

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

N° d'ordre : D0121211015D



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT en SCIENCES

En Génie Civil

Option : Géotechnique

L'OPTIMISATION DANS LES PROBLEMES D'AMELIORATION ET DE RENFORCEMENT DES SOLS

Par :

BENAYOUN FADILA

Soutenue publiquement le 24 Novembre 2021

Devant le Jury

Président	MESSAST Salah	Professeur	Université 20 Août 1955 Skikda
Rapporteur	REHAB BEKKOUCHE Souhila	M.C.A	Université 20 Août 1955 Skikda
Co-Encadreur	BOUMEZERANE Djmalddine	Professeur	Université West of Scotland
Examineurs	LAOUAR Mohamed Salah	Professeur	Université de Tébessa
	MENDJEL Djenette	M.C.A	Université 20 Août 1955 Skikda
	BOUKHATEM Ghania	M.C.A	Université de Annaba
	GOUDJIL Kamel	M.C.A	Université de Jijel

2020-2021

REMERCIEMENT

Je dois tout d'abord remercier dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Mes plus vifs remerciements vont aux personnes qui ont contribué au bon déroulement et à l'aboutissement de cette thèse.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans le soutien et les encouragements de ma directrice de thèse **Dr. Rehab bekkouche souhila**. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour l'intérêt incessant qu'elle a porté au suivi de ce travail, ses précieux conseils, son soutien constant et sa lucidité scientifique tout au long de ces années. Qu'elle veuille bien accepter encore une fois ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

Cette thèse ne serait rien sans **Dr. Djamelddine boumezerane** qui m'a fait l'honneur de co-encadrer ce travail, je lui exprime toute ma gratitude pour la qualité de son encadrement, son soutien et sa confiance, pour m'avoir permis sur tous les plans, de mener à bien cette étude. Je suis toujours reconnaissante envers lui de m'avoir fait connaître le fascinant sujet de l'optimisation.

Je suis profondément reconnaissante aussi envers **Mr Bendada Larbi**, pour la collaboration en termes de recherche et d'enseignement, pour m'avoir prodigué d'ineestimables réflexions et principalement pour l'ineestimable aide dans la rédaction des articles, ses conseils en matière de recherche ont été toujours précieux.

Je remercie également **Pr Ismail fadhel** pour son aide inestimable et son soutien pendant ces dernières années.

Je suis heureuse de pouvoir exprimer ici mes remerciements à chacun des membres du jury qui ont bien accepté d'évaluer ce travail, et pour l'honneur qu'ils m'ont fait, d'accepter d'être examinateurs de cette thèse.

Je remercie donc tout d'abord **Pr. Salah Messast**, professeur à l'université de Skikda d'avoir accepté de présider le jury de thèse.

Ensuite, j'exprime toute ma reconnaissance aux Pr. **Laouar Mohamed Salah**, professeur à l'université de Tebessa, **Dr. Mendjel Djenette** maître de conférences à l'université de Skikda sans oublier **Dr. Boukhatem Ghania**, maître de conférences à l'université de Annaba, et **Dr. Goudjil Kamel**, maître de conférences à l'université de Jijel, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter d'être examinateurs de cette thèse.

Je salue et remercie **Dr. Faiza Bouaicha, Dr. Selman djeffal, Pr. Mouetssi Souheil et Pr. Laamara Kheireddine, Pr hamaizia Tayeb et Mr Bouhabila Hamoudi** pour leurs collaborations en recherche.

Je voudrais plus particulièrement exprimer ma reconnaissance envers **Mr Abdulaziz Benayoune et Dr. Fatima Benayoun** pour ses encouragements et pour les remarques qu'ils ont faites durant les lectures qu'ils m'ont accordés au moment de la rédaction des articles à publier.

Je remercie également tous les enseignants du département « Génie civil » de la faculté des sciences et science appliquée techniques Oum el Bouaghi et l'Université Skikda. A tous, je dédie cette thèse.

Qu'il me soit permis aussi de dédier ce travail à tous mes amis : Marwa, Radia, Fouzia, Samia, Lynda, Nassira Wahiba, Naima Ramoul, Adel et Sihem.

Un immense merci, tout à fait particulier, à mon mari, je suis consciente que cette thèse ne serait pas ce qu'elle est sans sa patience et soutien.

Je tiens à remercier tout particulièrement ma mère qui a toujours cru en moi et m'a encouragé à aller toujours de l'avant et de ne pas baisser les bras. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Enfin, je dois ce travail à mes enfants, à mes sœurs, mes frères qui m'ont toujours soutenu pendant ces années. Je les en remercie du fond du cœur.

A l'âme de mon père
A tous ceux qui j'aime et qui m'aiment

ملخص

هدف العمل الحالي هو تطبيق طرق التحسين في مجال تقوية التربة عن طريق التسمير ، وهذه التقنيات تتمثل في: الخوارزمية الجينية (GA) ، طريقة تاغوشي ، وطريقة سطح الاستجابة (RSM) ، تم اقتراح منهجية النمذجة العددية بواسطة العناصر المحدودة باستخدام البرنامج (PLAXIS 2D).

العوامل التالية هي مدخلات النموذج المقترح: نسبة طول المسمار وارتفاع الحفر (L / H) ، وميل المسامير والتباعد الرأسي بين المسامير .

الهدف هو تطوير نموذج رياضي يمكنه إنتاج الحد الأدنى من عامل الأمان من خلال إيجاد التركيبة المثلى لمعاملات الإدخال هذه. في طريقة تاغوشي، تم اختيار مصفوفة متعامدة L27 (OA) لدراسة تأثيرات وتفاعلات كل معلمة إدخال على متغير الاستجابة و هو عامل الأمان FS . في طريقة سطح الاستجابة، تم اختيار تصميم Box - Behnken .

تم اختيار المجالات المدروسة للنسبة (L / H) : 0.8 , 1 , 1.2 وفقاً لتوصيات Clouterre 1991، بالنسبة للميل القيم المختارة هي : 15 ° , 20 ° , 25 ° ، بينما أخذنا القيم : 1 م , 1.5 م و 2 م بالنسبة للبعد العمودي بين المسامير.

تم إجراء تحليل البيانات الناتجة عن عمليات المحاكاة باستخدام Minitab 18 و تم التحقق في النتائج باستخدام نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S / N)، و تحليلات التباين ANOVA، و خطوط المحيط، و الأسطح المرسومة ثلاثية الأبعاد.

في ما يتعلق بالخوارزمية الجينية، تم تحليل النتائج بواسطة Matlab 2019

تم تحديد التركيبة المثلى لمعاملات التسمير التي تتوافق مع الحد الأدنى من عامل الأمان، و أظهرت نتائج هذه الدراسة أن طول المسمار هو المعيار الذي له أكبر تأثير على عامل الأمان تليها التباعد الرأسي و الميل أخيراً.

الكلمات المفتاحية: التحسين، التربة المسمرة، طريقة تاغوشي، الخوارزمية الجينية، سطح الاستجابة، الانحدار، صندوق بهنكن، عامل الأمان، المحاكاة، Plaxis 2D، ANOVA، Minitab 2018، Matlab 2019.

Abstract

The present work aims to apply the optimization methods in the field of soil reinforcement by nailing, these optimization techniques are: the Genetic Algorithm (GA), the Taguchi method, and the response surface method (RSM). A methodology of numerical modeling by finite elements (PLAXIS 2D) is proposed. The following parameters are the inputs of the proposed model: ratio of nail length and excavation height (L / H), inclination of nails and vertical spacing between nails.

The goal is to develop a mathematical model that can produce a minimum factor of safety by finding the optimal combination of these input parameters. In Taguchi's method an orthogonal array (OA) L27 was selected to study the effects and interactions of each input parameter on the response variable which is the safety factor FS. In the response surface method, the Box – Behnken design was chosen.

The intervals studied for the ratio (L / H) are chosen from 0.8, 1, 1.2 according to the Clouterre 1991 recommendations, for the inclination the values chosen are: 15°, 20°, 25°, and for the vertical spacing interval takes the values 1m, 1.5m and 2m.

Analysis of the data generated by the simulations is performed using Minitab 18 and the results are investigated using signal-to-noise (S / N) ratio, ANOVA analyzes of variance, line contours, and 3D plotted surfaces.

Regarding the Genetic algorithm, the analysis of the results was carried out by MATLAB 2019.

The optimal combination of nailing parameters that corresponds to the minimum safety factor has been determined, and the results of this study have shown that the nail length is the parameter that has the most effect on the safety factor followed by the vertical spacing and finally inclination.

Keywords: Optimization, Nailed Soil, Taguchi Method, Genetic Algorithm, Regression, Box – Behnken, safety factor, simulation, Plaxis 2D, ANOVA, Minitab 2018, Matlab 2019.

Résumé

Le présent travail vise à appliquer les méthodes d'optimisation dans le domaine de renforcement des sols par la technique du clouage, ces techniques d'optimisation sont : l'Algorithme Génétique (GA), la méthode Taguchi, et la méthode de surface de réponse (RSM).

Une méthodologie de modélisation numérique du modèle par éléments finis (PLAXIS 2D) est proposée.

Les paramètres suivants sont les entrées du modèle proposé : rapport longueur des clous et la hauteur d'excavation (L/H), inclinaison des clous et espacement vertical entre les clous.

L'objectif est de développer un modèle mathématique qui peut produire un facteur de sécurité minimal en trouvant la combinaison optimale de ces paramètres d'entrées. Dans la méthode de Taguchi un tableau orthogonal (OA) L27 a été sélectionné pour étudier les effets et les interactions de chaque paramètre d'entrée sur la variable de réponse qui est le facteur de sécurité F_s . Dans la méthode de surface de réponse RSM, c'est le plan Box–Behnken qui a été choisi.

Les intervalles étudiés pour le rapport (L/H) sont choisis de 0.8, 1, 1.2 suivant les recommandations Clouterre 1991, pour l'inclinaison les valeurs choisies sont : 15°, 20°, 25°, et pour l'espacement vertical l'intervalle prend les valeurs 1 m, 1,5m et 2m.

L'analyse des données générées par les simulations est réalisée à l'aide de Minitab 18 et les résultats sont étudiés en utilisant le rapport signal bruit (S / N), les analyses de variance ANOVA, les contours lignes et les surfaces 3D plots.

Concernant l'algorithme Génétique, l'analyse des résultats a été faites par Matlab 2019.

La combinaison optimale des paramètres de clouage qui correspond au facteur de sécurité minimale a été déterminé, et les résultats de cette étude ont montré que la longueur des clous est le paramètre qui a le plus d'effet sur le facteur de sécurité suivi par l'espacement vertical et en dernier lieu l'inclinaison.

Mots clés : Optimisation, Sol cloué, Méthode Taguchi, Algorithme Génétique, Surface de réponse, Régression, Box–Behnken, Coefficient de sécurité, Simulation, Plaxis 2D, ANOVA, Minitab 2018, Matlab 2019.

Liste des Figures

Chapitre II

Fig. 1 Classes des méthodes d'optimisation	27
Fig. 2 Classes des Algorithmes de Résolution.	28
Fig. 3 Classes des métaheuristiques.	29
Fig. 4 Illustration du codage des variables	31
Fig. 5 Les quatre niveaux d'organisation des AG.....	31
Fig. 6 Croisement en un seul point.....	32
Fig. 7 Croisement en multipoints ($m = 2$)	32
Fig. 8 Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne.....	33
Fig. 9 Organigramme de l'algorithme génétique.....	33
Fig. 10 Schéma de principe du déplacement d'une particule.....	34
Fig. 11 Le mouvement de base de la particule par PSO.....	35
Fig. 12 Organigramme de l'algorithme PSO.....	36
Fig. 13 Structure de modèle de réseau de neurones artificiels.....	38
Fig. 14 Schématisation d'un processus expérimental.....	41
Fig. 15 Conception Box-Behnken à trois facteurs.....	43
Fig. 16 Étapes impliquées dans la conception de Box-Behnken.....	43
Fig. 17 Schématisation du processus de la méthode Taguchi.....	45

Chapitre III

Fig. 1 Renforcement du sol par la Terre Armée.....	51
Fig. 2 Renforcement du sol les géotextiles.	52
Fig. 3 Renforcement du sol par les colonnes ballastées.	53
Fig. 4 Renforcement du sol par les micros pieux.....	54
Fig. 5 Schématisation de la zone active et de la zone résistante.....	55
Fig. 6 Stabilisation d'une pente instable par clouage.	56

Fig. 7 Stabilisation d'une Excavation.....	56
Fig. 8 Phase de réalisation d'une paroi clouée.....	57
Fig. 9 Concept du Comportement d'un sol cloué (Byrne et al., 1998)	61

Chapitre IV

Fig. 1 Modèle géométrique	65
Fig. 2 Soulèvement de la base d'excavation	67
Fig. 3 Variation de Facteur de sécurité avec la profondeur	68
Fig. 4 Déplacement latéral du mur avec la profondeur	68
Fig. 5 Développement de la force axiale des clous avec la profondeur	69
Fig. 6 Courbes des effets principaux pour les rapports S / N	73
Fig. 7 Graphique des effets principaux pour les moyennes	74
Fig. 8 Diagramme d'interaction pour les rapports S / N.....	75
Fig. 9 Diagramme d'interaction pour les moyennes	76
Fig. 10 Diagramme de probabilité normale (Droite de Henry)	78
Fig.11 Valeurs Résiduels par rapport aux valeurs ajustées	78
Fig. 12 Résidus par rapport à l'ordre des données	79
Fig. 13 Histogramme des résidus	79
Fig. 14 Schéma de principe de l'algorithme génétique.	80
Fig. 15 Variation des valeurs de fitness avec les générations	83
Fig. 16 Effets principaux	85
Fig. 17 Diagramme de Pareto	85
Fig. 18 Surfaces de réponse 3D	86
Fig. 19 Lignes de contour	87
Fig. 20 Graphiques normaux pour les effets standardisés	88
Fig. 21 Diagrammes d'interaction pour le Facteur de sécurité	88
Fig. 22 Optimisation	90

Liste des Tableaux

Chapitre IV

Tableau. 1 Paramètres mécaniques et physiques du sol (Singh and Babu 2009)	66
Tableau. 2 Caractéristiques des clous	67
Tableau. 3 Paramètres d'entrée et leurs niveaux.....	71
Tableau. 4 Tableau orthogonal standard L27de Taguchi	71
Tableau. 5 Réponses mesurées et les rapports S/N	72
Tableau. 6 Réponse pour le rapport signal / bruit « plus petit est mieux »	74
Tableau. 7 Réponses pour les moyennes	74
Tableau. 8 Valeurs optimales	75
Tableau. 9 Résultats de l'analyse de variance ANOVA	77
Tableau. 10 Paramètres de l'algorithme génétique.	82
Tableau. 11 Résultats des valeurs optimales.....	82
Tableau. 12 Paramètres et plages pour l'analyse du clouage du sol	84
Tableau. 13 Résultats expérimentaux selon un design Box-Behnken	84

Liste des Acronymes

ACO : Optimisation par colonie de fourmis (Ant Colony Optimization)

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADN : Acide Désoxyribo Nucléique

VBA : Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles virtuelle

BCO : Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles.

DBO : Algorithme d'optimisation par la danse d'abeille.

ABC : Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle

DOE: Plans experiences (design of experiment)

PSO : Optimisation par Essaim de Particules (particle swarm optimization)

MOPSO : Optimisation multi-objectif de l'essaim de particules

RSM : Méthode de surfaces de réponses (response of surface methodology)

RNA : Réseaux de neurones artificiels

AE : Algorithmes Evolutionnaires

AG : Algorithmes Génétiques

AG : Algorithme Génétique

MOGA : Algorithme génétique multi-objectif

SA : Le recuit simulé (Simulated Annealing)

PNL: Programmation non linéaire

TGP: Tree based genetic programming

LGP: Linear genetic programming

ANFIS: Adaptative network-based fuzzy inference system

ANOVA : Analyse des variances (Analysis of variance)

Liste des notations

L/H : Rapport longueur des clous sur la hauteur de l'excavation

Sv : Espacement vertical

Sh : Espacement horizontal

I° : Inclinaison des clous

F_s : Coefficient de sécurité

S/N : Rapport signal bruit

Seq SS : La somme des carrés

DF : Degrés de liberté

F : Coefficient de probabilité

P : Facteur de contribution :

C1 et C2 : Facteurs d'accélération

W : Coefficient d'inertie

r1, r2 : Nombre aléatoire généré entre 0 et 1

C (kN/m²) : Cohésion du sol

ψ (deg): Angle de dilatance

φ (deg): Angle de frottement

γ (kN/m³): Poids volumique

v: Coefficient de Poisson

EA (kN / m) : Raideur Axiale

EI (kN.m²/m) : Rigidité de flexion

Tables Des Matières

Remerciements

Résumé en arabe	I
Abstract	II
Résumé	III
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux.....	VI
Liste des Acronymes et Notations.....	VII
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : État de l'art sur l'optimisation géotechnique

I.1 Introduction.....	5
I.2 État de l'Art sur l'Optimisation en Géotechnique	5
I.3 L'optimisation dans les sols renforcés (sols cloués).....	12
Conclusion	16
References	17

Chapitre II : Méthodes d'optimisations

II .1 Introduction	25
II .2 Classes des méthodes d'optimisation	26
II. 3 Les algorithmes évolutionnaires.....	29
II. 3.1 L'Algorithme Génétique	30
II. 3. 2 Les opérateurs des algorithmes génétiques.....	30
II. 4 Optimisation par essaim de particules (PSO).....	34
II. 4 .1 Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules.....	36
II. 5 Optimisation par Colonie d'abeilles.....	37
II.6 Les Réseaux de Neurones Artificiels.....	37
II.7 Les algorithmes de voisinage	38
II. 8 Monte Carlo	39
II.9 Recherche taboue.....	40

II. 10 Le recuit simulé	40
II. 11 Les plans d'expériences (DOE)	40
II. 11.1 Étapes de la méthodologie de surface de réponse.....	41
II. 11. 2 La méthodologie des surfaces de réponse.....	42
II. 11. 3. Modélisation.....	43
II. 11. 4 Validation des modèles.....	44
II. 12 La méthode de Taguchi	44
II. 12.1 Les différentes étapes de la méthodologie de Taguchi.....	44
II.12.2 Principe de la méthode.....	45
II. 12.3 Plan de Taguchi.....	46
Conclusion	46
Références	47

Chapitre III : Renforcement et d'amélioration des sols

III. 1 Introduction	49
III. 2 Définition du Renforcement et de l'Amélioration de Sol	49
III. 3 Les Domaines d'Application des Techniques de Renforcement	50
III. 4 Techniques D'Amélioration et Renforcement Des Sols	50
III. 4. 1 La Terre armée.	50
III. 4. 2 Les géotextiles.	52
III. 4. 3 Les colonnes ballastées	53
III. 4. 4 Les micros pieux.....	53
III. 4. 5 Le clouage	54
III. 4. 5. 1 Différentes type d'utilisations	56
III. 4. 5. 1. a La stabilisation des pentes. (Naturelles)	56
III. 4. 5. 1. b Le soutènement des excavations (pentés artificielles)	56
III. 4. 5. 2 Différentes phases de construction d'un mur de sol cloué	57

<i>III. 4. 5. 3 Concept de clouage du sol</i>	60
Conclusion	62
Références	63

Chapitre IV : Modélisation Numérique et Application des Méthodes d'Optimisation

IV. 1 Introduction	65
IV. 2 Validation du modèle	67
IV. 3 Application de la Méthode de Taguchi	69
IV. 3. 1 Sélection des facteurs et de leurs niveaux.....	70
IV. 3. 2 Paramètres d'effet.....	75
IV. 3. 3 Analyse de la variance du facteur de sécurité.....	76
IV. 4 Application de l'algorithme Génétique.	80
IV. 4.1 Modélisation mathématique et formulation de problèmes d'optimisation.....	81
IV.4 .2 Paramètres de l'algorithme génétique.....	81
IV. 5 Application de la méthode des surfaces de réponses (RSM)	83
IV. 5. 1 Résultats et discussions	85
IV. 5. 1. 1 <i>Analyse de la variance</i>	85
IV. 5. 1. 2 <i>Développement de l'équation du modèle de régression</i>	86
IV. 5. 1. 3 <i>Optimisation à l'aide de la surface de réponse et des courbes de niveau</i>	86
Conclusion	89
Référence	91
 Conclusion Générale et perspective	 92

INTRODUCTION GENERALE

L'optimisation peut être considérée comme un processus qui recherche méthodiquement de meilleures réponses, de meilleures solutions ou de meilleures conceptions qu'un être humain peut ne pas être en mesure de trouver par l'expérience. L'optimisation peut être définie comme l'art d'améliorer les choses, il est intéressant de noter que très souvent, l'optimisation ne nous permet pas simplement de faire quelque chose de mieux, mais elle peut également permettre de faire quelque chose que nous ne savions pas faire autrement. Pour profiter pleinement de la puissance de l'optimisation dans la pratique, il n'y a pas d'autre choix que d'utiliser un ordinateur (Zhen-Yu Y and Yin-Fu J, 2019).

L'intérêt actuel réside dans la capacité immédiate d'appliquer l'optimisation dans la pratique. Afin d'atteindre cet objectif et d'avoir la capacité d'appliquer l'optimisation à des problèmes du monde réel. Nous utilisons la puissance de l'ordinateur, en conjonction avec l'étude de différents aspects pratiques importants de l'optimisation. Pour ce faire, nous utilisons un outil de modélisation et de codage informatique puissant, facile à utiliser et largement appliqué dans l'ingénierie et dans d'autres domaines. Parmi les outils et logiciels, il y a le MATLAB, qui est devenu l'outil le plus sophistiqué pour la modélisation informatique dans le monde (Zhen-Yu Y and Yin-Fu J, 2019).

Alors le problème d'optimisation est défini comme la recherche de la meilleure solution à partir de la solution réalisable dans un bain qui contient toutes les solutions. Dans de nombreux problèmes d'ingénierie, la solution optimale peut être la valeur minimale ou maximale de la fonction objective du problème. Parfois, le problème d'optimisation peut avoir plusieurs fonctions objectives et plusieurs solutions.

L'application de l'optimisation à des problèmes d'ingénierie est assez récente, principalement en raison de la complexité des modèles mathématiques, Avec l'avènement des méthodes d'optimisation avancées, les dernières décennies ont été témoins d'une application croissante de l'optimisation à un large éventail de problèmes d'ingénierie, de l'automobile à la biomédecine et, bien sûr, au génie civil.

Les applications des techniques d'optimisation sont des plus passionnantes, des plus stimulantes et de très grande échelle en ce qui concerne les problèmes de génie civil en termes de qualité et de quantité (Dede, T and al, 2019).

De nos jours, une croissance et développement dans le domaine d'optimisation en génie civil en particulier, la géotechnique tel que la modélisation des ouvrages et la prédiction de la réponse

structurelle est plus précise que dans les décennies passées (Matej Leps, 2005). Plusieurs nouveaux défis que nous voulons découvrir, et aussi plusieurs problèmes doivent être résolus. Par conséquent, l'objectif principal de la thèse proposée est de passer en revue de l'art dans le domaine de l'optimisation en mettant l'accent aux problèmes d'ingénierie géotechniques, en appliquant quelques techniques d'optimisation sur un sol cloué.

Les problèmes d'amélioration et de renforcement des sols sont divers et touchent à plusieurs aspects de la géotechnique. La nature des sols ainsi que les contraintes liées aux types de projets font que le renforcement ou l'amélioration de ces milieux obéissent à différents paramètres nécessitant un travail objectif d'optimisation, tant sur le plan économique que sur le plan de l'amélioration des caractéristiques de résistance.

Le travail vise à exposer les principes de base des différentes techniques d'amélioration et renforcement des sols qui consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but d'augmenter et améliorer les caractéristiques du sol. Ces techniques vont du compactage statique (ou compactage dynamique) à l'injection par divers procédés et elles permettent d'améliorer les différentes propriétés en mécanique des sols (résistance, compressibilité et perméabilité) on met l'accent sur l'identification de différents problèmes lié au renforcement des sols et les différentes techniques de renforcements utilisés tels que le clouage et identifier les paramètres prépondérants dans les processus de renforcement pour garantir la stabilité.

Dans cette recherche on se propose d'étudier l'optimisation dans les problèmes de renforcement des sols en utilisant les outils adéquats qu'offrent les mathématiques et les sciences de l'ingénieur. Une revue générale sur l'état de l'art en la matière a été effectuée.

Ce travail s'intègre dans les études dédiées à la compréhension du comportement de ce type d'ouvrage (sol cloué), l'étude engagée consiste à mettre au point un modèle numérique pour décrire le comportement des structures renforcées par le clouage avec une attention particulière sur l'effet de phasage de construction sur le comportement de la paroi clouée, l'effet de l'espacement et longueurs des clous et leurs inclinaisons. Notre travail s'inscrit aussi dans le cadre d'optimisation des paramètres du clouage du sol, en minimisant la fonction objective qui est le coefficient de sécurité. Sa stabilité est étroitement liée à la géométrie de l'excavation et aux paramètres des clous et la nature du sol. Les paramètres des clous incluent l'inclinaison, longueur, diamètre (rigidité de flexion et la raideur axiale), l'espacement horizontal et vertical entre clous ... etc. La géométrie de l'excavation comprend la profondeur (hauteur), l'inclinaison du parement de mur, l'épaisseur du parement et d'autres paramètres tels que la connexion entre les clous et le parement (interaction), la rigidité du parement, la séquence de construction ... etc.

La variabilité des propriétés in situ du sol a une influence significative sur la stabilité de l'ouvrage. Parmi toutes ces possibilités quelle est la meilleure combinaison (optimale) qui répond à nos exigences. Alors l'ingénieur doit prendre des décisions de conception qui mèneront à une conception optimale. Dans notre travail seulement, trois facteurs sont supposés à être optimiser : le rapport de la longueur du clou à la hauteur du mur (L/H), l'espacement vertical des clous (S_v) et l'inclinaison des clous (I°).

Le contenu de ce travail est organisé comme suit :

- Le chapitre I dresse un état de l'art des techniques d'optimisation dans le domaine de génie civil en générale et les problèmes géotechniques en particulier. Parmi eux une attention particulière a été portée sur les méthodes dites évolutionnistes et qui ont connu depuis le début des années soixante une croissance exceptionnelle. En plus les statistiques ont évolué dans différentes directions, parmi lesquelles les plans d'expériences.
- Le chapitre II illustre l'intérêt des différentes techniques d'optimisation, principalement les plus utilisées, et plus particulièrement les méthodes d'optimisation stochastiques.
- Le chapitre III est consacré à une étude bibliographique sur les méthodes de renforcement et amélioration du sol, en accordant une importance particulière à la technique de clouage.
- Dans le chapitre IV, on aborde le processus d'optimisation des paramètres à travers la modélisation numérique du modèle géométrique du sol cloué en utilisant le (PLAXIS 2D), où chaque méthode d'optimisation a été testée et appliquée de façon classique à partir de fonctions mathématiques, trois méthodes d'optimisation ont été appliquées : l'algorithme génétique GA, méthode de TAGUCHI et la méthode de surface de réponse RSM. Des comparaisons entre ces méthodes d'optimisation mono-objectives ont été faites.

Nous concluons le travail par une discussion des résultats obtenus, des conclusions et des perspectives sur les travaux effectués et les travaux à venir.

Références

1. **Dede, T., Kripka, M., Togan, V., Yepes, V. and Rao, R.V** (2019). Usage of Optimization Techniques in Civil Engineering During the Last Two Decades. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 1(1), pp.1-17.
2. **Matej Leps** (2005). Single and Multi-Objective Optimization in Civil Engineering with Applications. Thesis.
3. **Zhen-Yu Yin, Yin-Fu Jin** (2019). Practice of Optimization Theory in Geotechnical Engineering. Chapter Book, Springer. pp. 1-7.

Chapitre I

État de l'Art sur l'Optimisation
en Géotechnique

I.1 Introduction

Les problèmes géotechniques dans le domaine de génie civil sont multiples et vastes, dans les années soixante sont apparues les premières recherches dans les problèmes d'optimisation. Plusieurs recherches sur les problèmes d'optimisation géotechniques tels que les murs de soutènement, fondations, tunnels...etc ont été réalisées. Dans la littérature récente, les chercheurs ont appliqué les techniques d'optimisation avancées à des fins différentes. A cause de la nature multi-objectif de la plupart des problèmes réels, l'optimisation multi-objectif est un axe de recherche très important.

Dans la plupart des problèmes de génie civil en général, on trouve le plus souvent un compromis entre des besoins techniques et les objectifs de coût.

I.2 État de l'Art sur l'Optimisation en Géotechnique

L'objectif de cette section est de rassembler les études utilisant les différentes techniques d'optimisation dans les multiples divisions de problèmes de l'ingénierie géotechnique (Dede, T et al, 2019).

La stabilité des pentes est l'une des grands et sérieux problèmes de géotechnique qui estime le potentiel de rupture de la masse du sol en mouvement couvrant une pente. Il existe de nombreuses techniques pour localiser la surface de pente critique dans l'ingénierie géotechnique classique, il existe une forte demande pour trouver une surface de glissement critique ou une configuration optimale. Parmi ces travaux de recherche on cite :

- Little et Price (1958) qui ont présenté une approche informatisée de l'analyse de la stabilité des pentes en utilisant l'adaptation de Bishop de la méthode suédoise.

Les travaux de Horn en 1960 avec un début élémentaire et l'application des techniques d'optimisation à la résolution de problèmes d'ingénierie géotechnique a fait de modestes progrès au cours des années soixante-dix. On cite aussi des tentatives sérieuses pour appliquer ces techniques :

- Les travaux de recherches de (Arai et Tagyo, 1965) et (Ramamurthy et al., 1977, Baker et Garber, 1977) ont pour but de localiser la surface de glissement critique et le facteur de sécurité minimum correspondant pour des pentes homogènes.

Depuis les premières tentatives initiales à ce jour, l'art de l'application de ces techniques a été étendu dans les domaines déjà cités tels que la stabilité des talus, pression du sol, la capacité portante, l'estimation des paramètres d'ouvrage géotechnique, la conception optimale des fondations...etc.

Plusieurs chercheurs en génie géotechnique ont également pris des initiatives dans ce sens, réalisant le potentiel de ces méthodes, ils ont commencé à développer des programmes pour résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires soumis à la fois à des contraintes d'égalité et d'inégalité afin d'analyser des problèmes géotechniques.

- Lysmer (1970) a résolu les problèmes de capacité portante et de pression du sol en convertissant le problème de programmation non linéaire en un problème linéaire en approximant les contraintes non linéaires par une série de lignes droites et des techniques de programmation linéaire appliquées.
- Potchman et Kolesnichenko (1972) ont utilisé la programmation dynamique pour résoudre les problèmes de capacité.
- Krugman et Krizek (1973), Chen (1975) ont résolu des problèmes de stabilité de pente sans contrainte avec seulement 2 à 3 variables.
- Basudhar et al (1979a, 1979b, 1981, 2006, 2007) ont utilisé des techniques de programmation non linéaires pour résoudre les problèmes de capacité portante, de stabilité des pentes et de pression de terre passive.

L'utilisation de telles techniques en génie géotechnique a augmenté de manière significative, toujours dans l'analyse des problèmes de stabilité, les travaux suivants sont apparus juste après : Baker, 1980 ; Martin, 1982 ; Munro, 1982 ; Yudhbir et al., 1987 ; Sloan, 1988, 1989. Les travaux de Singh et Basudhar, 1992a, 1992b, 1993a, 1993b, 1995a, 1995b ; Basudhar 2008, et Sabahit et al, 1996.

Bien que la puissance des techniques d'optimisation linéaire été bien reconnue, à la fin des années 90, leur incapacité à résoudre les problèmes dans des situations particulières était de plus en plus appréciée. Ainsi, le besoin d'appliquer de nouvelles méthodes évolutives, telles que le recuit simulé et l'algorithme génétique, s'est fait sentir. Ces méthodes sont utilisées dans d'autres branches de l'ingénierie et de la science.

- (Simpson et Priest, 1993), (Pal et al., 1996) ; ont utilisé une procédure d'algorithmes génétiques (GA) pour localiser la surface de glissement circulaire critique, et il existe diverses applications des GA dans les problèmes d'ingénierie des transports et d'ingénierie structurelle.

Dans les années 2000 plusieurs travaux ont été faites pour traiter différents problèmes géotechniques en utilisant les algorithmes génétiques :

- (Ponterosso et al 2000) ont produit une solution GA pour le problème d'optimisation des coûts du tracé des armatures pour les pentes de sol renforcées.

- (McCombie et Wilkinson, 2002) ont appliqué une GA simple pour rechercher le facteur de sécurité minimum dans l'analyse de la stabilité des pentes.
- (Zolfaghari et al, 2005) ont présenté une GA simple pour rechercher la surface critique de rupture non circulaire dans l'analyse de stabilité de pente.
- En utilisant Tree genetic programming (TGP), la formulation de la résistance à la compression non confinée des sols meubles a été étudié par Narendra et al (2006) et évaluation des déplacements latéraux induits par la liquéfaction ont été réalisé par Javadi et al (2006).
- Cheng et al (2007) ont appliqué six algorithmes d'optimisation heuristique à des pentes simples et complexes.
- Levasseur et al (2007,2009) ont utilisé une AG pour identifier les paramètres du sol, d'un mur de palplanches retenant une excavation.
- Un programme génétique linéaire (LGP) a été appliquée par Alavi et al. (2008) pour prédire les caractéristiques de performance du sol stabilisé.
- L'identification de la dynamique non linéaire des glissements de terrain par la programmation génétique des arbres TGP (Yang et Feng, 2004,2005).
- Prédiction du tassement des fondations peu profondes a été appliqué par Rezanian et Javadi, (2007) en appliquant TGP.
- Une modélisation constitutive des sables de Leighton buzzard par Cabalar et al (2009)
- La modélisation du rapport d'amortissement et du module de cisaillement des mélanges sable-mica faite par Cevik et Cabalar (2009).
- La prédiction de l'affouillement des pieux circulaires (Guvén et al., 2009).
- La prédiction de la capacité de soulèvement des caissons d'aspiration (Alavi et al, 2010b)
- Modélisation du système non linéaire des problèmes d'ingénierie géotechnique (Gandomi et Alavi, 2012), prédiction des paramètres temporels des mouvements du sol (Gandomi et al., 2011) et la simulation génétique non linéaire des paramètres de résistance au cisaillement du sol (Mousavi et al., 2011).
- Mendjel et Messast (2012) ont développé une méthode d'optimisation par l'algorithme génétique permettant l'identification de la perméabilité des sols non saturés en minimisant l'écart entre les mesures expérimentales et les résultats numériques.
- Islam et Rokouzzaman, M. (2018) ont présenté un processus de conception optimisé des fondations à l'aide d'algorithmes génétiques.

Depuis le début des années quatre-vingt-dix, les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été appliqués avec succès, presque dans tous les problèmes de l'ingénierie géotechnique et sont devenus les procédures de reconnaissance de formes les plus largement utilisées, les RNA ont été utilisées pour un large éventail de problèmes d'ingénierie géotechnique, comme c'est présenté dans les travaux de ; Shahin et al., 2001, 2002, 2004 ; Alavi et al., 2009a, 2010a ; Alavi et Gandomi, 2011b)

La littérature révèle aussi que les RNA ont été largement utilisées pour prédire les capacités de charge axiale et latérale en compression et en soulèvement des fondations sur pieux :

(AbuKiefa 1998 ; Ahmad et al. 2007 ; Chan et al. 1995).

Prédiction du coefficient de pression terrestre latérale à l'aide de réseaux de neurones artificiels (Das et Basudhar 2005) et (Rahman et al. 2001).

Depuis la dernière décennie l'utilisation de l'RNA a été propagé dans divers problèmes d'ingénierie géotechnique, les ingénieurs géotechniciens se sont aventurés et ont cherché l'application de cette nouvelle technique (RNA) dans la modélisation de problèmes d'ingénierie géotechnique complexes tels que l'analyse de liquéfaction, surtout que la liquéfaction est l'un des phénomènes de rupture du sol très dangereux lors des tremblements de terre qui causent de nombreux dommages à la plupart des ouvrages de génie civil. Bien que le mécanisme de liquéfaction soit bien connu, la prédiction de la valeur des déplacements induits par la liquéfaction est très complexe et n'est pas entièrement résolu, cela a attiré de nombreux chercheurs (Goh 1994, 1995 ; Hanna et al. 2007 ; Javadi et al. 2006 ; Juang 2001) pour étudier l'applicabilité des RNA pour prédire la liquéfaction.

Des études connexes, ont été aussi réalisés comme : les relations constitutives du sol (Ghaboussi et al. 1998), l'analyse des fondations sur pieux (Goh, 1995a, 1995b), une approche générale des analyses basées sur la fiabilité et des conceptions optimales des pieux chargés latéralement est présentée par Barakat, S. A et al (1999), les fondations sur pieux et la prédiction des propriétés du sol (Shahin et al. 2001 ; Shahin, 2002, 2004).

Sur la base de l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA), des méthodologies ont été développées pour estimer plusieurs propriétés du sol, notamment la pression de préconsolidation, la résistance au cisaillement et l'historique des contraintes compactage et perméabilité, classification des sols et la densité des sols.

Les autres applications des RNA en génie géotechnique comprennent les murs de soutènement (Kung et al. 2007), les barrages (Kim et Kim 2008), le dynamitage (Lu 2005), l'exploitation minière (Rankine et Sivakugan 2005 ; Singh 2005), génie géoenvironnemental (Shang et

al.2004), mécanique des roches (Gokceoglu et al.2004), caractérisation de sites des tunnels et des ouvertures souterraines (Benardos et Kaliampakos 2004 ; Zhao 2008).

- Le problème de la prédiction du tassement des fondations peu profondes, en particulier sur les sols sans cohésion, est très complexe, incertain et pas encore entièrement compris. Ce qui a fait encourager d'autres chercheurs.
- Le problème de l'estimation de la capacité portante des fondations peu profondes par les RNA a également été étudié par Padminin et al (2008) et Provenzano et al. (2004).

D'autres travaux sont apparus en utilisant d'autres techniques d'optimisations telles que PSO (Particle Swarm Optimisation), Topologie, ACO (Ant Colony Optimisation), DOE (design of experiment)....etc :

- Ahmadi-Nedushan et Varae (2009) ont proposé un algorithme d'optimisation basé sur l'optimisation par essaim de particules (PSO) pour une conception optimale des murs de soutènement en béton armé.

Les méthodes d'optimisation structurale, en particulier de l'optimisation topologique en géotechnique, ont été appliquées par Pucker et al (2011), Seitz (2015).

- Ghazavi, (2011) ont appliqué une méthodologie pour arriver à la conception optimale du mur de soutènement en béton en utilisant l'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis ACO pour trouver le poids et le coût minimum.
- Boumezerane (2012) a étudié l'optimisation par les ensembles flous de la densité des sondages par la prise en compte de l'information qualitative dans la caractérisation géotechnique de site.
- Une étude géotechnique de planification basée sur l'expérience de l'utilisation du système adaptatif neuro-flou (ANFIS) par Žlender et al (2012) pour obtenir un nombre optimal de points d'investigation d'essais sur le terrain et en laboratoire et la modélisation du module de déformation du sol à l'aide des résultats des tests.
- Un modèle neuro-flou en conjonction avec l'optimisation de l'essaim de particules (PSO) est utilisé par Sadoghi Yazdi et al (2012), pour l'étalonnage des paramètres de sol utilisés avec un modèle de constitution plastique à durcissement linéaire avec le critère Drucker-Prager. Les auteurs ont utilisé un système Neuro-flou (Neuro-fuzzy) pour fournir une régression non linéaire entre la contrainte déviatorique et la déformation axiale obtenue à partir d'un test triaxial drainé consolidé.
- Telis et al (2013) ont présenté une méthode d'optimisation simultanée des caractéristiques de conception d'un ouvrage de soutènement en utilisant des outils de qualité.

- Levasseur et al (2013) ont utilisé une méthode d'analyse rétrospective basée sur l'optimisation d'algorithmes génétiques (méthode itérative) pour identifier les paramètres d'un barrage en terre et en roche. Dans leur étude, un algorithme génétique a été utilisé comme stratégie d'optimisation pour rechercher la minimisation des erreurs. Ils ont introduit cette méthode comme une méthode d'optimisation longue et efficace.
- Momeni et al (2014) ont développé un modèle prédictif basé sur l'RNA amélioré avec une technique d'optimisation d'algorithme génétique (GA) pour prédire la capacité portante des pieux.
- En tant que technique d'optimisation puissante, la PSO a été largement appliquée dans différents aspects de l'ingénierie géotechnique tels que l'analyse de la stabilité des pentes, l'ingénierie des pieux et des fondations, la mécanique des roches et des sols, et la conception de tunnels et d'espaces souterrains. En plus des applications susmentionnées, PSO est également utilisé comme algorithme d'apprentissage dans les réseaux de neurones artificiels (RNA) qui sont largement utilisés en génie géotechnique (Armaghani et al. 2014a ; Hajihassani et al., 2014 ; Hasanipanah et al., 2016).
- Un programme informatique a été développé pour déterminer la surface de glissement critique des pentes en utilisant l'optimisation de l'essaim de particules PSO (Kalatehjari et al. 2013).
- Zaobao Liu et al (2014) ont présenté une évaluation et une prédiction de la stabilité des pentes avec l'approche d'un réseau de neurones robustes rapides appelée (Extreme Learning Machine ELM).
- Un modèle intégré d'optimisation de l'essaim de particules et de réseau neuronal artificiel (PSO-RNA) a été développé par Armaghani et al (2014) en définissant les résultats des tests d'indice de roche comme entrées et les paramètres de résistance au cisaillement comme sorties du modèle.
- Yazdani et al. (2014) ont examiné la capacité de l'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis (ACO) à optimiser les fondations de radeaux sur pilotis.
- Lye et al 2015 ont utilisé DOE pour trouver le cercle critique de glissement.
- Li Nansheng et al (2015) ont étudié une analyse de stabilité des pentes des barrages en terre-enrochement et proposé un modèle analytique optimal et utilise un algorithme génétique modifié (MGA) pour rechercher la surface de glissement sur la base des critères de rupture par cisaillement de la théorie non linéaire (Unified Strength Theory UST) sans hypothèse préalable de la forme de la surface de glissement.

- Hui et al (2015) ont mené une étude pour optimiser la conception dynamique des tunnels dans les masses rocheuses peu profondes. Ils ont utilisé le langage de programmation Python pour mettre en place un modèle dynamique d'étendue de tunnel qui pourrait être analysé et implémenté via le logiciel Abaqus. Ils ont également utilisé le logiciel MATLAB pour développer une optimisation d'algorithme génétique. Ils ont importé le modèle de calcul dynamique dans le programme d'optimisation des algorithmes génétiques du logiciel MATLAB. Ils ont introduit cette méthode pour la stabilité et l'amélioration de la conception dans le tunnel.
- Hoseini et al (2015) ont utilisé l'AG, le PSO et la régression multiple dans l'estimation de la valeur de résistance mécanique des sols.
- Zhang et Goh (2015) ont utilisé des modèles de régression pour estimer les états limites ultimes et de service des cavernes rocheuses souterraines.
- Jin et al (2016), et afin d'obtenir les paramètres du sol, ont utilisé l'analyse inverse en utilisant une méthode d'optimisation basée sur un algorithme génétique (GA).
- Zhen-yu yin et al (2017) ont utilisé une étude comparative des techniques d'optimisation (algorithmes génétiques, optimisation des essaims de particules et algorithme des colonies d'abeilles artificielles) pour identifier les paramètres du sol en génie géotechnique.
- Armaghani DJ et al (2017) : Cette étude visait à développer un modèle de réseau neuronal artificiel (RNA), ainsi qu'un modèle hybride basé à la fois sur l'optimisation des essaims de particules (PSO) et sur l'RNA, avec lequel prédire la capacité portante ultime des pieux enchâssés dans la roche.
- Kolivand et Rahmamejad (2017) ont étudié l'optimisation des paramètres de comportement du sol sur la base de la méthode de conception d'expérience (DOE).
- Jihong et Mingfei (2018) ont amélioré un modèle d'optimisation contre l'instabilité de la conception des dômes.
- Yang et Wang (2018) ont appliqué une procédure numérique en tenant compte de la combinaison du théorème de la borne supérieure et de la théorie du milieu stochastique, à l'analyse optimale du mode passif-actif pour décrire la rupture limite du tunnel peu profond circulaire avec tassement.
- Deng et al (2019) ont appliqué des cartes pour optimiser la conception du drainage de l'analyse de la stabilité des pentes sous l'infiltration des eaux souterraines.
- Primož Jelušič et al (2019) ont étudié le coût optimal et conception d'un stockage souterrain de gaz par ANFIS

- Armaghani et al (2019) ont proposé deux modèles prédictifs précis et pratiques des paramètres de résistance au cisaillement du sol via des modèles hybrides basés sur un réseau neuronal artificiel, à savoir un algorithme génétique et une optimisation de l'essaim de particules pour prédire la cohésion du sol sableux combiné à la fibre.
- Kalita et al. (2019) ont utilisé un algorithme génétique multi-objectif (MOGA) et une optimisation multi-objectif de l'essaim de particules (MOPSO) pour trouver la combinaison optimale de diverses variables de conception de plaques composites.
- Kiki et al 2006 ont utilisé la méthode de Taguchi pour analyser les résultats expérimentaux de la stabilisation d'une argile gonflante traitée par des solutions de cosse de néré. Cinq paramètres (valeur de bleu, pression de gonflement, amplitude de gonflement, indice de compression et indice de gonflement) ont été étudiés en faisant varier quatre facteurs (température, temps de macération, quantité de cosse, temps de cure).
- Lafifi et al. (2019) ont utilisé une combinaison du plan d'expérience (DOE) de Taguchi, du RSM et de la fonction de désirabilité pour optimiser les paramètres géotechniques d'un sol synthétique pour les tests pressiométriques.
- Yang et al (2019) ont optimisé une conception de structures de murs de soutènement dans différentes conditions dynamiques basées sur des systèmes intelligents et optimaux. En conséquence, un système de réseau neuronal a été développé pour établir une relation appropriée entre les données afin d'obtenir le facteur de sécurité des murs de soutènement.
- Pour la conception des murs de soutènement en béton armé, Kalemci (2020) a proposé un algorithme d'optimisation appelé Rao-3, le poids total de l'acier et du béton, qui sont utilisés pour la construction du mur de soutènement, a été choisi comme fonction objective.

I.3 L'optimisation dans les sols renforcés (sols cloués)

Le clouage est l'une des techniques des renforcements des sols, qui est utilisé pour améliorer des propriétés mécaniques de ces sols, par la mise en place d'inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion, et qui peuvent être utilisées soit pour la réalisation de massifs de soutènement en déblai, soit pour le renforcement de talus existants. Les éléments linéaires (barres, cornières, tubes.) sont mis en place horizontalement ou légèrement inclinés au fur et à mesure que l'on terrasse l'excavation et sont sollicités par la déformation progressive du massif (la méthode de clouage va être traité dans le chapitre méthodes de renforcement).

Les études suivantes montrent l'utilisation de diverses techniques d'optimisation dans les applications de clouage au sol et constitueront le point de départ et la référence de l'analyse menée dans cette étude.

L'optimisation des sols cloués est encore rare jusque dans les années 2000. L'objectif des méthodes d'optimisation utilisées est presque toujours de minimiser le coût de conception et le facteur de sécurité.

- Basudhar, P.K. et Patra 2000 ont utilisé un programme non linéaire pour l'optimisation d'un design d'un sol cloué.

Depuis le début des années 90, les RNA ont été appliqués avec succès presque dans tous les problèmes de l'ingénierie géotechnique, (Rahman et al. 2001 ; Shahin 2001, Shahin et Jaksa 2005a,2005b,2006) ont utilisé les RNA dans les ancrages aux sols

- Patra et Basudhar (2005) ont rapporté une méthode généralisée de conception optimale informatisée des pentes clouées dans le sol.
- Fan et Luo (2008) ont étudié l'effet des inclinaisons des clous sur la stabilité de la pente des clous du sol par élément finis
- Chang (2009) a introduit une méthode de conception d'optimisation du clouage de sol composite dans l'excavation du loess.
- Sivakumar Babu et Vikas Pratap Singh (2010) ont utilisé des modèles de régression pour les analyses de fiabilité d'un prototype de clou de sol.
- Zhou et al. (2011) ont développé un modèle d'éléments finis (EF) tridimensionnel (3D) pour simuler le comportement d'arrachement d'un clou de sol dans une boîte d'extraction de clou de sol sous différentes pressions de mort-terrain et d'injection
- Rotte et al. (2011) ont déterminé la stabilité de la pente et utilisé les inclinaisons et les paramètres des clous pour trouver une conception optimale.
- Zlender et al (2013) ont réalisé une optimisation de la stabilité sol-clou en utilisant ANFIS qui utilise l'approche de programmation non linéaire (PNL).
- Jelusic et Zlender (2013) ont présenté l'optimisation du clouage au sol à l'aide d'une approche de programmation non linéaire pour prédire le facteur de sécurité à l'aide de paramètres tels que l'angle de pente, l'inclinaison des clous et la longueur des clous
- Un algorithme génétique et un algorithme génétique hybride amélioré ont été établis pour optimiser la conception des clous de sol soutenant les paramètres des fosses de fondation profondes par Xu et al. (2013).

- Seo et al. (2014) ont considéré l'optimisation du clouage au sol à l'aide de trois paramètres de conception variables : la longueur des clous, le nombre de clous et la précontrainte
- La méthode de Monte Carlo a été utilisée par Cao et al. (2014) pour rechercher la méthode de conception et d'analyse optimale de fiabilité de la structure de clouage du sol sur la base de la surface de réponse.
- Zhang et al 2015 ont utilisé un modèle de régression pour estimer états limites ultimes et de service des cavernes rocheuses souterraines.
- Rabie (2016) a décrit la philosophie de conception des murs hybrides MSE / Soil Nail Wall afin d'évaluer le facteur de sécurité global.
- Hoa Jiambin et Banqiao Wang (2014) ont développé le modèle d'optimisation non linéaire basé sur l'algorithme de rétropropagation des réseaux de neurones artificiels (RNA) et établit un modèle intelligent qui est utilisé pour prédire le déplacement latéral maximal de la paroi clouée en sol composite.
- Gao et al, (2016) ont utilisé une procédure d'analyse rétrospective basée sur un algorithme génétique immunisé pour l'identification des paramètres du modèle élastique-plastique pour la roche entourant une excavation souterraine.
- Hong et al. (2017) ont mené un total de huit tests d'arrachement de clous de sol dans un champ pour examiner l'influence de la pression de mort-terrain (OP) et de la pression d'injection (GP) sur le PPR des clous de sol
- Deng Dong-ping (2017) : afin d'analyser facilement la stabilité d'une pente clouée dans le sol dans l'ingénierie réelle et de faciliter la conception optimale des paramètres pour le clouage du sol, des graphiques de courbes de niveau de facteur de sécurité (FOS) ont été dessinés sur la base de la relation proportionnelle linéaire établie entre l'espacement des clous du sol et de la hauteur de la pente, ainsi que de la longueur des clous du sol et de la hauteur de la pente.
- Qinghui Jiang et al (2017) ont proposé une méthode d'analyse inverse multi-objectifs pour l'excavation de pente dans une conception orthogonale qui comprend la simulation numérique, un réseau neuronal à propagation arrière (BPNN) et un algorithme génétique de tri élitiste non dominé (NSGA-II) ont été intégrés. Le modèle multi-objectif est construit en minimisant un ensemble de fonctions d'erreur multi-objectif entre la série chronologique d'observations et les valeurs calculées correspondantes. Ils ont utilisé les paramètres d'inversion obtenus dans une analyse directe pour prédire les déplacements.

- Hashemi et Rahmani, (2018) ont effectué une rétro-analyse en utilisant un algorithme génétique et une optimisation de l'essaim de particules afin de déterminer les paramètres de résistance du sol dans un projet d'excavation.
- Quansah et al. (2018) ont présenté la conception optimale avec analyse d'équilibre limite pour la stabilité de la pente clouée du sol.
- Jian Li et al (2019) ont acquis un mécanisme de renforcement des câbles d'ancrage précontraints dans la pente élevée et la pente et a proposé une méthode pour optimiser leur schéma de renforcement impliquant de tels câbles d'ancrage précontraints dans la pente.
- Mohd Sukry Mohamed et al 2019 ont optimisé les paramètres d'un sol cloué en utilisant le logiciel SLOPE/W.
- Yuan et al (2019) ont proposé une caractérisation statistique de model tout en prenant en compte la conception basée sur la fiabilité d'un mur en béton avec sol renforce par clouage.
- Wei Wang et al (2020) ont utilisé une étude numérique d'une fosse de fondation soutenue par une structure composite de clouage de sol, le degré d'influence des facteurs affectant le déplacement d'une fosse de fondation symétrique a été analysé sur la base d'un test orthogonal.
- Sharma et Ramkrishnan (2020) ont présenté une optimisation paramétrique et une analyse de régression multiple pour le clouage du sol à l'aide d'approches numériques.
- Johari et al. (2020) ont utilisé une analyse stochastique à l'aide de la méthode des éléments finis aléatoires pour l'analyse de la fiabilité du système du système d'un sol cloué, ils ont utilisé le modèle de Singh et Babu 2010 et ont représenté l'importance des modes de stabilité mentionnés et leurs effets sur la fiabilité, ils ont et la probabilité de défaillance du système en utilisant la méthode des éléments finis aléatoires.
- Effet de l'espacement des clous sur la stabilité globale des murs cloués au sol à l'aide des méthodes d'équilibre limite et des éléments finis a été étudié par Sergio Villalobosa et Felipe (2021), Rouzbeh (2021) ont ajouté l'effet de surcharge.

Conclusion :

Avec un début modeste au début des années soixante, l'application des techniques d'optimisation pour résoudre les problèmes d'ingénierie géotechnique a augmenté de manière phénoménale, en particulier avec le développement important d'outils de calcul informatique. Des grands efforts se sont avérés fructueux pour résoudre de nombreux problèmes d'ingénierie géotechnique tels que la conception optimale des structures de soutènement et des fondations peu profondes, l'analyse automatisée de la stabilité des pentes avec et sans armature, les murs en terre renforcée, l'analyse de la limite inférieure des ancrages, les semelles peu profondes et l'estimation des paramètres.... etc

La plupart des développements dans ce sens ont eu lieu dans les années soixante-dix et quatre-vingt. Par la suite, des efforts ont été faits pour utiliser des techniques évolutives telles que l'algorithme génétique pour analyser les problèmes de stabilité des pentes et assurer l'optimalité globale de la solution. Il a été rapporté que l'algorithme génétique donne des résultats meilleurs ou comparables à ceux obtenus à partir d'autres approches programmation non linéaire (PNL). L'algorithme génétique a été introduite dans l'ingénierie géotechnique au début des années 90 et largement appliquée à la résolution de deux types de problèmes, à savoir l'estimation des paramètres et l'analyse de la stabilité des pentes non renforcées et renforcées. Parallèlement, des efforts ont été déployés pour appliquer les réseaux de neurones artificiels à la résolution de ces problèmes. Ils ont été appliqués avec succès dans divers types de problèmes d'ingénierie géotechnique. La modélisation avec RNA a un avantage sur les autres types de modélisation de système. Ainsi, on observe que ces techniques jouent un grand rôle dans la recherche de solutions aux problèmes, auquel on n'avait pas pensé auparavant et la résolution d'un problème d'optimisation et un problème complexe, car de nombreux facteurs interviennent et interagissent entre eux et bien que des progrès considérables aient été réalisés dans l'application de ces techniques à différents problèmes d'ingénierie géotechnique, il existe une marge considérable pour appliquer toutes ces techniques pour une conception et une modélisation économique et meilleure des phénomènes physiques.

References

1. Alavi, A.H., and Gandomi, A.H. (2011b). Prediction of principal ground-motion parameters using a hybrid method coupling artificial neural networks and simulated annealing. *Comput. Struct.* 89(23–24), 2176– 2194.
2. Alavi, A.H., Gandomi A.H., Mousavi, M., and Mollahasani, A. (2010b). High-precision modeling of uplift capacity of suction caissons using a hybrid computational method. *Geomech. Eng.* 2(4), 253–280
3. Alavi, A.H., Gandomi, A.H., Gandomi, M., and Sadat Hosseini, S.S. (2009a). Prediction of Maximum Dry Density and Optimum Moisture Content of Stabilized Soil Using RBF Neural Networks. *The IES J. Part A: Civil Struct. Eng.* 2(2), 98–106.
4. Alavi, A.H., Gandomi, A.H., Mollahasani, A., Heshmati, A.A.R. and Rashed, A. (2010a). Modeling of maximum dry density and optimum moisture content of stabilized soil using artificial neural networks. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 368–379
5. Alavi, A.H., Heshmati, A.A.R., Gandomi, A.H., Askarinejad, A. and Mirjalili, M. (2008). Utilisation of Computational Intelligence Techniques for Stabilised Soil. In “Engineering Computational Technology” (M. Papadrakakis, B.H.V. Topping Eds.), paper 175, Civil-Comp Press, Edinburgh, UK.
6. Baker, R. (1980), Determination of Noncircular Slip Surface in Slope Stability Computation, *Int. J. for Num. & Anal. Methods in Geomechanics*, 4, 333-411.
7. Barakat, S. A., Malkawi, A. I. H., & Ra'ed, H. T. (1999). Reliability-based optimization of laterally loaded piles. *Structural safety*, 21(1), 45-64.
8. Basudhar, P. K. (2008), “Application of optimization and other evolutionary techniques in geotechnical engineering”, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, 1-6 October
9. Basudhar, P.K. et Patra, C.R., Optimal Design of soil Nailed Structures –A Nonlinear Programming Approach, Proceedings of the Annual Convention of the Orissa Engineers Congress-2000, Bhubaneswar, India, pp.72-82.
10. Basudhar, P.K., Das, Anuradha, Das, Sarat Kumar, Dey, Arindam, Deb, Kousik and De, Sourav (2006) “Optimal Cost Design of Rigid Raft Foundation” The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-10), Bangkok, Thailand, 3rd -5th August, Vol: 7, pp: 39-44.

11. Basudhar, P.K., Valsangkar, A.J., Madhav, M.R. (1979a), "Nonlinear Programming in Automated Slope Stability Analysis," *Indian Geotechnical Journal*, Vol.9, Jul.-Sept., No.3, pp. 212-219
12. Basudhar, P.K., Valsangkar, A.J., Madhav, M.R. (1979b), "Optimal Lower Bound of Passive Earth Pressure Using Finite Elements and Nonlinear Programming," *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, John Wiley and Sons Ltd., Vol.3, pp. 367-379.
13. Basudhar, P.K., Valsangkar, A.J., Madhav, M.R. (1981), "Sequential Unconstrained Minimization in the Optimal Lower Bound Bearing Capacity Analysis," *Indian Geotechnical Journal*, Vol.11, Jan., No.1, pp. 42-55.
14. Basudhar.P.K., Amol Vashistha, Deb, Kousik and Dey. Arindam, (2007) "Cost Optimization of Reinforced Earth Walls", *Geotechnical and Geological Engineering: an International Journal*, Springer, Netherlands (Published Online 16th August, 2007
15. Cabalar, A.F., Cevik, A., and Guzelbey, I.H. (2009). Constitutive modeling of Leighton Buzzard Sands using genetic programming. *Neur. Comput. Appl.* 19(5), 657–665
16. Cao, L, Liu, T, and Liu, H.M 2014. Soil Nailing reliability Optimization Design of Foundation Pit Based on Response Surface Method, *Appl. Mech. Mater.*, ISSN:1662-7482,556-562,4655-4659
17. Cevik, A. and Cabalar, A.F. (2009). Modelling damping ratio and shear modulus of sand–mica mixtures using genetic programming. *Exp. Syst. Appl.* 36(4), 7749–7757
18. Chang, G.M 2009. Optimization design of composite soil-nailing in loess excavation, *Geotech. Aspects Underg. Constr. Soft Ground*, ISBN 978-0-415-48475-6.
19. Chen, W. F. (1975), *Limit Analysis and Soil Plasticity*, *Developments in geotechnical Engineering*, No.7, Elsevier Scientific Publishing Company, New York
20. Cheng, Y. M., Li, L., & Chi, S. C. (2007). Performance studies on six heuristic global optimization methods in the location of critical slip surface. *Computers and Geotechnics*, 34(6), 462-484.
21. Das, S.K. and Basudhar, P.K. (2005), "Prediction of Coefficient of Lateral Earth Pressure Using Artificial Neural Networks ", *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, Vol. 10. Bundle-A.
22. Dede, T., Kripka, M., Togan, V., Yepes, V. and Rao, R.V., (2019). Usage of Optimization Techniques in Civil Engineering During the Last Two Decades. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 1(1), pp.1-17.

23. Deng, D.P., Li, L. & Zhao, L.H. (2017). Limit equilibrium analysis for stability of soil nailed slope and optimum design of soil nailing parameters, *Journal of Central South University*, 24(11), 2496-2503.
24. D. Mendjel and S. Messast, Development of limit equilibrium method as optimization in slope stability analysis. *Int. J. Structural Engineering and Mechanics*, Techno Press, Vol.41, N°3, pp. 339-348, 2012.
25. Fan CC, Luo JH (2008) Numerical study on the optimum layout of soil– nailed slopes. *Comput Geotech* 35(4):585–599
26. Gandomi A.H., Alavi A.H., Yun G.J., (2011). Nonlinear Modeling of Shear Strength of SFRC Beams Using Linear Genetic Programming. *Struct. Eng. Mech.*, 38(1): 1-25
27. Gandomi, A.H., and Alavi, A.H., (2012). A new multi–gene genetic programming approach to nonlinear system modeling. Part II: Geotechnical and Earthquake Engineering Problems. *Neur. Comput. Appl.* 21, 189–201
28. Ghaboussi, J., and Sidarta, D. E. (1998), New Nested Adaptive Neural Networks (NANN). *Computers and Geotechnics*, 22(1), 29-52
29. Goh, A. T. C. (1994), Seismic Liquefaction Potential Assessed by Neural Network, *J. of Geotech. Engineering*, ASCE, Vol.120 (9), 1467-1480
30. Goh, A. T. C. (1995b), Modeling Soil Correlations Using Neural Network, *J. of Computing in Civil Engineering*, Vol.9, No.4, pp.275-278
31. Guven, A., Azamathulla, H.M., and Zakaria, N.A., (2009). Linear genetic programming for prediction of circular pile scour. *Ocean Eng.* 36 (12–13), 985–991
32. Hao, J., & Wang, B. (2014). Parameter sensitivity analysis on deformation of composite soil-nailed wall using artificial neural networks and orthogonal experiment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
33. Hashemi, S. M., & Rahmani, I. (2018). Numerical comparison of the performance of genetic algorithm and particle swarm optimization in excavations. *Civil Engineering Journal*, 4(9), 2186-2196.
34. Hong CY, Liu ZX, Zhang YF, Zhang MX, Borana L (2017) Influence of critical parameters on the peak pullout resistance of soil nails under different testing conditions. *Int J Geosynth Ground Eng* 3(2):1–7
35. Horn, J. A. (1960), Computer analysis of slope stability, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 102, No.GT9, 971-966
36. Islam, M. S., & Rokonzaman, M. (2018). Optimized design of foundations: an application of genetic algorithms. *Australian Journal of Civil Engineering*, 16(1), 46-52. eves (1961)

37. Javadi, A.A., Rezanian, M. and Mousavi Nezhad, M. (2006). Evaluation of liquefaction induced lateral displacements using genetic programming. *Comput. Geotech.* 33, (4–5), 222–233
38. Johari A, Hajivand AK, Binesh SM (2020) System reliability analysis of soil nail wall using random finite element method. *Bull Eng Geol Environ*:1–22
39. Juang, C.H., Jiang, T. and Christopher, R.A. (2001). Three-dimensional site characterisation: neural network approach. *Geotechnique* 51, 799–809. Chan et al.1995
40. Kiki, T. Y., I. K. Cissé, and J-L. Favre. "Plans d'expériences pour la stabilisation d'une argile gonflante du Bénin." *Revue française de géotechnique* 114 (2006) : 33-41.
41. Kim, Y.S. and Kim, B.T. (2008). Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model. *Comput. Geotech.* 35, 313–22
42. Krugman, P. K. and Krizek, R. J. (1973), Stability Charts for Inhomogeneous Soil Conditions, *Geotechnical Engineering, Journal of South East Asian Society of Soil Engineering*, 4, 1-13.
43. Levasseur, S., Malécot, Y., Boulon, M. and Flavigny E. (2007). Soil parameter identification using a genetic algorithm. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 32, 189–213
44. Levasseur, S., Malécot, Y., Boulon, M. and Flavigny, E. (2009). Statistical inverse analysis based on genetic algorithm and principal component analysis: Method and developments using synthetic data. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 33, 1485–511
45. Li, J. ; Chen, S. ; Yu, F. ; Jiang, L. (2020). Reinforcement Mechanism and Optimization of Reinforcement Approach of a High and Steep Slope Using Prestressed Anchor Cables. *Appl. Sci.* 10 (1), 266
46. Liu, Zaobao, et al. "An extreme learning machine approach for slope stability evaluation and prediction." *Natural hazards* 73.2 (2014) : 787-804.
47. Little, A.L. and Price, V.E., (1958). The use of an electronic computer for slope stability analysis. *Geotechnique*, 8(3), pp.113-116
48. Lysmer, J. (1970), Limit Analysis of Plane Problems in Geotechnical Engineering, *J. of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 896, N0.SM4, 1311-1334
49. Martin, J. B. (1982), Embankments and Slopes by Mathematical Programming, J.B. Martins (Ed.), *Numerical Methods in Geomechanics*, D Reidel Publishing Company, 305-334
50. McCombie, P. and Wilkinson, P. (2002). The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis. *Comput. Geotech.* 29, 699–714

51. Mousavi, S.M., Alavi, A.H., Gandomi, A.H., and Mollahasani, A., (2011). Nonlinear Genetic-Based Simulation of Soil Shear Strength Parameters. *J. Earth Syst. Sci.* 120(6), 1001–1022
52. Munro, J. (1982), *Plastic Analysis in Geomechanics by Mathematical Programming*, J.B. Martins (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics, D Reidel Publishing Company, 247-272
53. Nansheng, Li, Tang Bo, and Xie Lihui. "Slope stability analysis of earth-rockfill dams using MGA and UST." *Journal of Computational Engineering* 2015.
54. Narendra, B.S., Sivapullaiah, P.V., Suresh, S. and Omkar, S.N. (2006). Prediction of unconfined compressive strength of soft grounds using computational intelligence techniques: A comparative study. *Comput. Geotech.* 33, 196–208.
55. Pal, S., Wije Wathugala, G. and Kundu, S. (1996). Calibration of a constitutive model using genetic algorithms. *Comput. Geotech.* 19, 325–48.
56. Patra, C.R. and Basudhar, P.K. (2005). "Optimum Design of Nailed Soil Slopes", *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 273–296
57. Pochtman, Yu M. and Kolesnichenko, A. L. (1972), *Application of the Dynamic Programming Method to the Solution of Some Problems of Soil mechanics*, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Translated from Russian, 430-432
58. Ponterosso, P., & Fox, D. S. J. (2000). Optimization of reinforced soil embankments by genetic algorithm. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 24(4), 425-433.
59. Rabie, M. (2016). Performance of hybrid MSE/Soil Nail walls using numerical analysis and limit equilibrium approaches. *HBRC journal*, 12(1), 63-70.
60. Rahman, M. S., Wang, J., Deng, W., and Carter, J. P. (2001). "A neural network model for the uplift capacity of suction cassions." *Computers and Geotechnics*, 28(4), 269-287
61. Rezania, M. and Javadi, A.A. (2007). A new genetic programming model for predicting settlement of shallow foundations. *Can. Geotech. J.* 44(12), 1462–73
62. Rotte, V., Viswanadham, B., & Chourasia, D. (2011). Influence of slope geometry and nail parameters on the stability of soil-nailed slopes. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(3), 267-281.
63. Sabahit, N, Basudhar, P.K., Madhav, M.R. (1996), "A Generalized Procedure for the Optimum Design of Nailed Soil Slopes," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.19, pp. 437-452.

64. Seitz, K. F. (2015, September). Topology optimization for the design of geotechnical structures. In *Proceedings of the 24th European Young Geotechnical Engineers Conference (EYGEC), Durham, UK* (pp. 11-13).
65. Seo, H. J., Lee, I. M., & Lee, S. W. (2014). Optimization of soil nailing design considering three failure modes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 488-496.
66. Shahin, M. A., and Jaksa, M. B. (2005a). "Modeling the pullout capacity of marquee ground anchors using neurofuzzy technique." *Proceedings of the International Journal of Modeling and Simulation, MODSIM 2005, Melbourne, Australia*, 66-72.
67. Shahin, M. A., and Jaksa, M. B. (2005b). "Neural network prediction of pullout capacity of marquee ground anchors." *Computers and Geotechnics*, 32(3), 153-163.
68. Shahin, M. A., and Jaksa, M. B. (2006). "Pullout capacity of small ground anchors by direct cone penetration test methods and neural methods." *Canadian Geotechnical Journal*, 43(6), 626-637.
69. Shahin, M. A., Jaksa, M. B. and Maier, H. R. (2001), Artificial Neural Network Application in Geotechnical Engineering, *Australian Geomechanics*, 36(1), 49-62.
70. Shahin, M. A., Jaksa, M. B., and Maier, H. R. (2001). "Artificial neural network applications in geotechnical engineering." *Australian Geomechanics*, 36(1), 49-62.
71. Shahin, M. A., Maier, H. R., and Jaksa, M. B. (2004), Data Division for Developing Neural Networks Applied to Geotechnical Engineering, *J. of Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol.18(2), 105-114.
72. Shahin, M.A., Maier, H. R., and Jaksa, M. B. (2002), Predicting Settlement of Shallow Foundations Using Neural Network, *J. of Geotech. & Geoenv. Engineering, ASCE*, Vol. 128(9), 785-793
73. Sharma A, Ramkrishnan R (2020) Parametric optimization and multiregression analysis for soil nailing using numerical approaches. *Geotech Geol Eng*:1–19
74. Simpson, A.R. and Priest, S.D. (1993). The application of genetic algorithms to optimisation problems in Geotechnics. *Comput. Geotech.* 15, 1–19.
75. Singh, D. N. and Basudhar, P. K. (1992), "A Note on the Optimal Lower bound Pull-out Capacity of Inclined Strip Anchor in Sand," *Canadian Geotechnical Engineering Journal*, Vol.29(5), pp. 870-873.
76. Singh, D. N. and Basudhar, P. K. (1992), "A Note on Vertical Cut in Homogeneous Soils," *Canadian Geotechnical Engineering Journal*, June, pp. 859-862.

77. Singh, D. N. and Basudhar, P. K. (1993), "A Note on the Effect of Mesh Pattern on the Lower bound Bearing Capacity of Embedded Strip Footings," *Int. J. for Num. and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.17, pp. 735-743.
78. Singh, D. N. and Basudhar, P. K. (1993), "Optimal Lowerbound Bearing Capacity of Reinforced Soil Retaining Walls Using Finite Elements and Nonlinear Programming," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.12, No.7, pp. 665-686.
79. Singh, D. N. and Basudhar, P. K. (1995), "Optimal Lower-bound Solutions of Plane-strain Metal Indentation and Extrusion Problems," *Journal of Material Processing Technology*, 49, pp. 75-84, Elsevier.
80. Singh, D. N. and Basudhar, P. K. (1995), "Unconstrained Minimization Techniques for Passive Earth Pressure – A Comparative Study, *Indian Geotechnical Journal*, Vol.25 (2), pp. 182-195.
81. Sivakumar Babu GL, Singh VP (2009) Deformation and stability regression models for soil nail walls. *Proc Inst Civ Eng: Geotech Eng* 162(4):213–223
82. Sloan, S.W. (1988), Lower bound limit analysis Using Finite elements and Linear Programming, *International Journal for numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, 61-77.
83. Sloan, S.W. (1989), Upper bound limit analysis Using Finite elements and Linear Programming, *International Journal for numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, 263-283 Tagyo, 1965
84. Xu, W., Feng, J.S. (2013), "Parameter Optimization Design of Soil Nail Supporting to Deep Foundation Pits", *Advanced Materials Research*, 671-674, 235-239.
85. Yang, C.X., Feng, X.T. (2005). Evolutionary self-organizing identification of nonlinear dynamics of landslides. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* 24(6), 911–914.
86. Yang, C.X., Tham, L.G., Feng, X.T., Wang, Y.J. and Lee, P.K.K. (2004). Two-stepped evolutionary algorithm and its application to stability analysis of slopes. *J. Comput. Civil Eng. (ASCE)* 18, 145–53.
87. Yudhbir, Basudhar, P.K. and Bhowmik, S.K. (1987), "Slope Stability Computations with nonlinear failure envelop using generalized procedure for slice and optimization techniques," *Proc. Second International Conf. on advances in Engineering, NUMETA-87*, Univ. College of Swansea, U.K
88. Zhang, W. G., & Goh, A. T. C. (2015). Regression models for estimating ultimate and serviceability limit states of underground rock caverns. *Engineering geology*, 188, 68-76.

89. Zhou H, Yin JH, Hong CY (2011) Finite element modelling of pullout testing on a soil nail in a pullout box under different overburden and grouting pressures. *Can Geotech J* 48(4):557–567
90. Žlender, B, Jelušič, P and Boumezerane, D 2012. Planning geotechnical investigations using ANFIS, *Geotech. Geolog. Eng*, 30(4),975-989
91. Zolfaghari, A. R., Heath, A. C., & McCombie, P. F. (2005). Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis. *Computers and geotechnics*, 32(3), 139-152.

Chapitre II

Méthodes d'Optimisation

Méthodes d'optimisation

II .1 Introduction

Par définition l'optimisation est un terme qui est fréquemment et largement répandu utilisée pour la description et la conduite des processus de conception pour le développement des produits. Largement parlant, l'optimisation signifie le perfectionnement ou l'amélioration de la conception en termes d'un ou plusieurs aspects de performance et de qualité (Benanane, S 2019), elle est une branche des mathématiques appliquées modernes, et de nombreuses recherches, à la fois pratiques et théoriques, lui sont consacrées.

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue plusieurs méthodes d'optimisation en accordant une importance particulière aux méthodes utilisées dans notre recherche ; notamment la méthode de l'algorithme génétique, les méthodes de plans d'expériences : Taguchi et la méthode de surface de réponse RSM. Pour les autres méthodes, une description sommaire a été faite en faisant référence à la documentation pour tout besoin d'informations ou de détails supplémentaires. L'objectif n'est pas d'en faire une liste, mais de comprendre le principe de chaque méthode, afin d'établir la méthodologie à mettre en place pour choisir la technique adéquate en fonction d'un problème donné.

L'optimisation est au cœur de tout problème lié à la prise de décision, que ce soit en ingénierie ou en économie. Le but ultime de toutes ces décisions est soit de minimiser l'effort requis et/ou maximiser le bénéfice désiré. La résolution d'un problème d'optimisation est un problème complexe, car de nombreux facteurs interviennent et interagissent entre eux. Les problèmes d'optimisation rencontrés en pratiques ont rarement mono-objectif ; plusieurs paramètres contradictoires à satisfaire sont présents (Hafid Zidani, 2013). Classiquement, un problème est dit bien posé si les sollicitations, les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont connus. Si le système est stable, alors la réponse du modèle est unique.

L'optimisation multi objective est disponible depuis environ trois décennies, et son application dans les problèmes du monde réel ne cesse d'augmenter. Son but est de chercher à optimiser plusieurs composantes de la fonction objective. La solution du problème n'est pas un vecteur unique, mais un ensemble de solutions connu comme l'ensemble de solutions Pareto optimales. Il n'existe pas de méthode unique disponible pour résoudre efficacement tous les problèmes d'optimisation.

II. 2 Classes des méthodes d'optimisation

La théorie de l'optimisation comprend l'étude quantitative des optimums et les méthodes pour les trouver. L'espace d'état est défini par la modélisation mathématique des paramètres d'entrées du système suivant la nature des variables, cet espace peut être continu ou discrets.

Les méthodes d'optimisation sont classées sommairement en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes non déterministes

- Méthodes déterministes.

Ce sont des méthodes qui exigent des hypothèses sur la fonction à optimiser, telles que la continuité et la dérivabilité en tout point du domaine des solutions. Leur principe est d'exploiter au mieux l'information connue sur un espace de recherche pour estimer l'optimum. Les méthodes déterministes correspondent principalement aux méthodes dites de gradient. Elles n'utilisent aucun concept statistique mais requièrent des hypothèses sur la fonction à optimiser. La fonction à optimiser est évaluée en chacun des points de discrétisation. La valeur maximale est alors considérée comme une bonne approximation de l'optimum de la fonction. Cette méthode est brutale et le temps de calcul augmentera exponentiellement en fonction du nombre de variables (Vincent Magnin 1998).

Les méthodes déterministes sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction est très rapide ou quand la forme de la fonction est connue a priori. Les cas plus complexes (temps de calcul important, nombreux optima locaux, ...) sont souvent traités plus efficacement par des méthodes non-déterministes, appelées aussi méthodes stochastiques.

- Méthodes indéterministes (stochastiques).

Les cas d'optimisation complexes impliquant des temps de calcul importants, de nombreux optima locaux ou des fonctions non-dérivables, seront souvent traités plus efficacement par des méthodes non-déterministes. Ces méthodes font appel à des tirages de nombres aléatoires qui permettent d'explorer l'espace de recherche plus efficacement. Elles sont faciles à implanter pour le traitement des problèmes d'optimisation discrète, quand l'espace de recherche devient non-convexe ou lorsque les gradients sont discontinus (Agoudjil, A.E, 2019).

Lorsqu'une exploration de type déterministe est difficile à implanter, on fait appel aux techniques à recherche aléatoire. Ces méthodes font appel à des tirages de nombres aléatoires (Vincent Magnin 1998). Elles assurent qu'au bout d'un certain nombre d'itérations, les solutions fournies convergent vers la solution optimale.

L'optimisation de la conception technique concerne généralement des objectifs ou des critères multiples, souvent contradictoires, et peut donc être très difficile à résoudre.

L'optimisation à un seul objectif a généralement un point unique dans l'espace de solution comme solution optimale, tandis que pour l'optimisation à deux objectifs ; le front de Pareto correspond à une courbe. Des problèmes de dimension plus élevée peuvent avoir des hypersurfaces extrêmement complexes sur la zone frontale. Par conséquent, ces problèmes peuvent être extrêmement difficiles à résoudre. Les algorithmes inspirés de la nature ont montré leurs performances prometteuses et sont donc devenus populaires et largement utilisés, et ces algorithmes sont principalement basés sur l'intelligence en essaim. Ces algorithmes ont également été utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation multi objectifs (Ali, D.L, 2014).

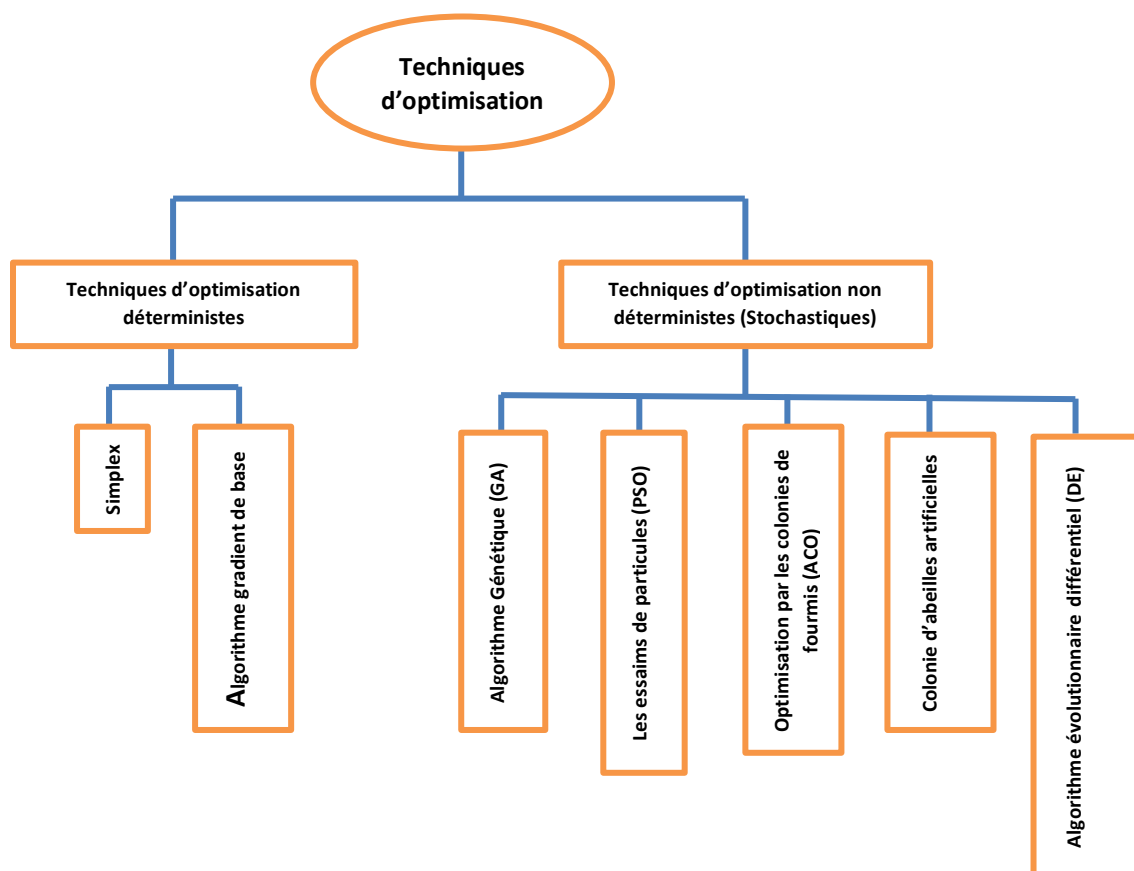


Fig. 1 Classes des méthodes d'optimisation (Lemouari.A .2014)

Les problèmes d'optimisation sont généralement très difficiles à résoudre. Il existe deux catégories de méthodes pour les résoudre : les méthodes exactes, qui assurent de trouver la meilleure solution réalisable mais souvent en un temps exponentiellement croissant avec la taille du problème et les méthodes approchées (heuristique), comme les métaheuristiques, qui se veulent plus rapides et qui tentent de s'approcher de la meilleure solution réalisable sans garantie.

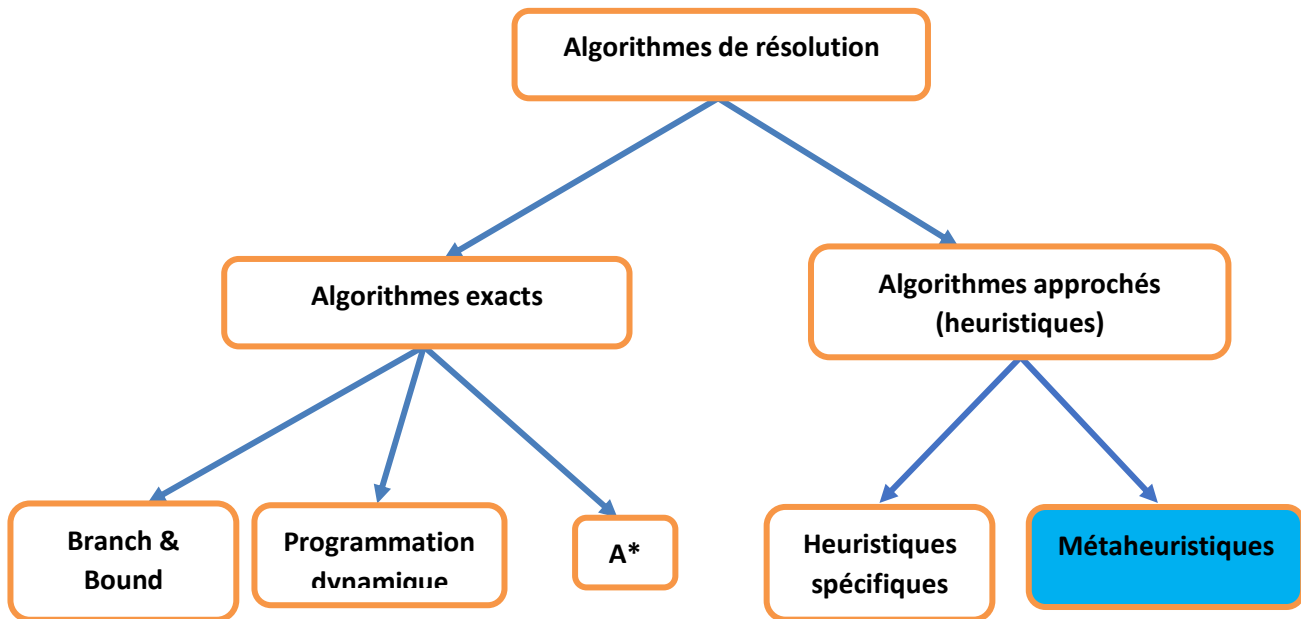


Fig. 2 Classes des Algorithmes de Résolution (Lemouari.A .2014).

Ces problèmes ont donné lieu au développement d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation nommées méta heuristiques, celles-ci marquent une grande révolution dans le domaine d'optimisation.

Une métaheuristique est un algorithme d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global.

Les métaheuristiques peuvent être classées selon deux groupes : les recherches locales, qui font évoluer une solution unique et les méthodes à population de solutions. Les métaheuristiques se veulent génériques afin d'être utilisées pour résoudre tout type de problèmes d'optimisation. Ainsi, elles ont, en général, un certain nombre de paramètres qui permettent de les adapter efficacement au problème traité. Cependant, ces paramètres sont fastidieux à régler et il n'existe pas vraiment de règles pour y arriver facilement. Il est alors possible d'avoir recours à l'analyse de la structure du problème d'optimisation.

Il est nécessaire d'analyser et de comparer les différences entre les différents algorithmes sur le même problème d'identification des paramètres d'ingénierie géotechnique, d'améliorer les inconvénients des algorithmes existants sur la base des résultats d'analyse et de comparaison, et d'utiliser l'algorithme amélioré pour les modèles constitutifs avancés ou les problèmes d'ingénierie géotechnique complexes. Basé sur l'identification des paramètres, le modèle le plus

adapté peut être trouvé parmi les modèles constitutifs existants pour faire face aux problèmes d'ingénierie géotechnique (Yin, Z. Y., & Jin, Y. F. 2019).

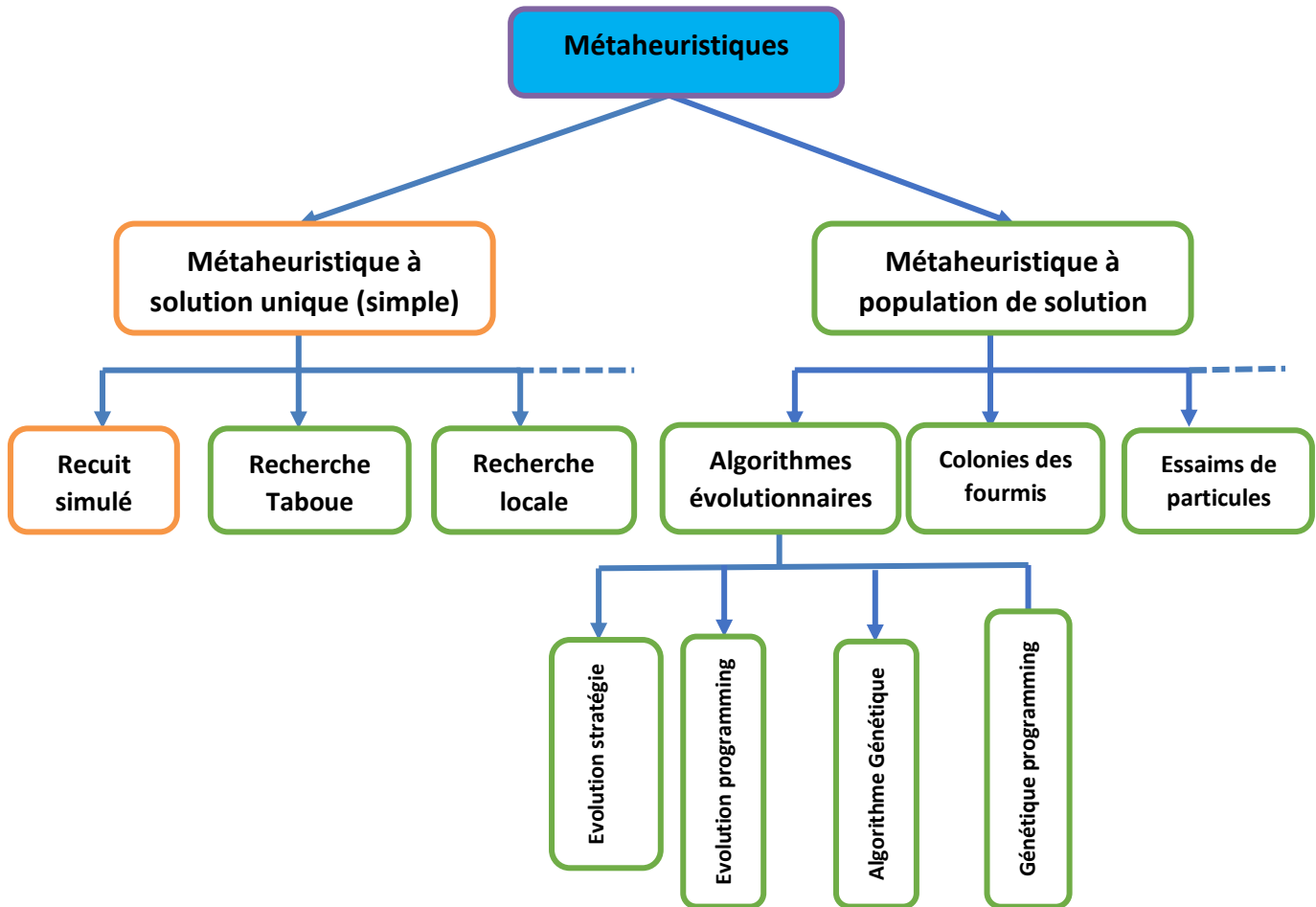


Fig. 3 Classes des métaheuristiques (Lemouari.A .2014)

II. 3 Les algorithmes évolutionnaires

D'un point de vue informatique les algorithmes évolutionnaires font partie de la famille des algorithmes d'optimisation stochastiques. Le terme algorithme évolutionnaire correspond à l'ensemble des techniques fondées sur ce modèle biologique, dont les plus connues sont les algorithmes génétiques, mais on parle aussi dans ce cadre de programmation génétique, de stratégies d'évolution, de programmation évolutionnaire, selon la façon dont on traduit les principes darwiniens dans le modèle artificiel.

L'objectif des algorithmes évolutionnaires (AE) est de faire évoluer une population dans le but de trouver l'optimum. Pour ce faire, à chaque génération, les individus de la population sont mutés et croisés avec une probabilité et ce sont les plus aptes qui survivent pour la génération suivante. Ce processus est répété pendant un certain nombre de générations, en espérant que les solutions de la fonction fitness apparaissent dans la population. Trois types d'AE ont été

développés isolément et à peu près simultanément, dans les années 60, par différents scientifiques : les Algorithmes Génétiques, les Stratégies d'Evolution, et la Programmation Evolutionnaire.

II. 3.1 L'Algorithme Génétique

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation stochastiques maintenant bien connues, sont inspirés des mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent les principes de survie des individus les mieux adaptés. C'est J. Halland, qui a posé les fondements théoriques de l'algorithme génétique, passant du paradigme darwinien de l'évolution naturelle à celui de l'évolution artificielle. Une nouvelle étape est franchie de lorsque les travaux de G. Goldberg, vers le milieu des années quatre-vingt, donnent aux algorithmes génétiques leurs lettres de noblesse en tant que méthode d'optimisation viable, efficace et non spécifique (Amédée, S and Francois, R, 2004).

Quelque terme de base de l'algorithme génétique :

- Population : ensemble fini d'individus (de solution).
- Individu : solution potentielle du problème ou expression des chromosomes.
- Chromosome : solution potentielle du problème sous une forme codée (forme de Chaîne de caractères) ou ensemble des gènes.
- Gène : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome.
- Fitness : terme qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette Fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution).

II. 3. 2 Les opérateurs des algorithmes génétiques

Rappelons que la génétique représente un individu par un code, c'est-à-dire un ensemble de données (appelées chromosomes), identifiant complètement l'individu. La reproduction représente dans ce domaine, un mixage aléatoire de chromosomes de deux individus, donnant naissance à des individus enfants ayant une empreinte génétique nouvelle, héritée des parents. La mutation génétique ensuite est caractérisée dans le code génétique de l'enfant par l'apparition d'un chromosome nouveau, inexistant chez les individus parents (Ould Nagi, A, 2012).

- **L'opérateur sélection**

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés. La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante.

On trouve essentiellement quatre types de méthodes de sélection différentes :

- La méthode de la "loterie biaisée" (roulette wheel) de Goldberg,
- La méthode "élitiste",
- La sélection par tournois,
- La sélection universelle stochastique.

- **L'opérateur croisement (crossover)**

Le but de cette opération est de créer une diversité dans notre population car l'exploitation (recopiage du meilleur chromosome) ne conduit pas à une exploration optimale de toute l'espace de recherche, en réalité on n'explore qu'une partie de notre espace si les individus sont similaires l'opérateur de croisement n'est qu'une juxtaposition des meilleures portions des anciens chromosomes dont le but d'arriver à générer de bons nouveaux chromosomes et le processus se répète jusqu'à la convergence vers la solution optimale (meilleure adaptation).

Il existe un grand nombre d'opérateurs de croisement le croisement en seul point et le croisement en m point (multipoints).

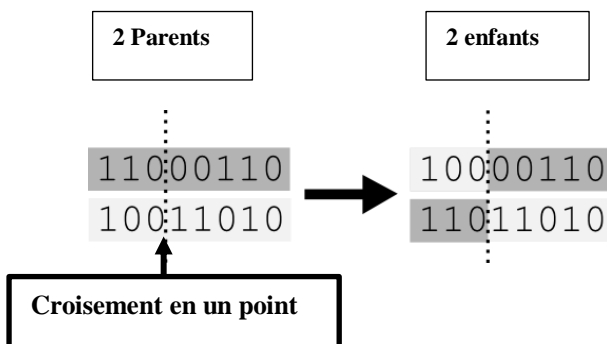


Fig. 6 Croisement en un seul point

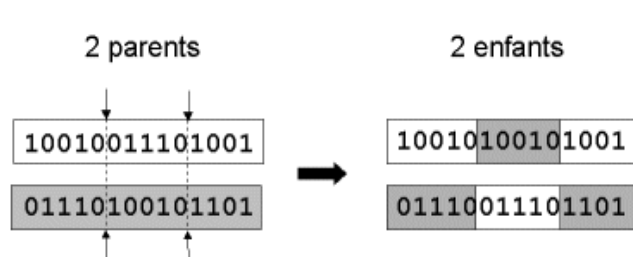


Fig. 7 Croisement en deux points ($m = 2$)

- **L'opérateur Mutation**

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa (figure .8). Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local. La probabilité de mutation reste usuellement très faible et, très souvent, elle est maintenue à une valeur fixée tout au long de l'évolution de l'AG (Amédée, S and Francois, R, 2004).

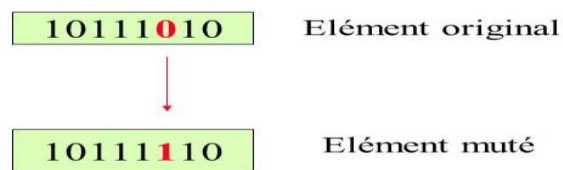


Fig. 8 Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne

- **Critères d'arrêt**

Les deux étapes d'évaluation et d'évolution de la population sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

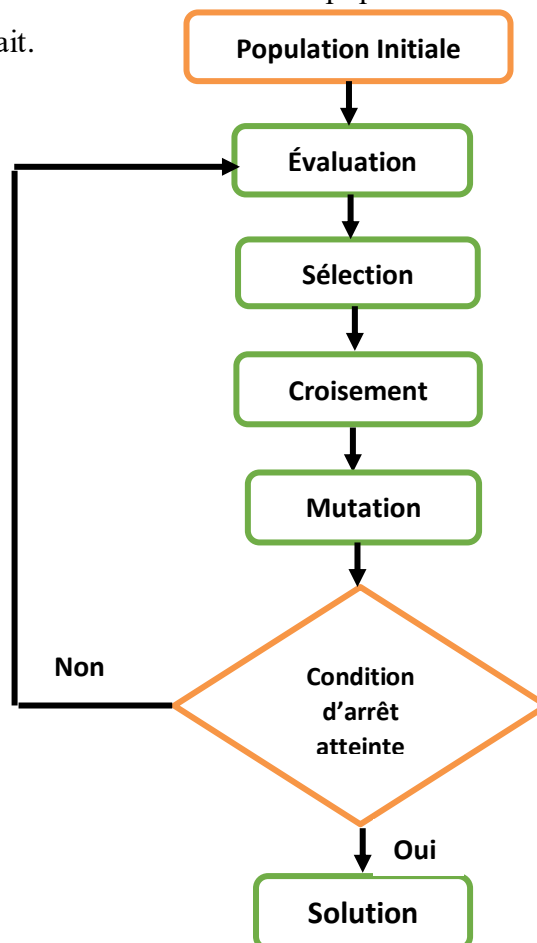


Fig. 9 Organigramme de l'algorithme génétique.

II. 4 Optimisation par essaim de particules (PSO)

Particle Swarm Optimization PSO est un algorithme de recherche métaheuristique qui a été initialement introduit par les scientifiques Eberhart et Kennedy en 1995, pour trouver une solution optimale dans l'optimisation de la conception technique (Roy, R.K. 2001). La structure de PSO est basée sur le concept de modèles sociaux, les théories des essaims et la pratique composite des insectes sociaux tels que les abeilles, les fourmis, les vols d'oiseaux et les bancs de poissons, pour rechercher une source de nourriture et éviter un prédateur en appliquant des phénomènes de partage d'informations.

Pour un problème d'optimisation, l'optimisation de l'essaim de particules PSO contient une population de candidats appelée essaim, cela peut se traduire par la population qui est constituée de particules individuelles qui tentent mutuellement de trouver une solution optimale dans la zone de recherche multidimensionnelle en se contractant entre eux (Shi, Y. 2001). Le chemin de la particule dans l'espace de recherche est ajusté en mettant à jour la vitesse de la particule et le gain d'information de l'individu le plus performant (Ahmad, N et Janahiraman, T.V. 2014) À chaque itération, les individus (particules) se dirigent vers la meilleure solution qu'ils expérimentent (meilleur personnel) et en même temps vers la meilleure solution obtenue par les autres particules (meilleure globalement) (Bai, Q. 2010). Chaque particule est constamment mise à jour via $pbest$ et $gbest$ pour créer une nouvelle population et toute la population recherche complètement la région de la solution.

Le nouvel emplacement de la particule est calculé comme suit :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (1)$$

Chaque répétition de la vitesse des particules est mise à jour en utilisant :

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 \times r_1 \times (X_{pbest} - X_i^t) + c_2 \times r_2 \times (X_{gbest} - X_i^t) \quad (2)$$

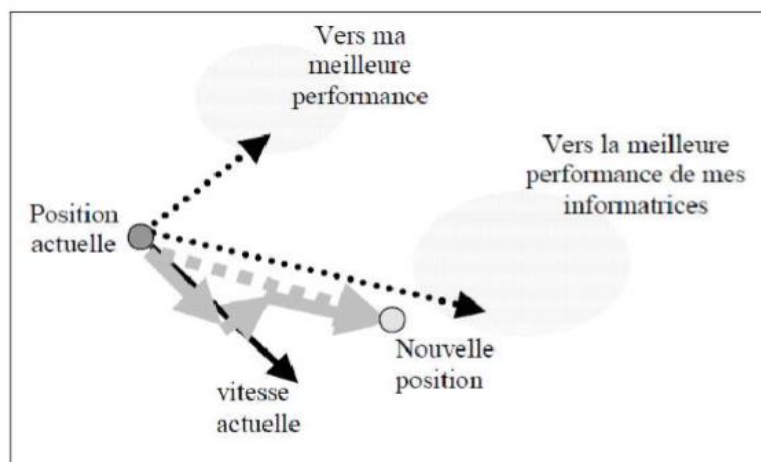


Fig. 10 Schéma de principe du déplacement d'une particule (Clerc and Siarry 2004)

Où $X(t+1)$ désigne une nouvelle position de la particule.

$V(t)$ définit la vitesse de la particule, r_1, r_2 est le nombre aléatoire généré entre 0 et 1. Un poids d'inertie " w " a été ajouté pour contrôler la vitesse, C_1 et C_2 sont les facteurs d'accélération pour calculer la meilleure position personnelle de la particule X_{pbest} et X_{gbest} meilleure position mondiale.

Swarm a une solution candidate appelée particule, chaque particule dans l'algorithme PSO représente une solution possible, chaque particule individuelle vole dans l'espace de recherche avec une vitesse qui est ajustée dynamiquement en fonction de sa propre expérience de vol et des expériences de vol de ses compagnons.

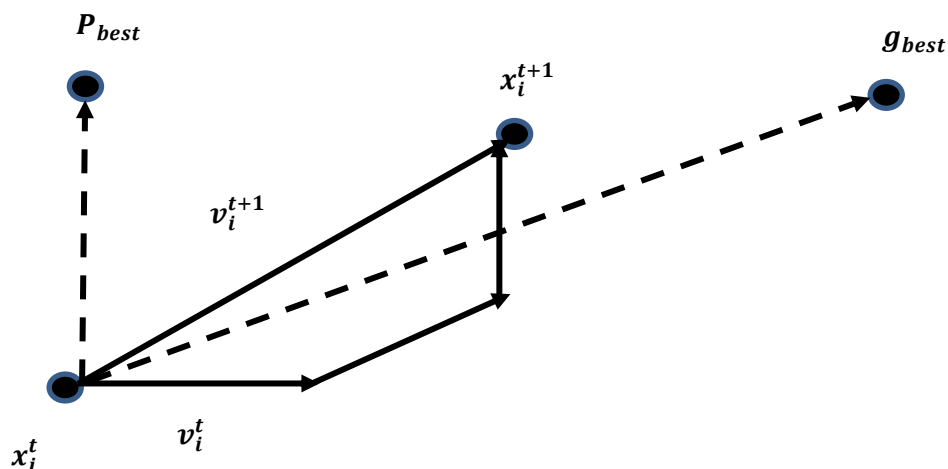


Fig. 11 : Le mouvement de base de la particule par PSO (Athreya, S. et Venkatesh, Y.D. 2012)

La meilleure position de chaque particule tout au long du processus d'optimisation est la meilleure solution trouvée par la particule, alors la meilleure position rencontrée par l'ensemble du groupe est la meilleure solution actuellement trouvée par l'ensemble du groupe (Zhang, X et al. 2018).

Pour la coopération de particules dans l'algorithme PSO, il existe deux principes :

- Communication : informer la meilleure solution d'une particule particulière aux autres particules de l'essaim.
- Apprentissage : lorsque les particules se rapprochent les unes des autres, elles apprennent vraiment la meilleure solution de localisation.

Les étapes simplifiées de l'algorithme PSO pour le cas à objectif unique sont illustrées dans l'organigramme 12.

Pour obtenir la solution optimale, l'optimisation par essaim de particules peut également être utilisée pour minimiser la fonction objective de ce problème (Shi, Y. 2001).

II. 4 .1 Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules

L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

- 1ère étape : Initialisation des coefficients C_1 , r_1 , C_2 , r_2 , et le coefficient d'inertie w .
- 2ème étape : La création de la population initiale aléatoirement et le calcul du fitness.
- 3ème étape : Le calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules.
- 4ème étape : Le calcul du meilleur fitness de la population initiale et comparer par la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations
- 5ème étape : incrémentation du nombre d'itération $t = t+1$.
- 6ème étape : Si un critère d'arrêt est satisfait alors passer à la 7ème étape. Autrement, aller à la 3ème étape.
- 7ème étape : La position enregistrée dans la solution optimale

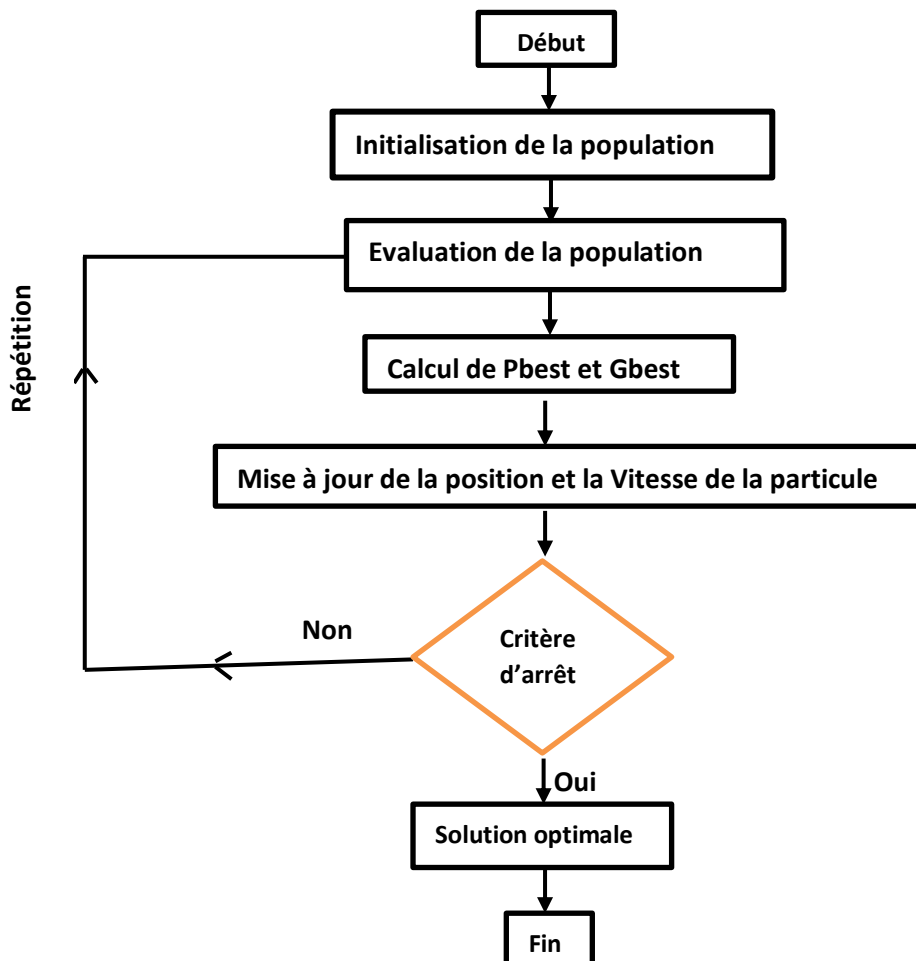


Fig. 12 Organigramme de l'algorithme PSO

II. 5 Optimisation par Colonie d'abeilles

La nature ne cesse d'inspirer la recherche dans le domaine de l'optimisation. Alors que la génétique, les fourmis et les essaims particulaires en sont des exemples célèbres, d'autres algorithmes d'optimisation inspirés de la nature émergent régulièrement.

L'optimisation par colonie d'abeilles est une famille très récente des méta heuristiques. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelles dans la vie, lors de la recherche de nourriture (Philippe. F, 2015).

Les abeilles possèdent des propriétés assez différentes de celles des autres espèces d'insectes. Elles vivent en colonies, en construisant leurs nids dans des troncs d'arbres ou d'autres espaces clos similaires. Généralement, une colonie d'abeilles contient une femelle reproductrice appelée reine, quelques centaines de mâles connus sous le nom de faux bourdon, et des milliers de femelles stériles qui s'appellent les ouvrières. Après accouplement avec plusieurs faux-bourbons, la reine reproduit beaucoup de jeunes abeilles appelées les couvées.

Le principe est de récolter le nectar des sources d'accès les plus faciles tout en privilégiant les plus riches. La danse des abeilles, qui est leur seul moyen de communication, est probablement le secret de leur efficacité puisque c'est à travers elle qu'une abeille indique à ses semblables une source de nourriture et sa qualité. Il entraîne très rapidement l'essaim pour concentrer ses efforts de recherche sur la source la plus riche.

Enfin nous allons présenter quelques algorithmes inspirés du comportement des abeilles, dans la littérature plusieurs variantes basées sur l'algorithme standard des abeilles ont été développés pour résoudre une large variété de problème d'optimisation, nous citons :

- Algorithmes d'abeilles basés sur la recherche de nourriture
- Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles virtuelle VBA
- Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles (BCO)
- Algorithme d'optimisation par la danse d'abeille (DBO)
- Algorithmes d'abeilles basés sur d'autres comportements
- Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle (ABC)

II.6 Les Réseaux de Neurones Artificiels

Un réseau de neurones artificiels, est un système dont la conception est à l'origine schématiquement inspirée du fonctionnement du système nerveux (neurones biologiques), et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques. L'idée est de reproduire le mécanisme cérébral d'apprentissage, soit l'adaptation lente d'un individu à l'exécution d'une tâche

nouvelle. Ils sont conçus pour reproduire certaines caractéristiques de mémoires biologiques par le fait qu'ils sont Massivement parallèles, capables d'apprendre, capables de mémoriser l'information dans les connexions entre les neurones, capables de traiter des informations incomplètes, ces réseaux de neurones sont composés de plusieurs éléments (ou cellules) de calcul opérant en parallèle et arrangés à la manière des réseaux de neurones biologiques.

Un réseau neuronal est l'association, en un graphe plus ou moins complexe, d'objets élémentaires, les neurones formels. Les principaux réseaux se distinguent par l'organisation du graphe (en couches, complets. . .), c'est-à-dire leur architecture, son niveau de complexité (le nombre de neurones, présence ou non de boucles de rétroaction dans le réseau), par le type des neurones (leurs fonctions de transition ou d'activation) et enfin par l'objectif visé : apprentissage supervisé ou non, optimisation, systèmes dynamiques*

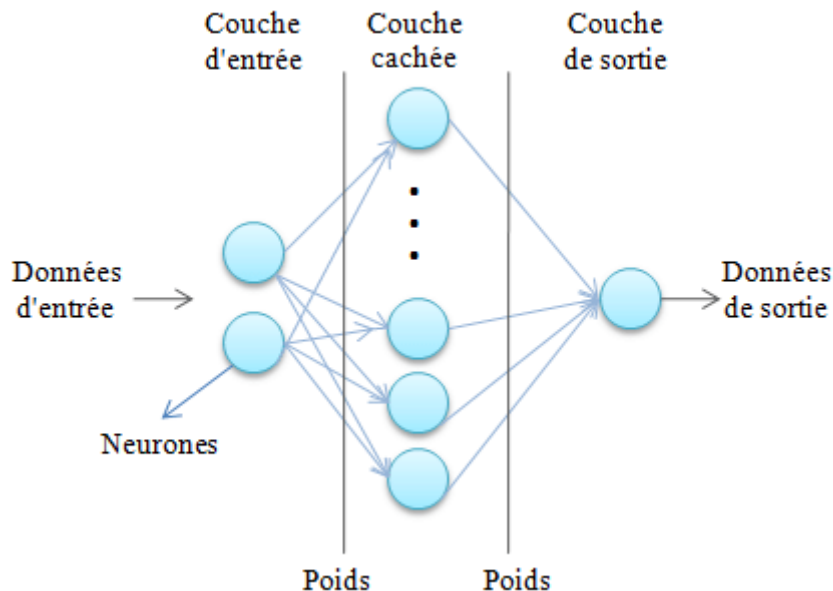


Fig. 13 Structure de modèle de réseau de neurones artificiels (Ferchichi 2017)

II.7 Les algorithmes de voisinage

L'algorithme de voisinage est recherche des paramètres directe, basée sur la méthode de Monte Carlo. Son principe est de faire un échantillonnage de la région de l'espace des paramètres où le modèle est acceptable. En considérant un point sur l'espace de recherche est représentatif de ses voisins dont le but est de construire approximativement la topologie de la fonction erreur du problème à partir de l'évaluation de quelques jeux de paramètres sur l'espace. L'algorithme

* <https://www.math.univ-toulouse.fr/~besse/Wikistat/pdf/st-m-app-rn.pdf>

de voisinage est une recherche globale contrôlée de l'espace de recherche et n'a pas besoin de calcul autre que celui de la fonction erreur (Mendjel.D 2012).

II. 8 Monte Carlo

Ces méthodes consistent en des simulations informatiques de problèmes mathématiques ou physiques, basées sur le tirage de nombres aléatoires. La méthode de Monte-Carlo a été développée par N. Metropolis et S. Ulam, alors qu'ils travaillaient sur le projet de la bombe atomique. L'utilisation de la méthode de Monte-Carlo est devenue possible grâce à l'amélioration des performances des ordinateurs (il est devenu plus efficace de simuler numériquement le comportement d'un système complexe que de l'observer expérimentalement) car pour obtenir des estimations suffisamment exactes de la grandeur recherchée, il faut réaliser le calcul d'un très grand nombre de cas particuliers et dépouiller ensuite la statistique d'un volume énorme de données. Le grand avantage de cette méthode est sa simplicité. Or son inconvénient est le temps de calcul. Les méthodes Monte Carlo permettent une bonne exploration puisque tout point a une probabilité identique d'être atteint, toutefois, elles ne permettent pas d'exploitation des résultats déjà obtenus (Vincent Magnin 1998)

Cette méthode est la plus simple parmi l'ensemble des méthodes de recherche stochastique. Elle commence par générer une solution aléatoirement dans l'espace de recherche, puis évalue sa valeur par la fonction objective. Ensuite, elle recommence et compare les deux résultats. Si le nouveau résultat est meilleur, elle le garde et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié.

II.9 Recherche Taboue

La méthode taboue qui fait partie des méthodes de voisinage, a été proposée par **Fred Glover en 1986**. Cette méthode d'optimisation est la première à avoir porté le nom de "métaheuristique", Elle est classée comme méthode de recherche locale à mémoire adaptative. En effet, sa caractéristique principale est de mémoriser des solutions, ou des caractéristiques de solutions, visitées durant la recherche, et d'éviter de rester piégé dans des optimums locaux. Des algorithmes à mémoire adaptative pourront effectivement utiliser une procédure créant de nouvelles solutions à partir des informations mémorisées. Donc le principe de l'algorithme est le suivant ; à chaque itération, le voisinage de la solution est sélectionné en appliquant le principe de voisinage. La méthode autorise de remonter vers des solutions qui semblent moins intéressantes mais qui ont peut-être un meilleur voisinage. Des fois, ce principe engendre des phénomènes de cyclage entre deux solutions, tandis que la méthode taboue a l'interdiction de visiter une solution récemment visitée. Pour cela, une liste taboue contenant les attributs des

dernières solutions considérées est tenue à jour. Chaque nouvelle solution considérée enlève de cette liste la solution la plus anciennement visitée. Ainsi, la recherche de la solution suivante se fait dans le voisinage de la solution actuelle sans considérer les solutions appartenant à la liste taboue (Ayas, J. and Viau, M.A., 2004).

II. 10 Le recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode empirique (métaheuristique) d'optimisation, inspirée d'un processus utilisé en métallurgie, réalisée par Métropolis et al 1953, pour simuler l'évolution d'un recuit physique. Elle a été mise au point par trois chercheurs de la société IBM, S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt et M.P. Vecchi en 1983, et indépendamment par V. Černý en 1985. L'expression « recuit simulé » est la traduction de Simulated Annealing, dans la réalité, le terme « recuit » correspond à un réchauffement suivi d'un refroidissement lent. Un tel procédé est souvent utilisé dans l'industrie. Selon que des métaux chauffés au rouge sont refroidis rapidement ou lentement, ils présentent des propriétés complètement différentes. C'est une technique dérivée de la méthode de Monte Carlo. Par analogie avec le processus physique, l'algorithme de Metropolis-Hastings, permet de décrire l'évolution d'un système thermodynamique dont la fonction à minimiser deviendra l'énergie E du système en introduisant également un paramètre fictif qui est la température T du système.

Le recuit simulé est une recherche locale peut être piégé dans un minimum local. Les méta-heuristiques peuvent échapper à ces minimums en construisant une suite de solution, mais dans laquelle la fonction objective peut temporairement augmenter. La méthode du recuit simulé conçu pour rechercher un optimum global parmi plusieurs minimums locaux. Son principe est d'explorer l'espace d'état de manière aléatoire afin d'éviter les minimums locaux. Diminuer progressivement la température pour stabiliser l'algorithme sur un minimum global. Si le refroidissement est trop rapide, il y a un risque de rester bloqué dans un minimum local.

Dans l'algorithme de Métropolis, on part d'une configuration donnée, et on lui fait subir une modification aléatoire. Si cette modification fait diminuer la fonction objective, elle est directement acceptée, sinon, elle n'est pas acceptée qu'avec une probabilité égale à $\exp(-\Delta E/T)$, cette règle appelé critère de Métropolis. Le recuit simulé applique itérativement l'algorithme de Métropolis pour engendrer une séquence de configurations qui tendent vers l'équilibre thermodynamique.

II. 11 Les plans d'expériences (DOE)

Les plans d'expériences ou la planification expérimentale regroupe un ensemble de techniques statistiques destinées à analyser le comportement d'un système expérimental dans le but de comprendre et d'améliorer son fonctionnement. Dans le domaine industriel en particulier,

l'utilisation des plans expérimentaux est en développement constant. La planification expérimentale consiste à imposer aux entrées du problème des variations particulières et mesurer les variations induites aux sorties afin de déduire les relations de causes à effets. Elle peut donc être considérée comme un système donnant l'expression d'une ou plusieurs réponses dépendamment d'un certain nombre de facteurs. Les réponses de ce système sont généralement constituées de variables qui serviront à l'optimisation. Ces variables d'entrées du système qui doivent varier indépendamment les unes des autres lors de l'expérimentation, sont appelées facteurs.

Les facteurs peuvent également être classés selon d'autres critères dont : des facteurs contrôlés, facteurs mesurables, facteurs constants et facteurs bruits.

Les réponses caractérisent ce que l'expérimentateur considère comme conséquence du phénomène et constituent des objectifs à optimiser.

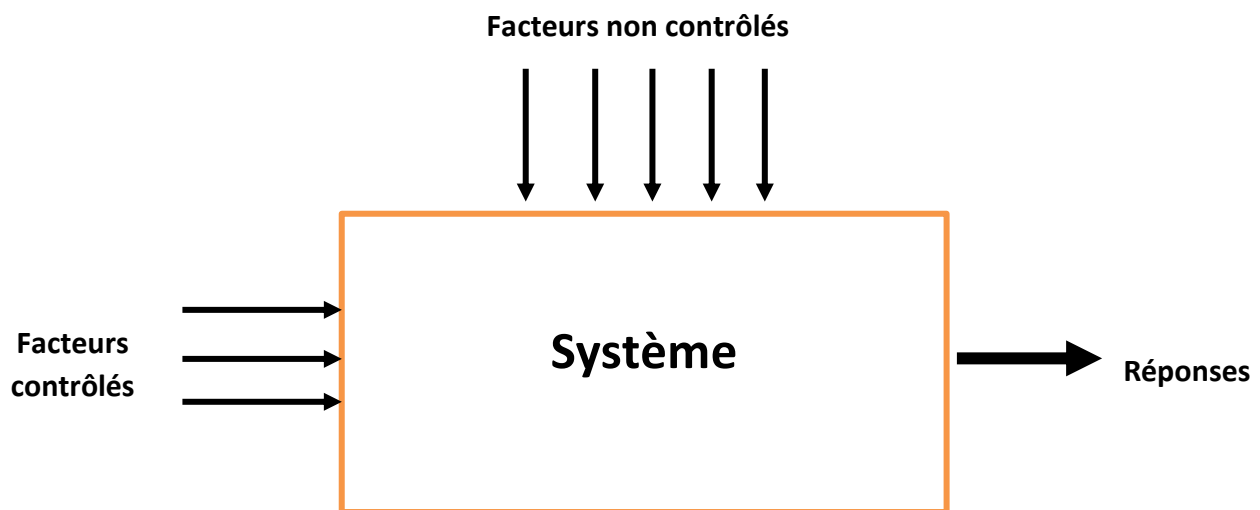


Fig. 14 Schématisation d'un processus expérimental

II. 11.1 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

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

Les différentes étapes à suivre pour mener à bien une expérimentation sont :

- Définir le problème, processus -objectif.
- Choisir les variables facteurs et l'espace de variation.
- Définir et comparer les designs expérimentaux.

- Exécution des expériences.
- Analyse statistique des résultats.

Cinq méthodes d'optimisation peuvent permettre d'optimiser simultanément les différentes réponses découlant de l'emploi de la méthode des surfaces de réponses à savoir :

Screening (Dépistage), Factorial, Response surface, Mixture (Mélange) et Taguchi, dans cette section on va s'intéresser par la méthode de surface de réponse et la méthode de Taguchi.

II. 11. 2 La méthodologie des surfaces de réponse

La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été introduite par Box et Wilson au début des années 1950, il s'agissait d'un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utiles pour le développement et l'optimisation des processus (Dwornicka et Pietraszek 2018). Diverses méthodes de surface de réponse sont disponibles parmi eux la conception Box-Behnken (BBD) et la conception composite centrale.

BBD prend les points médians des bords de l'espace de processus et le point central en considération lors de la construction de la conception (Fig. 3), chaque variable a été codée aux niveaux, -1 , 0 et 1 . (Ranade et Thiagarajan 2017), et il est composé de deux parties : le point central et les points médians des bords. Ceci est classé parmi les points de conception appelés type d'espace. Par conséquent, la valeur haute de la variable d'origine est représentée par $(+1)$ et la valeur basse est représentée par (-1) . La valeur (0) représente la moyenne de ces deux valeurs (Bagaber et Yusoff 2018). BBD est reconnu comme l'une des conceptions les plus courantes et les plus efficaces utilisées dans le RSM. L'utilisation de BBD facilite l'optimisation des paramètres effectifs avec un nombre minimum d'expériences, ainsi que l'analyse de l'interaction entre les paramètres (Polat et Sayan 2019).

Les concepts et les techniques de la méthodologie de surface de réponse (RSM) ont été appliqués avec succès et de manière extensive dans différents domaines scientifiques et de recherche (Zangeneh et al .2002).

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.

Pour la méthode de surface de réponse deux types de plans sont disponible Box-Benhenken et central composite.

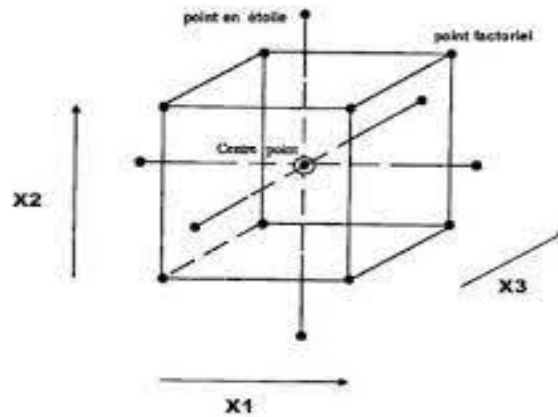


Fig.15 Conception Box-Behnken à trois facteurs (Claude Hoinard 2009)

Les différentes étapes impliquées dans Box-Behnken Design sont présentées dans la Figure 16.

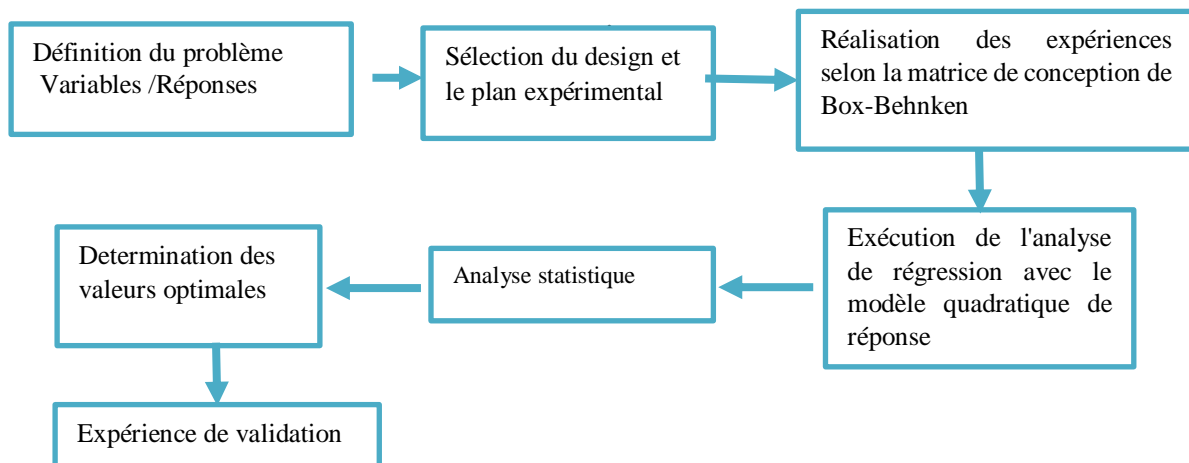


Fig.16 Étapes impliquées dans la conception de Box-Behnken

II. 11. 3. Modélisation

La méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir le lien existant entre deux types de variables : la réponse et les facteurs qui sont grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux.

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 :

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^K B_i x_i + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=2}^K B_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

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 :

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^K B_i x_i + \sum_{i=1}^K B_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=2}^K B_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Où Y est la réponse prédite (facteur de sécurité) ou (coût), B_0 , B_i , B_{ii} et B_{ij} sont respectivement affectés aux valeurs constantes, linéaires, quadratiques et interactives des coefficients de régression, x_i , x_j sont des variables d'entrée, i et j sont les numéros d'index.

II. 11. 4 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} ;

Une fois la modélisation terminée, le problème à l'étude doit être optimisé.

II. 12 La méthode de Taguchi

La méthode Taguchi a été inventée par Genichi Taguchi (1924-2012), ingénieur et statisticien japonais, fait une utilisation spécifique de la technique des plans d'expériences, a mis de l'avant une méthodologie appelée conception robuste pour aider les ingénieurs durant la phase de conception des produits.

La méthode Taguchi est une technique bien connue, puissante qui s'appuie sur une méthode systématique et efficace pour l'optimisation des processus. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. La méthode Taguchi est appliquée dans le cadre de l'amélioration avec un nombre minimum d'expériences. Elle est facile à adopter et à appliquer pour les utilisateurs ayant une connaissance limitée de statistiques. Pour cela, elle a acquis une grande popularité dans la communauté des ingénieurs et scientifiques.

II. 12.1 Les différentes étapes de la méthodologie de Taguchi

La méthode Taguchi comporte plusieurs phases de base dans le processus d'optimisation :

1. Formaliser le problème,
2. Sélection des facteurs et niveaux,

3. Construire le plan en fonction des tables de Taguchi,
4. Réalisation des essais,
5. Analyse des résultats et recherche de configuration d'optimisation,
6. Essai de validation (confirmation).

II.12.2 Principe de la méthode

La méthode de Taguchi se sert d'un plan spécial de table orthogonale (TO). Les résultats expérimentaux basés sur (TO) sont alors transformés en rapports de signal sur bruit pour évaluer les caractéristiques de fonctionnement (Touggui et al. 2018). Elle se concentre sur les effets des variations sur des caractéristiques de qualité, plutôt que sur les moyennes.

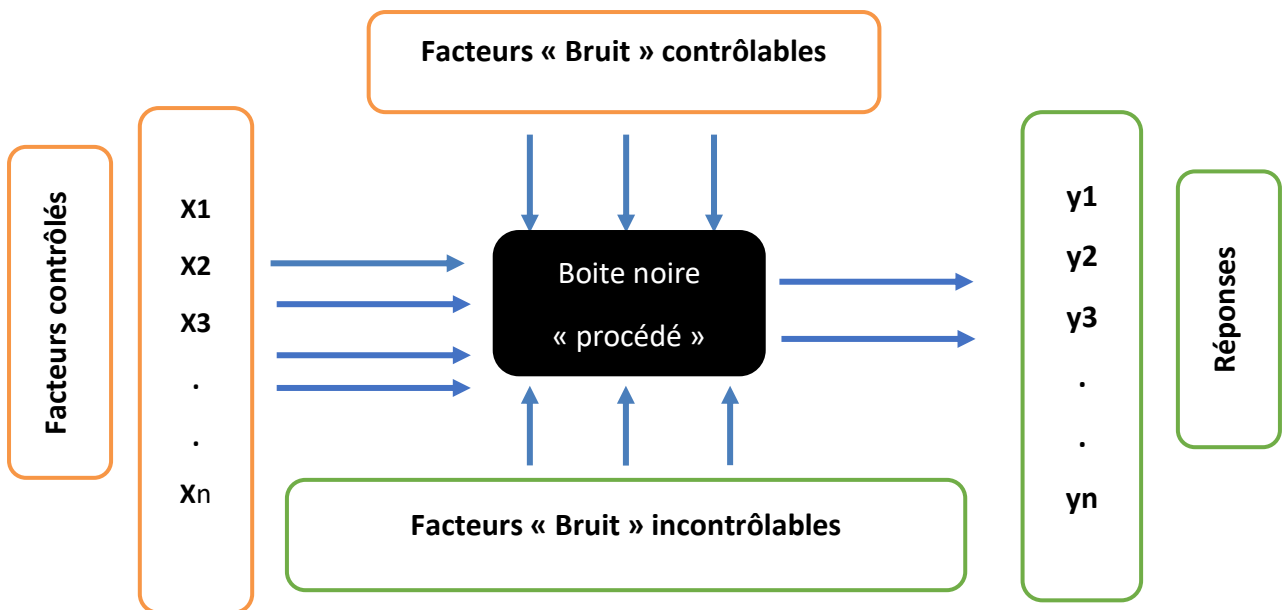


Fig. 17 Schématisation du processus de la méthode Taguchi

Il a présenté l'utilisation du rapport signal sur bruit (S/N) pour mesurer la qualité des résultats. Le rapport (S/N) est défini comme le signal désiré par rapport à la valeur de bruit aléatoire indésirable et aux caractéristiques de la qualité des données expérimentales, le ratio signal/bruit. Cette donnée est appelée ratio S/N ou tout simplement S/N dans la suite (ratio = Signal/Noise). S/N est exprimé en dB (décibel).

Les rapports signal-bruit SB les plus souvent utilisés sont de quatre types :

Nominal est le meilleur, Plus grand est le meilleur, plus petit est le meilleur. Pour chacune de ces catégories, le meilleur niveau d'un paramètre de processus est le niveau qui se traduit par la plus grande valeur du rapport (S/N).

II. 12.3 Plan de Taguchi

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, on manipule les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis on détermine les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit.

Après avoir choisi les facteurs que l'on considère comme ayant une influence sur la réponse de l'expérience, l'expérimentateur propose un modèle correspondant à l'hypothèse qui lui semble la plus probable.

Le modèle est, en général, une expression linéaire ou quadratique de la variable réponse en fonction des facteurs et des interactions que l'on suppose avoir un effet sur la réponse. Les coefficients du modèle ne peuvent être calculés qu'après avoir réalisé les expériences. En l'absence de ces coefficients, nous écrivons le modèle d'une manière symbolique en vue de préciser les facteurs et les interactions pris en compte.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différentes techniques d'optimisation menées par plusieurs travaux de recherche. Ces méthodes peuvent se scinder en deux groupes : - les méthodes dites déterministes (méthodes exactes) et les méthodes dites non-déterministes (méthodes approchées ou méthodes stochastiques). Après cette rapide présentation de différentes techniques d'optimisation, on s'aperçoit qu'il existe des points communs ainsi que des différences entre les méthodes.

Dans le large panorama des méthodes d'optimisation discrètes adaptées aux problèmes d'optimisation géotechniques nous avons le choix d'utiliser la technique la plus adaptée à notre problème et la disponibilité des données nécessaires pour résoudre un problème d'optimisation. De plus, les problèmes géotechniques présentent généralement de nombreuses incertitudes, la solution d'un problème est par conséquent rarement unique (Mendjel.D. 2012).

Cependant, les avantages et les inconvénients de ces techniques d'optimisation sont rarement synthétisés et comparés de manière systémique pour un même problème géotechnique. Par conséquent, une revue et une étude comparative sont nécessaires pour une bonne

compréhension des différences entre les différentes techniques, ce qui peut aider à sélectionner la méthode d'optimisation appropriée pour résoudre les problèmes d'ingénierie géotechnique.

Références

1. **Agoudjil, A. E., (2019).** Optimisation d'un échangeur de chaleur avec agitateur par les méthodes de Taguci et Algorithmes Génétiques.
2. **Ahmad, N., Janahiraman, T.V. (2014).** A comparison on optimization of surface roughness in machining AISI 1045 steel using Taguchi method, genetic algorithm and particle swarm optimization, In :2015 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC), Bandar Sunway, Malaysia, 18 - 20 December.
3. **Ali, Dr LEMOUARI (2014).** "Introduction aux Métaheuristiques" Université de Jijel 1-5.
4. **Amédée, S. and Francois-Gérard, R., (2004).** 'ALGORITHMES GENETIQUES'. TE de fin d'année.
5. **Asma, DRIF and Nesrine, BENSALFIA. (2018).** Méthode Hybride Basée Sur Les Algorithmes A Evolution Différentielle.
6. **Athreya, S., Venkatesh, Y.D. (2012).** Application of Taguchi method for optimization of process parameters in improving the surface roughness of lathe facing operation, International Refereed Journal of Engineering and Science, 1(3), 13-19.
7. **Ayas, J. and Viau, M.A., (2004).** La recherche taboue. Notes de cours, 12.
8. **Bai, Q. (2010).** Analysis of particle swarm optimization algorithm, Computer and information SSP - Journal of Civil Engineering Vol.16, Issue 1, 2021 145 science, 3(1),1-5
9. **Benanane, Sofiane (2019).** Application des algorithmes génétiques a l'optimisation globale des structures du génie civil. Diss. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran.
10. **Claud Hoinard (2009).** Les méthodes d'optimisation, cours et énoncés d'exercices.
11. **Clerc, M. and Siarry, P. (2004).** Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essaims particulaires. J3eA, 3, p.007.
12. **Ferchichi, Ahlem. (2017).** Propagation et réduction des incertitudes dans les modèles de changement d'occupation des sols. Diss. Université de la Manouba, 2017
13. **Hafid Zidani. (2013),** Représentation de solution en optimisation continue, multi-objectif et applications. Autre. INSA de Rouen ; Université Mohammed V-Agdal (Rabat, Maroc), Français. NNT : 2013ISAM0027
14. **Mendjel, D, (2012).** Analyse inverse dans le calcul géotechnique-application au calcul de la stabilité des talus (Doctoral dissertation, Université Badji-Mokhtar-Annaba).

15. **Ould Nagi, A.**, (2014 Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC (Master's thesis).
16. **Philippe Feyel. (2015)**, Optimisation des correcteurs par les métaheuristiques. Application à la stabilisation inertielle de ligne de visée. Autre. Centrale Supélec, Français. NNT : 2015CSUP0011
17. **Roy, R.K. (2001)**. Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons.
18. **Shi, Y. (2001)**. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546), 1, 81-86.
19. **Touggui, Youssef, et al. (2018)** "Optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de l'acier inoxydable AISI 316L en utilisant ANOVA et la méthode de Taguchi."
20. **Vincent Magnin (1998)**. "Contribution à l'étude et à l'optimisation de composants optoélectroniques". Thèse de Doctorat, Université Des Sciences et Technologies, Lille.
21. **Yin, Z. Y., & Jin, Y. F. (2019)**. Practice of optimization theory in geotechnical engineering. Springer.
22. **Zhang, X., Zou, D. & Shen, X. (2018)**. A novel simple particle swarm optimization algorithm for global optimization", Mathematics,6(12), 1-34

Chapitre III
Renforcement et
Amélioration des Sols

Renforcement et Amélioration des Sols

III. 1 Introduction

Le sol est un milieu poreux qui présente un faible comportement en traction, avec des propriétés géotechniques qui varient avec les facteurs environnementaux. Plusieurs techniques d'amélioration et de renforcement des sols ont été proposées et mises en œuvre pour stabiliser les sols les plus faibles avant les constructions (Sato, A et al, 2016, Bordoloi, S et al, 2017).

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 (Buhan, P and Salençon, J, 1987).

On peut noter que les techniques d'amélioration et de renforcement des sols donnent lieu à des projets de plus en plus importants, avec la prise en compte de la durabilité des ouvrages et d'impacts sur l'environnement.

III. 2 Définition du Renforcement et de l'Amélioration de Sol

- Le Renforcement de sol : Regroupe plus particulièrement les techniques conduisant à inclure des éléments dans le sol afin d'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.
- L'Amélioration de Sol : peut se comprendre comme certaines caractéristiques mécaniques avec ou sans ajout de matériaux en : réarrangement des grains par action mécanique, consolidation, injection, vibration ou congélation. Le terme Amélioration des sols dans la masse est également employé pour désigner les techniques comme le pré-chargement avec ou sans drainage, le compactage dynamique, le vibrocompactage.

III. 3 Les Domaines d'Application des Techniques de Renforcement

L'emploi des techniques de renforcement des sols dans la construction géotechnique nécessite l'élaboration de méthodes de dimensionnement à la rupture des ouvrages ainsi renforcés, qui soient à la fois fiables et simples à utiliser. On trouve ces applications dans : les Ouvrages de soutènement, Stabilisation de pente, Voûtes et fronts de taille des tunnels et Fondations (Buhan, P. and Salençon, J., 1987). On cite par exemple :

- Sol rapporté : Remblais en sol renforcé : Terre Armée.
- Sol en place : Pentes et terrassement : Clouage.
- Fondations : Colonnes verticales (colonnes ballastées et inclusions rigides).
- Soutènements : parmi les techniques utilisées : Palplanches, Parois moulées.

III. 4 Techniques D'Amélioration et Renforcement Des Sols

Le renforcement des sols regroupe un ensemble de techniques d'amélioration des propriétés mécaniques de ces sols par la mise en place d'inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion. Parmi ces techniques, celle concernant le clouage des sols, qui peut être utilisé soit dans les domaines de stabilisation des pentes et du soutènement des excavations. 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 (Terbouche, F and al, 2017).

On distingue cinq types de renforcement.

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

La Terre armée et les géotextiles sont utilisés pour renforcer des sols rapportés. Le clouage, les colonnes ballastées, les micros pieux et s'utilisent sur le terrain en place.

III. 4. 1 La Terre armée

Historiquement la terre armée représente la première technique de renforcement d'un sol qui ait connu un développement remarquable à l'échelle industrielle depuis son invention par (H.

Vidal) au début des années soixante. Elle ouvrait en effet à l'époque la possibilité d'apporter des solutions techniquement fiables à un certain nombre de problèmes difficiles auxquels étaient confrontés les ingénieurs (nécessité de construire des remblais d'autoroutes de grande hauteur et d'en assurer la stabilité) (Mansouri, T, 2011).

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, relativement inextensibles vis-à-vis du sol de remblai et qui sont galvanisées pour empêcher la corrosion (Schlosser, F, 1984).

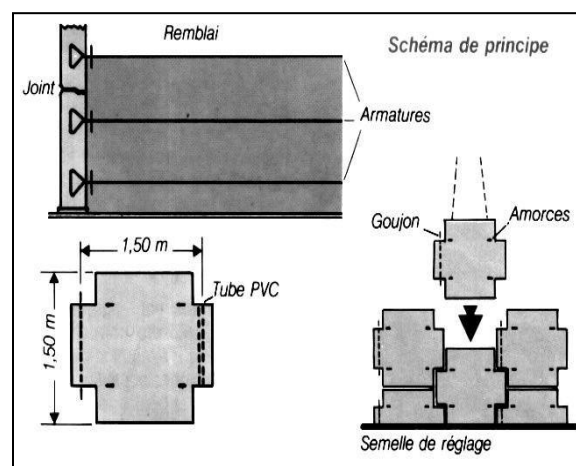


Fig.1 Renforcement du sol par la Terre Armée (A, Bouafia, 2018)

Lorsque le massif de Terre Armée est sollicité, les armatures, par le biais du frottement, se mettent en traction et apportent au sol une cohésion anisotrope. Les principaux avantages de ce matériau sont d'être souple et déformable, donc peu sensible aux tassements du sol de fondation, et économique. Les ouvrages réalisés avec ce matériau sont de trois types : murs de soutènement, culées de pont et radiers de fondation.

Le parement de l'ouvrage, ou peau, est généralement constitué d'écailles de béton cruciformes. La peau ne joue qu'un rôle local : celui d'empêcher la terre de s'écouler entre les armatures.

L'étude du dimensionnement d'un mur de soutènement en Terre Armée comporte deux parties :

- Le dimensionnement interne, spécifique au matériau Terre Armée, qui comporte notamment le dimensionnement des lits d'armatures ;

- Le dimensionnement externe, reposant sur les mêmes principes que le dimensionnement des murs poids en maçonnerie ou en béton.

III. 4. 2 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 (Amidou, S, 1995).

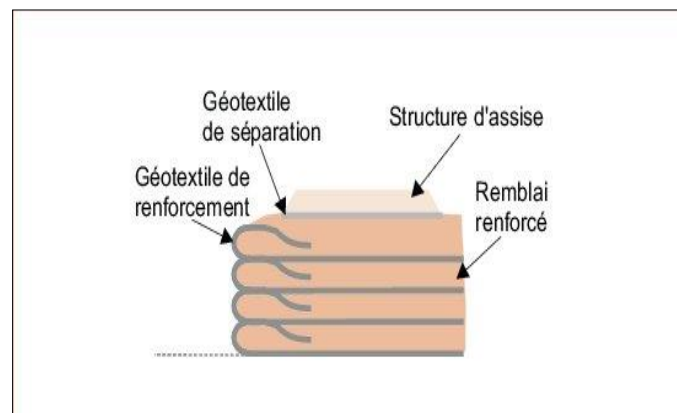


Fig. 2 Renforcement du sol par les Géotextiles (S, Lambert, 2020)

Les géotextiles offrent une large étendue de résistance en traction et de raideur, ils peuvent être employés en renforcement de sols comme dans les murs renforcés par exemple.

La route a été le premier domaine d'emploi où les géotextiles ont été utilisés en quantités importantes ; les géotextiles sont employés pour les routes et les pistes comme séparateurs, renforts, filtres, drains et pour lutter contre l'érosion des talus.

Pour la réalisation des aménagements en bordure de mer (épis, digues défenses de côtes), les géotextiles peuvent remplacer avantageusement des techniques comme celles des tapis filtrants ou des parafouilles.

Les géotextiles sont particulièrement intéressants dans les travaux hydrauliques, car ils permettent la réalisation d'interfaces continues, perméables, filtrantes. Ils sont donc utilisés, soit en addition à une structure classique, pour renforcer la sécurité de l'ouvrage, soit le plus souvent, en substitution de matériaux naturels. Dans ce cas, ils permettent des économies car ils

remplacent des matériaux généralement calibrés et onéreux ; de plus leur mise en œuvre est beaucoup plus facile pour la réalisation d'interfaces inclinées ou verticales.

III. 4. 3 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 du sol de fondation, en outre la colonne agit comme un drain vertical (Bazizi, H and Kara, D, 2010).



Fig. 3 Renforcement du sol par les colonnes ballastées

Le Procédé d'exécution d'une colonne ballastée par vibroflottation est comme suit :

- Vibrofonçage de l'outil avec ou sans lançage à eau (lançage à l'air par défaut).
- Incorporation de matériaux tout en maintenant la pression du fluide de lançage.
- Compactage du matériau d'apport par passes successives à l'aide de l'outil de vibrocompactage.
- Continuation et adaptation de la quantité incorporée en fonction de la réponse du terrain.
- Arase des excédents d'incorporation et de refoulement en surface.
- Colonne ballastée terminée

III. 4. 4 Les micros pieux

Cette technique consiste à mettre en place dans le sol de petits pieux injectés. Chaque pieu est constitué d'une barre métallique (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.



Fig. 4 Renforcement du sol par les micros pieux

Les pieux et les micropieux se différencient essentiellement par leur dimension et leur utilisation. En effet, en ce qui concerne les dimensions, le faible diamètre des micropieux fait qu'il est généralement considéré que l'effort est repris par le frottement latéral et on néglige la résistance en pointe, contrairement au pieu. De plus, les micropieux sont généralement utilisés en très grand nombre et positionnés très proches les uns des autres, ce qui nécessite la prise en compte d'interactions entre les inclusions (effet de groupe) différentes de celles considérées dans le cas des groupes de pieux classiques (A, Kouby, 2003).

Les principales phases de réalisation d'un micropieu sont les suivantes :

- forage préalable du sol, y compris maçonnerie béton ou remblai rencontré.
- mise en place de l'armature métallique.
- mise en œuvre du coulis de ciment en remplissage du forage par le bas et en remontant. Puis scellement soit par gravité soit par Injection Globale Unitaire ou par Injection Répétitive Sélective (selon le type de micropieu considéré).
- liaisonnement à sa partie supérieure avec la fondation soit par plot-massif ou longrine additionnelle en béton armé soit directement par scellement au coulis de ciment.

III. 4. 5 Le clouage

De point de vue économique le clouage du sol peut être choisi comme une solution qui est en généralement la moins coûteuse parmi les techniques de renforcement (Kiyyour, S, 2014).

Le clouage des sols 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. Ce procédé qui s'inspire de la technique de boulonnage des galeries en mécanique des roches. 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'activer 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 (Jean de Sauvage, 2018). La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle. Le lieu géométrique des points de traction maximale T_{max} permet de séparer le massif soutenu en deux zones (Fig.5) :

- 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.

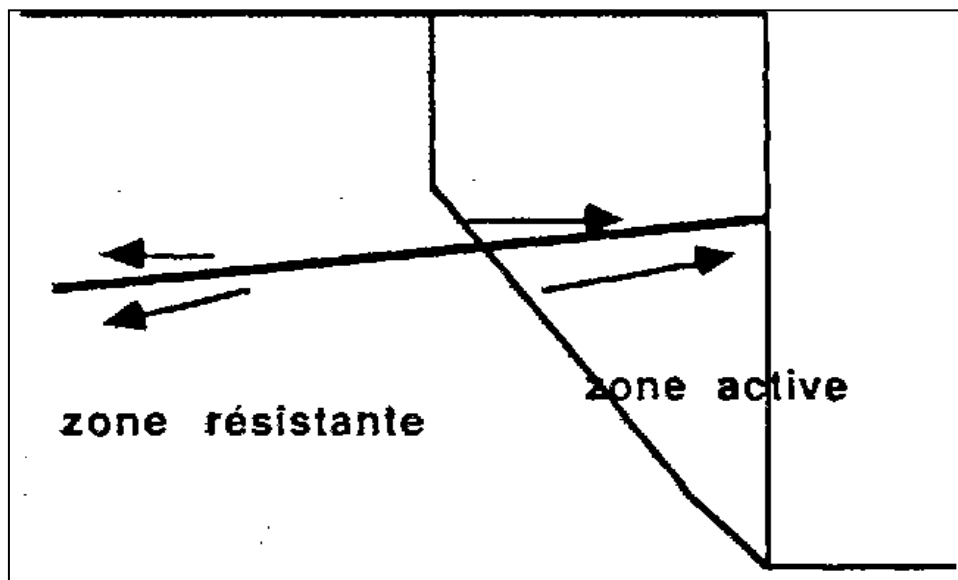


Fig. 5 Schématisation de la zone active et de la zone résistante (Fau, D, 1987).

III. 4. 5. 1 Différentes type d'utilisations

La technique de clouage s'emploie dans deux domaines :

III. 4. 5. 1. a La stabilisation des pentes (Naturelles)

Le clouage des pentes consiste à solidariser par l'intermédiaire des clous, et pour l'amélioration de la stabilité des pentes, Les inclusions sont souvent simplement battues et placées le plus perpendiculairement possible par rapport à la surface de glissement potentielle. Elles travaillent essentiellement par "cisaillement généralisé (Mansouri, T, 2011).

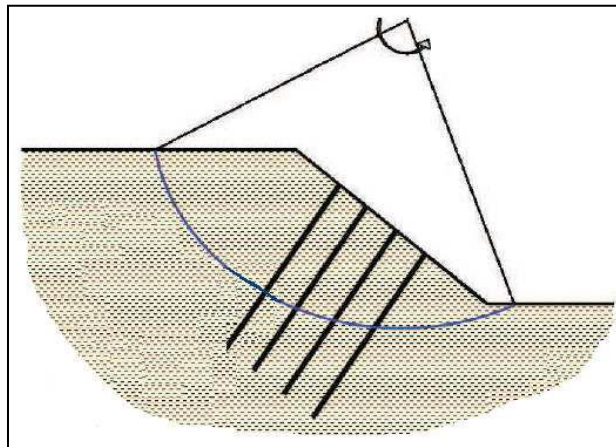


Fig. 6 Stabilisation d'une pente instable par clouage (Mansouri, T, 2011).

III. 4. 5. 1. b 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 (Amidou, S, 1995).

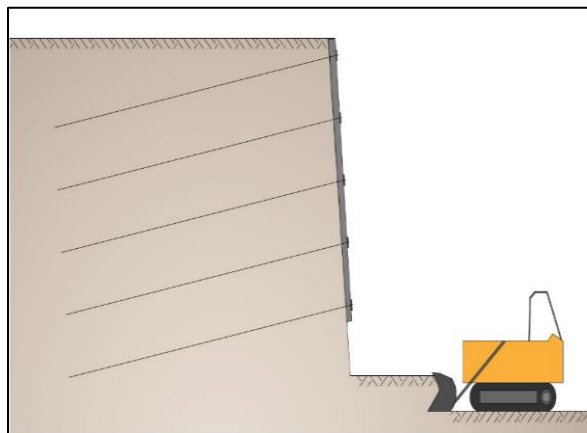


Fig. 7 Stabilisation d'une excavation.

III. 4. 5. 2 Différentes phases de construction d'un mur de sol cloué

Le principe de la construction d'un mur de sol cloué est décrit ci-dessous et représenté schématiquement à la figure 8.

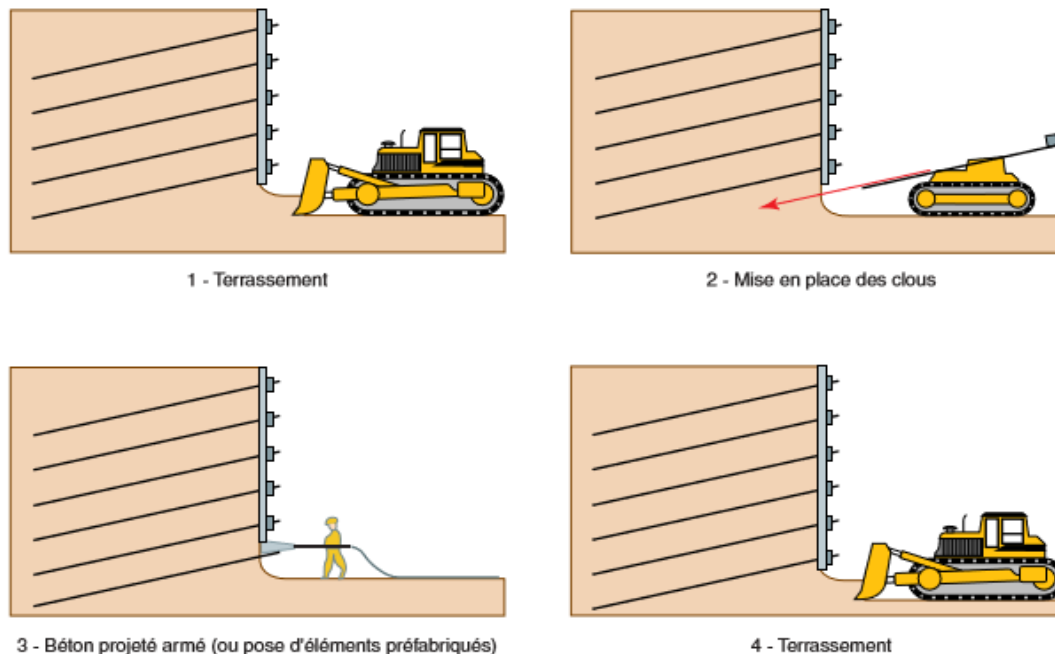


Fig. 8 Phase de réalisation d'une paroi clouée (F. Schlosser et al. 1993)

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

Étape 1. Excavation :

L'excavation initiale est effectuée à une profondeur pour laquelle la face de l'excavation est en mesure de rester non prise en charge pendant une courte période de temps, généralement de l'ordre de 24 à 48 heures. La profondeur de l'excavation est généralement comprise entre 1 et 2m et atteint légèrement au-dessous de l'altitude où les clous seront installés. La largeur de la plate-forme creusée ou banc doit être suffisante pour permettre l'accès à l'équipement de l'installation, le terrassement se fait sur une longueur de quelques dizaines de mètres.

Étape 2. Forage de trous :

Forage de trous pour installer clous, forages sont forés à une longueur, le diamètre spécifié, il y a deux types de processus qui peuvent être effectués après terrassement, Le clou peut être directement poussé dans le sol au moyen d'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 de l'équipement de forage. Ce dernier processus est couramment utilisé.

Étape 3. Installation des clous :

Les inclusions généralement utilisées sont des armatures pour béton armé appelés clous (acier à haute adhérence), de diamètre de 20,25 ou 32 mm ou des cornières d'environ 60 x 60 mm. Elles sont légèrement inclinées vers le bas.

Plusieurs techniques sont employées pour la mise en place des clous :

- **Le battage** : Un mouton lourd frappe la tête du clou à une fréquence faible.
- **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.
- **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 6 et 15 cm). 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.
- **Le jet nailing ou cloujet** : Cette technique très récente dérive du jet grouting. Le principe est d'associer au vibrofonçage une injection de coulis sous très haute pression en bout de clou. Cette méthode présente l'avantage de faciliter la pénétration du clou dans le sol et de consolider le terrain au voisinage du clou sous l'effet de la pression d'injection (Fau Didier 1987).

Le trou de forage est alors rempli avec un coulis de ciment à travers un tuyau. Le coulis est injecté au niveau du point de trous de forage la plus basse grâce à un tube plongeur dans une opération continue. 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 fois les clous scellés, il faut les relier à la peau de confinement pour permettre un transfert d'efforts (peau vers clou) lors du travail de l'ouvrage. Cette liaison se fait la plupart du temps par un très léger serrage de l'écrou en tête sur une plaque d'appui, juste suffisant pour éliminer tout jeu. Pour cela, l'extrémité du clou est filetée (Guide technique des parois clouées 2003)

Étape 4. Construction de béton projeté provisoire :

Un système de parement provisoire est ensuite construit pour supporter la section de sol avant la prochaine levée du sol est excavé.

Le parement le plus typique provisoire est constitué d'une couche de béton projeté renforcé légèrement couramment 100 mm d'épaisseur. L'armature est constituée généralement d'un treillis métallique soudé, qui est placé à peu près au milieu de l'épaisseur de revêtement.

Le rôle de parement est double, d'une part, protéger la paroi contre d'éventuelles agressions, chocs, et d'autre part, reprendre l'effort de poussée appliqué par la zone active et le transférer aux clous par l'intermédiaire des têtes, on peut utiliser aussi de panneaux, une fois les clous installés, il convient de bourrer le vide existant entre le sol et les panneaux au moyen de mortier maigre pour garantir un bon frottement sol-peau.

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, le béton projeté est armé à l'aide de nappes de treillis, généralement au nombre de deux ; on appelle cela le ferrailage, Il peut être projeté par voie humide ou sèche.

Les dispositions adoptées pour le drainage des murs cloués dépendent de la nature des terrains et de l'exposition de l'ouvrage aux circulations aquifères.

Les moyens usuels sont les suivant :

- Barbacanes en pied d'ouvrage ou placées à plusieurs niveaux.
- Géosynthétiques drainants disposés en bandes verticales, ou parfois inclinées sur le terrain à l'arrière du parement. Ces géosynthétiques sont raccordés à un exutoire en pied du parement, ils ne doivent pas remonter jusqu'en tête du parement pour éviter de collecter les eaux de surfaces.
- Drains subhorizontaux, équipés le plus souvent de tube crépinés

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 dans certains cas être reliés à un collecteur enterré, sans être visibles de l'extérieur.

- Des cunettes mises en œuvre en tête d'ouvrage pour collecter les eaux de surfaces (Guide technique des parois clouées 2003)

L'étape 5. Construction des niveaux suivants :

Telles sont les différentes phases de la première période ; une fois effectuées, l'excavation de la deuxième peut être entreprise, et ainsi de suite jusqu'à ce que la profondeur totale de fouille soit atteinte ça veut dire les étapes 1 à 4 sont répétées pour les remontées d'excavation restante.

L'étape 6. Construction d'une face permanente :

Après le fond de l'excavation est atteint et les clous sont installés et testé en charge, un parement définitif peut être construit. Finale face peut être constituée de béton coulé sur place en béton armé, béton projeté armé ou panneaux préfabriqués (Fau, D, 1987).

III. 4. 5. 3 Concept de clouage du sol

La fonction du clouage du sol est de renforcer ou de stabiliser les pentes raides et les excavations existantes au fur et à mesure que la construction se déroule de haut en bas. Les clous de sol développent leur action de renforcement par l'interaction sol-clou en raison de la déformation du sol qui entraîne le développement de forces de traction dans les clous de sol. La majeure partie des résistances provient du développement de la force axiale qui est essentiellement une force de tension. Par convention, on suppose que le cisaillement et la flexion apportent peu de contribution à la résistance (Dey, A, 2015). Le clouage du sol a pour effet d'améliorer la stabilité de la pente ou de l'excavation par

- a) Augmenter la force normale sur le plan de cisaillement et donc augmenter la résistance au cisaillement le long du plan de glissement dans le sol de friction.
- b) Réduction de la force motrice le long du plan de glissement à la fois dans les sols frottant et cohésifs. Dans le clouage de sol, l'armature est installée horizontalement ou légèrement inclinée parallèlement à la direction de la déformation de traction de sorte qu'elle développe une force de traction maximale. Les clous de sol sont des inclusions passives, qui améliorent la résistance au cisaillement du sol.

Le système de clou de sol peut être divisé en région active et passive comme le montre la figure 9. Pendant la rupture de la pente, la région active a tendance à se déformer, ce qui entraîne un déplacement axial le long des clous de sol qui sont placés à travers le plan de glissement. Il en résulte le développement de forces de traction dans le clou du sol dans la zone passive qui résiste à la déformation de la zone active. Cette force de tension entraîne une augmentation de la force normale venant sur le plan de glissement et réduit la force de cisaillement d'entraînement. Les clous de sol sont noyés dans une région passive à travers laquelle ils

résistent à l'arrachement du clou de la pente par frottement entre les clous et le sol. Sur la base des deux mécanismes, la quantité requise de longueur de clou doit être placée dans la zone résistante. De plus, l'effet combiné de la résistance de la tête du clou et de la force de tension générée dans la zone active doit être adéquat pour fournir la tension de clou requise à la surface de glissement (Byrne et al., 1998).

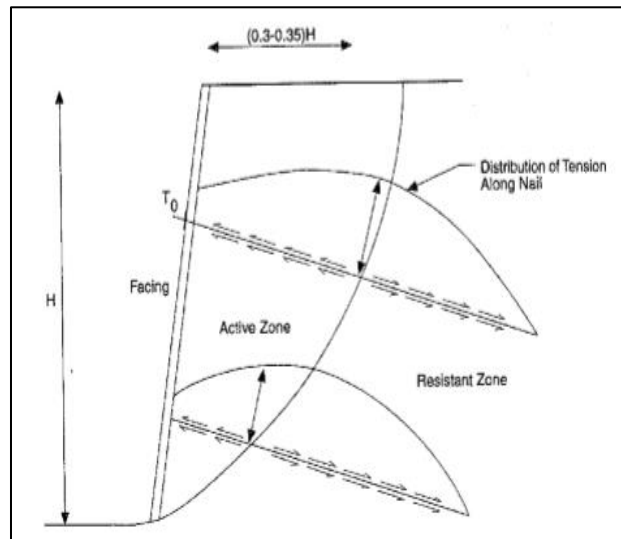


Fig. 9 Concept du Comportement d'un sol cloué (Byrne et al., 1998)

Les clous sont ici des ancrages passifs : ils ne sont pas prétendus et retiennent la masse de sol par frottement lorsque le massif amorce une rupture.

Le clouage du sol présente un certain nombre d'avantages, lorsqu'il s'agit d'une technique qui peut être utilisée en toute sécurité. Cela peut être fait dans des espaces très restreints, ce qui peut être utile lorsque l'espace de travail est limité sur un site ou lorsque la construction jouxte une autre limite de propriété. Le clouage du sol permet des projets où ils pourraient autrement être difficiles à exécuter. De plus, il peut suivre des courbes et des virages inhabituels et serrés en toute sécurité, et il peut assurer la stabilité et l'étaiyage du haut d'un mur vers le bas, permettant aux gens de sécuriser le sol pendant qu'ils creusent (Guide technique des parois clouées 2003).

Le clouage présente cependant certaines limitations, à savoir :

La construction de murs cloués sous la nappe dans des sols à faible cohésion, n'est pas envisageable, tant pour des problèmes d'exécution que pour la stabilité à long terme, sans un rabattement mettant l'ouvrage à l'abri des arrivées d'eau.

Une utilisation difficile dans les sols argileux à caractéristiques médiocres, des précautions doivent être prise pour empêcher les infiltrations d'eau qui peuvent entrainer une forte diminution du frottement latéral sol/clou associée à une perte de résistance du sol.

Une utilisation délicate dans des sols pulvérulent sans cohésion, où il n'est pas possible d'assurer la stabilité d'une excavation su verticale, meme limitée en longueur et hauteur.

Le gel peut conduire à des gonflements de certains types de sol, générant des augmentations importantes de traction en tête de clou.

Le dimensionnement des ouvrages en sols renforcés se fait avec des hypothèses simplificatrices qui ignorent des facteurs importants tels que :

- le caractère aléatoire des propriétés des sols, des matériaux de renforcement et de leur interaction ;
- les incertitudes sur les données géométriques de l'ouvrage telles que les dimensions, l'espacement entre armatures, le niveau de la nappe et la configuration des différentes couches ;
- la variation d'un point à un autre des propriétés physiques et mécaniques du sol, qui peut remettre en cause la représentativité des échantillons prélevés par rapport à l'ensemble de l'ouvrage ;
- les incertitudes relatives à la détermination des paramètres sur les échantillons prélevés. Elles sont fonction du remaniement des échantillons, des appareils d'essais et des opérateurs.

Pour tenir compte de ces facteurs, le concepteur peut utiliser l'approche probabiliste. En effet, cette approche permet d'analyser le risque de ruine des ouvrages en prenant en compte les aléas liés aux chargements et aux propriétés des matériaux utilisés (Hocini, H, 1992).

Conclusion

Pour stabiliser un massif, on peut soit améliorer les caractéristiques internes du sol qui le constitue par un apport de matériau qui joue le rôle d'une armature, soit opposer aux poussées des terres un ouvrage de soutènement.

Dans cette section nous avons présenté quelques procédés qui permettent de stabiliser un sol, notamment le renforcement avec des armatures métalliques comme dans la terre armée ou les murs cloutés, les inclusions géosynthétiques, les colonnes ballastées, ces solutions peuvent avoir un caractère définitif ou provisoire pendant la phase d'exécution sur un chantier, cependant, l'application de ces méthodes nécessite une bonne reconnaissance géotechnique du sol à traité.

Références

1. **Ali Bouafia**,(2018). Murs en remblai renforcé - Mechanically Stabilized Earth Retaining Walls, Introduction à la réglementation géotechnique - Tome 2/2, OPU, Alger.
2. **Alain Le Kouby**. (2003). Etude du comportement mécanique de micropieux sous chargements monotones et cycliques verticaux. Application aux effets de groupe. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole des Ponts Paris Tech.
3. **Amidou Sere**, (1995). Ouvrages renforcés par géotextiles chargés en tête : comportement et dimensionnement, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, Paris.
4. **Bazizi, H. and Kara, D.**, (2010). Renforcement des sols par colonnes ballastées (cas de la zone portuaire de Bejaia), Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.
5. **Bordoloi S., Garg A., Sekharan S.** (2017). A Review of Physio-Biochemical Properties of Natural Fibers and Their Application in Soil Reinforcement. Adv. Civ. Eng. Mater.; 6:323–359.
6. **Buhan, P. and Salençon, J.**, (1987). Analyse de la stabilité des ouvrages en sols renforcés par une méthode d'homogénéisation. Revue Française de Géotechnique, (41), pp.29-43.
7. **Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C. and Ueblacker, G.** (1998), Soil Manual for design and construction monitoring of soil nail wall, Manual of the Federal Highway Administration Division, (No. FHWA0-SA-96-069R).
8. **Dey, A.**, (2015), Issues and aspects of soil nailing, Challenges and Recent Advances in Geotechnical Engineering Research and Practices, CAGERP, II T Guwahati, India, January.
9. **Fau, D.**, (1987). Le clouage des sols. Application au soutènement de fouille. Étude expérimentale et dimensionnement, Doctoral dissertation.
10. **F. Schlosser et al.** (1993)., Recommendations Clouterre 1991, French national research project Clouterre (English translation). Rapp. Tech. Presses de l'ENPC.
11. **Guide technique** recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois clouées juillet 2003 ; LCPC.
12. **Hocini, H.**, (1992), Etude probabiliste des ouvrages en sols-renforcés : application à la terre armée et au clouage, thèse de doctorat, Université de Lille.

13. **Jean de Sauvage**, (2018), Étude du comportement des murs de soutènement par clouage des sols en place-Application au dimensionnement du parement, thèse de doctorat de l'université de Lyon.
14. **Kiyyour Sami**, (2014), Le clouage dans les ouvrages de soutènement : conception et dimensionnement, mémoire de magister, université Constantine.
15. **Mansouri, T.**, (2011). Etude par éléments finis de la capacité portante d'une semelle filante implantée sur une pente en sable renforcée par des géogrilles supportant des ancrages en grilles, Doctoral dissertation, Université de Batna.
16. **Sato A., Kawasaki S., Hata T., Hayashi T.** (2016). Possibility for Solidification of Peaty Soil by Using Microbes. Int. J. GEOMATE. 10 :2071–2076.
17. **Schlosser, F., Jacobsen, H.M. and Juran, I.**, (1984). Le renforcement des sols. Revue Française de Géotechnique, (29), pp.7-33.
18. **S. Lambert.** (2000). Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement. Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF, p. 17 - p. 25. Hal-00464010.
19. **Terbouche, F., Laghouchi, A., Hamza, A. and Djemai, M.**, (2017). Modélisation d'un talus conforter par clouage (cas de Beni Malek wilaya de Skikda a Algerie). Academic Journal of Civil Engineering, 35(1), pp.821-824.

Chapitre IV

Modélisation Numérique et Application des Méthodes d'Optimisation

Modélisation Numérique et Application des Méthodes d'Optimisation

IV. 1 Introduction

Le modèle suivi dans notre travail est basé sur celui proposé par Singh et al. (2010). Le mur cloué est construit en utilisant la séquence de de haut construction en bas. L'excavation du sol s'est déroulée sur des bancs de 2m et des plaques en tête sont installées sur chaque clou. Un revêtement en béton projeté est généralement appliqué sur la face d'excavation pour assurer la continuité.

Le modèle géométrique adopté est modélisé avec le code de calcul Plaxis 2D, un programme d'éléments finis bidimensionnel à quinze (15) nœuds a été utilisés pour générer le maillage. Un maillage grossier est adopté globalement mais affinée à une maille de densité fine dans les zones entourant chaque clou. Le modèle Mohr-Coulomb a été adopté avec des déformations planes, le comportement à long terme est simulé en utilisant des conditions d'analyse drainées.

La figure 1 montre le mur de sol cloué simulé avec les dimensions et les divers paramètres, y compris, les limites du maillage et les blocages standards. Le modèle géométrique fait 30 m de long et 25 m de profondeur, la hauteur d'excavation est de 10 m.

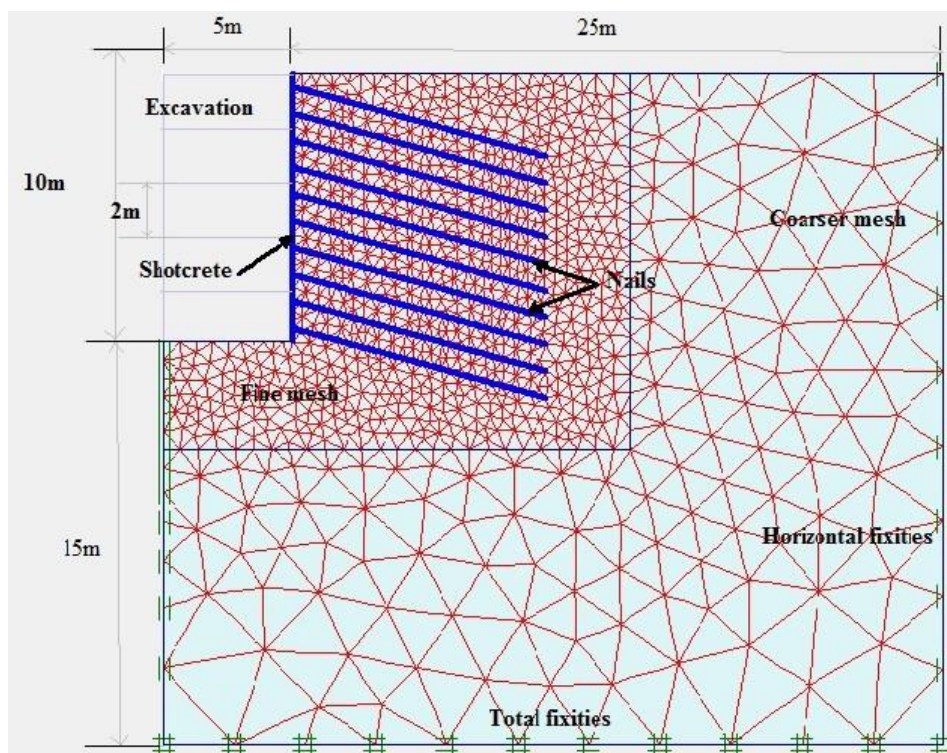


Fig. 1 Modèle géométrique

Selon les données d'exploration du sol, le modèle est composé d'une couche caractérisée par les paramètres résumés dans le tableau 1.

Tableau. 1 Paramètres mécaniques et physiques du sol (Singh and Babu 2010)

Paramètres	Modèle Mohr-Coulomb
Cohesion C (kN/m ²)	10
Angle de frottement ϕ (deg)	27,5
Angle de dilatance ψ (deg)	0.0
Poids volumique γ (kN/m ³)	19,0
Module de Young E (kN/m ²)	30.000
Coefficient de Poisson ν	0,3

Les paramètres des clous utilisés sont la rigidité axiale EA et la rigidité en flexion EI (Tableau.2), les clous ont été modélisés comme un élément (plaque). La longueur des clous considérée est fixée à 7 m, leur inclinaison à 15° pour l'horizontale et pour l'espacement vertical fixé à 1,0 m.

Le terme E_{eq} est utilisé pour désigner le module d'élasticité équivalent, qui est une combinaison du module d'élasticité du coulis de ciment autour du clou, et l'élément barre (clou).

$$E_{eq} = E_n \left(\frac{A_n}{A} \right) + E_g \left(\frac{A_g}{A} \right) \quad (1)$$

Avec :

E_g : Module d'élasticité de coulis de ciment.

E_n : Module d'élasticité du clou.

E_{eq} : equivalent modulus of elasticity of grouted soil nail

$A = \frac{\pi D^2}{4}$ A: Section transversale du forage des clous, D : diamètre du trou de forage.

$A_n = \frac{\pi d^2}{4}$ A_n : Section transversale des clous, d : diamètre du clou.

$A_g = A - A_n$ A_g : Section transversale de coulis de ciment.

$$\text{Rigidité axiale EA [KN/m]} = EA \text{ [KN/m]} = \frac{E_{eq}}{S_h} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (2)$$

$$\text{Rigidité en flexion EI [KNm}^2\text{/m]} = EI \text{ [(KN m}^2\text{)/m]} = \frac{E_{eq}}{S_h} \left(\frac{\pi D^4}{64} \right) \quad (3)$$

Avec, S_h l'espacement horizontal entre les clous.

En utilisant Plaxis 2D, l'épaisseur équivalente est déterminée automatiquement par la formule,

$$d_{eq} = \sqrt{12 \left(\frac{EI}{EA} \right)}$$

Les propriétés des clous et du béton projeté pris comme élément (plate) sont présentées dans le tableau 2 et qui ont été calculées à l'aide des formules données dans les équations 1,2 et 3.

Tableau. 2 Caractéristiques des clous

Raideur Axiale EA (kN / m)	Rigidité de flexion EI (kN.m²/m)
$2,29 \times 10^5$	$1,43 \times 10^2$

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 $4,2 \times 10^6$ kN/m et une rigidité à la flexion (EI) de $1,4 \times 10^4$ kNm² / m. La hauteur du mur (H) est considérée constante et égale à 10 m. L'inclinaison du mur ($\beta = 90^\circ$), les propriétés du sol, le diamètre des clous (20 mm) et le diamètre du trou de forage (100 mm) sont également considérés comme des constantes.

IV. 2 Validation du modèle

Les résultats ont été comparés à ceux donnés par Vikas et Sivakumar (2010), Nous avons comparé les paramètres suivants obtenus à partir des résultats et des graphiques : le facteur de sécurité, les valeurs de soulèvement de la base d'excavation, le déplacement latéral de la paroi et le développement de la force axiale maximale dans les clous.

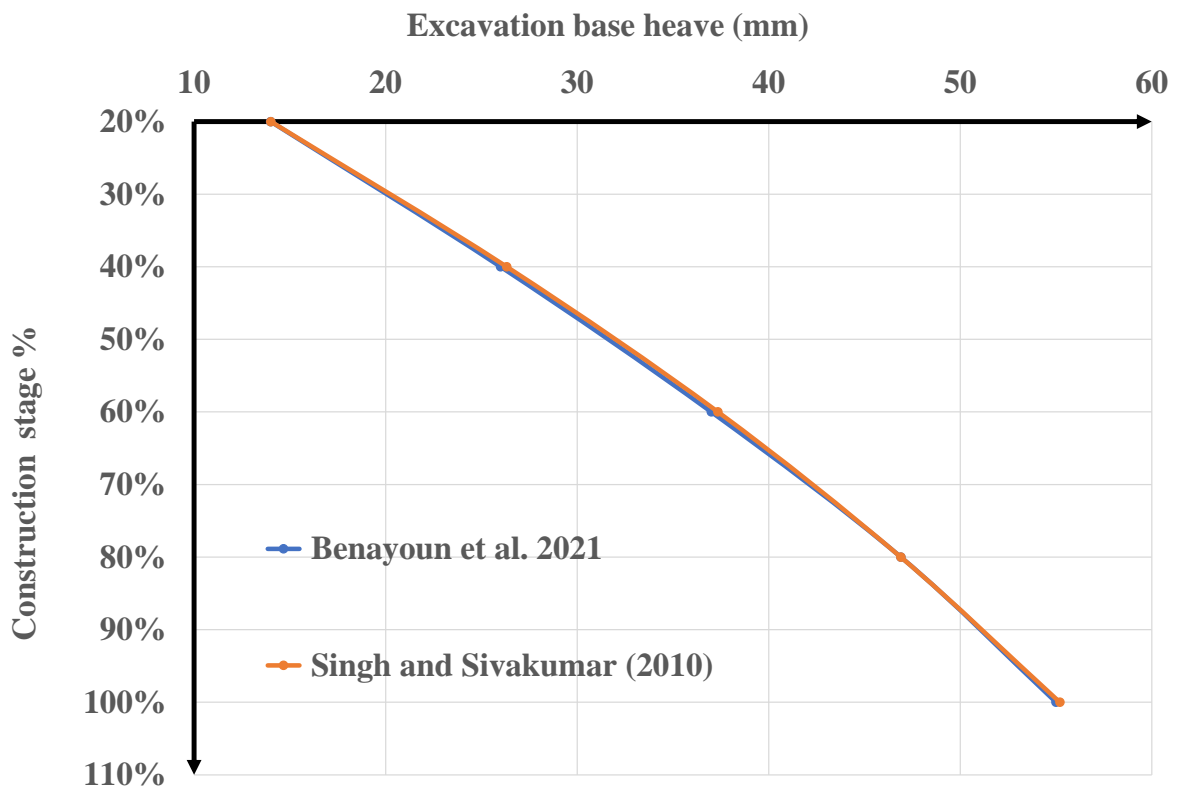


Fig. 2 Soulèvement de la base d'excavation

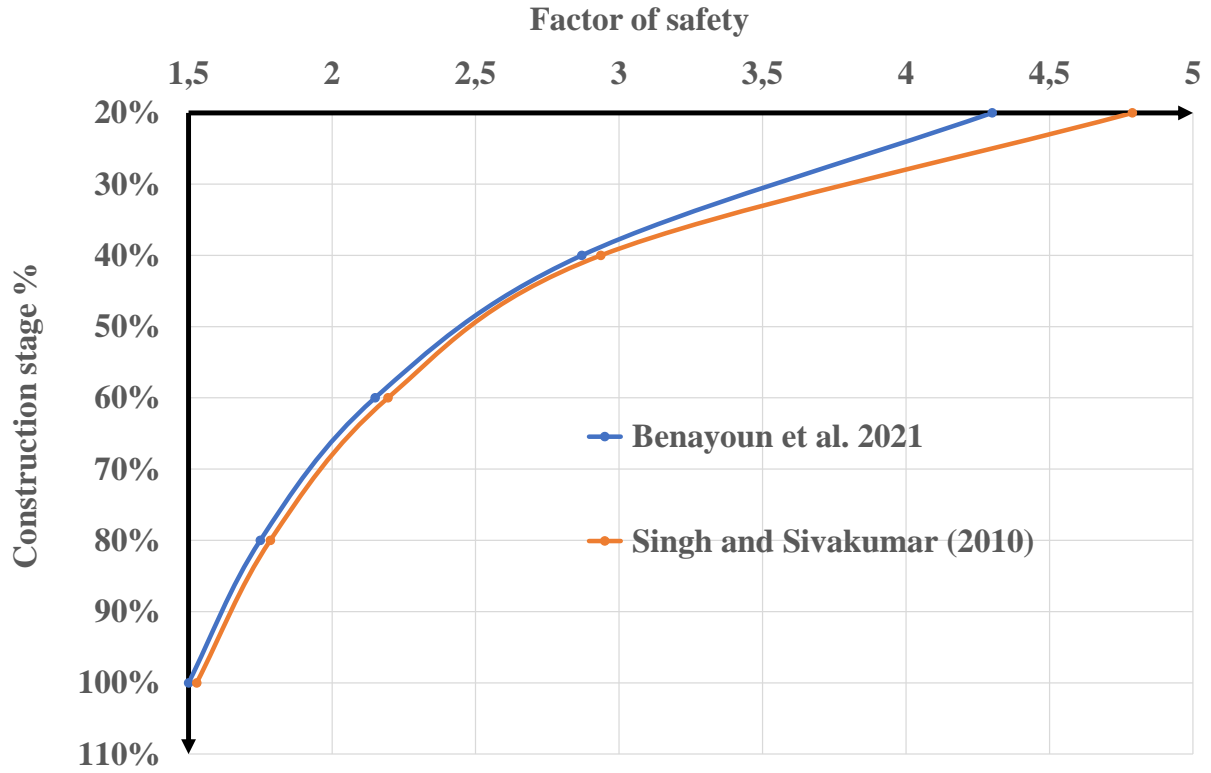


Fig. 3 Variation du facteur de sécurité avec la profondeur

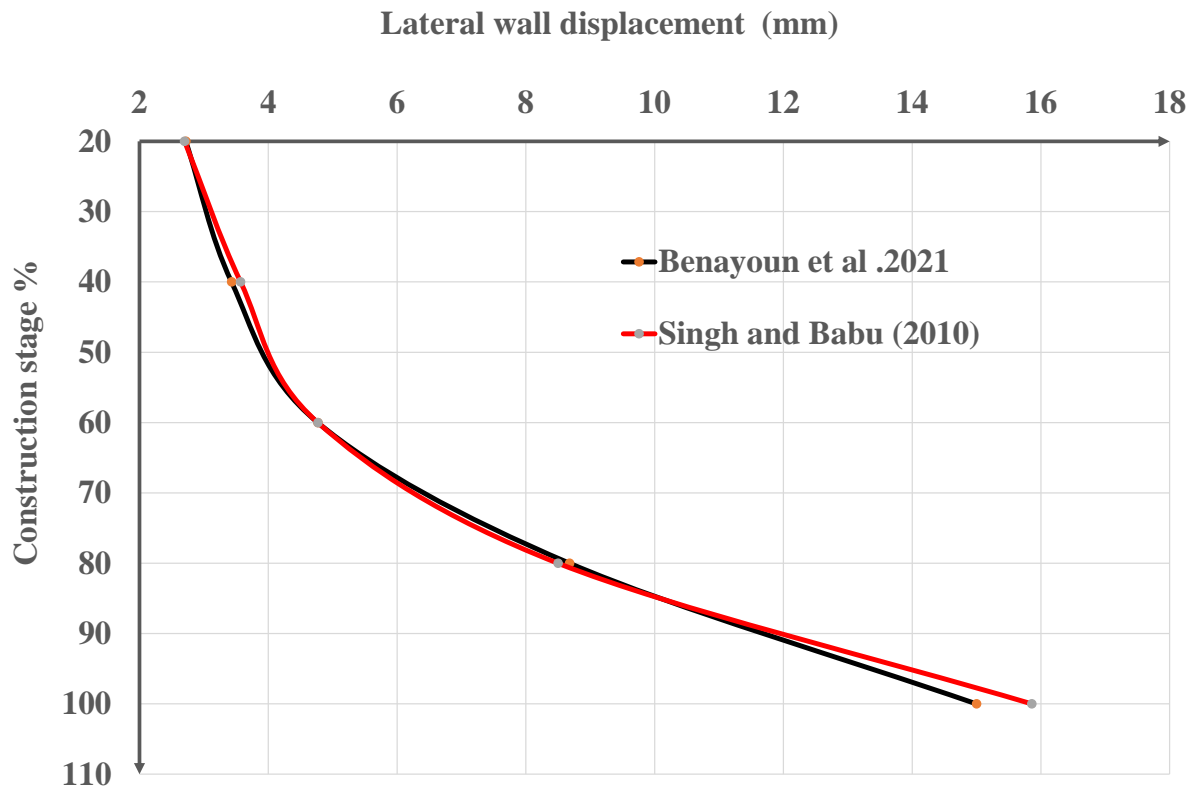


Fig. 4 Déplacement latéral du mur avec la profondeur

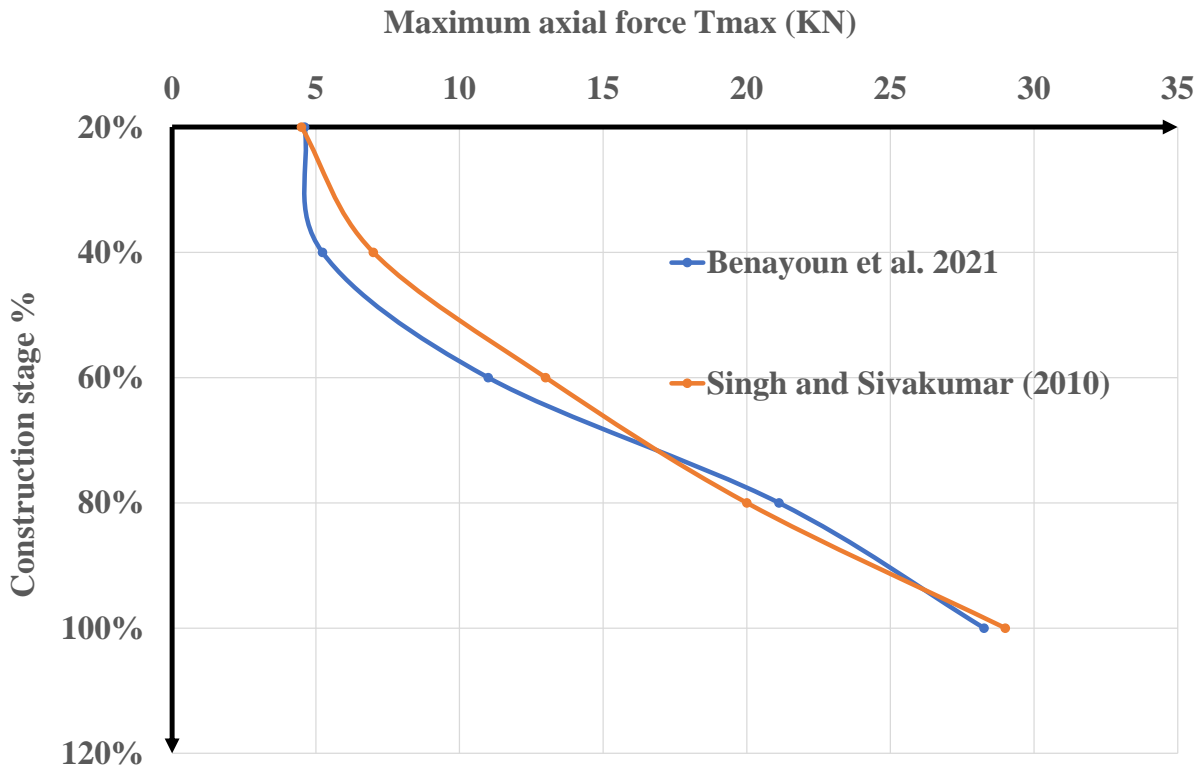


Fig. 5 Développement de la force axiale des clous avec la profondeur

Dans la figure 2, le soulèvement de la base de la face d'excavation est la valeur maximale du déplacement vertical vers le haut pour chaque étape de construction.

La figure 3 montre la diminution du facteur de sécurité avec les étapes de construction, le facteur de sécurité est obtenu après chaque étape de construction.

Dans la figure 4 on note que le déplacement latéral est la valeur maximale du déplacement horizontal pour chaque étape de construction (qui se produit généralement en haut) de la face verticale du mur.

La figure 5 montre la force axiale maximale dans le clou du sol, et qui est la force axiale maximale développée parmi les clous installés jusqu'à l'étape de construction considérée.

Comme le montrent les graphiques, tous les résultats sont presque similaires et ces observations sont en bon accord avec la littérature technique.

IV.3 Application de la Méthode de Taguchi

Le processus d'optimisation de la méthode Taguchi a été réalisé à l'aide de Minitab 18, un logiciel utilisé pour l'analyse statistique et la résolution de problèmes et l'amélioration de la qualité dans le domaine des mathématiques, des statistiques, de l'économie et de l'ingénierie.

Le but de ces simulations est d'obtenir une combinaison optimale de paramètres de facteurs de contrôle qui atteignent la robustesse contre les facteurs de bruit. La disposition du tableau orthogonal (L27) a été traitée, elle se composait de 27 combinaisons utilisant trois variables de processus prises chacune à trois niveaux afin d'obtenir une conception stable.

Le tableau orthogonal de Taguchi est généralement représenté par :

La (Q^b), où :

a : est le nombre d'expériences ;

Q : est le nombre de niveaux ;

b : est le nombre de facteurs.

Les tableaux orthogonaux de troisième niveau les plus couramment utilisés sont L9, L18 et L27. Dans cette étude, la matrice orthogonale L27 (3 niveaux) est utilisée et les trois facteurs sont choisis pour être L27 (3^{**3}).

Afin de sélectionner un tableau orthogonal approprié pour les expériences, les degrés de liberté totaux doivent être calculés. Les degrés de liberté sont définis comme le nombre de comparaisons entre les paramètres de processus qui doivent être faites pour déterminer quel niveau est le meilleur et en particulier combien il est meilleur (Bin Mohamad et al. 2012).

IV. 3. 1 Sélection des facteurs et leurs niveaux

Les murs de clouage du sol sont des éléments de renforcement structurels installés pour stabiliser les faces verticales créées lors des excavations, la stabilité de ces murs est étroitement liée à la géométrie de l'excavation et aux paramètres des clous.

Les paramètres des clous incluent : l'inclinaison, la longueur, le diamètre, l'espacement horizontal et vertical entre les clous ... etc. La géométrie de l'excavation comprend la profondeur de l'excavation, l'inclinaison du parement du mur, le type de parement et d'autres paramètres tels que la connexion (interaction) entre les clous et le parement, la rigidité du parement, la séquence de construction ... etc.

L'ingénieur doit prendre des décisions de conception qui mèneront à une conception optimale.

Dans ce cas, trois facteurs de sol cloué au mur ont été considérés pour optimiser le modèle par la méthode de Taguchi : le rapport de la longueur du clou à la hauteur du mur ($\frac{L}{H}$), l'espacement vertical des clous (S_v) et l'inclinaison des clous (I°).

Tableau. 3 Paramètres d'entrée et leurs niveaux

N°	Paramètres	Unité	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
1	L/H	-	0,8	1	1,2
2	I°	Degré ($^\circ$)	15	20	25
3	S_v	Mètre (m)	1	1,5	2

Tableau. 4 orthogonal standard L27de Taguchi

Simulation N°	Facteurs de Contrôle		
	L/H	S_v	I°
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3

Le tableau 4 montre la matrice orthogonale standard L27. L'équation S / N dépend du critère de la caractéristique de qualité à optimiser, l'approche « Plus petit est mieux » a été choisie pour cette analyse comme indiqué dans l'équation. (1).

Dans le concept de « plus il est petit, plus c'est mieux », le rapport S/N utilisé pour ce type de réponse est donné par :

$$S/N \text{ (dB)} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Les rapports $\frac{S}{N}$ sont exprimés sur une échelle de décibels et y_i est la valeur de réponse pour une condition d'essai répétée n fois.

Taguchi utilise des rapports signal sur bruit comme mesures de performance pour optimiser la variable de réponse ou la caractéristique de qualité de sortie contre les variations des facteurs de bruit. Les rapports signal / bruit de Taguchi, qui sont des fonctions logarithmiques de la sortie souhaitée, s'adaptent comme des fonctions objectives pour l'optimisation, servent à l'analyse des données et présagent un résultat optimal (Sudhakara et Prasanthi 2014).

Sur la base des exécutions de simulation, le facteur de sécurité a été enregistré à trois niveaux différents et la valeur moyenne est prise pour analyse. Le tableau suivant montre les réponses mesurées et les rapports $\frac{S}{N}$ atteints.

Tableau. 5 Réponses mesurées et les rapports S/N

N°	Facteurs d'entrés			Variable de réponse Fs	Rapport $\frac{S}{N}$ (dB)
	$\frac{L}{H}$ -	Espacement Vertical S_v (m)	Inclinaison (I°)		
1	0,8	1,0	15	1,754	-4,881
2	0,8	1,0	20	1,632	-4,256
3	0,8	1,0	25	1,643	-4,312
4	0,8	1,5	15	1,740	-4,807
5	0,8	1,5	20	1,636	-4,274
6	0,8	1,5	25	1,640	-4,274
7	0,8	2,0	15	1,599	-4,076
8	0,8	2,0	20	1,567	-3,902
9	0,8	2,0	25	1,535	-3,723
10	1	1,0	15	1,793	-5,074
11	1	1,0	20	1,802	-5,114
12	1	1,0	25	1,805	-5,129
13	1	1,5	15	1,800	-5,108
14	1	1,5	20	1,809	-5,149
15	1	1,5	25	1,810	-5,154
16	1	2,0	15	1,720	-4,713
17	1	2,0	20	1,748	-4,852

18	1	2,0	25	1,764	-4,929
19	1,2	1,0	15	1,962	-5,853
20	1,2	1,0	20	1,970	-5,891
21	1,2	1,0	25	1,963	-5,857
22	1,2	1,5	15	1,890	-5,530
23	1,2	1,5	20	1,974	-5,906
24	1,2	1,5	25	1,873	-5,452
25	1,2	2,0	15	1,968	-5,882
26	1,2	2,0	20	1,923	-5,680
27	1,2	2,0	25	1,927	-5,700

À l'aide de Minitab, chaque paramètre de sortie est analysé statistiquement et les principaux tracés d'effets des rapports signal / bruit ($\frac{S}{N}$) pour les mesures de sortie sont obtenus.

Le graphique des principaux effets pour les moyennes et les rapports $\frac{S}{N}$ est présenté dans les Figures 6 et 7 respectivement. Ils montrent la variation de la réponse individuelle avec trois paramètres séparément. Dans le graphique, l'axe des x représente la valeur de chaque paramètre de processus et l'axe des y est la valeur de la réponse. La ligne horizontale indique la moyenne de la réponse. Les graphiques des effets principaux sont utilisés pour déterminer le paramètre de conception optimal pour obtenir la condition de stabilité optimale (Ranganath et al 2015).

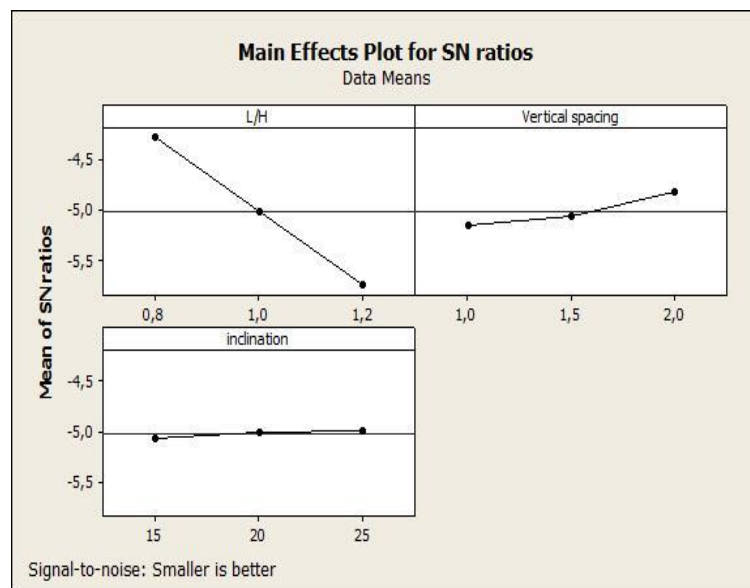


Fig. 6 Courbes des effets principaux pour les rapports S/N

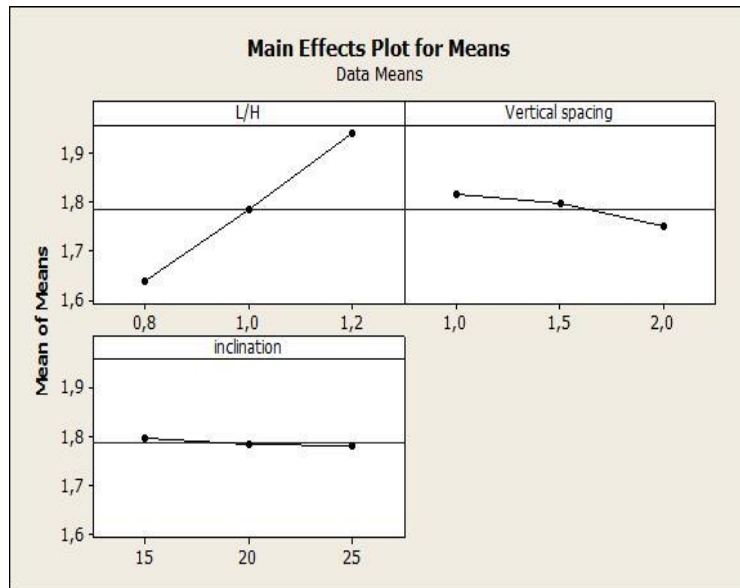


Fig. 7 Graphique des effets principaux pour les moyennes

Les Figures 6 et 7, montrent les graphiques des effets principaux pour les rapports $\frac{S}{N}$, les moyennes et l'influence des divers paramètres d'entrées sur la stabilité. À partir du graphique des effets principaux, si la ligne d'un paramètre est presque horizontale, le paramètre n'a aucun effet significatif. En revanche, un paramètre pour lequel la ligne a la plus forte inclinaison a l'effet le plus significatif. Dans ce cas, le rapport longueur / hauteur a la plus grande influence sur la stabilité, suivi de l'espacement vertical, tandis que l'inclinaison a la plus petite influence.

Tableau. 6 Réponses pour le rapport signal / bruit « plus petit est mieux »

Niveau	L/H	Espacement Vertical	Inclinaison
1	-4,281	-5,152	-5,103
2	-5,025	-5,075	-5,003
3	-5,75	-4,829	-4,95
Delta	1,469	0,323	0,153
Rang	1	2	3

Tableau. 7 Reponses pour les moyennes

Niveau	L/H	Espacement Vertical	Inclinaison
1	1,638	1,814	1,803
2	1,784	1,797	1,785
3	1,939	1,75	1,78
Delta	0,301	0,064	0,016
Rang	1	2	3

Les résultats de réponse pour les moyennes et les rapports signal bruit ont été présentés dans les tableaux 6 et 7. Le classement des paramètres de processus est obtenu par Minitab à l'aide des rapports signal / bruit et des moyennes pour différents niveaux, la dernière ligne du tableau indique le rang des entrées. Les rangs indiquent que le paramètre d'entrée le plus impactant est le rapport longueur / hauteur ($\frac{L}{H}$), le deuxième en termes d'impact est l'espacement vertical (S_v) et le troisième est l'inclinaison (I°), ce qui correspond fortement aux résultats ci-dessus. Les niveaux de facteur qui ont un rapport $\frac{S}{N}$ maximal sont considérés comme optimaux.

Tableau. 8 Valeurs optimales

Paramètres des variables (Unité)	Valeur optimale	Niveau
Rapport longueur / hauteur ($\frac{L}{H}$)	0,8	1
Espacement Vertical S_v (m)	2	3
Inclinaison I° (°)	25	3

IV. 3. 2 Paramètres d'effet

Les lignes parallèles indiquent qu'il n'y a pas d'interaction entre les facteurs, les lignes de paramètres non parallèles jouent un rôle essentiel dans l'étude de l'interaction, cela suggère qu'il y a eu une interaction nominale. Si les lignes se croisent, cela indique qu'il y a eu une forte interaction entre les facteurs.

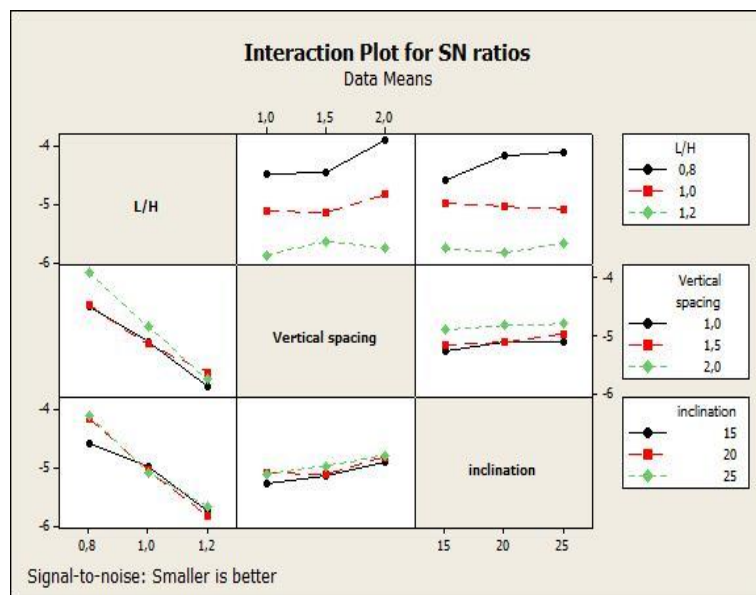


Fig. 8 Diagramme d'interaction pour les rapports S/N

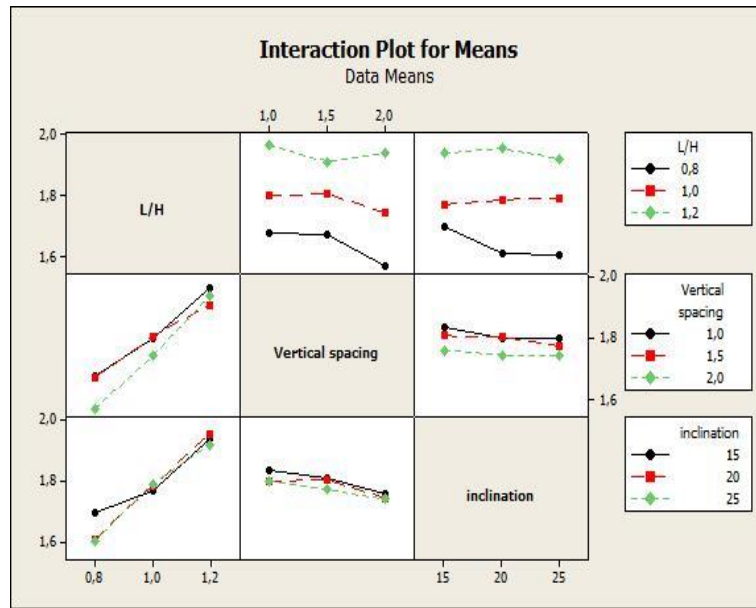


Fig. 9 Diagramme d'interaction pour les moyennes

Le graphique d'interaction entre les paramètres de processus tels que le rapport longueur / hauteur, l'espacement vertical et l'inclinaison sont également représentés sur les figures 8 et 9. Nous pouvons voir qu'il existe une interaction substantielle entre l'espacement vertical et le rapport longueur / hauteur, tandis qu'une interaction modérée entre le rapport longueur / hauteur et l'inclinaison et entre l'espacement vertical également.

Le graphique 9 prédit clairement que la valeur de la réponse augmente progressivement à mesure que le niveau des paramètres de rapport longueur / hauteur augmente, il apparaît également que lorsque l'espacement entre les clous augmente, la valeur de la réponse diminue lentement.

Comme le rapport signal sur bruit pris en compte est basé sur le plus petit pour le mieux, il est clair que le niveau optimisé de facteur de sécurité n'est réalisable que lorsque les paramètres du rapport longueur / hauteur sont réglés au niveau 1, tandis que les paramètres d'espacement vertical et d'inclinaison sont fixés au niveau 3.

IV. 3. 3 Analyse de la variance du facteur de sécurité (ANOVA)

L'ANOVA est une technique statistique utilisée pour trouver les paramètres de processus les plus significatifs qui affecteront les paramètres de sortie, les valeurs S/N des variables de réponse sont utilisées pour obtenir une ANOVA à l'aide du logiciel Minitab 18. L'examen ANOVA est réalisé avec un niveau de certitude (confiance) de 95% et un niveau de signification de 5%. (Sayeed Ahmed et al.2015).

L'ANOVA calcule les quantités telles que les degrés de liberté (DF), les sommes des carrés (Seq SS), le rapport (F), la valeur (P) et la contribution en pourcentage (P%), comme illustré dans le tableau 9.

Si la valeur P est inférieure à 0,05, le paramètre de processus est dit significatif et si la valeur P est supérieure à 0,05, les paramètres de processus sont considérés comme non significatifs.

Tableau. 9 Résultats de l'analyse de variance ANOVA

Source	DF	Seq SS	F	P	% P
L/H	1	0,406862	244,108	0,000 < 0,05	87,06
Sv	1	0,018177	10,906	0,003 < 0,05	3,89
I°	1	0,003972	2,383	0,136 > 0,05	0,85
Erreur	23	0,038335			
Total	26	0,467346			

Les résultats de l'ANOVA présentés dans le tableau 9 révèlent que le paramètre le plus efficace est le rapport longueur / hauteur, tel qu'illustré par sa faible valeur P ($P < 0,05$) et sa valeur F élevée, puis suivi d'un espacement vertical avec un valeur p et valeur F considérablement faible, et enfin facteur d'inclinaison du clou.

D'après les résultats, l'inclinaison de l'angle est le seul facteur insignifiant, avec 0,85% de contribution.

Il a été constaté que le rapport longueur / hauteur était le principal facteur affectant la stabilité (87,06%), alors que l'espacement vertical était le deuxième facteur (3,89%), la contribution en pourcentage de l'inclinaison est beaucoup plus faible (0,85 %).

Les graphiques résiduels sont utilisés pour examiner la qualité de l'ajustement du modèle. Minitab fournit les tracés résiduels suivants.

L'interprétation de chaque graphique résiduel est donnée ci-dessous :

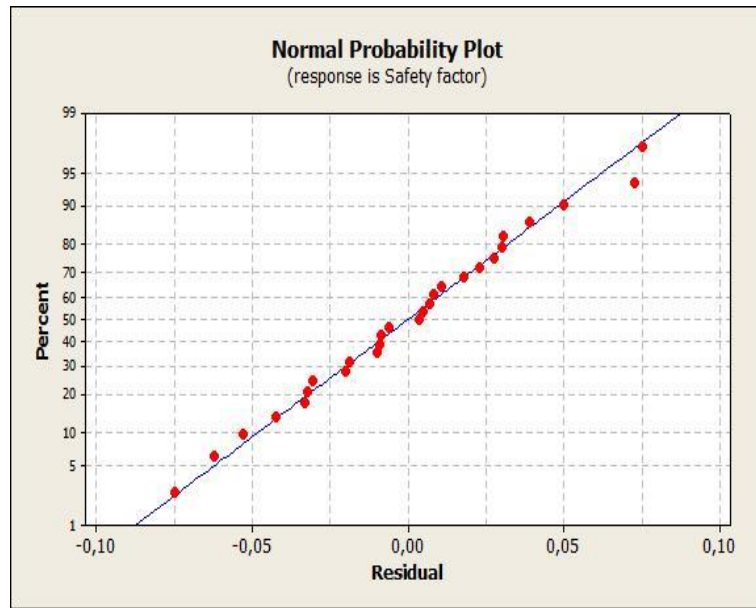


Fig. 10 Diagramme de probabilité normale (droite de Henry)

Le graphique de probabilité normale révèle que presque tous les résidus suivent un modèle linéaire et qu'il ne semble pas y avoir de valeurs aberrantes, cela concorde bien avec les résultats.

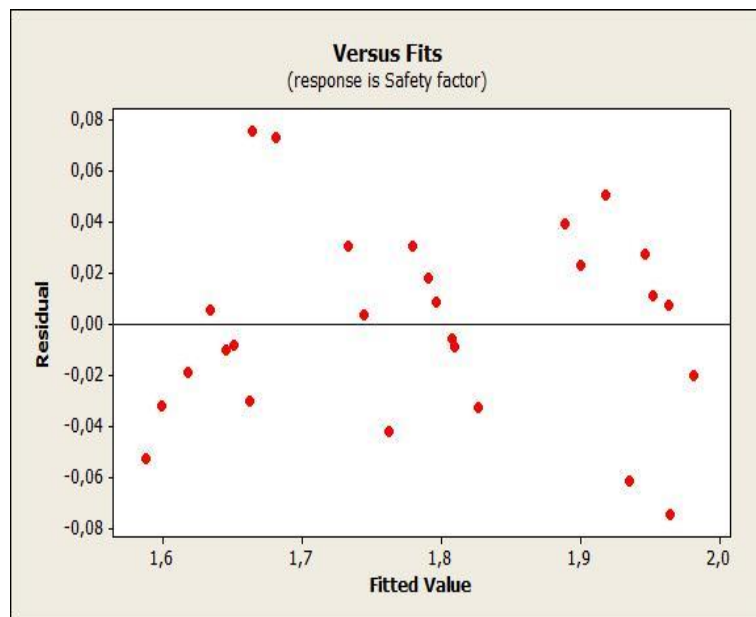


Fig.11 Valeurs Résiduels par rapport aux valeurs ajustées

Les valeurs résiduelles par rapport aux valeurs ajustées indiquent que les points apparaissent dispersés au hasard sur le graphique, il existe une relation non linéaire et aucune valeur aberrante n'est apparente, le résidu est majoritairement cumulé autour de zéro, sauf quelques points au-dessus.

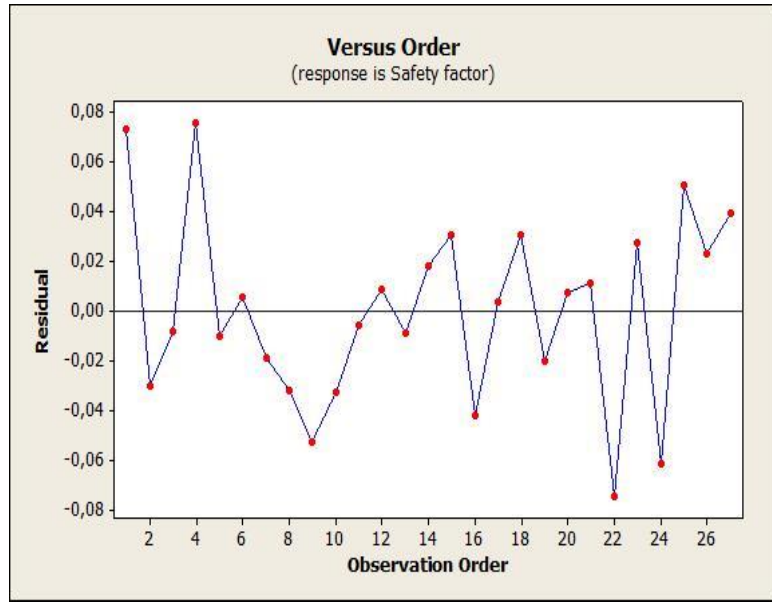


Fig. 12 Résidus par rapport à l'ordre des données

Dans le diagramme des résidus en fonction de l'ordre, les résidus sont disposés au hasard autour de la ligne centrale. Le graphique montre clairement que les résidus proches les uns des autres sont corrélés et donc non indépendants. Cela signifie que le modèle est valide.

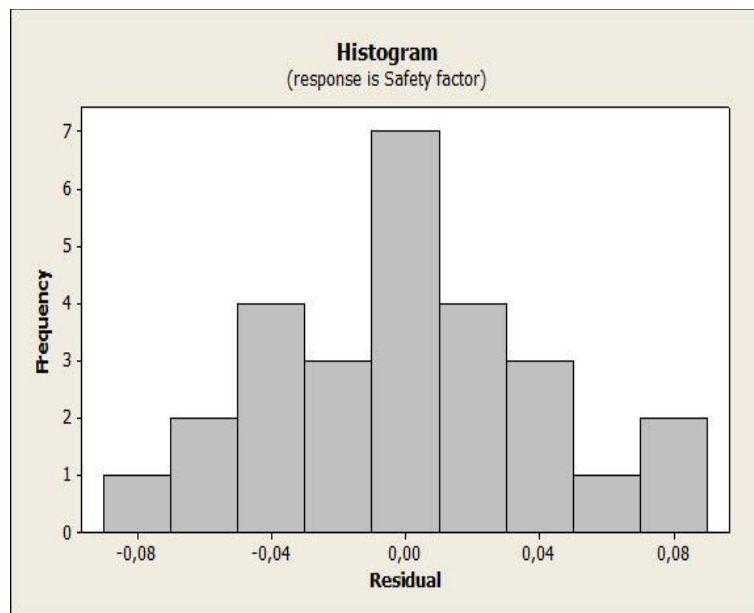


Fig. 13 Histogramme des résidus

L'histogramme prouve que les données ne contiennent aucune valeur aberrante, un histogramme normal est à peu près symétrique et a la forme d'une cloche.

IV. 4 Application de l'algorithme Génétique.

Les algorithmes génétiques (GA) ont été développés dans le but principal d'imiter les processus qui existent dans la nature. Les principes de base des algorithmes génétiques ont été publiés en 1962 (Hollande) et le cadre mathématique de leur développement a été publié en 1975.

Un algorithme génétique (GA) est classé comme une heuristique de recherche globale, qui est utilisée dans le calcul pour trouver des solutions exactes ou approximatives aux problèmes d'optimisation et de recherche. L'algorithme génétique est mis en œuvre dans une simulation informatique dans laquelle une solution du problème est représentée en utilisant un génome ou un chromosome. L'algorithme génétique crée une population de solutions et applique des opérateurs génétiques sous forme de mutation et de croisement pour faire évoluer des solutions afin de trouver la meilleure solution.

Les composants de base communs pour tous les algorithmes génétiques sont :

- Une fonction de fitness pour l'optimisation ;
- Une population de chromosomes ;
- Sélection des chromosomes qui se reproduiront ;
- Croisement pour produire la prochaine génération de chromosomes ;
- Mutation aléatoire des chromosomes dans la nouvelle génération.

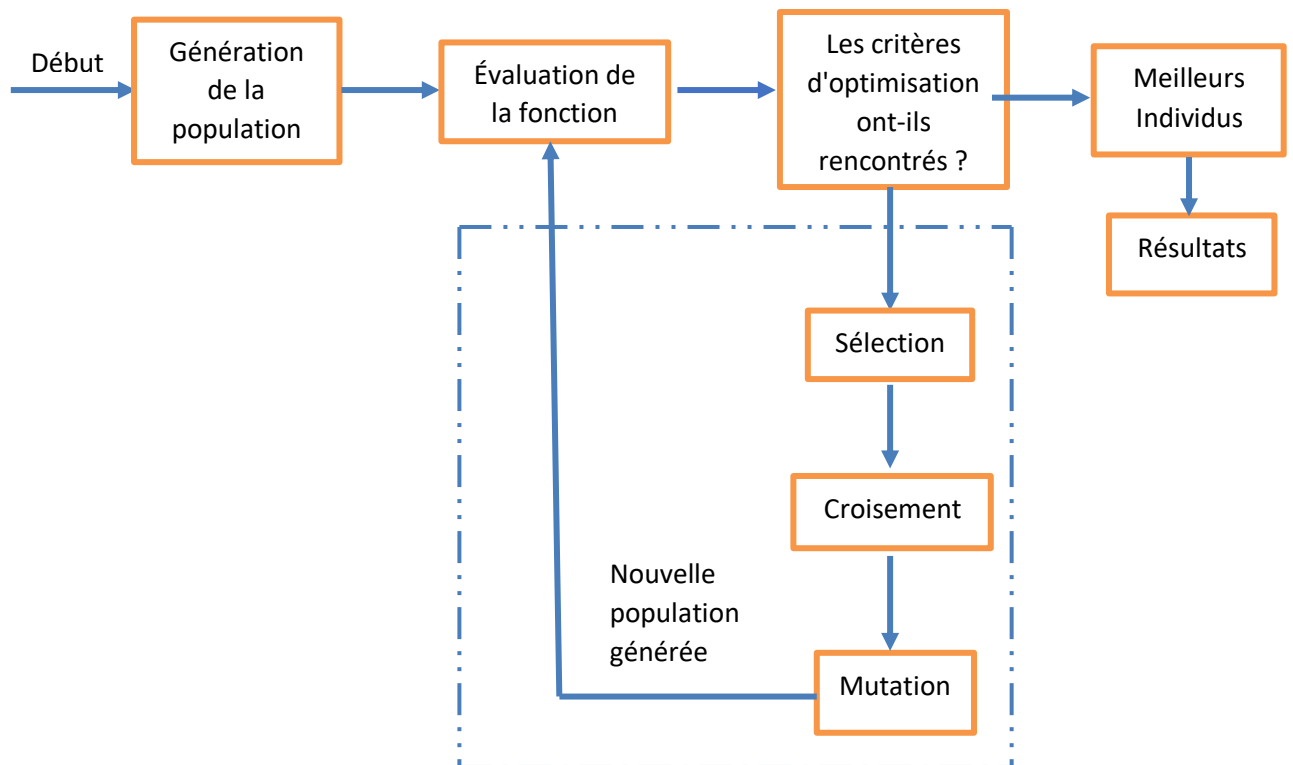


Fig. 14 Schéma de principe de l'algorithme génétique (Petkovic, D., and Radovanovic, M. (2013))

IV. 4. 1 Modélisation mathématique et formulation de problèmes d'optimisation

Du point de vue mathématique, l'optimisation consiste à trouver la meilleure solution dans un espace de recherche d'une fonction, qui décrit le problème et est souvent appelée fonction de fitness ou d'objective. La fonction de remise en forme ou fonction objective a des limites, qui sont les contraintes du problème. La procédure d'optimisation comporte deux phases. La première phase est la modélisation mathématique où une fonction objective à plusieurs variables doit être définie. Dans cette phase, toutes les contraintes et limites des variables doivent également être définies. La deuxième phase est la recherche d'un minimum global de fonction objective. Dans le processus d'optimisation, le facteur de sécurité du clouage du sol est défini comme la fonction objective et utilisé pour fournir une mesure de la performance des individus face au problème posé. La fonction objective est la fonction que l'algorithme tente d'optimiser, c'est l'une des parties les plus cruciales de l'algorithme.

La fonction objective est définie comme suit :

$$Y(X_1, X_2, X_3) = -0.180333 X_1 - 0.121889 X_2 - 0.0286222 X_3 + 0.126944 X_1^2 + 0.21 X_1 X_2 \\ + 0.0181583 X_1 X_3 - 0.0588889 X_2^2 + 0.0015 X_2 X_3 + 0.00014044 X_3^2 \\ + 1.96039$$

Les variables sont :

X_1 : Rapport longueur / hauteur (L/H)

X_2 : Espacement vertical

X_3 : Inclinaison des clous

Et les contraintes sont :

Limites sur le rapport de hauteur de longueur : $0.8 \leq X_1 \leq 1.2$

Limites sur l'espacement vertical (m) : $1 \leq X_2 \leq 2$

Limites sur l'inclinaison du clou ($^\circ$) : $15^\circ \leq X_3 \leq 25^\circ$

La technique d'algorithme génétique est appliquée pour optimiser les paramètres de clouage du sol. Cette fonction est un problème non linéaire.

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, la deuxième phase consiste à résoudre le modèle mathématique et à minimiser la fonction objective $Y(X_1, X_2, X_3)$ à l'aide de la boîte à outils GA dans Matlab.

IV. 4. 2 Paramètres de l'algorithme génétique

Les paramètres doivent être pré-choisis pour contrôler le processus de recherche, et ils comprennent la taille de la population pour chaque génération, le nombre de générations, les

probabilités des opérateurs génétiques (reproduction, croisement et mutation), la méthode de sélection, les conditions de terminaison, etc. les paramètres utilisés dans l'étude de cas sont les suivants :

Tableau. 10 Paramètres de l'algorithme génétique.

Paramètres	Détails
Type de Population	Vecteur Double
Taille de la Population	100
Fraction de croisement	0.8
Génération	100
Sélection	Uniforme stochastique
Rapport de Mutation	0.05

Les paramètres optimaux obtenus avec ce modèle pour différentes conditions de variables sont :

Tableau. 11 Résultats des valeurs optimales

Variables	L/H	S_V (m)	I°
Optimal	0.8	1.99994	15°

Les paramètres obtenus sont conformes aux recommandations Clouterre 1991 qui indique un rapport longueur / hauteur des clous = (0,8 - 1,2).

L'évaluation des générations et les meilleures valeurs obtenues par GA sont présentées dans la figure 15.

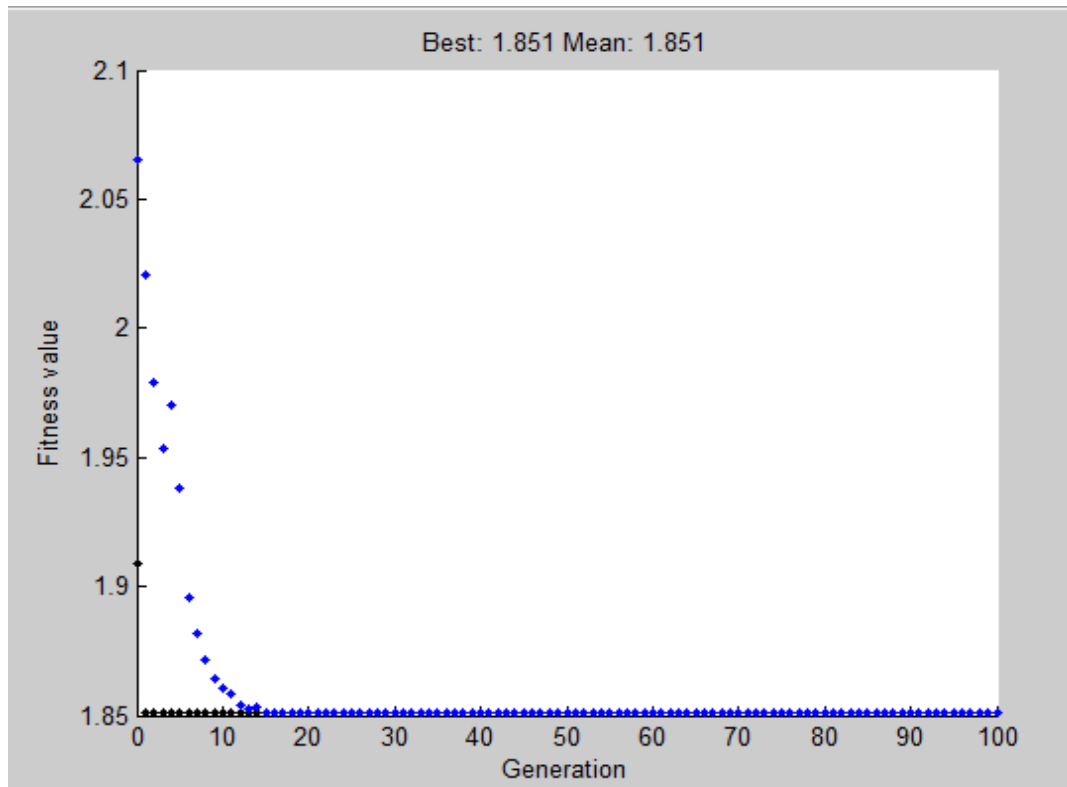


Fig. 15 Variation des valeurs de fitness avec les générations

Dans la figure 15, le point noir indique la meilleure valeur obtenue de la fonction objective à chaque génération, montre peu de progrès dans l'abaissement de la valeur de fitness. Le point bleu indique la valeur moyenne de la fonction objective à chaque génération. Nous avons un nombre de points égal au nombre de générations soit pour la moyenne soit pour les meilleures, et pour ce cas nous avons 100 points pour les meilleurs et 100 points pour les moyennes. La valeur de fitness est quasiment constante après la 13^{ème} génération, la valeur finale obtenue égale à 1,851 qui exprime le résultat de la minimisation du facteur de sécurité.

IV. 5 Application de la méthode des surfaces de réponses (RSM)

La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été introduite par G. E. P. Box et K. B. Wilson au début des années 1950, c'est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utiles pour le développement et l'optimisation des processus (Renata, D et Jacek, P 2018). La technique RSM la plus utilisée est la conception Box-Behnken (BBD). Le processus a été réalisé selon l'outil de conception Box-Behnken de RSM à l'aide du logiciel Minitab 18 pour 3 facteurs sélectionnés (tableau 11) afin de résoudre ce problème de minimisation du facteur de sécurité. Sur la base de simulations effectuées et des résultats obtenus en utilisant l'analyse par

éléments finis avec Plaxis 2D, 15 essais ont été réalisés selon le plan de Box-Behnken (Tableau 12).

Tableau. 12 Paramètres et plages pour l'analyse du clouage du sol

Paramètres	Unités	Étiquettes	Faible (-1)	Haute (+1)
Longueur du clou	Mètre (m)	L/H	0.8	1.2
Inclinaison du clou	Degré (°)	I	15	25
Espacement Vertical	Mètre (m)	S_v	1	2

Tableau. 13 Résultats expérimentaux selon un design Box-Behnken

Cas	L/H	Inclinaison	Espacement Vertical	Variable de réponse expérimentale	Variable de réponse estimée
1	1.0	20	1.5	1.809	1.813
2	1.0	25	2	1.764	1.747
3	0.8	20	1	1.632	1.675
4	1.0	15	1	1.793	1.818
5	1.0	20	1.5	1.809	1.813
6	0.8	15	1.5	1.740	1.683
7	1.0	25	1	1.805	1.787
8	1.2	15	1.5	1.890	1.912
9	0.8	25	1.5	1.640	1.626
10	1.0	15	2	1.720	1.746
11	1.2	20	1	1.970	1.936
12	1.2	20	2	1.923	1.889
13	1.0	20	1.5	1.809	1.813
14	0.8	20	2	1.567	1.601
15	1.2	25	1.5	1.873	1.938

IV. 5. 1 Résultats et discussions

IV. 5. 1. 1 Analyse de la variance

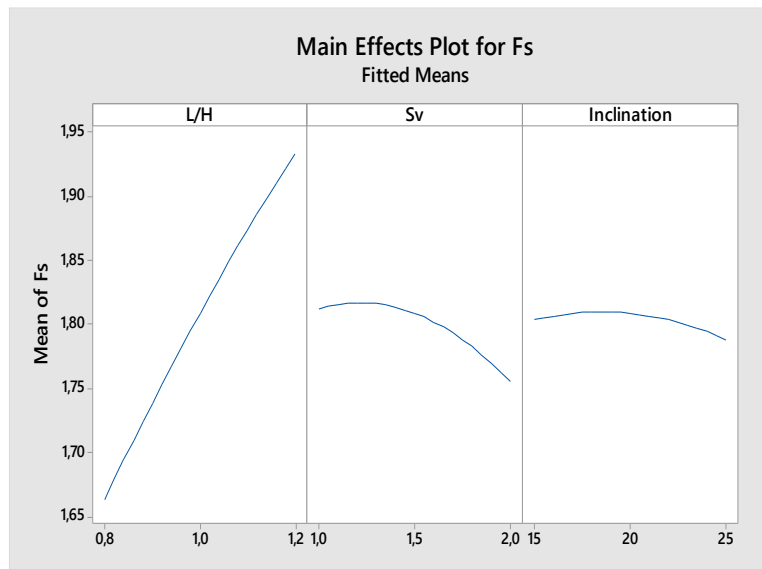


Fig. 16 Effets principaux

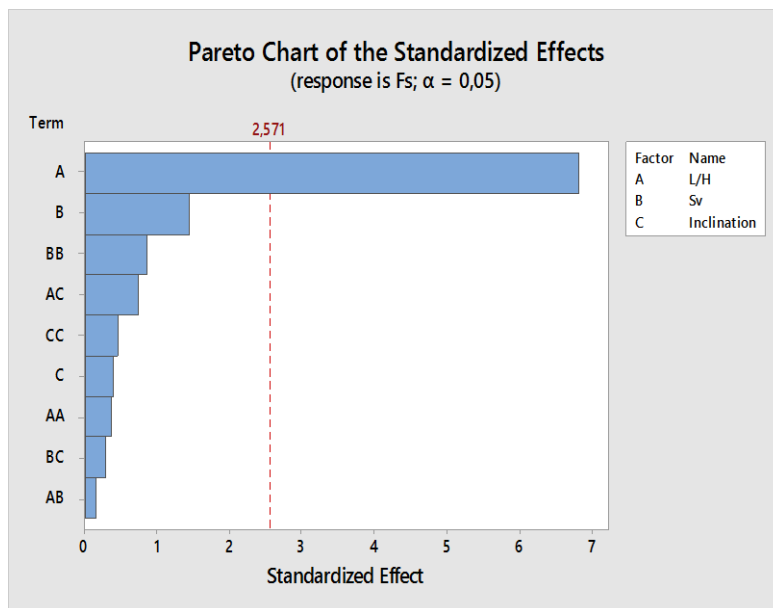


Fig. 17 Diagramme de Pareto

L'adéquation du modèle de surface de réponse quadratique a été justifiée par ANOVA. Seul le paramètre de longueur des clous a un effet standardisé positif (Fig. 16). Le graphique de Pareto a été développé pour comparer l'ampleur relative des effets de divers facteurs sur la réponse, leur signification et leur interaction. Minitab trace les effets par ordre décroissant de la valeur absolue des effets standardisés et trace une ligne de référence sur le graphique (Anika, N.A et

al.2020). Comme le montre la figure 17, la barre de Pareto d'effet d'entrée A (longueur des clous) est à droite de la ligne rouge verticale ; par conséquent, cette barre est statistiquement significative au niveau de signification de 5% avec les termes actuels du modèle. Bien que les autres facteurs C, CC, AB, BB, B, AA, BC, AC semblent insignifiants.

IV. 5. 1. 2 Développement de l'équation du modèle de régression

L'expérience numérique totale la plus basse a été utilisée pour modéliser l'équation polynomiale quadratique. L'équation de régression développée, comme indiqué ci-dessous, représente l'effet quantitatif des facteurs d'entrée et de leurs interactions. Par conséquent, une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et prédites confirme la validité du modèle (tableau 12).

$$F_s = 0.72 \frac{L}{H} + 0.139 S_v - 0.0062 I^\circ - 0.262 \frac{L}{H} \times \frac{L}{H} - 0.101 S_v \times S_v - 0.00052 I^\circ \times I^\circ + 0.044 \frac{L}{H} \times S_v + 0.0207 \frac{L}{H} \times I^\circ + 0.0032 S_v \times I^\circ + 1.13$$

IV. 5. 1. 3 Optimisation à l'aide de la surface de réponse et des courbes de niveau

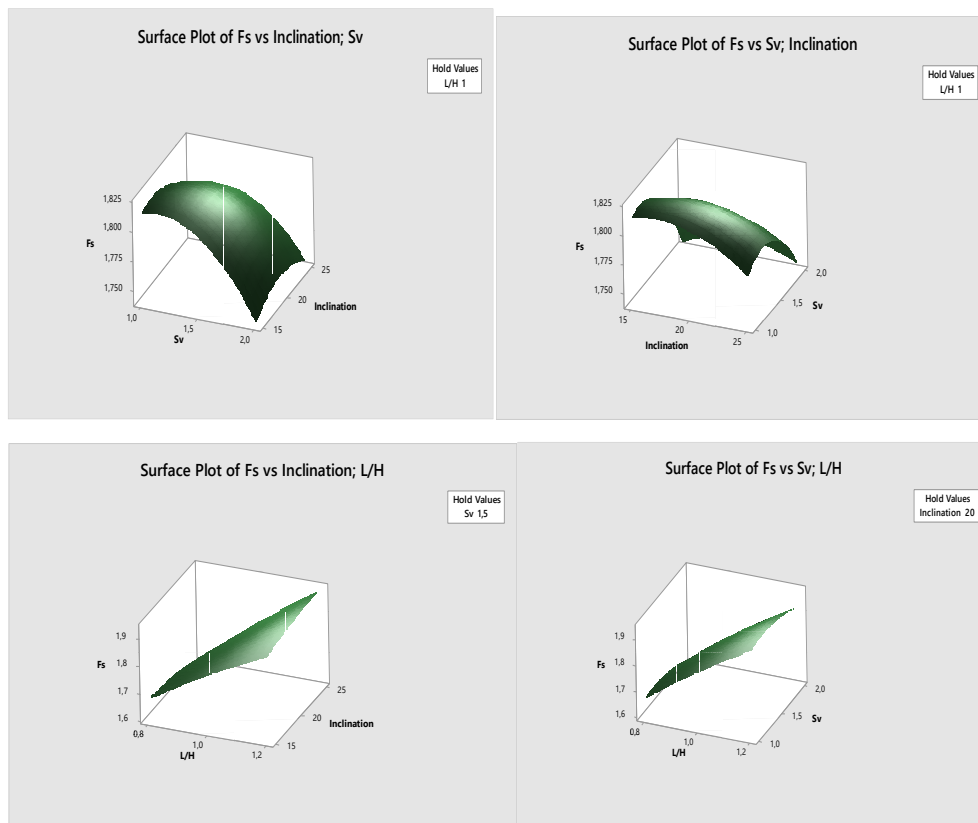


Fig. 18 Surfaces de réponse 3D

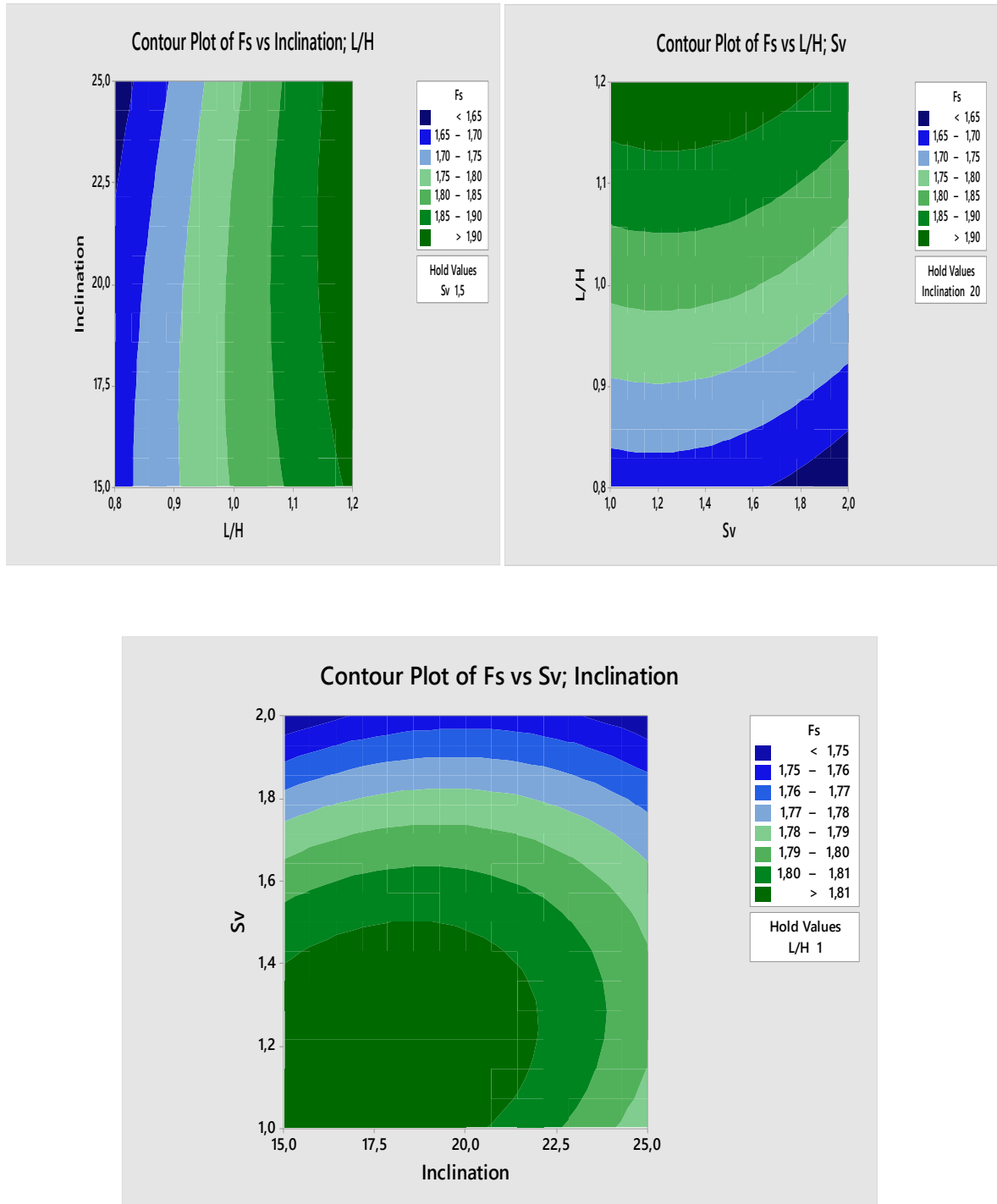


Fig. 19 Lignes de contour

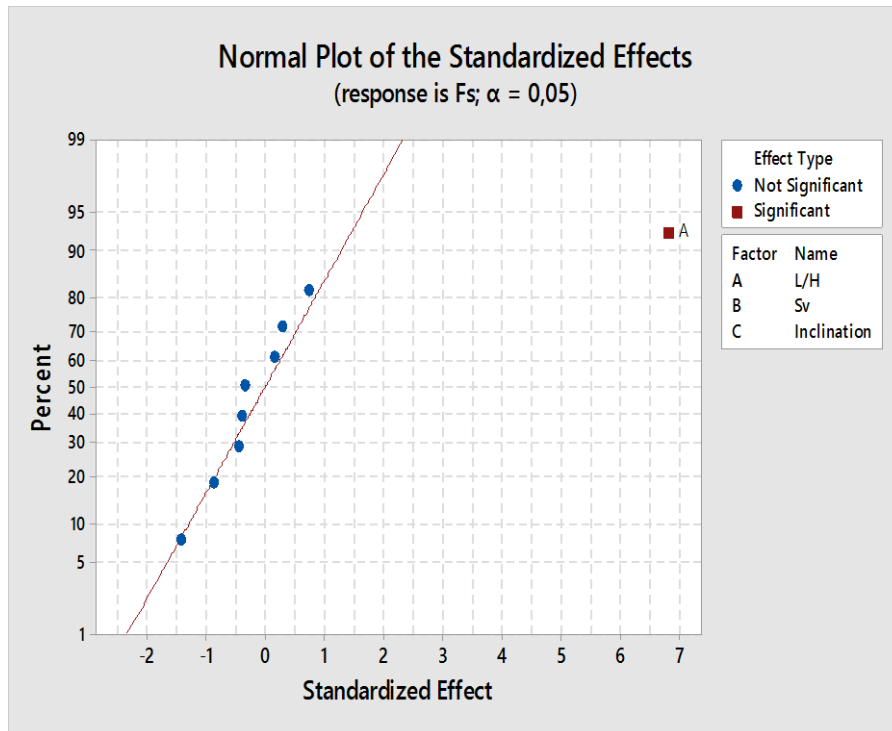


Fig. 20 Graphiques normaux pour les effets standardisés

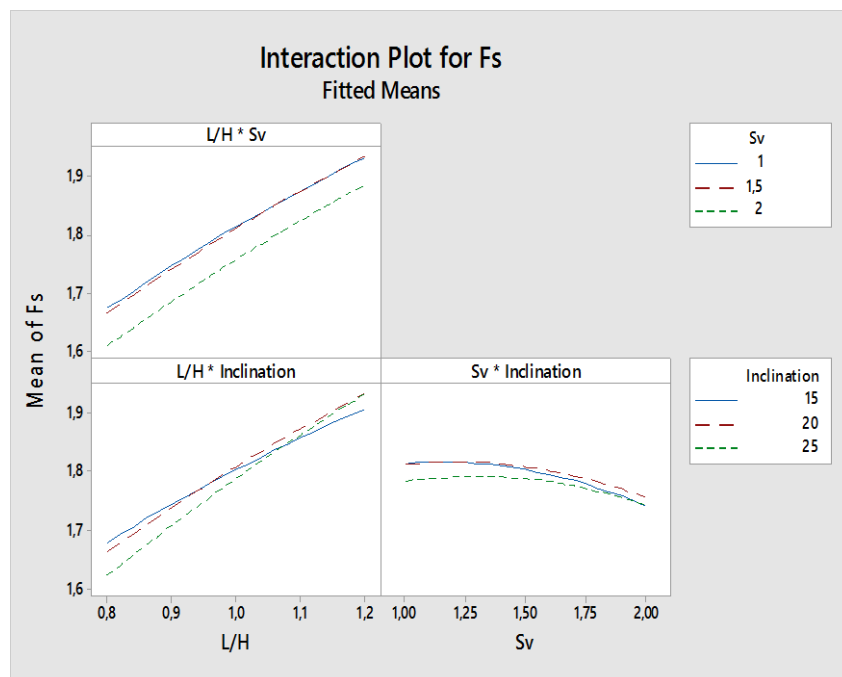


Fig. 21 Diagrammes d'interaction pour le Facteur de sécurité

Les résultats sont également déduits de l'analyse de deux tracés graphiques : un tracé de contour et un tracé de surface 3D. La relation entre les variables a été représentée graphiquement par la surface de réponse 3D et les tracés de contour 2D générés par le modèle (Figures 18 et 19). À partir des résultats, il était facile et pratique de comprendre les interactions entre les facteurs et de localiser leurs niveaux optimaux.

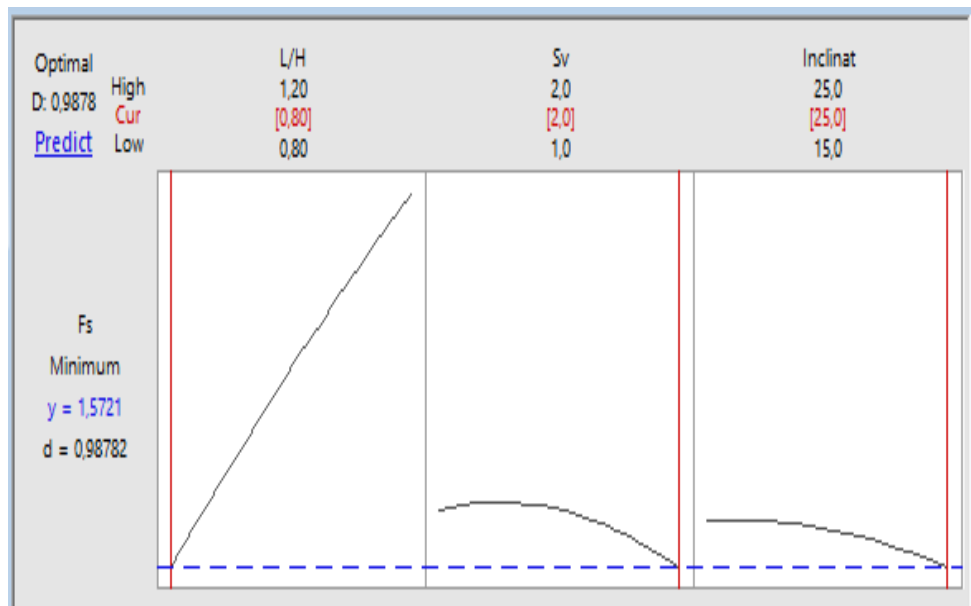


Fig. 22 Optimisation

La figure 22 montre qu'une valeur intéressante et recherchée de la variable de réponse peut être prédite et obtenue à partir du modèle développé. Ainsi, une longueur de 8 m, une inclinaison de 25° et un espacement vertical de 2 m, pour permettre une réponse variable (facteur de sécurité) de 1,5721 avec une bonne désirabilité de 0,98782.

Conclusion

Dans ce travail nous avons appliqué une méthodologie d'optimisation des paramètres d'un sol cloué en comparant trois méthodes : l'algorithme génétique (GA) et la méthode DOE (la méthode Taguchi et la surface de réponse RSM). Notre but est d'optimiser un modèle de renforcement de sol cloué et à identifier la combinaison optimale des paramètres de clouage, le rapport longueur des clous sur la hauteur de l'excavation (L/H), l'espacement vertical entre les clous Sv, et l'inclinaison des clous en minimisant le facteur de sécurité

Les potentiels des trois méthodes pour estimer les paramètres optimaux ont été explorés et les conclusions suivantes ont été tirées.

- Il a été démontré que les techniques présentées sont toutes capables de trouver rapidement la solution optimale.
- L'optimisation par la méthode mono-objective Taguchi a été effectuée avec la prise en compte du rapport signal sur bruit (S/N). Ce rapport nous a permis de conclure que les valeurs optimales pour minimiser le coefficient de sécurité sont donc la combinaison une

inclinaison des clous de 25° , un espacement vertical de 2 m entre deux couches successives et un rapport L/H de 0.8.

- Même combinaison a été obtenue par la méthode RSM, et pour l'algorithme génétique l'inclinaison 15° est obtenu comme une valeur optimale.
- Les résultats obtenus sont satisfaisants et conformes aux recommandations Clouterre 1991, l'additif 2002 et aux recherches consultées.
- Les avantages de la méthode Taguchi par rapport aux autres méthodes sont que de nombreux facteurs peuvent être optimisés simultanément, et plus d'informations quantitatives peuvent être extraites d'un nombre réduit d'essais expérimentaux.
- La méthode Taguchi se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision.
- L'application de la méthode Taguchi peut réduire le nombre de simulations, réduisant ainsi considérablement le coût de calcul.
- Pour une meilleure stratégie d'optimisation avec l'algorithme génétique le choix des paramètres est une étape très importante (taille de la population, taux de mutation, fraction de croisement ...etc). Des indications sont données dans ce travail pour un choix judicieux de ces paramètres
- L'utilisation de la méthode RSM (Conception Box–Behnken) est une méthode statistique très utile qui a réduit le nombre d'expériences. L'un des avantages de la méthode réside dans l'analyse statistique qui permet de voir le problème d'optimisation sous plusieurs facettes (notamment en termes de probabilités et de désirabilité en regard des paramètres considérés). Les interactions mutuelles entre les variables indépendantes sont décrites avec des équations quadratiques qui permettent de prédire la réponse dans les conditions appliquées.
- Pour les méthodes de plans d'expériences, nous avons le libre choix des facteurs et les interactions à étudier selon le modèle qu'on propose, en étroite adéquation avec ses objectifs.
- Les trois méthodes peuvent constituer un outil précieux pour l'optimisation des murs cloués au sol en général.

References

1. **Anika, N.A., Tanzeem, N., Gupta, H.S. (2020)** Design of Experiment (DoE): Implementation in Determining Optimum Design Parameters of Portable Workstation. *Engineering*, 12, 25-32.
2. **Bin Mohamad, A., Siddiquee, A.S., Abdul Quadir, G., Khan, Z.A. and Saini, V.K. (2012)**, "Optimization of EDM process parameters using Taguchi method", International Conference on Application and Design in Mechanical Engineering (ICADME), Penang, Malaysia, 27-28 February.
3. **Clouterre (1991)** Recommandations Clouterre pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols. Presses de l'ENPC, 268 p
4. **Holland J. 1975**, *Adaptation in natural and artificial systems, an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence* MIT Press Cambridge, MA, USA ©1992 ISBN:0262082136
5. **Petkovic, D., and Radovanovic, M. (2013)**. Using genetic algorithms for optimization of turning machining process. *Journal of Engineering Studies and Research*, 19(1), 47.
6. **Ranganath, M. S., Vipin, Mishra, R. S., Prateek, and Nikhil. (2015)**, "Optimization of surface roughness in CNC turning of aluminium 6061 using Taguchi techniques", *Inter. J. Modern Eng. Research (IJMER)*, 5(5), 42-50, ISSN: 2249-6645.
7. **Renata, D., Jacek, P (2018)**. The outline of the expert system for the design of experiment, *Production Engineering Archives* 20 43-48.
8. **Sayeed Ahmed, G.M., Sibghatullah Hussaini Quadri, S. and Mohiuddin, M.S. (2015)**, "Optimization of feed and radial force in turning process by using Taguchi design approach" 4th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC), *Materials Today, Proceedings*, 2, 3277 – 3285.
9. **Sudhakara, D. and Prasanthib, G. (2014)**, "Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in wire electric discharge machining of P/M cold worked tool steel (Vanadis-4E)", *Procedia Engineering*, 97, 1565-1576.
10. **Vikas, P.S. and Sivakumar Babu, G.L. (2009)**, "2D Numerical simulations of soil nail walls", *Geotech. Geolog. Eng. ASCE*, 28, 299-309.

Conclusions Générales Et Perspectives

Conclusions Générales et Perspectives

Les études menées lors de nos travaux de thèse sur le sujet « Optimisation dans les renforcements des sols » ont conduit à optimiser un modèle de renforcement du sol par clouage et à identifier la combinaison optimale des paramètres de clouage : rapport longueur des clous sur la hauteur de l'excavation (L/H), espacement vertical entre les clous (S_V), et l'inclinaison des clous par rapport à l'horizontale (I°), le problème d'optimisation est mono-objectif en minimisant le facteur de sécurité F_s par l'application des différentes méthodes d'optimisations citées auparavant.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Il a été démontré que la méthode l'Algorithme Génétique présenté est capable de trouver rapidement le facteur de sécurité minimum et les paramètres optimaux, on peut remarquer que le système de l'Algorithme Génétique est initialisé avec une population de solutions aléatoires et recherche des optima en mettant à jour les générations,
- Pour une meilleure stratégie d'optimisation, le choix des paramètres de l'algorithme génétique est une étape très sensible (taille de la population, taux de mutation, fraction de croisement.... etc.).
- Les résultats sont satisfaisants et conformes aux recommandations Clouterre 1991 et l'additif 2002.
- La méthode de Taguchi (en utilisant les tables orthogonaux) a pourrait rapidement et facilement déterminer la conception optimale et trouver la combinaison optimale des niveaux de divers facteurs.
- On constate que la conception des paramètres de la méthode de Taguchi fournit une technique simple et robuste.
- L'analyse de Taguchi est effectuée pour comprendre le classement des facteurs affectant la réponse.
- D'après la méthode de Taguchi, le rapport entre la longueur du clou et la hauteur du mur est le paramètre le plus influent sur le facteur de sécurité suivi de l'espacement vertical et de l'inclinaison.
- La compréhension de l'importance du modèle développé est obtenue par les résultats de l'ANOVA.
- De plus, d'après l'analyse ANOVA, le rapport longueur / hauteur est le paramètre le plus significatif suivi de l'espacement vertical.

- À partir de l'analyse de la variance, l'inclinaison s'avère être un facteur non significatif pour affecter le facteur de sécurité.
- Les résultats de l'analyse de Taguchi et de l'analyse ANOVA se renforcent mutuellement.
- L'efficacité de la méthode d'optimisation de Taguchi a été menée et vérifiée à l'aide d'une expérience de confirmation.
- L'approche de Taguchi peut acquies une grande popularité auprès des utilisateurs ayant une connaissance limitée des statistiques dans la communauté des ingénieurs et des scientifiques car son application est facile à adopter et à appliquer.

La présente étude a démontré de manière concluante l'utilisation du design Box-Behnken de la méthode RSM pour l'optimisation des paramètres de clouage du sol et à partir des données ANOVA, il a été indiqué que le facteur le plus important et le plus significatif était le paramètre de longueur des clous suivi de l'espacement vertical puis l'inclinaison en dernier lieu.

- Un modèle quadratique a également été développé pour prédire la variable de réponse. L'optimisation de cette réponse a ensuite été réalisée à l'aide de tracés de contour et de tracés 3D de surface montrant les effets de tous les facteurs.
 - Cette étude explore les potentiels (capacités) de l'Algorithme Génétique (GA) et les méthodes statistiques Plans d'Expériences (DOE) dans l'estimation des paramètres optimaux de la conception de clouage du sol et du facteur de sécurité minimum.
- Il a été démontré que les techniques présentées sont toutes capables de trouver rapidement la solution optimale.
- Les résultats des valeurs de paramètres optimales retenues de notre conception correspondant à la valeur FS la plus basse, consistent en : 25° d'inclinaison du clou, 2m l'espacement vertical entre les clous et 0.8 le rapport (L/H), sont satisfaisants et conformes aux recommandations Clouterre 1991 et les recherches consultées.
- Les avantages de la méthode Taguchi par rapport aux autres méthodes sont que de nombreux facteurs peuvent être optimisés simultanément et que des informations plus quantitatives peuvent être extraites de moins d'essais expérimentaux.
- Cependant, il convient de noter que les modèles de surface de réponse obtenus et la méthode de Taguchi, ainsi que l'Algorithme Génétique ne sont valides que dans les plages de paramètres sélectionnés

Ce travail incite à envisager également d'autres axes de recherches orientées principalement dans les directions suivantes.

- Les méthodes présentées dans cette thèse ont donné des résultats satisfaisants mais la recherche continue.
- Une simulation du design en 3D (statique et dynamique) est intéressante.
- Nous comptons aussi à travailler sur des problèmes multi objectifs plus complexes pour bien améliorer les limites de nos méthodes et développer des métaheuristiques dans le cadre d'optimisation avec incertitude. L'Application de la méthode des réseaux neurones artificiels s'avère très intéressante.
- Les algorithmes heuristiques, combinatoires sont proposés pour résoudre d'autres problèmes dans les recherches future.
- L'influence du coût de réalisation d'un sol cloué : coût d'excavation, forage, béton projeté, acier.... etc, pose un problème d'optimisation.
- Cette étude aidera les ingénieurs à choisir les paramètres de renforcement du clouage du sol qui produiront une conception économique et stable.