20	1,5	40	13,33	12,62	837,333
7	10	2	20	2	40	13,57	13,67	628
8	13	1,5	30	1,5	40	12,53	12,56	837,333
9	10	1	20	1,5	20	12,66	12,88	209,333
10	10	1,5	10	1	40	10,97	11,31	1256
11	10	1,5	20	2	20	14,28	14,16	157
12	7	2	20	1,5	40	15,12	15,16	837,333
13	10	1,5	30	1,5	60	12,97	13,15	1884
14	13	1,5	20	1,5	20	12,26	12,31	209,333
15	10	1,5	20	1	60	11,36	11,17	2826
16	7	1,5	20	1,5	60	13,85	13,90	1884
17	10	1	10	1,5	40	11,61	11,56	837,333
18	13	1,5	20	2	40	11,77	11,66	628
19	7	1	20	1,5	40	13,77	14,03	837,333
20	10	2	20	1	40	12,2	12,27	1256
21	13	1,5	10	1,5	40	10,88	10,69	837,333
22	10	1	30	1,5	40	13,48	13,43	837,333
23	7	1,5	20	1,5	20	15,38	15,43	209,333
24	7	1,5	30	1,5	40	16,08	15,97	837,333
25	10	2	10	1,5	40	12,74	12,69	837,333
26	10	1	20	2	40	12,22	12,31	628
27	10	1,5	10	1,5	60	11,47	11,28	1884

28	10	1,5	20	1	20	12,83	12,59	314
29	10	1,5	30	1,5	20	15,01	14,97	209,333
30	10	1,5	20	2	60	12,03	11,95	1413
31	10	2	20	1,5	60	12,1	12,20	1884
32	10	2	20	1,5	20	14,08	14,31	209,333
33	13	1,5	20	1,5	60	10,16	10,20	1884
34	10	2	30	1,5	40	14,45	14,56	837,333
35	13	1	20	1,5	40	10,53	10,62	837,333
36	10	1,5	10	1,5	20	13,25	13,10	209,333
37	7	1,5	10	1,5	40	14,2	14,10	837,333
38	7	1,5	20	2	40	15	14,87	628
39	10	1	20	1,5	60	11,27	11,36	1884
40	10	1,5	30	1	40	13,15	13,18	1256
41	13	2	20	1,5	40	11,64	11,76	837,333

V.3.4.1 Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour comprendre l'influence des facteurs d'entrée à partir d'une série de résultats expérimentaux, en utilisant la méthode des plans d'expériences pour le modèle proposé. Elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie. L'ANOVA partitionne essentiellement la variation totale observée lors d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et aux erreurs générées.

L'évaluation de la signification statistique des modèles quadratiques de prédiction se fait à l'aide des valeurs P et F de l'ANOVA. Ces valeurs permettent de déterminer si les facteurs d'entrée ont une influence significative sur les résultats et si le modèle de prédiction est statistiquement valide.

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

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

Tableau V.4: Analyse de la variance ANOVA pour le déplacement horizontal U_x .

Source	Somme des carrés SS	df	Moyenne des carrés MC	F-value	p-value	Contribution (%)	
Model	87,82	14	6,27	119,49	< 0.0001	98,475	signifiant
A-L	46,41	1	46,41	884,10	< 0.0001	52,041	signifiant
B-Sv	5,13	1	5,13	97,73	< 0.0001	5,75	signifiant
C-i	13,99	1	13,99	266,46	< 0.0001	15,68	signifiant
D-Sh	5,56	1	5,56	105,88	< 0.0001	6,24	signifiant
E-d	13,21	1	13,21	251,71	< 0.0001	14,82	signifiant
AD	0,0380	1	0,0380	0,7244	0,4025	0,043	Non significatif
AE	0,0812	1	0,0812	1,55	0,2246	0,092	Non significatif
BD	0,0506	1	0,0506	0,9644	0,3351	0,057	Non significatif

BE	0,0870	1	0,0870	1,66	0,2092	0,097	Non signifiant
DE	0,1521	1	0,1521	2,90	0,1006	0,0171	Non signifiant
A ²	0,5059	1	0,5059	9,64	0,0046	0,568	Non signifiant
C ²	1,31	1	1,31	25,04	< 0.0001	1,469	signifiant
D ²	0,3304	1	0,3304	6,29	0,0187	0,371	Non signifiant
E ²	0,0308	1	0,0308	0,5861	0,4508	0,0345	Non signifiant
Résiduel	1,36	26	0,0525			1,53	
Cor Total	89,18	40				100	

L'analyse ANOVA du tableau V.4 montre que la longueur des clous (L) est le paramètre le plus influent sur le déplacement horizontal (U_x) dont sa contribution est de 52,04 %, suivi par l'inclinaison (i) et le diamètre (D) par influence notable, leurs contributions sont 15,68 % et 14,82 %, puis les interactions entre facteurs sont négligeables car ($P > 0,05$). Parmi les effets quadratiques seul l'inclusion (i^2) est significatif (1,469 % de contribution), tandis que l'espacement horizontal (Sh), l'espacement vertical (Sv) et les effets quadratiques (D^2), (L^2), (Sh^2) n'ont pas d'effets significatifs sur le résultat.

Ces résultats permettent d'orienter l'optimisation vers les paramètres les plus pertinents. Le modèle est globalement fiable ($R^2 = 98,47$ %) et sert de base solide pour l'optimisation géométrique du système de renforcement.

V.3.4.2 Analyse de régression

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (déplacement horizontal U_x) et les variables d'entrées (Sv, L, D, i et Sh) a été exprimé avec un coefficient de détermination ($R^2=98,47$), correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la sortie U_x en fonction des facteurs étudiés. Le modèle obtenu est présenté par l'équation (V.10).

$$U_x = -16,816 - 1,172 * L + -1,047 * Sv - 0,0812 * i + 3,262 * Sh + 0,0163 * D + 0,065 * L * Sh - 0,0024 * L * D + 0,45 * Sv * Sh - 0,0147 * Sv * D - 0,0195 * Sh * D + 0,0301 * L^2 + 0,00437 * i^2 - 0,867 * Sh^2 - 0,000167 * D^2 \quad (V.10)$$

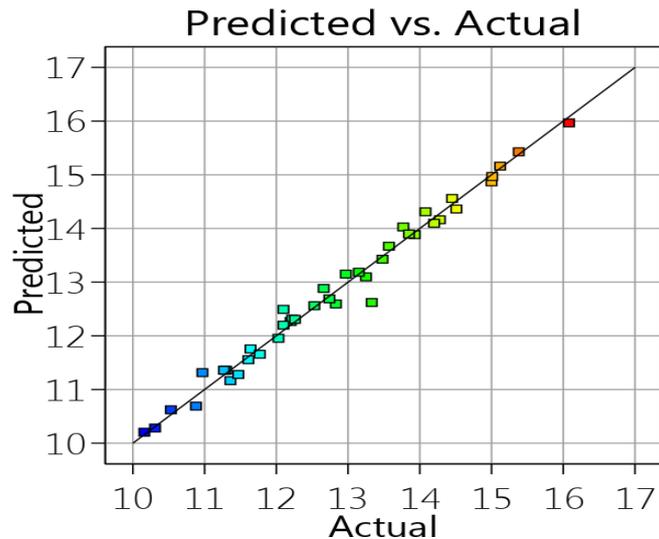
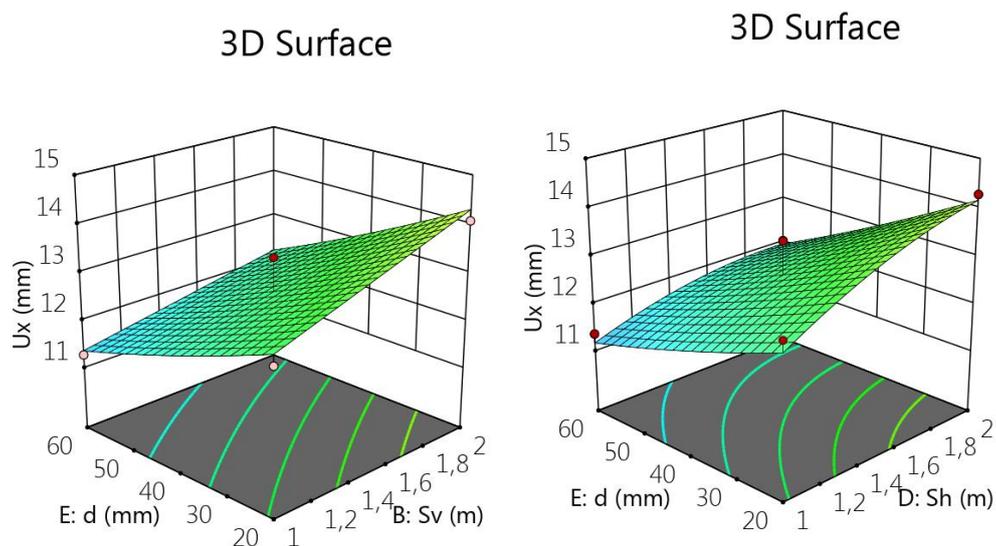


Figure V.1: Probabilités normales des résidus du déplacement horizontal U_x .

D’après la figure V.1, les résidus du modèle du déplacement horizontal peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

V.3.4.3 Validation graphique des modèles Le graphe de surface de réponse de la figure V.2 représente les résultats de la surface de réponse (3D) du déplacement horizontal U_x , en fonction des paramètres cherchés (S_v , L , D , i et Sh). L’analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l’ANOVA, on remarque que la longueur (L) est important, donc ce facteur possède l’effet le plus significatif sur le déplacement horizontal U_x .



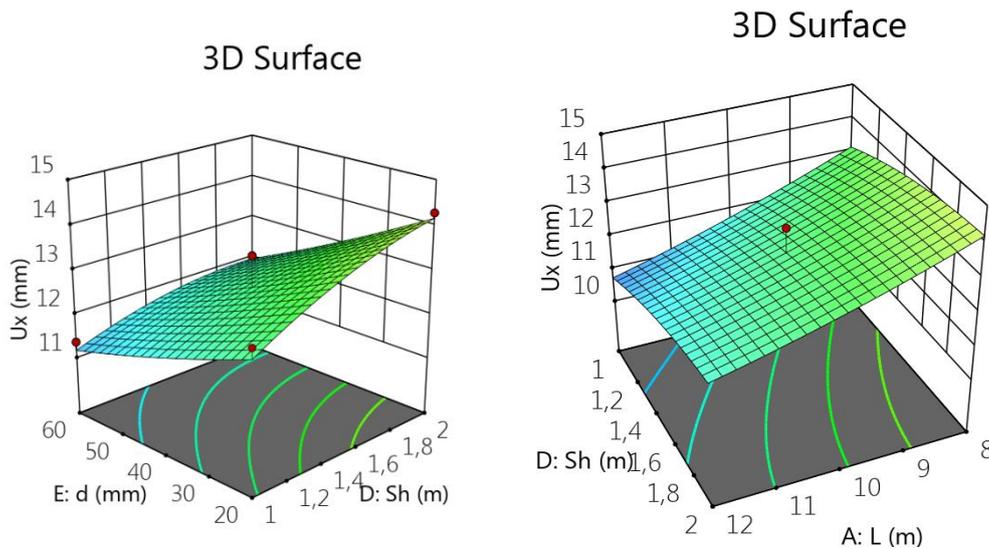


Figure V.2: Surfaces de réponses pour le déplacement horizontal de la paroi \$U_x\$.

V.4 Prédiction par les réseaux de neurones artificiels

La technique des réseaux de neurones artificiels (ANN) est un outil informatique inspiré par le fonctionnement des neurones du cerveau humain, capable de trouver une formulation mathématique reliant les données d'entrée et les résultats de sortie d'un problème défini [31].

Cette technique a été utilisée pour résoudre des problèmes complexes en raison de sa capacité exceptionnelle. Il est recommandé d'utiliser ce type d'outils pour approximer les fonctions de réponse dans l'évaluation de processus compliqués. Les ANN sont plus robustes et précis et peuvent être utilisés à la place des ajustements non linéaires, résolus avec des modèles de régression polynomiale [32]. Pour obtenir des résultats significatifs, l'utilisateur doit prendre en compte les principaux facteurs : le type de réseau, l'architecture du réseau et les paramètres d'entraînement du réseau [33]. Le réseau a été conçu en augmentant progressivement le nombre de couches cachées et de nœuds jusqu'à ce qu'une architecture appropriée puisse être trouvée Selon [34]. la fonction hyperbolique tangente est utilisée dans les couches cachées du réseau de neurones, dans lequel l'utilisation de cette fonction accélère l'entraînement du réseau par rapport à la fonction sigmoïde [35]. Les données volumineuses sont réservées à l'entraînement du réseau pendant le calcul, et le reste est utilisé pour le processus de validation.

L'algorithme de rétropropagation est utilisé pour entraîner le réseau en se basant sur la règle du gradient descendant. Cet algorithme minimise l'erreur quadratique moyenne (EQM) en introduisant les motifs d'entrée-sortie de manière séquentielle pour mettre à jour les poids à chaque fois. La minimisation est réalisée en ajustant les poids de la couche de sortie à la couche d'entrée [33]. Pour évaluer l'adéquation et la précision du modèle obtenu par ANN, [36] suggère trois indicateurs, à savoir le coefficient de détermination (\$R^2\$), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), et l'erreur absolue moyenne (MAE) et qui sont définis comme suit :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{i,n})}{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{moyenne})^2} \tag{V11}$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i,n} - y_{i,p})^2}}{n} \tag{V12}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{i,n} - y_{i,p}| \tag{V13}$$

Où n : est le nombre d'expériences ;

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

Y_{moyenne} : est la valeur moyenne des résultats expérimentaux. La première étape pour obtenir un modèle ANN est la sélection d'une architecture de réseau appropriée. L'objectif est de construire un modèle ANN prédictif en minimisant la taille du modèle et les erreurs utilisées lors de l'entraînement et de la validation [37]. Dans cette étude et dans tous les cas, le taux d'apprentissage adopté est de 0,01. De plus, pour sélectionner le nombre optimal de neurones dans chaque couche cachée, procédez en variant le nombre d'itérations jusqu'à obtenir une valeur élevée de R^2 avec une valeur plus faible du paramètre (RMSE).

V.4.1 Modélisation des résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels

La figure V.3 illustre l'architecture adéquate du modèle de capacité portante (U_x) par réseau de neurones artificiels (5-5-1), représentée avec Cinq nœuds d'entrée (L, D, i, Sv et Sh), cinq nœuds dans la couche cachée et un nœud pour la couche de sortie (capacité portante). Cette architecture finale est obtenue après un nombre optimal de 50 itérations.

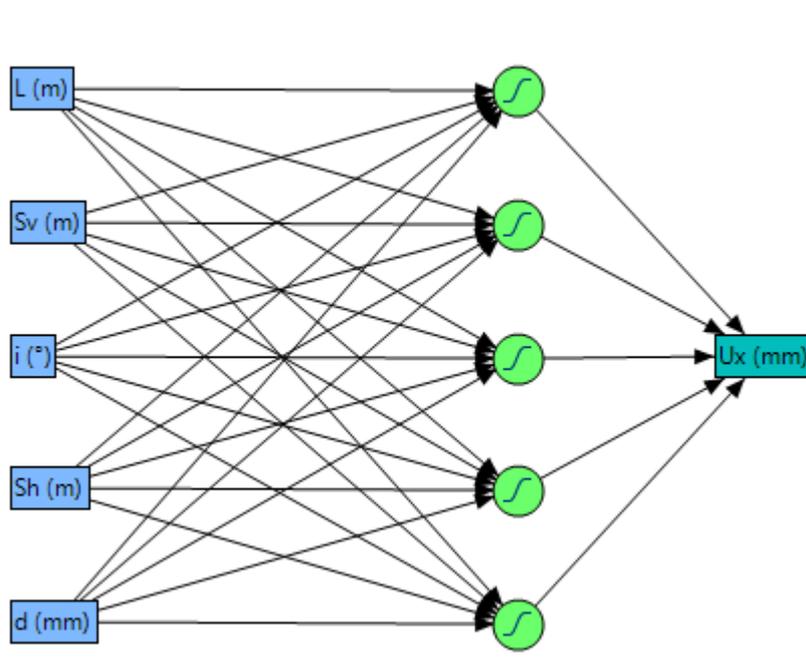


Figure V.3: Architecture du réseau de neurones artificiels (5-5-1) pour le déplacement latéral de la paroi (U_x).

Le modèle mathématique de l'architecture de réseau de neurones artificiels (ANN) ci-dessus est présenté par l'équation (V.14). Ce modèle résulte du produit des couches cachées des cinq neurones avec une fonction linéaire.

$$U_x = -13.063 + 0,856 * H_1 - 0.423 * H_2 - 1.186 * H_3 + 0.494 * H_4 - 3.859 * H_5 \quad (V14)$$

Où H_1 à H_5 sont les sorties de chaque neurone de la couche cachée et sont exprimées comme suit :

$$H1 = \text{Tan h} (0.5 * (-3.433 + 0.129 * L + 6.838 * Sv + 0.029 * i - 3.728 * Sh - 0.008 * d)) \quad (V.15)$$

$$H2 = \text{Tan h} (0.5 * (-37.18 + 0.623 * L + 1.785 * Sv - 0.005 * i + 8.437 * Sh + 0.290 * d)) \quad (V.16)$$

$$H3 = \text{Tan h} (0.5 * (-0.525 + 1.015 * L + -0.781 * Sv - 0.076 * i - 7.839 * Sh + 0.024 * d)) \quad (V.17)$$

$$H4 = \text{Tan h} (0.5 * (22.17 - 0.672 * L + -2.633 * Sv - 0.128 * i - 4.414 * Sh - 0.0467 * d)) \quad (V.18)$$

$$H5 = \text{Tan h} (0.5 * (2.036 + 0.229 * L - 0.282 * Sv - 0.072 * i - 1.202 * Sh + 0.0134 * d)) \quad (V.19)$$

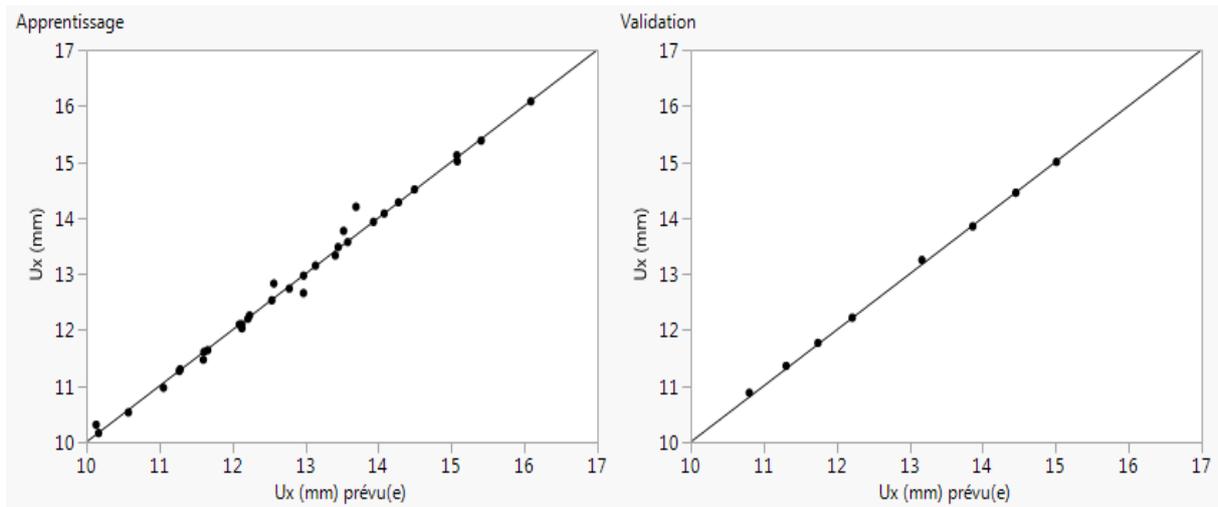


Figure V.4: Valeurs prédites par rapport aux valeurs numériques pour le déplacement latéral Ux.

Comme le montre la figure V.4, il est crucial de noter que l'intersection entre les valeurs numériques et prédites de déplacement portante (Ux) est proche de la ligne médiane pour les deux cas. Le coefficient de détermination R² est de 0,9990 pour le cas d'apprentissage et de 0,9847 pour le cas de validation.

Tableau V.5: Résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels.

N° d'essai	Facteurs					Réponses	
	L (m)	Sv (m)	i(°)	Sh (m)	D (mm)	Ux(mm)	Ux Prédit (ANN)
1	10	1,5	10	2	40	12,1	12,127
2	7	1,5	20	1	40	13,93	13,932
3	10	1,5	30	2	40	14,51	14,495
4	13	1,5	20	1	40	10,31	10,132
5	10	1	20	1	40	11,3	11,283
6	10	1,5	20	1,5	40	13,33	13,408
7	10	2	20	2	40	13,57	13,578
8	13	1,5	30	1,5	40	12,53	12,539
9	10	1	20	1,5	20	12,66	12,973
10	10	1,5	10	1	40	10,97	11,055
11	10	1,5	20	2	20	14,28	14,274
12	7	2	20	1,5	40	15,12	15,074

13	10	1,5	30	1,5	60	12,97	12,974
14	13	1,5	20	1,5	20	12,26	12,234
15	10	1,5	20	1	60	11,36	11,307
16	7	1,5	20	1,5	60	13,85	13,864
17	10	1	10	1,5	40	11,61	11,609
18	13	1,5	20	2	40	11,77	11,743
19	7	1	20	1,5	40	13,77	13,522
20	10	2	20	1	40	12,2	12,210
21	13	1,5	10	1,5	40	10,88	10,803
22	10	1	30	1,5	40	13,48	13,448
23	7	1,5	20	1,5	20	15,38	15,407
24	7	1,5	30	1,5	40	16,08	16,089
25	10	2	10	1,5	40	12,74	12,779
26	10	1	20	2	40	12,22	12,213
27	10	1,5	10	1,5	60	11,47	11,601
28	10	1,5	20	1	20	12,83	12,566
29	10	1,5	30	1,5	20	15,01	15,080
30	10	1,5	20	2	60	12,03	12,129
31	10	2	20	1,5	60	12,1	12,094
32	10	2	20	1,5	20	14,08	14,079
33	13	1,5	20	1,5	60	10,16	10,166
34	10	2	30	1,5	40	14,45	14,453
35	13	1	20	1,5	40	10,53	10,574
36	10	1,5	10	1,5	20	13,25	13,167
37	7	1,5	10	1,5	40	14,2	13,692
38	7	1,5	20	2	40	15	15,011
39	10	1	20	1,5	60	11,27	11,272
40	10	1,5	30	1	40	13,15	13,137
41	13	2	20	1,5	40	11,64	11,661

Tableau V.6: Résultat de déplacement latéral U_x par RSM et ANN.

N° d'essai	Valeur numérique	U _x Prédit (RSM)	U _x Prédit (ANN)
1	12,10	12,49	12,127
2	13,93	13,88	13,932
3	14,51	14,36	14,495
4	10,31	10,28	10,132
5	11,30	11,36	11,283
6	13,33	12,62	13,408
7	13,57	13,67	13,578
8	12,53	12,56	12,539
9	12,66	12,88	12,973
10	10,97	11,31	11,055
11	14,28	14,16	14,275
12	15,12	15,16	15,074

13	12,97	13,15	12,974
14	12,26	12,31	12,234
15	11,36	11,17	11,307
16	13,85	13,90	13,864
17	11,61	11,56	11,609
18	11,77	11,66	11,743
19	13,77	14,03	13,522
20	12,20	12,27	12,210
21	10,88	10,69	10,803
22	13,48	13,43	13,448
23	15,38	15,43	15,407
24	16,08	15,97	16,089
25	12,74	12,69	12,779
26	12,22	12,31	12,213
27	11,47	11,28	11,601
28	12,83	12,59	12,567
29	15,01	14,97	15,080
30	12,03	11,95	12,129
31	12,10	12,20	12,095
32	14,08	14,31	14,079
33	10,16	10,20	10,166
34	14,45	14,56	14,453
35	10,53	10,62	10,574
36	13,25	13,10	13,167
37	14,20	14,10	13,692
38	15,00	14,87	15,011
39	11,27	11,36	11,272
40	13,15	13,18	13,137
41	11,64	11,76	11,661

V.4.2 Comparaison des modèles RSM et ANN

Une comparaison entre les méthodes RSM et ANN a été établie pour déterminer la précision des modèles prédictifs. À cette étape, certaines comparaisons étaient nécessaires pour évaluer la différence entre les résultats numériques et les valeurs prédites obtenues par les modèles RSM et ANN. Les critères de comparaison pour les deux modèles prédictifs sont le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, les faibles valeurs de l'erreur quadratique moyennée (RMSE) et de l'erreur absolue moyenne (MAE). Les différences entre les réponses numériques et prédites en utilisant les modèles RSM et ANN sont présentées dans la figure V.5. Il est évident d'après cette figure que les valeurs numériques et prédites par le modèle ANN sont très proches les unes des autres comparativement aux valeurs prédites par le modèle RSM.

Tableau V.7: Comparaison des modèles RSM et ANN.

RSM			ANN		
R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE
0.9847	0.2326	1.6922	0.9990	0.0455	0.1180

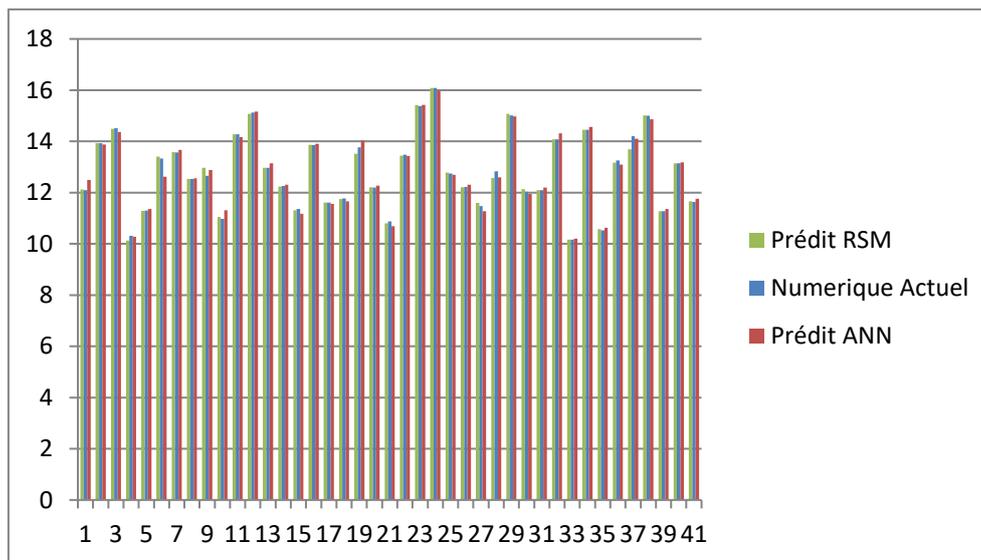


Figure V.5: Comparaison entre les valeurs de la capacité portante numériques et prédites Par RSM et ANN.

- Le modèle ANN présente une capacité supérieure à modéliser les relations complexes et non linéaires entre les paramètres d'entrée (L , S_v , i , Sh et D) et la réponse (U_x). Le modèle RSM reste acceptable, mais sa précision est inférieure à celle du réseau de neurones. Par conséquent, le modèle ANN a été retenu pour la phase d'optimisation finale à l'aide l'algorithme génétique. La figure V.5 confirme visuellement et numériquement la supériorité du modèle ANN.

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

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

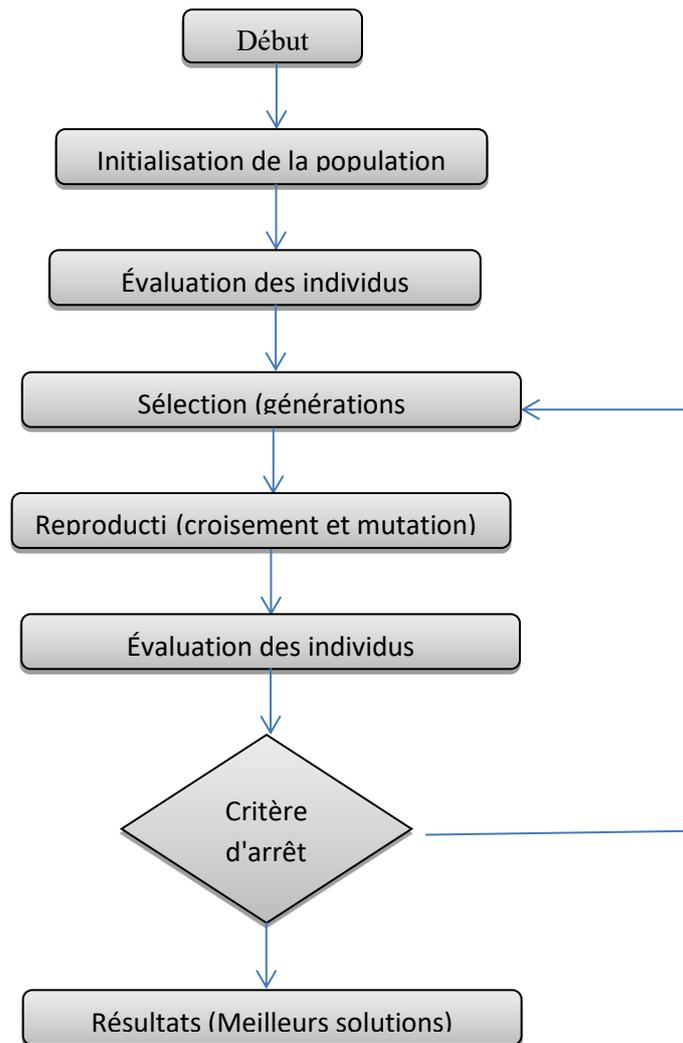


Figure V.6: Diagramme de l'algorithme génétique.

Les algorithmes génétiques (AG) sont les méthodes d'optimisation les plus largement utilisées. Tout d'abord, en commençant par créer une population initiale arbitraire nommée chromosomes, considérée comme une solution initiale, dont la performance principale est l'évaluation de la fonction d'adaptation. Ensuite, selon les résultats obtenus, plusieurs paires parmi ces solutions potentielles sont générées en utilisant des techniques évolutives telles que la sélection, le croisement et la mutation. Le système de résolution peut répéter cette procédure jusqu'à l'obtention de la meilleure solution [38].

L'objectif recherché dans la procédure d'optimisation est la minimisation du déplacement de la paroi (U_x) ainsi que du coût de réalisation, cela sera réalisé avec cinq variables d'entrée (L , S_v , i , Sh , et D). La longueur (L) a été variée entre 7.0 m et 13 m, l'espace vertical (S_v) a été varié entre 1.0 m et 2.0 m, l'inclinaison entre 10° et 30° , l'espace horizontal (Sh) a été varié entre 1.0m et 2.0 m et le diamètre a été varié entre 20mm et 60mm. L'outil d'algorithme génétique est utilisé sur la base du modèle mathématique formulé par la méthode ANN. Les contraintes utilisées dans le processus d'optimisation sont présentées dans le tableau V.8.

Tableau V.8: Conditions d'optimisation.

Paramètres	Objective	Limite inférieure	Limite supérieure
L (m)	Dans l'intervalle	7.0	13
Sv (m)	Dans l'intervalle	1.0	2.0
i (m)	Dans l'intervalle	10.0	30.0
Sh	Dans l'intervalle	1.0	2.0
D	Dans l'intervalle	20.0	60.0
Ux (mm)	Minimisation	10.10	16.08
Cout	Minimisation	157.0	2826

Les caractéristiques de l'algorithme génétique, telles que la population, l'indice de distribution du croisement, l'indice de distribution de mutation, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation, ont été définies à l'aide de la boîte à outils GA implémentée dans le logiciel Matlab, comme présenté dans le tableau V.9.

Tableau V.9: Paramètres de l'algorithme génétique (GA).

Paramètres	Valeurs
Nombre de variables	5
Taille de population	100
Fonction de sélection	Stochastique Uniform
Fraction de croisement	0.8
Probabilité de mutation	0.2
Nombre de générations	100

Le tableau V.10 présente les résultats obtenus grâce à l'optimisation par algorithme génétique des variables d'entrée ainsi que des réponses.

Tableau V.10: Résultats de l'optimisation.

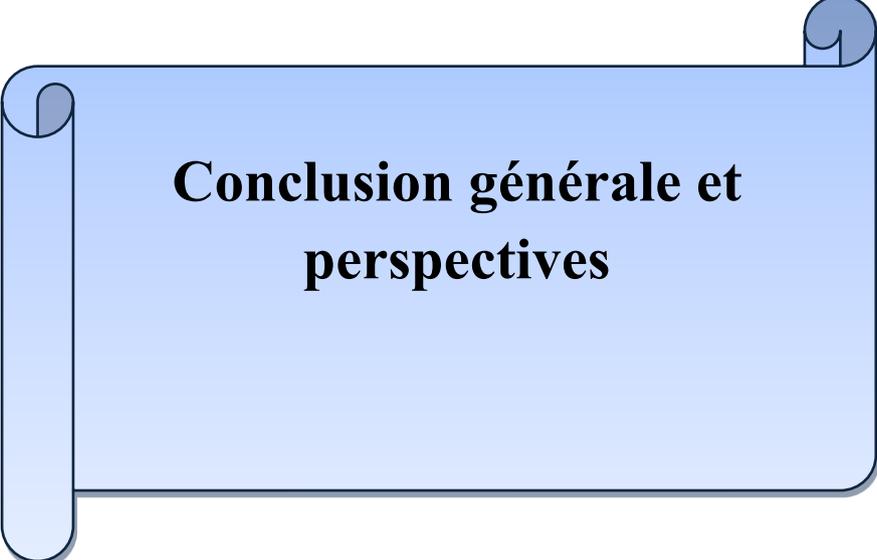
N°	L	Sv	i	Sh	D	Ux	Cout
1	12,000	1,009	11,323	1,000	20,000	10,535	315,829
2	12,000	1,011	10,002	1,001	20,346	10,509	328,013
3	12,000	1,026	10,547	1,000	20,003	10,544	315,784
4	12,000	1,000	10,226	1,028	20,000	10,576	302,068

V.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons validé la méthodologie d'optimisation proposée pour identifier les facteurs géométriques influençant le comportement de la paroi clouée. L'étude a porté sur cinq variables principales : la longueur des clous (L), l'espacement verticale et horizontale entre les clous (Sv et Sh), le diamètre (D) et l'inclinaison (i). Nous avons utilisé deux approches prédictives : la méthode de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN).

Un plan d'expériences fractionnaire de type Box-Behnken (L41) a été appliqué pour modéliser les différentes combinaisons de variables. Les résultats de la modélisation ont montré que les réseaux de neurones artificiels (ANN) offrent une précision prédictive supérieure par rapport à la méthode de surface de réponse (RSM), les réseaux de neurones artificiels (ANN) présentant des coefficients de détermination plus élevés et des valeurs plus faibles de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de l'erreur absolue moyenne (MAE).

Enfin, Les résultats de l'optimisation ont démontré l'efficacité de cette méthodologie pour déterminer les valeurs optimales des variables L, D, i, Sh et Sv, aboutissant à un déplacement latéral de la paroi et un cout de construction minimaux. Cette étude souligne l'importance de l'intégration des techniques avancées de modélisation et d'optimisation pour résoudre de tels problème.



**Conclusion générale et
perspectives**

Conclusion générale et perspectives

L'optimisation des structures de soutènement constitue une problématique cruciale en ingénierie géotechnique, particulièrement dans un contexte où la maîtrise des coûts et l'efficacité technique sont des priorités majeures. Cette étude a permis de développer une approche novatrice en combinant plans d'expériences, modélisation numérique et techniques d'intelligence artificielle, offrant ainsi une démarche intégrée pour améliorer la conception des parois clouées.

Après avoir analysé les différentes techniques de renforcement des sols, nous avons approfondi la compréhension des mécanismes de clouage ainsi que des paramètres influençant la stabilité des parois. La mise en œuvre de plans d'expériences a structuré les simulations numériques et permis d'évaluer précisément l'impact de chaque variable. Par la validation du modèle numérique à l'aide du logiciel Plaxis 2D, la pertinence du modèle utilisé a été confirmée, constituant une base de données fiable et robuste pour l'étape d'optimisation.

L'intégration de la méthodologie de surface de réponse (RSM), notamment via le design de Box-Behnken, a conduit au développement d'un modèle quadratique prédictif du facteur de sécurité en fonction des variables géométriques. Les représentations graphiques tridimensionnelles ont facilité la visualisation des effets individuels et combinés des paramètres, rendant plus intuitif le processus d'optimisation. L'analyse de la variance (ANOVA) a mis en évidence que la longueur des clous est le facteur ayant l'impact le plus significatif sur la stabilité et le coût du soutènement, suivie du diamètre et de l'inclinaison des clous.

Par ailleurs, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (ANN) s'est révélée particulièrement performante pour prédire les déplacements horizontaux des parois. Les résultats ont confirmé que la longueur, l'inclinaison et le diamètre des clous restent les paramètres les plus influents. Cette méthode a permis non seulement de réduire les incertitudes associées aux modélisations classiques, mais aussi de proposer des configurations géométriques optimales conciliant performance mécanique et économie.

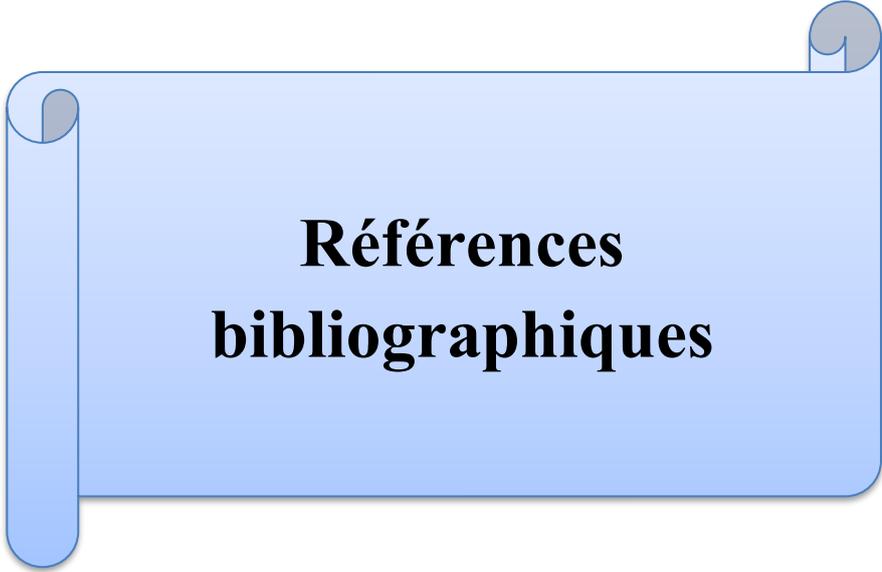
En conclusion, cette recherche apporte une contribution significative à la conception intelligente et optimisée des parois clouées, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour l'intégration des techniques d'intelligence artificielle en géotechnique. Ces avancées peuvent favoriser des soutènements plus sûrs, plus efficaces et mieux adaptés aux contraintes économiques actuelles.

Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives prometteuses pour la recherche future et les applications pratiques dans le domaine des ouvrages de soutènement et des excavations souterraines, notamment :

- **Exploration de différents plans d'expériences**, tels que les plans factoriels complets, afin de mieux appréhender les interactions complexes entre variables et d'augmenter la précision des modèles prédictifs.
- **Extension vers la modélisation numérique tridimensionnelle (3D)**, permettant une meilleure représentation de la réalité géométrique et des conditions de terrain, et fournissant ainsi des analyses plus détaillées et fiables.
- **Amélioration des modèles prédictifs** par l'intégration de techniques avancées de machine Learning, ou les modèles hybrides, ainsi que l'exploitation de nouvelles sources de données géotechniques, notamment issues de mesures in situ.
- **Élargissement des domaines d'application** de cette méthodologie à d'autres types de structures géotechniques, telles que les digues, barrages, remblais ou tunnels.
- **Intégration des paramètres hydrauliques et environnementaux** dans les modèles, afin de mieux prendre en compte l'influence de la présence d'eau, des variations de nappe phréatique et des conditions climatiques sur la stabilité des ouvrages.
- **Développement d'outils logiciels intégrés**, combinant modélisation numérique, intelligence artificielle et optimisation multi-critères, pour assister les ingénieurs dans la conception rapide et fiable de soutènements adaptés aux projets complexes.

Ces axes de développement contribueront à renforcer la robustesse, la précision et la portée des outils d'aide à la décision en ingénierie géotechnique, favorisant ainsi des constructions plus sûres, durables et économiquement viables.



**Références
bibliographiques**

Références Bibliographiques

- [1] **Fabrice ROJAT**, (2011/2012), Ouvrages de soutènement, Cours mds 2, Ecole nationale des travaux publics de l'état (ENTPE), Laboratoire de Lyon (France)
- [2] "Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux, LCPC, 2003.
- [3] Typologie des ouvrages de soutènement service d'étude techniques des routes et autoroute (setra)
- [4] Mémoire de **NEHAOUA ADEL**, "Les Ouvrages de soutènement (Murs de soutènement et blindages)", SETS, Sétif, 21 février 2010, pp.1
- [5] GUIDE AFPS/CFMS « Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques »
- [6] Mémoire de Melle **AZZAZ Ibtissem et CHOUIKHA Safia**, Université de Djelfa, 2017. « Étude numérique de la stabilité d'un remblai sur sol mol traité par des colonnes ballastées entouré par de géosynthétiques »
- [7] Mémoire de M. **SEMACHE Samir**, Université d'Oum El Bouaghi, 2019 « Modélisation Numérique des Massifs de Soutènements en Sol Renforcée par Géosynthétique »
- [8] Mémoire de Melle. **Djeribai khedidja** Université d'Oum El Bouaghi, 2019 « Etude Paramétrique D'une Paroi Clouée »
- [9] Recommandations **CLOUTERRE, (1991)** pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 272 pages.
- [10] **Didier Fau. (1987)** Le clouage des sols. Application au soutènement de fouille. Étude Expérimentale et dimensionnement. Mécanique [physiques. Med -ph]. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Français
- [11] Un chantier représentatif mis en Suvre à LYON (cours d'HERBOUVILLE)
- [12] Cours : Amélioration des sols Master2 Geot Pr K.ABBECHE Chapitre III Murs en sols cloués
- [13] **ORTIGÃO et SAYÃO (2004)**. Handbook of Slope Stabilisation, Springer, New York, 478 p.
- [14] **MMIHOUBI Raid Nidhal** Université 08 Mai 1945 de Guelma **2024** « Recherche de la position et des dimensions optimales des excavations souterraines en utilisant l'intelligence artificielle ».
- [15] **Özel T., et Karpaz Y.**, Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no 4, p. 467-479.
- [16] **Bendell A., Disney J., Pridmore W.**, (1989) Taguchi methods: applications in world industry, IFS Publications, Bedford.
- [17] **Vesic, A. S.** (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *J. Soilmech. Found. Div, ASCE 99*, No. SM1, 45373.
- [18] Murat, M. et Rudman, A. (1992). Automated first arrival picking: a neural network approach. *Geophys. Prosp.*, 40, 587-604.

- [19] McCormack, M., Zaucha, D. et Dushek, D. (1993). First-break refraction picking and seismic data trace editing using neural network. *Geophysics*, 34, 255-270.
- [20] Roth, G. et Tarantola, A. (1994). Neural networks and inversion of seismic data. *J. Geophys. Res.*, 99, 811-822.
- [21] Langer, H., Nunnari, G. et Occhipinti, L. (1996). Estimation of seismic waveform governing parameters with neural networks. *J. Geophys. Res.*, 101, 20109-20118.
- [22] Wang, L.X. et Mendel, J.M. (1992). Adaptive minimum prediction error deconvolution and source wavelet estimation using Hopfield neural networks. *Geophysics*, 57, 670-679.
- [23] Zhang, Y. et Paulson, K. V. (1997). Magnetotelluric inversion using regularized Hopfield neural networks. *Geophys. Prosp.*, 45, 725-743.
- [24] Poulton M., Sternberg, K. et Glass, C. (1992). Neural network pattern recording of the Subsurface EM images. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 21-36.
- [25] DREW, P.J. et MONSON, J.R.T. (2000). Artificial neural networks, *Surgery* 127: 3-11.
- [26] Hagan, M.T., Demuth, H.B. et Beale, M. (1996). *Neural network design*. PWS Publishing Company, Boston, Massachusetts. 82
- [27] Fathi Insaf, Yacef Safa « Prédiction du tassement d'une fondation Superficielle en utilisant les réseaux de Neurones artificiels », Mémoire en Master Académique, Université Mohammed Seddik Ben Yahia -Jijel, juillet 2019.
- [28] Vikas, P.S. and Sivakumar Babu, G.L. (2009), "2D Numerical simulations of soil nail walls", *Geotech. Geolog. Eng, ASCE.*, 28, 299-309
- [29] These Doctorat De Melle Benayoun Fadila Université 20 Août 1955-Skikda .2021 «L'optimisation Dans Les Problèmes D'amélioration Et De Renforcement Des Sols».
- [30] DJEBABLAH Wafa, (2020/2021), Etude du comportement des murs de soutènement en sol stabilisé mécaniquement, Thèse de doctorat, Université de Guelma (Algérie), Département de génie civil et hydrolyque
- [31] Zerti, A., Yallese, M.A., Meddour, I. et al. (2019). Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness, cutting force, and power, and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations. *Int J Adv Manuf Technol* 102, 135-157 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2984-8>.
- [32] Y. Nagata, K.H. Chu, (2003). Optimization of a fermentation medium using neural networks and genetic algorithms. *Biotechnol. Lett.* 25, 1837-1842 (2003).
- [33] Meddour, I., Yallese, M.A., Bensouilah, H. et al. (2018). Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. *Int J Adv Manuf Technol* 97, 1931-1949 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2026-6>.

- [34] Kalman BL, Kwasny SC (1992). Why Tanh: choosing a sigmoidal function, Proc. Int. Jt. Conf Neural Network. Baltimore, 4 578–581.
- [35] Labidi, A., Tebassi, H., Belhadi, S.*et al.*(2018). Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function. *J Fail. Anal.and Preven.* **18**, 1017–1033 (2018).<https://doi.org/10.1007/s11668-018-0501-x>
- [36] M. Ramezani, A. Afsari, (2015). Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks. *Manag. Sci. Lett.* 5, 357–362 (2015).
- [37] K.R. Kashyzadeh, E. Maleki, (2017). Experimental investigation and artificial neural network modeling of warm galvanization and hardened chromium coatings thickness effects on fatigue life of AISI 1045 carbon steel. *J. Fail. Anal.Prev.*17(6), 1276–1287(2017).
- [38]Reddy NSK, Rao PV (2005). Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *Int J Adv Manuf Technol* 26(11–12):1202–1210.