



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics
Laboratoire de Génie Civil & Environnement

T H È S E

Application des plans d'expérience pour l'étude des sols gonflants

Présentée par

Nawal DOUNANE

Pour obtenir le diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique et Ouvrages en Terre

Soutenue à Sidi Bel Abbès le 24/05/2021 devant le jury composé de :

<i>Dr. ASROUN Aissa</i>	Professeur/ UDL Sidi Bel Abbès	Président
<i>Dr. TROUZINE Habib</i>	Professeur/ UDL Sidi Bel Abbès	Encadreur
<i>Dr. AISSA MAMOUNE Sidi Mohamed</i>	Professeur/ U. d'Ain Temouchent	Examineur
<i>Dr. BOUROKBA Souad</i>	MCA / USTO. Oran	Examineur

Année universitaire 2020/2021

LGCE Laboratoire de Génie Civil & Environnement
lgce.weebly.com/
lgce.webnode.fr/

À la mémoire de **mon père**,
que Dieu lui pardonne et ait pitié de lui ;
À **ma mère**,
que Dieu la récompense et la protège ;
À mon conjoint **docteur Yagoub Reda**,
Vous m'avez tout donné par votre présence pendant
les périodes dures comme celles faciles. Que le Dieu vous garde ;
À mes **frères et sœurs** ;
À **Alexandra kate Mitchell** et **docteur kaouter Zallat** ;
Vous avez été toujours là quand j'étais dans le besoin.
Merci infiniment.

Remerciements

Avant tout Je tiens à remercier *Dieu* miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce travail.

Ma profonde gratitude s'adresse tout particulièrement à mon Directeur de thèse, Monsieur *Trouzine Habib*, qui m'a accordé sa confiance dans l'élaboration de cette thèse. Tout en suivant de près ma démarche scientifique, il m'a fait partager son expérience enrichissante et m'a prodigué de précieux conseils et encouragements pour mener à bien ce travail. Je le remercie du fond du cœur et j'espère avoir à nouveau l'occasion de travailler avec lui.

Je tiens à remercier très vivement et respectueusement, Monsieur *Aissa Asroun*, professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Je présente également mes remerciements à Monsieur *Aissa Mamoune Sidi Mohamed*, professeur au Centre Universitaire de Ain Témouchent et à Madame *Bourokba Souad*, professeur à l'USTO d'Oran, qui ont acceptés d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

Enfin, je tiens à adresser mes sincères remerciements ainsi que ma gratitude la plus dévouée à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin pour réaliser ce travail de recherche

Résumé

Plusieurs méthodes statistiques ont été proposées dans la littérature pour la prévision du gonflement des sols. Ces méthodes sont connues pour être non universelles, nécessitant de nombreuses expériences, longues et coûteuses. Dans cette thèse de nouvelles approches sont développées pour prédire le degré et la pression de gonflement des sols et explorer les effets et les interactions de la teneur en argile et de l'indice de plasticité sur le potentiel et la pression de gonflement. Sur ce fondement, une base de données expérimentales a été collectée auprès des laboratoires de la région ouest d'Algérie, aux quels s'ajoute une lecture des principales publications sur les sols gonflants dans la même région. Différents types de régressions ont été appliqués à ces données et les résultats montrent que de nouvelles relations empiriques ont été trouvées entre la pression de gonflement et le potentiel de gonflement ; ces corrélations sont en bonnes concordances avec la littérature. Les régressions cubiques, quadratiques et multiples semblent être en bonne concordance et mieux adaptée que les modèles de régression linéaire simples dans le cas présenté. Par la suite, une analyse a été menée à l'aide d'un algorithme combiné orthogonal $L_9(3^2)$ de Taguchi et une analyse de réseaux de neurones artificiels. Les résultats indiquent que l'application de cet algorithme est très efficace et la précision des résultats est très acceptable et permet de prédire le potentiel et la pression de gonflement des sols. L'analyse de la variance (ANOVA) de l'approche intégrée proposée a indiqué que la signification de l'indice de plasticité est d'environ 91,66% et 95,77% respectivement, pour l'estimation du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement.

Mots clés : sol gonflant ; régression ; méthode de Taguchi ; ANN ; pression de gonflement, potentiel de gonflement, rapport S/N ; ANOVA.

Abstract

Several statistical methods have been proposed in the literature for predicting soil swelling. These methods are known to be non-universal, requiring many experiments, time consuming and expensive. In this thesis new approaches are developed to predict the degree and pressure of swelling soils and explore the effects and interactions of clay content and plasticity index on swelling potential and pressure. On this basis, an experimental database was collected from laboratories in the region to which is added a reading of the main publications on swelling soils in the region of Western Algeria. Different types of regressions were applied to these data and the results show that new empirical relationships were found between the swelling pressure and the swelling potential; these correlations are in good agreement with the literature. Cubic, quadratic and multiple regressions seem to be in good agreement and better suited than simple linear regression models in the case presented. Subsequently, an analysis was performed using a combined $L_9(3^2)$ orthogonal Taguchi algorithm and an analysis of artificial neural networks. The results indicate that the application of this algorithm is very efficient and the precision of the results is very acceptable and can predict the potential and the swelling pressure of soils. Analysis of variance (ANOVA) of the proposed integrated approach indicated that the significance of the plasticity index is approximately 91.66% and 95.77% respectively, for the estimation of the swelling potential and of inflation pressure.

Keywords : *Expansive soils; regression Taguchi design; ANN; swelling potential; swelling pressure; S/N ratio; ANOVA.*

ملخص:

تم اقتراح العديد من الطرق الإحصائية في الأدبيات للتنبؤ بانتفاخ التربة. من المعروف أن هذه الطرق غير عالمية وتتطلب العديد من التجارب وتستغرق وقتاً طويلاً وهي مكلفة. في هذه الأطروحة تم تطوير مناهج جديدة للتنبؤ بدرجة وضغط انتفاخ التربة واستكشاف تأثيرات وتفاعلات محتوى الطين ومؤشر اللدونة على إمكانات الانتفاخ والضغط. على هذا الأساس، تم جمع قاعدة بيانات تجريبية من المخابر في منطقة غرب الجزائر أضيفت إليها قراءة المنشورات العلمية عن التربة المنتفخة في نفس المنطقة. تم تطبيق أنواع مختلفة من الانحدار على هذه البيانات وأظهرت النتائج أنه تم العثور على علاقات تجريبية جديدة بين ضغط وإمكانية الانتفاخ ؛ هذه العلاقات في اتفاق جيد مع الأدبيات. يبدو أن الانحدار التكميبي والتربيعي والمتعدد في اتفاق جيد ومناسب بشكل أفضل من نماذج الانحدار الخطي البسيطة في الحالة المعروضة. بعد ذلك ، تم إجراء تحليل باستخدام خوارزمية تاجوشي المتعامدة (3^2) و L_9 وتحليل الشبكات العصبية الاصطناعية. تشير النتائج إلى أن تطبيق هذه الخوارزمية فعال للغاية وأن دقة النتائج مقبولة للغاية ويمكن أن تتنبأ بإمكانية وضغط انتفاخ التربة. أشار تحليل التباين ($ANOVA$) للنهج المتكامل المقترح إلى أن أهمية مؤشر اللدونة هي حوالي 91.66% و 95.77% على التوالي ، لتقدير إمكانية الانتفاخ وضغط الانتفاخ للتربة .

الكلمات المفتاحية: طين منتفخة، الانحدار، تصميم تاجوشي، الشبكات العصبية الاصطناعية، ضغط الانتفاخ، الانتفاخ المحتمل، نسبة S/N ؛ تحليل التباين.

Sommaire

Remerciements	ii
Résumé	iii
Notations	xii
Introduction générale	1
1 Problématique des sols gonflants	4
1.1 Définition et caractéristiques des sols gonflants	5
1.2 Techniques d'identification des minéraux argileux	7
1.3 Facteurs influants sur le gonflement des sols	9
1.4 Identification et classification des sols gonflants	9
1.4.1 Classification des sols gonflants	10
1.4.2 Estimation des paramètres régissant le gonflement des sols	12
1.4.2.1 Méthodes directes de mesure du gonflement	12
1.4.2.2 Méthodes indirectes de mesure du gonflement (corrélations mathématiques)	13
1.5 Les dégâts causés par le gonflement des sols	15
1.6 La cartographie des sols gonflants au monde	15
1.6.1 Les sols gonflants en Algérie	15
1.7 Solutions techniques	16
1.7.1 Suppression ou minimisation des mouvements du sol	16
1.7.2 Adaptation de la structure	16
1.8 Conclusion	17
2 Synthèse bibliographique sur les plans d'expériences	18
2.1 La méthode des plans d'expériences	19
2.1.1 Base historique des plans d'expériences	19
2.1.2 Contexte et méthodologie des plans d'expériences	20
2.1.3 Termes et concepts	21
2.1.4 Avantages des plans d'expérience	21
2.2 Différentes méthodes d'expérimentation	21
2.2.1 Les expérimentations ne faisant varier qu'un facteur à la fois (méthode OVAT)	22

2.2.2	Les expérimentations avec un plan factoriel complet	22
2.2.3	Les expérimentations avec un plan factoriel fractionnaire	23
2.3	Définition et méthodologie de la méthode Taguchi	23
2.3.1	Contexte et définition de la méthode Taguchi	23
2.3.2	Bref aperçu historique sur la méthode d'expérience de Taguchi	25
2.4	Méthodologie de la méthode Taguchi	25
2.5	La notion d'interaction	27
2.6	La notion d'orthogonalité	28
2.7	Le rapport Signal/Bruit	30
2.8	Avantages et limites des plans d'expériences de Taguchi	31
2.9	Application de la méthode Taguchi	33
2.10	La méthode de Taguchi et l'analyse de variance (ANOVA)	33
2.11	Conclusion	34
3	Position du problème et méthodologie de travail	36
3.1	Position du problème	37
3.2	Objective et méthodologie de travail	39
3.3	Base de données expérimentale	39
3.4	Analyse statistique descriptive des données utilisées	41
3.5	Classification des sols étudiés	41
3.5.1	Classification de Casagrande	41
3.5.2	Classification de Van der Merwe	41
3.5.3	Classification de Philipponnat	43
4	Corrélations pour l'évaluation du gonflement des sols	44
4.1	Méthodologie de travail	45
4.2	Résultats et interprétations	45
4.2.1	Régressions linéaires simples	46
4.2.2	Régressions linéaires multiples	48
4.2.3	Régressions quadratiques	49
4.2.4	Régressions cubiques	51
4.3	Comparaisons entre les types des régressions	54
4.4	Conclusion	54
5	Application des plans d'expérience	55
5.1	Méthodologie de travail	56
5.2	Méthode d'ANN pour compléter le plan d'expérience de Taguchi	58
5.2.1	Modélisation ANN	60
5.2.2	Résultats et interprétations	62
5.3	Analyse de Taguchi	67
5.3.1	Résultats et interprétations	69
5.3.1.1	Analyse de Taguchi L_9 pour l'estimation du potentiel de gonflement	69

5.3.1.2	Analyse de Taguchi L_9 pour l'estimation de la pression de gonflement	70
5.3.2	Conclusion	72
5.4	Validation des résultats d'analyse de Taguchi avec ANOVA	72
5.4.1	Analyse ANOVA pour le potentiel de gonflement	73
5.4.2	Analyse d'ANOVA pour la pression de gonflement	73
	Conclusion générale	75
	Bibliographie	77

Table des figures

1.1	(a) Tétraèdre de silice; (b) vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre [50, 60]; (c) schéma du feuillet de silice [60, 73].	6
1.2	(a) Octaèdre d'aluminium (ou de magnésium); (b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre [50, 60]; (c) schéma du feuillet d'octaèdre d'aluminium [60, 73].	7
1.3	Schéma de la structure kaolinite [60, 73].	7
1.4	Photomicrographie électronique de la kaolinite. La largeur d'image est $7.5\mu m$ [86, 138].	7
1.5	Schéma de la structure de la montmorillonite [60, 73].	8
1.6	Photomicrographie électronique de la montmorillonite. La largeur d'image est $7.5\mu m$ [86, 138].	8
1.7	Schéma de la structure de l'illite [60, 73].	8
1.8	Photomicrographie électronique d'illite. La largeur d'image est $7.5\mu m$ [86, 138].	8
1.9	Diagramme de plasticité de Casagrande [18].	10
1.10	Diagramme de classification de Van der Merwe [145].	12
2.1	plan d'expérience.	20
2.2	Représentation schématique de la méthodologie Taguchi [89].	26
2.3	Courbes de différent cas d'interactions [3].	27
2.4	Table triangulaire L_8 [3].	30
2.5	Graphes linéaires L_8 [3].	30
2.6	Illustration de comparaison de l'approche de Taguchi et l'approche classique [110].	32
3.1	Carte géologique du nord-ouest de l'Algérie [17].	38
3.2	Diagramme de plasticité de Casagrande pour les échantillons de sols étudiés.	42
3.3	Classification de Van der Merwe pour les sols étudiés.	42
3.4	Valeurs des coefficients de gonflement pour les sols étudiés.	43
4.1	Régressions linéaires simples de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c	46
4.2	Régressions linéaires simples de P_s , S_p et C_g en fonction de I_p	47
4.3	Régressions linéaires multiples de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c et I_p	49
4.4	Régressions quadratiques de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c	50
4.5	Régressions quadratiques de P_s , S_p et C_g en fonction de I_p	51
4.6	Régressions cubiques de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c	52
4.7	Régressions cubiques de P_s , S_p et C_g en fonction de I_p	53
5.1	Structure de la méthodologie proposée.	58

5.2	Structure d'un réseau de neurones simple.	59
5.3	Structure d'ANN proposée [33].	63
5.4	Résultats d'analyse ANN pour le potentiel de gonflement S_p	64
5.5	Résultats d'analyse ANN pour la pression de gonflement P_s	66
5.6	Effets de C_c et de I_p sur le potentiel de gonflement [33].	69
5.7	Rapport S/N pour le potentiel de gonflement [33].	70
5.8	Effets de C_c et de I_p sur la pression de gonflement [33].	71
5.9	Rapport S/N pour la pression de gonflement [33].	71

Liste des tableaux

1.1	Classification des argiles d'après leurs potentiels de gonflement, sous une charge de 6.9 kPa [60, 62, 144].	11
1.2	Classification des argiles d'après leur potentiel de gonflement [91, 118].	11
1.3	Risque de gonflement après Philipponnat [66].	12
1.4	Relations empiriques pour la prévision du gonflement.	14
2.1	Matrice d'expériences L_8	29
3.1	Base de données expérimentale [10, 15, 52, 53, 55, 56, 139, 140], LTPO 2015.	40
3.2	Analyse statistique descriptive des données utilisées.	41
5.1	Facteurs et niveaux [33].	56
5.2	Potentiel de gonflement selon le BRE « Building Research Establishment », (1980) [33].	56
5.3	Conception expérimentale utilisant un tableau orthogonal Taguchi L_9 [33].	57
5.4	L'ensemble de données d'apprentissage pour S_p [33].	61
5.5	L'ensemble de données d'apprentissage pour P_s [33].	62
5.6	Les valeurs statistiques des modèles ANN sélectionnés [33].	67
5.7	Conception orthogonale de Taguchi L_9 pour le potentiel de gonflement [33].	68
5.8	Conception orthogonale de Taguchi L_9 pour la pression de gonflement [33].	68
5.9	Analyse d'ANOVA pour le potentiel de gonflement [33].	73
5.10	Analyse d'ANOVA pour la pression de gonflement [33].	74

Notations

<i>Ac</i>	activité de Skempton (1)
<i>ANN</i>	Réseau neuronal artificiel (1)
<i>ANOVA</i>	Analyse de la variance (1)
<i>Cc</i>	teneur en argile (%)
<i>Cg</i>	coefficient de gonflement(1)
<i>Ci</i>	Indice de compression (1)
<i>Ip</i>	indice de plasticité (%)
<i>L₉</i>	Conception de tableaux orthogonaux Taguchi <i>L₉</i> (1)
<i>Ps</i>	Pression de gonflement (<i>kPa</i>)
<i>R²</i>	Coefficient de corrélation(%)
<i>Sp</i>	Potensiel de gonflement (%)
<i>VBS</i>	Valeur du bleu de méthylène (1)
<i>Wi</i>	Teneur en eau initiale (%)
<i>WL</i>	limite de liquidité (%)
<i>MSE</i>	Erreur quadratique moyenne
<i>S/N</i>	Rapport signal/bruit

Introduction générale

Le gonflement des sols est un phénomène très répandu dans le monde. Il pose de sérieux problèmes d'ingénierie. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées pour la prévision du comportement de ces types de sol ; ces approches basées sur des méthodes classiques nécessitent un grand nombre d'expériences généralement longues et coûteuses et donnant souvent des résultats valables seulement pour le sol de la région étudiée. Par conséquent, le besoin de nouvelles approches pour la prédiction de ces types de sol serait d'une très grande importance.

Les premières applications des statistiques et probabilités dans le domaine de la géotechnique datent des années soixante. Avec l'évolution et les performances des techniques de corrélations entre les propriétés physiques et mécaniques des sols ainsi que les nouvelles méthodes d'analyses statistiques, de nombreux chercheurs se sont penchés sur la possibilité d'utilisation de ces méthodes et leurs combinaisons pour les problèmes rencontrés par les ingénieurs géotechniciens.

La méthode de Taguchi est une approche factorielle fractionnaire qui fusionne des techniques statistiques et d'ingénierie pour une meilleure conception expérimentale. Facile à utiliser et à appliquer, elle permet d'améliorer la qualité des produits manufacturés et résoudre les problèmes d'optimisation lors d'une étude. Cette conception nécessite l'utilisation de tableaux afin d'estimer le nombre maximal d'effets principaux de manière orthogonale tout en n'utilisant qu'un nombre minimal d'essais. La conception de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plan d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires.

La méthodologie de Taguchi s'intéresse à un ensemble de facteurs, à la fois contrôlables et incontrôlables, sur des niveaux d'intérêt spécifique, elle traite simultanément la moyenne et la variabilité des valeurs des caractéristiques mesurées.

À ce jour, la méthode de Taguchi a été appliquée avec succès au domaine de génie civil et de l'ingénierie, mais jamais pour compléter et estimer des paramètres géotechniques.

L'objectif principal de cette thèse est de proposer et de valider un algorithme combiné de la méthode de Taguchi et la méthode ANN pour l'estimation du potentiel de gonflement des argiles à partir de paramètres simple à déterminer expérimentalement. En examinant les effets et les interactions avec la détermination des niveaux optimaux de facteurs sélectionnés sur ces deux paramètres.

Cette thèse est organisée en deux parties structurées en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le phénomène de gonflement des argiles. Il rappelle les définitions, les caractéristiques et les principales techniques d'identification des sols gonflants. À la fin du chapitre, une cartographie des sols gonflants dans le monde et les dégâts de ces types de sol en Algérie est présentée.

Le chapitre deux est une synthèse bibliographique sur les plans d'expériences en générale puis sur la méthode de Taguchi et son utilisation en géotechnique en particulier.

Le chapitre trois présente la position du problème étudié ainsi que la méthodologie adaptée pour le résoudre. Une lecture détaillé du data utilisé est présenté à la fin du chapitre trois.

Le quatrième chapitre présente une étude comparative sur le degré de gonflement des sols à l'aide de nouvelles formules de corrélations.

Le dernier chapitre est consacré à l'application d'un algorithme combiné de la méthode de Taguchi et la méthode ANN pour l'estimation du potentiel de gonflement des argiles. L'analyse des résultats est proposée en utilisant la technique ANOVA pour l'analyse de variance.

Enfin une conclusion générale ainsi que les perspectives de ce travail sont présentées.

Partie Bibliographique

Chapitre 1

Problématique des sols gonflants

L'objectif principal de ce chapitre est d'élaborer une synthèse bibliographique sur le phénomène de gonflement des sols. Au début, est présenté, un rappel sur la minéralogie et les caractéristiques des argiles afin de distinguer les compositions et les différentes familles d'argile et déterminer leur stabilité avec l'eau. Ensuite, les facteurs influants sur le gonflement, les techniques d'identification et de classification, ainsi que l'estimation des paramètres régissant le gonflement de ces sols seront présentés. A la fin du chapitre, une cartographie des sols gonflants dans le monde et les dégâts causés par ces sols sur les différents ouvrages en génie civil avec leurs solutions techniques seront discutés.

1.1 Définition et caractéristiques des sols gonflants

Jusqu'à la fin de 1930, le problème des sols gonflants a été reconnu par les géomécaniciens [20]. Ce phénomène a été étudié pour la première fois par "U.S. Bureau of Reclamation" qui en 1938 a reconnu le rôle des sols gonflants dans les dommages des constructions [20].

Aujourd'hui, de nombreuses recherches à travers le monde se sont intéressées au sujet du gonflement des sols [1, 20, 32, 94, 113, 128]. Les sols gonflants sont largement distribués dans le monde [20, 63, 90, 113, 117], particulièrement dans les régions avec des climats arides et semi-arides où l'évaporation excède la précipitation annuelle [100, 128, 141].

Les matières mères associées à un sol gonflant ont été classées en deux groupes [20, 32, 37] ; le premier groupe comprend les roches ignées (les roches magmatiques), telles que les basaltes dans lesquelles les minéraux de feldspath et de pyroxène peuvent être décomposés pour former de la montmorillonite et d'autres minéraux secondaires, le deuxième groupe comprend les roches sédimentaires qui contiennent de la montmorillonite comme l'un des constituants se décomposant physiquement pour former des sols gonflants. L'altération de ces roches est généralement sous l'action physique et chimique des eaux de surface, du gel, du vent, de la dessiccation, de la carbonatation, etc [86, 92, 101].

Murthy [92], définit le mot «argile» comme un matériau composé d'une masse de petites particules minérales, qui, en association avec certaines quantités d'eau, présente la propriété de plasticité (cohérente). Les minéraux argileux sont de très petits cristaux colloïdaux, dont le diamètre effectif est inférieur de deux micromètres ($0,002 \mu m$), selon la plupart des systèmes de classification des sols [20, 60], cette classification est purement basée sur la taille qui n'indique pas les propriétés des minéraux argileux [92], où la composition minéralogique est le principal facteur contrôlant leur taille, la forme et la propriété minérale [20, 86]. Ces minéraux sont composés des *alumino-silicates hydreux* ajoutés à d'autres ions métalliques, le magnésium ou le fer remplaçant totalement ou partiellement l'aluminium dans certains minéraux [60, 90, 92].

Beaucoup de chercheurs [20, 59, 60, 86, 90, 92] ont montré que tous les minerais d'argile sont formés d'un empilement de feuillets élémentaires constitués par l'association de deux feuilles de base, qui sont :

- a) **Le feuillet en tétraèdre** : est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène (ou hydroxyles, si nécessaire pour équilibrer la structure) placés aux sommets d'un tétraèdre renfermant un atome unique de silicium, de formule (SiO_4) , qui se combine pour former une structure en coquille avec tous les pointes orientées dans la même direction comme indiqué sur la Fig 1.1 [60, 92].
- b) **Le feuillet en octaèdre** : est une combinaison d'unités octaédriques composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle au sommet et d'un octaèdre renfermant un atome d'aluminium de formule $Al_2(OH_6)$ (dans ce cas, la feuille octaédrique est appelée feuille de gibbsite), ou un atome de magnésium de formule $Mg_3(OH_6)$ (dans ce cas, la feuille octaédrique est appelée

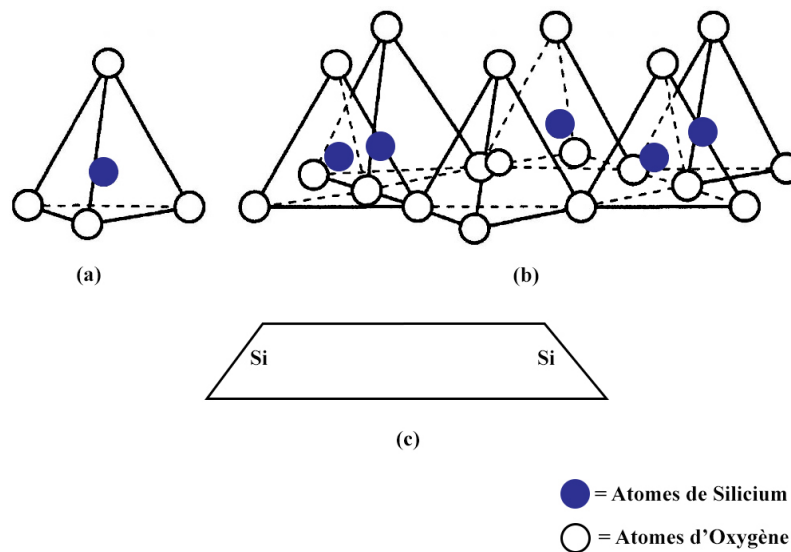


FIGURE 1.1 – (a) Tétrahédre de silice; (b) vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraédre [50, 60]; (c) schéma du feuillet de silice [60, 73].

une feuille de brucite), ou de fer, ou d'autre élément au centre comme indiqué sur la Fig 1.2 [60, 92].

La composition chimique et l'arrangement des deux feuilles de silice et d'alumine déterminent le type de minéraux argileux qui sont trouvés dans les sols [20, 37, 60, 86, 92], les plus connus sont :

- 1) **Kaolinite** : C'est un minéral argileux composé d'une seule feuille tétraédrique et d'une seule feuille d'alumine octaédrique, comme indiqué sur la Fig 1.3, dont l'ensemble mesure 7Å d'épaisseur. Les liaisons ioniques entre ces deux feuilles sont très fortes et elles superposent les uns sur les autres, grâce à la force de liaison de l'hydrogène. Ce groupe est généralement peu gonflant [37, 92].
- 2) **Montmorillonite (ou smectite)** : C'est un minéral argileux composé d'une seule feuille octaédrique serrée entre deux feuilles tétraédriques, comme montré dans la Fig 1.5, dont l'épaisseur est de 9.6Å . Les liaisons entre ces feuilles sont très faibles, empilées sans être en contact et séparées avec un vide par lesquels l'eau et les ions échangeables ont accès, par conséquent, ce type d'argile présente des caractéristiques de gonflement et de retrait élevées [20, 37, 60, 86, 90, 92].
- 3) **Illite** : sa structure est tout à fait semblable à celle de la montmorillonite, sauf que les espaces entre les couches sont reliés par des ions de potassium (K^+), comme indiqué dans la Fig 1.7, qui équilibre et renforce la liaison entre les feuilles, et le rend ainsi moins sensible au phénomène de gonflement [60, 90, 92].

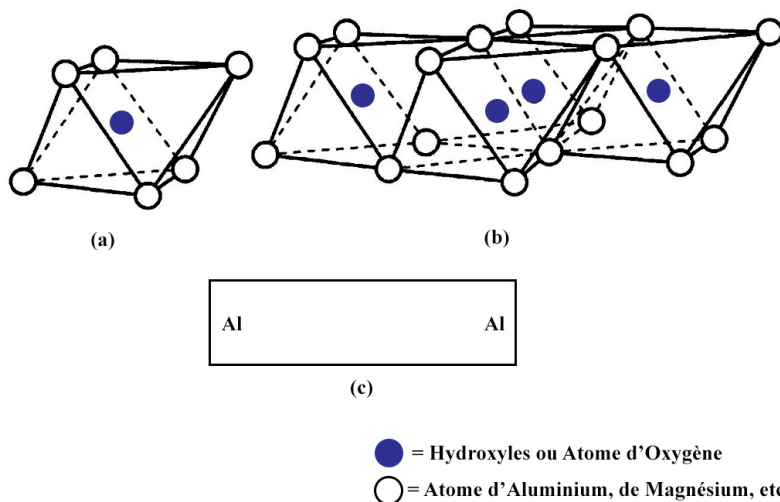


FIGURE 1.2 – (a) Octaèdre d'aluminium (ou de magnésium); (b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre [50, 60]; (c) schéma du feuillet d'octaèdre d'aluminium [60, 73].

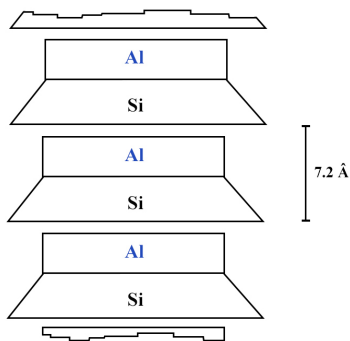


FIGURE 1.3 – Schéma de la structure kaolinite [60, 73].

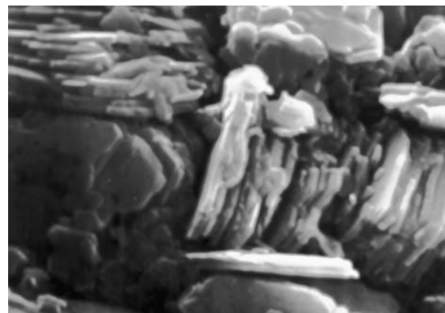


FIGURE 1.4 – Photomicrographie électronique de la kaolinite. La largeur d'image est $7.5\mu m$ [86, 138].

L'analyse de la composition minéralogique des argiles, ci-dessus, montre l'influence de l'ensemble type de liaison entre les feuilles ainsi que la force de ces liaisons dans le mécanisme du gonflement; dans lesquels, si les liaisons inter-feuillets sont très faibles, donc l'eau est retirée dans les espaces intermoléculaires, et cela provoque le gonflement inter-particulaire ou le gonflement osmotique. En outre, d'autres mécanismes du gonflement, reliés aux changements chimiques dans le colloïde de la particule de sol d'argile existant, c'est le gonflement inter-foliaire ou le gonflement cristallin [90].

1.2 Techniques d'identification des minéraux argileux

Parmi les techniques d'analyse les plus importantes utilisées pour déterminer les compositions minéralogiques des minéraux argileux, on peut citer :

- 1) **Diffraction au rayon X** : Il est connu que les rayons X diffractent les matériaux qui

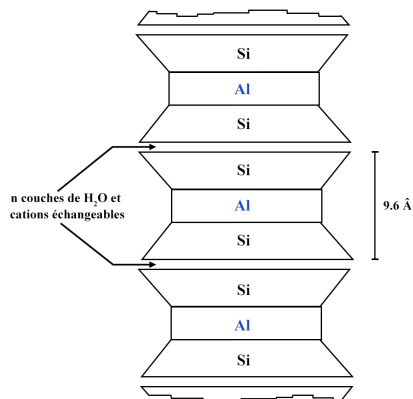


FIGURE 1.5 – Schéma de la structure de la montmorillonite [60, 73].

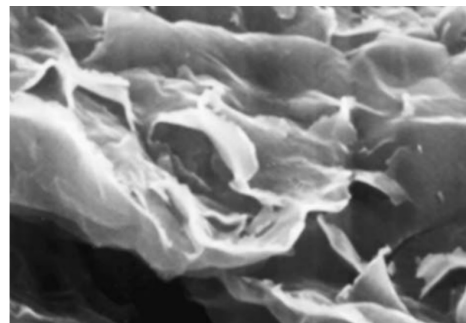


FIGURE 1.6 – Photomicrographie électronique de la montmorillonite. La largeur d'image est $7.5\mu m$ [86, 138].

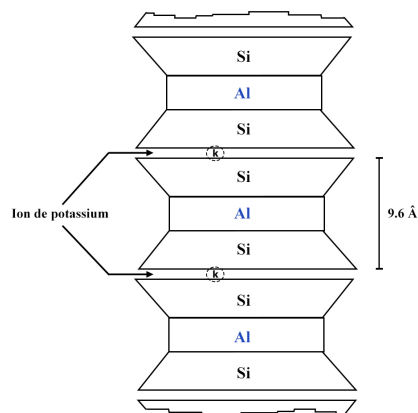


FIGURE 1.7 – Schéma de la structure de l'illite [60, 73].

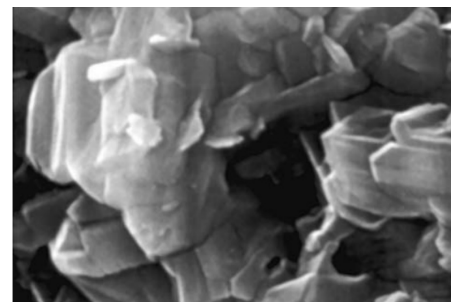


FIGURE 1.8 – Photomicrographie électronique de l'illite. La largeur d'image est $7.5\mu m$ [86, 138].

présentent une structure cristalline [51, 60], et comme les minerais d'argile sont de ce type, la diffraction des rayons X est la méthode la plus utilisée. Elle consiste essentiellement à comparer les spectres de diffraction des minéraux inconnus avec ceux des matériaux connus [20, 37, 60, 86, 91].

2) **Analyse thermique différentielle (DTA)**, est une technique qui consiste à chauffer simultanément un échantillon de sol inconnu et des substances inertes de référence, dans un four électrique jusqu'à une température élevée. Dans le cas des minéraux argileux, cette technique montre des réactions endothermiques caractéristiques dues à la déshydratation et à la perte de la structure cristalline et des réactions exothermiques dues à la formation de nouvelles phases à des températures élevées. La méthode est donc utile pour les recherches argilo-minérales en tant que moyen d'étude des réactions à haute température, en plus de son intérêt dans l'étude des phénomènes d'hydratation [51, 60].

3) **Adsorption de colorant** : Cette méthode est simple, rapide, et facile pour être employée par rapport aux méthodes mentionnées ci-dessus, elle permet d'identifier les argiles par des

colorants et d'autres réactifs qui montrent des couleurs caractéristiques une fois absorbées. Cette méthode est efficace pour des rapports de la montmorillonite entre 5 à 10 % de l'argile [20, 37].

- 4) **Analyse chimique** : cette méthode peut être un complément précieux à d'autres méthodes telles que l'analyse par rayons X pour l'identification des argiles, elle est utilisée pour évaluer quantitativement les quantités de chaque élément d'argile [20, 37].
- 5) **Résolution au microscope électronique** : Cette technique permet d'observer directement les particules d'argile, elle détermine avec précision la forme des particules de divers minéraux argileux et met en lumière la gamme de tailles des particules des composants de l'argile et le degré de réduction de la taille des particules lorsque l'argile réagit avec l'eau [51]. Ce procédé présente cependant des difficultés sur le plan de l'interprétation et ne permet pas d'obtenir des données quantitatives [60].

1.3 Facteurs influants sur le gonflement des sols

Beaucoup de chercheurs ont montré que le mécanisme de gonflement des sols est complexe et est influencé par de nombreux facteurs [36, 87, 113, 118, 127]. Ces facteurs peuvent être classés en trois groupes principaux : (a) facteurs géologiques principaux incluant la minéralogie d'argile, le type et l'âge de la roche par rapport au type et à la quantité de minerais d'argile, structure et tissu du sol, types de cations adsorbés etc. ; (b) les facteurs géotechniques comprennent la teneur en humidité, les limites d'Atterberge et la densité sèche, ces deux facteurs généralement affectent le potentiel de gonflement ; (c) Les facteurs environnementaux principaux incluent la variation de la teneur en eau, la pression d'emprisonnement, la chimie de l'eau etc., ces facteurs affectent la pression de gonflement [21, 113, 117]. En outre, le type de sol est le facteur le plus important affectant le gonflement, car il contrôle le comportement physico-chimique et la force des réactions inter-particulaires et intra-particulaires du sol.

1.4 Identification et classification des sols gonflants

L'historique des dommages et des pertes économiques énormes, qui causé par le gonflement des sols, indiquent l'évaluation erronée de ce phénomène. Par conséquent, l'analyse de risque de gonflement est essentielle pour caractériser qualitativement le comportement de sols gonflants et de prévenir l'ingénieur dans l'étape de planification au sujet des problèmes liés à ces sols. En outre, les sols gonflants dans différents secteurs ont des caractéristiques physiques spécifiques et dispositifs de technologie dus à la différence des composants et de l'environnement. À cet effet, l'évaluation de risque de gonflement des sols est un problème très complexe à cause des facteurs influencés. Ces facteurs sont importants à prendre en compte dans la classification de la capacité de gonflement en fonction du degré de risque [151, 152].

Certains chercheurs ont indiqué que le potentiel de gonflements et la pression de gonflements sont deux paramètres principaux pour évaluer les caractéristiques des sols gonflants [20, 61, 118, 129, 156]. Le potentiel de gonflement est défini comme le changement de volume vertical à l'équilibre obtenu à l'aide d'un test oedométrique, exprimé en pourcentage de la hauteur d'origine. La pression de gonflement est également définie comme la pression nécessaire pour recompresser l'échantillon entièrement gonflé et revenir à son volume initial [21, 118]. En outre, Philipponnat a montré que le coefficient de gonflement est le paramètre le plus significatif permettant d'identifier ces type de sols [66, 100].

1.4.1 Classification des sols gonflants

De très nombreux auteurs [18, 25, 44, 61, 82, 118, 145, 148, 153] ont développé différentes méthodes pour classer les sols gonflants basés sur le pourcentage en argile, la limite de retrait, la limite de liquidité et l'indice de plasticité, ces derniers semblaient fournir le système de classification le plus cohérent. Par suite, les sols sont classés en fonction des degrés de gonflement faibles, moyens, élevés et très élevé [76, 91]. Une disparité est notée dans les classifications des sols gonflants lorsque ces indices sont utilisés, et ceci est dû non seulement aux conditions d'échantillonnage variant (échantillons remaniés ou non remaniés) mais aussi à une large gamme de valeurs [69, 94].

L'abaque de Casagrande [18], la plus utilisée pour classer les sols fins, est basé sur le comportement plastique de ces types des sols par un diagramme en fonction de l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Fig.1.9). Cette classification traduit l'importance des types de minéral argileux car, pour une même proportion d'argile, l'activité de gonflement pourra aux différente s'il s'agit d'une Kaolinite ou d'une Montmorillonite [60, 90]

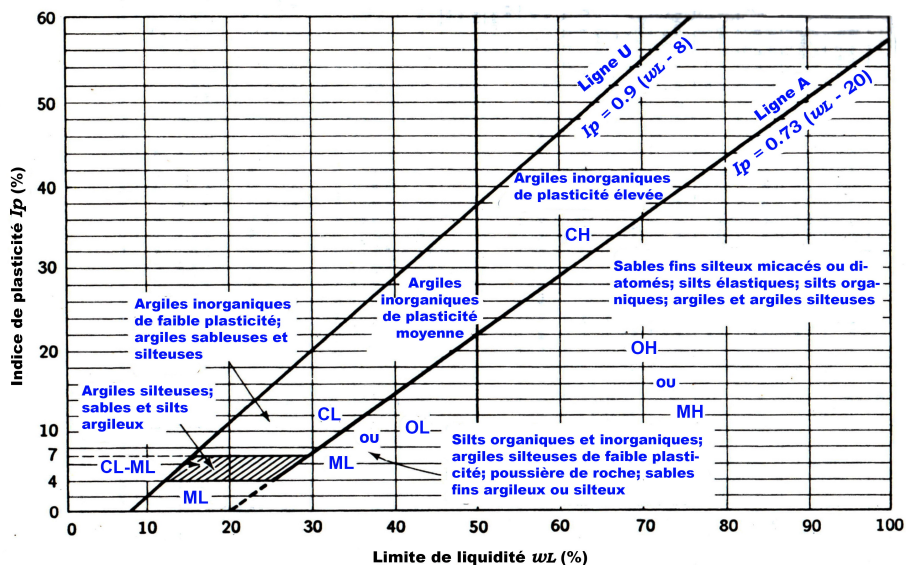


FIGURE 1.9 – Diagramme de plasticité de Casagrande [18].

Les méthodes de classification de Holtz [62] et d’USBR [144], comme illustré dans le [tableau 1.1](#), sont basées sur des investigations expérimentales sur les sols non remaniés séchés à l’air. Dans cette classification, la teneur en particules colloïdales (fraction plus petite que $1\mu m$), l’indice de plasticité, et la limite de retrait peuvent être employée pour déterminer les caractéristiques de gonflement des argiles expansibles en général [37, 60, 133].

TABLE 1.1 – Classification des argiles d’après leurs potentiels de gonflement, sous une charge de $6.9 kPa$ [60, 62, 144].

Teneur en particules Colloïdales ($<1\mu m$)	Indice de Plasticité I_p (%)	Limite de Retrait W_i (%)	Potentiel de gonflement (%)	Degré de gonflement
> 28	> 35	< 11	> 30	très élevé
20–31	25–41	7–12	20–30	élevé
13–23	15–28	10–16	10–30	moyen
< 15	< 18	> 15	< 10	faible

Seed et al, [118] ont indiqué que l’indice de plasticité est le seul paramètre qui pouvait être utilisé pour estimer les caractéristiques de gonflement des sols en général, cette classification était basée sur des tests des échantillons remaniés, le [tableau 1.2](#) donne les catégories de gonflement proposées par ces auteurs [69, 91, 133].

TABLE 1.2 – Classification des argiles d’après leur potentiel de gonflement [91, 118].

Potentiel de gonflement	Degré de gonflement
> 25	Très élevé
5–25	élevé
1.5–5	moyen
0–1.5	faible

Une autre méthode de classification développée par Van der Merwe [145] est basée sur la valeur de l’indice de plasticité ainsi que le pourcentage de la fraction d’argile, comme indiquée à la [Fig 1.10](#) [37, 142].

Le [tableau 1.3](#) représente la classification de Philipponnat, elle est basée sur le coefficient de gonflement. Cette classification indique que le risque de gonflement d’un sol est très grand quand la valeur de C_g varie entre 0.05 et 0.04 [66, 100].

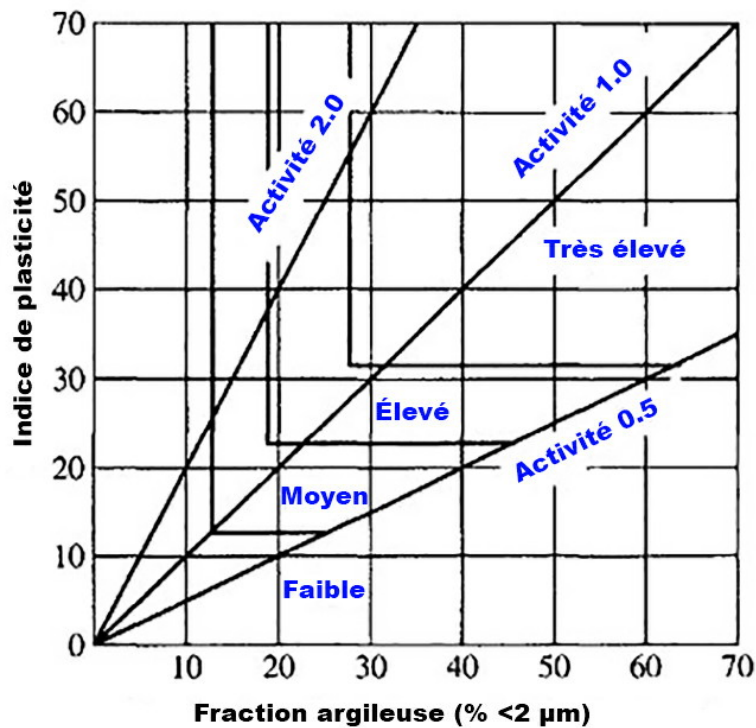


FIGURE 1.10 – Diagramme de classification de Van der Merwe [145].

TABLE 1.3 – Risque de gonflement après Philipponnat [66].

Degré de coefficient de gonflement (C_g)	Potentiel de Risque de gonflement
> 0.05	certain
$0.05-0.04$	Très élevé
$0.03-0.04$	élevé
$0.02-0.03$	possible
< 0.02	Peu probable

1.4.2 Estimation des paramètres régissant le gonflement des sols

Deux méthodes principales pour l'identification des sols gonflants, sont les méthodes directes et les méthodes indirectes :

1.4.2.1 Méthodes directes de mesure du gonflement

L'estimation de gonflement des sols par les méthodes directes nécessite des mesures réelles dans le laboratoire à l'aide d'œdomètre. Les chercheurs [43, 61, 67, 75] sont les premiers qui utilisent ces types d'essais pour prédire le gonflement des sols [125]. Trois types de test classiques d'œdométrie pour l'estimation de gonflement des sols sont : gonflement libre, gonflement sous une

charge constante et gonflement à volume constant [5]. La méthode la plus courante est la méthode de gonflement libre dans un œdomètre standard selon la norme ASTM D 4546-90 [6, 21, 107].

- 1)- **Essais œdométrique de gonflement libre** : Cet essai consiste à mettre un volume connu de sol sec en contact avec l'eau, au fond d'un cylindre gradué (œdomètre), et il laissait gonfler librement sous une charge appliquée jusqu'à ce que son rapport de vide initial soit atteint. Le pourcentage du gonflement libre (potentiel de gonflement) est exprimé par la différence entre le volume final et le volume initial. Alors que la pression de gonflement est définie comme l'effort nécessaire qui ramène l'échantillon à son volume original [20, 21, 43].
- 2)- **Essais de gonflement sous charge constante** : Cet essai consiste à mettre un volume connu de sol sec sous une charge supplémentaire appliquée prédéterminée pour l'équilibre. Ensuite, il immerge dans l'eau et laisser gonfler librement. Après, il charge jusqu'à ce dont il arrive sa hauteur initiale. La pression de gonflement se présente par l'effort correspondant au changement de volume nul [43].
- 3)- **Essais de gonflement à volume constant** : Cet essai est effectué sur un échantillon de sol sec placé dans l'anneau œdométrique puis de l'eau est ajoutée. Pour éviter les déformations verticales provoquées, on applique des petits incréments de pression verticale différente jusqu'à ce qu'aucun gonflement ne soit enregistré. La pression de gonflement "non corrigée" est présente l'effort nécessaire pour qu'aucune autre tendance pour le gonflement [43].

Les essais œdométriques traditionnels prennent en compte tous les facteurs essentiels qui affectent énormément le gonflement d'un tel type de sols. De plus, ces essais besoin d'effort, de temps et de coût très élevé pour exécuter ses étapes [38]. D'autre part, les ingénieurs géotechniques ont besoin des méthodes fiables pour prédire le gonflement des sols en très peu de temps, notamment quand la durée du projet est limitée. À cet effet, beaucoup de chercheurs ont proposé des techniques statistiques pour la prévision de ce type des sols, ceci sera expliqué dans la partie suivante.

1.4.2.2 Méthodes indirectes de mesure du gonflement (corrélations mathématiques)

Plusieurs corrélations ont été appliquées pour la prévision du gonflement des sols. L'utilisation de cette technique par les chercheurs était basée sur la corrélation du potentiel de gonflement et la pression de gonflement avec certaines de propriétés physiques telles que la limite de liquidités, l'index de plasticité, la teneur en argile,...etc., qui sont simples et faciles à déterminer par les géotechniciens. Par exemple, certains chercheurs ont montrés une relation linéaire entre la pression de gonflement, et le potentiel de gonflement, et l'indice de plasticité [16, 72, 91, 102], et d'autres chercheurs ont également proposés une relation entre le coefficient de gonflement et la valeur du bleu de méthylène (VBS) [66] et entre le coefficient de gonflement et l'indice de compression [158]. Le [tableau 1.4](#) récapitule la liste des relations empiriques les plus connues pour la prévision du gonflement des argiles.

TABLE 1.4 – Relations empiriques pour la prévision du gonflement.

Références	Relations empiriques
Berrah et al [16]	
Sabtan [113]	$P_s = 8.82 I_p - 123$ (1.1)
Popescu [102]	$P_s = 135 + 2 (C_c + I_p - W_i)$ (1.2)
Didier et al [30]	$P_s = 0.5735 I_p - 10.9196$ (1.3)
Nayak and Christensen [93]	$\log P_s(kg/cm^2) = 0.0294 C_c - 1.923$ (1.4)
Azam et al [8]	$P_s = (3.5817 \cdot 10^{-2})(I_p^{1.12})(C_c^2/W_i^2) + 3.7912$ (1.5)
Muntohar [91]	$S_p = 0.16 I_p^{1.188}$ (1.6)
Muntohar [91]	$S_p = 1.035 I_p^{0.816}$ (1.7)
Muntohar [91]	$S_p = 2.231 - 0.453 I_p$ (1.8)
Muntohar [91]	$S_p = 2.919 C_c^{0.535}$ (1.9)
Muntohar [91]	$S_p = 7.518 - 0.323 C_c$ (1.10)
Sabtan [113]	$S_p = 10.106 e^{0.056I_p}$ (1.11)
Sabtan [113]	$S_p = 0.11 C_c - 0.17$ (1.12)
Sabtan [113]	$S_p = 2.2 + 0.1 I_p$ (1.13)
Basma [12]	$S_p = 1.0 + 0.06 (C + I_p - W_i)$ (1.14)
Schneider and Poor [116]	$S_p = 0.00064 I_p^{1.37} C_c^{1.37}$ (1.15)
Nayak and Christensen [93]	$S_p = (0.9I_p/W_i) - 1.19$ (1.16)
Chen [20]	$S_p = (2.29 \cdot 10^{-2})(I_p^{1.45})(C_c/W_i) + 6.38$ (1.17)
Komornik and David [72]	$S_p = 0.2558 e^{0.0838I_p}$ (1.18)
Seed et al [118]	$S_p = 0.9 + 2.1 I_p$ (1.19)
Seed et al [118]	$S_p = 0.00216 I_p^{2.44}$ (1.20)
Jacquard [66]	$S_p = 3.6 \cdot 10^{-5} A_c^{2.44} C_c^{3.44}$ (1.21)
Yongli and Aissa [158]	$C_g = 0.008 VBS + 0.01$ (1.22)
	$C_g = 0.2689 C_i + 0.0021$ (1.23)

1.5 Les dégâts causés par le gonflement des sols

Le gonflement des sols pose des problèmes sérieux pour beaucoup d'ouvrages géotechniques et aux structures de génie civil en général, dans lesquelles ces dommages résultent des pertes financières significatives, annuellement. Jones et al [68] ont indiqué que les dommages causés par le gonflement des sols sont plus de deux fois supérieurs aux dommages combinés résultant des catastrophes naturelles telles que les inondations, les ouragans, les tremblements de terre et les tornades. Des recherches ont montré que le coût annuel des dommages est estimé à £150 millions au Royaume-Uni, à \$1000 millions aux États-Unis et à plusieurs milliards de livres sterling dans le monde entier [49, 99].

Des bases construites sur ces types de sol sont exposées aux pressions élevées dues au gonflement de ces sols. Ces pressions entraînent des dommages sous forme de fractures et de fissures dans les fondations des bâtiments ou dans les éléments du plancher [142]. Le gonflement du sol endommage beaucoup plus les structures légèrement chargées, tel que les routes, les pistes d'aéroport, les canalisations enterrées, les maisons, les bâtiments, etc [9, 20, 68, 125, 142]. En conséquence, une compréhension claire du comportement de ce type des sols est nécessaire pour une conception efficace des structures et des infrastructures [41].

1.6 La cartographie des sols gonflants au monde

Les sols gonflants sont trouvés dans beaucoup d'endroits dans le monde [20, 32]. Ils couvrent une aire d'environ 257 millions d'hectares sur la surface de la terre [34, 128]. Les pays dans lesquels les sols gonflants ont été signalés sont les suivants : Afrique du Sud, Arabie Saoudite, Argentine, Australie, États-Unis, Ethiopie, Canada, Chine, Ghana, Iran, Inde, l'Algérie, la Jordanie, la Turquie, le Kenya, le Maroc, le Mexique, l'Espagne, le Soudan, l'Éthiopie, le Myanmar, l'Indonésie, et le Venezuela [20, 31, 32, 133].

En Inde, l'aire couverte par ces sols est presque de 20 % de la surface totale [88, 128]. Plus de 40 % des bâtiments sont endommagés par le gonflement des sols en Jordanie [21]. En outre, la Chine est l'un des pays avec une grande distribution de ce type de sol, occupant 600.000 km² de surface, qui ont causé une perte financière qui avait excédée 1 milliard de dollars annuellement [21].

1.6.1 Les sols gonflants en Algérie

Plusieurs études ont été faites sur le problème du gonflement des sols en Algérie, ces études ont confirmé l'extension naturelle de ce type de sol dans plusieurs régions, ainsi que des dommages causés aux bâtiments, les réseaux routiers et réseaux divers, construction hydraulique... etc. Parmi les régions où il y a eu des problèmes de gonflement des sols, où des études ont été effectuées, nous mentionnons les suivantes :

- Les sols gonflants de la région d'In-Aménas [29, 56] ;
- Les sols gonflants de la région d'Oran [55, 56] ;

- Les sols gonflants de la région de Tlemcen [15, 31, 52, 140];
- Les sols gonflants de la région de M'sila [70, 80];
- Les sols gonflants de la région de Médéa [84, 158];
- Les sols gonflants de la région de Laghouat [52];
- Les sols gonflants de la région de de Tebessa [16].

1.7 Solutions techniques

Deux techniques principales sont indiquées pour construire sur les sols gonflants :

1.7.1 Suppression ou minimisation des mouvements du sol

Selon Mouroux et *al* [90], cette technique est basée sur la limitation des variations des teneurs en eau, ou sur la modification de la sensibilité du sol au gonflement par des actions physico-chimiques, ou en déblayant ces sols gonflants sur la hauteur où ils sont sujets à des variations hydriques trop importantes.

Deux catégories principales de stabilisateurs sont : des stabilisateurs traditionnels comme la chaux, le ciment, la zéolite, le gypse, les déchets industriels et les cendres volantes. [22, 65, 141, 143, 155]. Les stabilisateurs non-traditionnels sont des produits chimiques plus efficaces. Elle sont généralement disponible comme liquides concentrés à dilués avec de l'eau sur l'emplacement du projet et pulvérisés sur le sol à traiter avant tassement ; ce qui indique que cette technique apporter des coûts minimaux de transport, et considéré comme un choix pratiquement fiable pour traiter les sols [112, 141].

En plus des techniques mentionnées ci-dessus, les géo-synthétiques utilisées comme renforcement de ce type de sols est très efficaces pour contrôler le gonflement et le retrait des sols [99, 147, 149, 150].

1.7.2 Adaptation de la structure

Cette technique est utilisée beaucoup plus aux structures du bâtiment, elle consiste à mettre la structure plus résistante et s'adapte aux déformations et mouvements du sol et cela, par l'emploi des joints et des articulations. En outre, la technique d'adaptation est coûteuse et pas généralement fiable [90].

Enfin, avant de choisir le type d'une solution technique, il faut d'abord définir le seuil de dommage et le surcoût de construction acceptable par le maître d'ouvrage et le constructeur [90].

1.8 Conclusion

Le gonflement des sols est très répandu dans plusieurs régions du monde. Afin d'éviter les dégâts provoqués par ces types de sols, il faut maîtriser ce phénomène qui exige la connaissance de plusieurs paramètres géotechniques qui caractérisent le gonflement. En outre, la détermination de ces paramètres est généralement chère et demande un temps très long. Dans ce contexte, des nouvelles méthodes simples et fiables doivent être développées.

Chapitre 2

Synthèse bibliographique sur les plans d'expériences

Le chapitre suivant examine la méthode des plans d'expérience. Cette dernière est devenue extrêmement importante pour développer de nouveaux produits et processus de manière rentable et en toute confiance.

Ce chapitre est structuré en deux parties. La première partie s'intéresse à la mise en évidence des concepts généraux de la méthode des plans d'expérience, pour que son application dans les chapitres suivants soit claire et compréhensible. Dans la deuxième partie, une explication est faite sur la technique des plans d'expériences de Taguchi, qui sera appliqué pour la présente étude.

2.1 La méthode des plans d'expériences

L'observation et l'expérimentation ont fait partie intégrante et importante du métier des ingénieurs et les techniciens d'études et de fabrication. En outre, les produits et les processus deviennent extrêmement compliqués avec les progrès des sciences technologiques modernes, ce qui a induit à un accroissement rapide des coûts d'expérimentation. D'autre part, l'utilisation de la méthode traditionnelle d'optimisation pour l'étude expérimentale nécessite un certain nombre de combinaisons d'expériences qui demandent beaucoup de temps, de coûts et de main-d'œuvre [110]; pour cela, plusieurs chercheurs ont développé la méthode des plans d'expérience.

Les plans d'expériences sont des outils statistiques puissants et les plus utiles pour la conception et les tests de produits [54]. Les plans d'expériences sont une série d'essais effectués de manière systématique et organisée à l'avance, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, pour améliorer la compréhension d'un processus existant ou pour explorer un nouveau produit ou processus. Ces plans permettent de manipuler plusieurs facteurs d'entrée en déterminant leurs effets sur une réponse de sortie souhaitée, donc ils peuvent aussi identifier les interactions importantes qui peuvent être manquées lors de l'expérimentation avec un facteur à la fois [3, 124]. Par conséquent, les plans d'expériences assurent que tous les facteurs et leurs interactions font l'objet d'une enquête méthodique et ses résultats d'analyse sont beaucoup plus fiables et complets que les résultats d'expériences facteur par facteur qui ignorent les interactions et peuvent donc conduire à des conclusions fausses.

2.1.1 Base historique des plans d'expériences

Les plans d'expériences ont été développés au début du siècle (les années 1920) par un Français, Jacques Hadamard et au domaine de recherche agronomique par un Anglais Ronald A. Fisher; dans lequel l'expérience a été difficile et ça prend du temps très longue. En outre, la détermination des principaux effets des facteurs en présence d'énormes variations naturelles été le but principal dans la conception des plans à cette époque et les plans factoriels et les carrés latins étaient les matrices plus utilisées [3, 19, 42].

Après la Seconde Guerre mondiale, le chercheur Box a transféré la méthode de conception des plans d'expérience industriels aux États-Unis, et développé dans les années 1950-1960 [19, 26, 131]. Ces plans sont basés généralement sur la détermination des principaux effets et les interactions à deux facteurs avec un nombre minimal d'essais; pour cela, plusieurs modèles factoriels et fractionnaires ont été développés et largement utilisés en tant qu'outils simples et efficaces pouvant être utilisés par des non-statisticiens [19].

À mesure que le progrès technologique et statistique, la conception des plans d'expérience ont été devenue plus compliquée, mais avec l'utilisation des outils d'informatique plus développés, cette conception devenue plus facile. Dans lesquels, les déterminations de la courbure, les effets principaux et les interactions sont immédiatement couramment conçus par un logiciel standard, comme Minitab Design-Expert, etc., [19, 85, 130].

2.1.2 Contexte et méthodologie des plans d'expériences

La méthode des plans d'expérience détermine la relation entre les causes affectant un processus et les résultats du processus en établissant une relation de cause à effet entre plusieurs variables indépendantes (les facteurs) et une variable dépendante d'intérêt (la réponse) ; de sorte que le résultat d'un processus puisse être prédit dans des conditions préalables données. En outre, le résultat est décrit comme un modèle empirique purement descriptif basé sur les variables expérimentales dans un domaine expérimental limité (Eq 2.1) . Ce modèle décrira les résultats d'un processus (la réponse y) en fonction des facteurs (x_i) qui comporte : des termes linéaires ; des termes d'interactions faisant intervenir deux variables ou plus et des termes quadratiques ou cubiques [11, 77] :

$$y = a_0 + \sum_1^i a_i x_i + \sum_1^i a_{ij} x_i x_j + \sum_1^i a_{ijk} x_i x_j x_k \dots + \sum_1^i a_{ii} x_i^2 + \sum_1^i a_{iii} x_i^3 \quad (2.1)$$

Avec : y représente la réponse et x_i représente les facteurs (voire Fig 2.1)

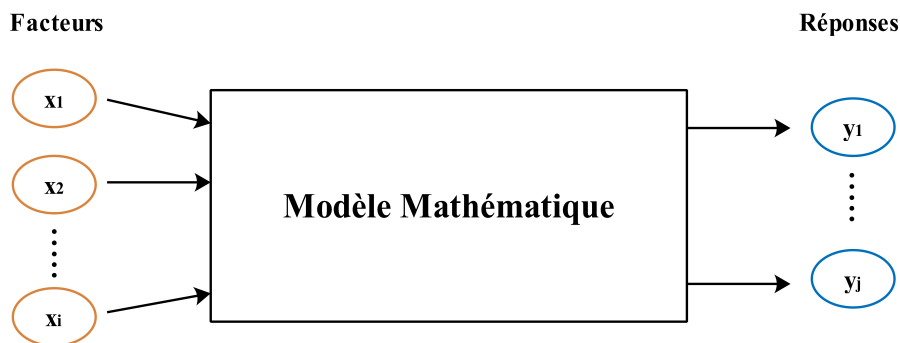


FIGURE 2.1 – plan d'expérience.

Le but principal de la conception et l'analyse des expériences est la détermination et la compréhension des effets de différentes variables sur une autre variable en utilisation du minimum des tests et la détermination des résultats avec une bonne précision. Pour atteindre ce but, il nécessite de réaliser une bonne conception d'un plan d'expérience en respectant les étapes suivantes [11, 159] :

- définir le problème et identifier l'objectif à atteindre en recueillir un maximum d'informations sur le phénomène étudié ;
- l'identification des facteurs indépendants ou influents à étudier ;
- l'identification des différents niveaux des facteurs et la prise en compte les facteurs de bruit observables qui peuvent influencer les expériences en tant que source d'erreur de variation.
- la sélection des réponses qui seront observées ;
- réaliser des expériences et collecter des données ;
- analyser les données ;
- interpréter les résultats ;
- vérifier les résultats prévus.

2.1.3 Termes et concepts

Dans ce qui suit, certains des termes et concepts importants dans la conception des expériences seront définis ;

- **Expérience** : série de tests effectués de manière systématique pour essayer de comprendre un problème existant, ou pour comparer deux ou plusieurs choses, ou pour explorer un nouveau produit ou processus, ou pour confirmer des résultats théoriques existants ;
- **Domaine expérimental** : La zone (espace) expérimentale sélectionnée pour les tests, et qui définit par la variation des variables expérimentales ;
- **Facteurs** : variables expérimentales indépendantes contrôlées. Chaque variable a une valeur donnée pour la réalisation d'un essai s'appelle niveau ; cette valeur est définie par l'expérimentateur. En outre, le facteur est limité ses variations entre deux bornes : la borne inférieure est le niveau bas et la borne supérieure est le niveau haut ;
- **Réponses** : la valeur mesurée ou observée des résultats d'expériences, et on peut souvent avoir plus d'une réponse ;
- **Résiduelle** : la différence entre le résultat calculé et le résultat expérimental.

2.1.4 Avantages des plans d'expérience

Les plans d'expérience sont une méthodologie qui caractérise par nombreux avantages, notamment :

- limitations du nombre d'expériences à effectuer aussi que la maîtrise de certaines propriétés statistiques aux modèles établis lors de répondre à une demande précise, donc un moindre coût économique [11] ;
- la possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs à la fois de manière programmée et raisonnée avec la détection des interactions entre eux ;
- la détermination des optimaux ;
- l'optimisation et la modélisation des résultats ;
- une précision optimum des résultats.

2.2 Différentes méthodes d'expérimentation

Le choix de méthode d'expérimentation doit assurer une interprétation facile des résultats, avec le minimum d'essais et gardant la meilleure précision possible [48]. Trois méthodes d'expérimentation sont [3] :

2.2.1 Les expérimentations ne faisant varier qu'un facteur à la fois (méthode OVAT)

La méthode d'expérimentation OVAT (*one variable at time*) est très souvent conduite sans méthodologie, c'est-à-dire sans plans d'expérimentation clairement préétablis. Cette méthode consiste à modifier un seul facteur à la fois, tandis que les autres facteurs restent fixes, en effet, chaque niveau de chacun des facteurs n'est essayé que face à une seule configuration des niveaux des autres facteurs. Toutefois, la méthode des plans d'expérience qui fait varier plusieurs facteurs simultanément sont plus efficaces que la méthode d'OVAT lorsqu'on étudie deux facteurs ou plus, pour les raisons suivantes [3, 24] :

- la méthode d'expérimentation conçue assure moins de ressources (expériences, temps, matériel, etc.) pour la quantité d'informations obtenue, et cela avec moins de coût et de temps ;
- dans la méthode d'expérimentation conçue, l'estimation des effets de chaque facteur est plus précise, et cela, avec l'utilisation d'un plus grand nombre d'observations pour estimer un effet. Par contre, la méthode OVAT n'utilise qu'en général deux des observations d'une expérience pour estimer l'effet de chaque facteur ;
- L'interaction entre les facteurs peut être estimée systématiquement avec la méthode d'expérimentation conçue. Par contre, les interactions ne sont pas estimables à partir des expériences OVAT ;
- la méthode d'expérimentation conçue améliore la prédiction de la réponse dans l'espace factoriel en réduisant la variabilité des estimations de la réponse dans l'espace factoriel, et rend l'optimisation des processus plus efficace, car la solution optimale est recherchée dans tout l'espace factoriel.

2.2.2 Les expérimentations avec un plan factoriel complet

Dans la conception d'un plan factoriel complet, toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs essayés sont étudiées. Les insuffisances précédemment signalées avec la méthode d'expérimentation OVAT sont donc totalement éliminées [3, 23]. L'objectif de conception des expériences factorielles complètes est ;

- d'identifier les facteurs qui ont un effet significatif sur la réponse (estimer les effets principaux) ;
- d'évaluer l'effet des interactions entre les facteurs, en fonction du plan d'expérience utilisé, dans lequel ces effets sont importants pour déterminer comment les conclusions de l'expérience pourraient s'appliquer plus généralement ;
- les prédictions qui peuvent être effectuées lorsque des facteurs quantitatifs sont présents.

Une conception factorielle complète à deux niveaux avec k facteurs nécessite 2^k expériences. Par exemple, deux variables donneraient $2^2 = 4$ expériences, trois variables donneraient $2^3=8$ expériences, etc.

Les plans d'expériences factoriels complets sont théoriquement parfaits, mais ils sont souvent volumineux, en particulier si un nombre appréciable de facteurs doivent être testé. Par conséquent, les délais et les coûts d'expérimentation deviennent prohibitifs dès que l'on dépasse 3 ou 4 facteurs [3, 23, 77].

2.2.3 Les expérimentations avec un plan factoriel fractionnaire

Lorsque le nombre de facteurs est élevé dans un plan factoriel complet (2^k avec 5, 6, 7, ... 10 paramètres), le nombre d'expériences augmentera rapidement (32, 64, 182, ..., 1024, etc.). Par exemple, une conception factorielle de 2^7 nécessite 182, cela signifie que le nombre d'expériences est très grand pour pouvoir estimer la valeur moyenne, sept effets principaux et 21 interactions de deux facteurs.

En pratique, la réalisation de ce nombre d'expériences est extraordinairement improbable par les utilisateurs. D'autre part, les renseignements donnés par chacune des combinaisons des niveaux des facteurs dans un plan factoriel complet, n'ont pas toute la même utilité pratique, telle que certains essais apportent plus d'informations efficaces que d'autres. En autres termes, les réponses peuvent être affectées par un petit nombre d'effets principaux et d'interactions d'ordre inférieur et les interactions d'ordre supérieur sont relativement peu importantes. C'est ce qu'on appelle le principe de rareté des effets. En outre, dans certains cas, des questions de recherche très nettement ciblées sont formulées, qui impliquent un petit nombre de facteurs clé. Donc, on est besoin d'une conception qui conserve autant d'avantages que possible des factorielles, mais n'utilise pas toutes les combinaisons de facteurs. C'est à partir ce principe, des plans factoriels fractionnaires ont été développés.

Un plan factoriel avec 2^{k-p} expériences est défini, où k est le nombre de variables et p la taille de la fraction. La taille de la fraction influencera le nombre possible d'effets à estimer et bien entendu, le nombre d'expériences nécessaires. Ces types des plans permettent d'obtenir des informations sur les effets principaux et les interactions d'ordre peu important sans avoir à exécuter la conception factorielle complète. D'autres propriétés importantes pour les plans factoriels fractionnaires, que ces dernières sélectionnent les expériences qui couvrent un volume maximal du domaine dans un nombre limité d'expériences. Par conséquent, le nombre d'essais effectué est considérablement réduit [3, 11, 23, 54, 77, 95].

2.3 Définition et méthodologie de la méthode Taguchi

2.3.1 Contexte et définition de la méthode Taguchi

Au début, pour optimiser un processus de production, une méthode traditionnelle de réalisation des expériences en modifiant "une variable à la fois" (*OVAT*) a été utilisée. Cependant, cette méthode

s'est révélée très inefficace dans de nombreux cas, impliquant un grand nombre d'expériences nécessitant du temps et est laborieuse. En outre, ces types de conceptions (*OVAT*) négligent souvent les interactions entre les variables [110]. Pour cela, une conception factorielle complète a été développée, cette conception est utilisée deux ou plusieurs facteurs, chacun avec des valeurs possibles discrètes ou des «niveaux», ainsi que, les unités expérimentales prennent toutes les combinaisons possibles de ces niveaux pour tous ces facteurs. Mais parfois, la conception factorielle complète est impossible à mener en raison du nombre croissant de facteurs à prendre en compte. Afin de minimiser le nombre d'expériences requis, Sir RA Fisher dans les années 1920 a proposé une nouvelle conception appelé « conception des expériences factorielles fractionnaires ». Cette conception n'utilise qu'une partie du total des combinaisons possibles pour estimer les effets des principaux facteurs, ainsi que les interactions éventuels. La méthode de conception des expériences factorielles fractionnaires est bien connue et efficace par rapport les deux méthodes mentionnées ci-dessus, malgré cela, il n'y a pas de directives générales pour son application ou l'analyse des résultats obtenus en effectuant les expériences [114, 159]. Considérant ces difficultés, le Dr. Genichi Taguchi en 1990, a développé une nouvelle méthode de conception appelé "les plans d'expériences de Taguchi". Ces conceptions sont semblables aux conceptions factorielles fractionnaires bien connues, mais, elles suivent une approche systématique pour limiter le nombre des expériences. Pour cela, elles étaient adoptées pour optimiser les paramètres de conception et minimiser de manière significative la durée globale des expériences et les coûts expérimentaux [110, 114, 159].

La méthode de conception expérimentale de Taguchi est un outil statistique simple, économique et efficace à appliquer, qui s'appuie sur l'utilisation d'un système de dessins tabulés (tableaux) qui permettent d'estimer un nombre maximal d'effets principaux de manière non biaisée (orthogonale) tout en n'utilisant qu'un nombre minimum de tests expérimentaux [110, 159]. La méthode de Taguchi est une approche utilisée dans la conception robuste qui détermine les facteurs produisant les meilleurs niveaux de qualité (mesure de performance) avec une variation minimale, et de minimiser de la sensibilité du bruit [122, 157]. Elle est appliquée essentiellement pour prédire la contribution significative des variables de calcul et la combinaison optimale de chaque variable en effectuant des expériences en temps réel [110]. L'objectif de Taguchi comprend trois étapes [157] :

- 1) *conception* ;
- 2) *conception de paramètres robuste (RPD)* ;
- 3) *conception de la tolérance*.

L'approche de Taguchi facilite l'étude d'un système par un ensemble des facteurs, à la fois contrôlables et incontrôlables (signal-bruit), sur des niveaux d'intérêt spécifique, elle traite simultanément la moyenne et la variabilité des valeurs des caractéristiques mesurées. D'autre part, la conception expérimentale traditionnelle se concentre sur les caractéristiques moyennes de performance du procédé, et qui ne considère que valeurs moyennes des caractéristiques à optimiser, telle qu'on la complète parfois par une analyse de la variance des différents facteurs testés [3, 89].

2.3.2 Bref aperçu historique sur la méthode d'expérience de Taguchi

Les méthodes de conception expérimentales ont été largement étudiées et développées au début du 20^e siècle par les statisticiens, mais elles n'étaient pas faciles à utiliser par de nombreux praticiens [98, 122]. Pour faire une conception expérimentale puissante et facile à utiliser et de l'appliquer pour améliorer la qualité des produits manufacturés, Dr. Genichi Taguchi a fait de nombreuses recherches au Laboratoire de contrôle électronique au Japon sur les techniques de conception d'expériences, et cela, à la fin des années 1940. À la suite de ses recherches, plusieurs nouvelles approches ont été proposées pour les conceptions expérimentales qui sont maintenant appelées "méthodes Taguchi" [110]. Ils ont été introduits aux États-Unis au début des années 1980, comme pionniers AT Bell Laboratoires, Ford Motor Company et Xerox, afin de concevoir des produits et des procédés robustes. Actuellement, les méthodes d'expériences Taguchi sont largement appliquées dans différents domaines de l'ingénierie [3, 110].

2.4 Méthodologie de la méthode Taguchi

La méthodologie de Taguchi est une approche factorielle fractionnaire qui fusionne des techniques statistiques et d'ingénierie [89]. L'optimisation de la méthodologie de Taguchi consiste principalement en quatre étapes, adoptée et illustrée dans un organigramme à la Fig 2.2. Pour chaque étapes a un objectif distinct, reliés en effet pour effectuer le processus d'optimisation global [110, 146] :

- **Phase 1 : planification**

Cette phase consiste principalement à déterminer les divers facteurs à optimiser le processus avec l'identification les conditions d'essais (déterminer le nombre d'essais à effectuer et de la manière dont elles devraient être effectuées). Ainsi qu'étudier l'effet des facteurs de processus sur la caractéristique de performance de sortie d'un produit ou procédé ou pour optimiser le processus, il faut avoir une compréhension générale du processus global à étudier, et sélectionner les facteurs a priori le plus influent pour l'étude (identification des facteurs de contrôle et de bruit).

- **Phase 2 : réalisation**

Dans cette phase, des expériences conçues à l'aide des tableaux orthogonaux spéciaux sont réalisées. Les tableaux sont utilisés pour la conception de paramètres robustes, dans lesquelles un tableau orthogonal (OA) impliquant des variables de contrôle a été croisé avec un (OA) pour les variables incontrôlables/de bruit. Dans la méthodologie Taguchi, il a établi des tableaux orthogonaux (OA) pour décrire un grand nombre de situations expérimentales principalement pour réduire les erreurs expérimentales et pour améliorer l'efficacité et la reproductibilité des expériences de laboratoire. (*Plus détaillés sur la notion de l'orthogonalité et tableaux orthogonaux dans le paragraphe 2.6*).

- **Etape 3 : analyse**

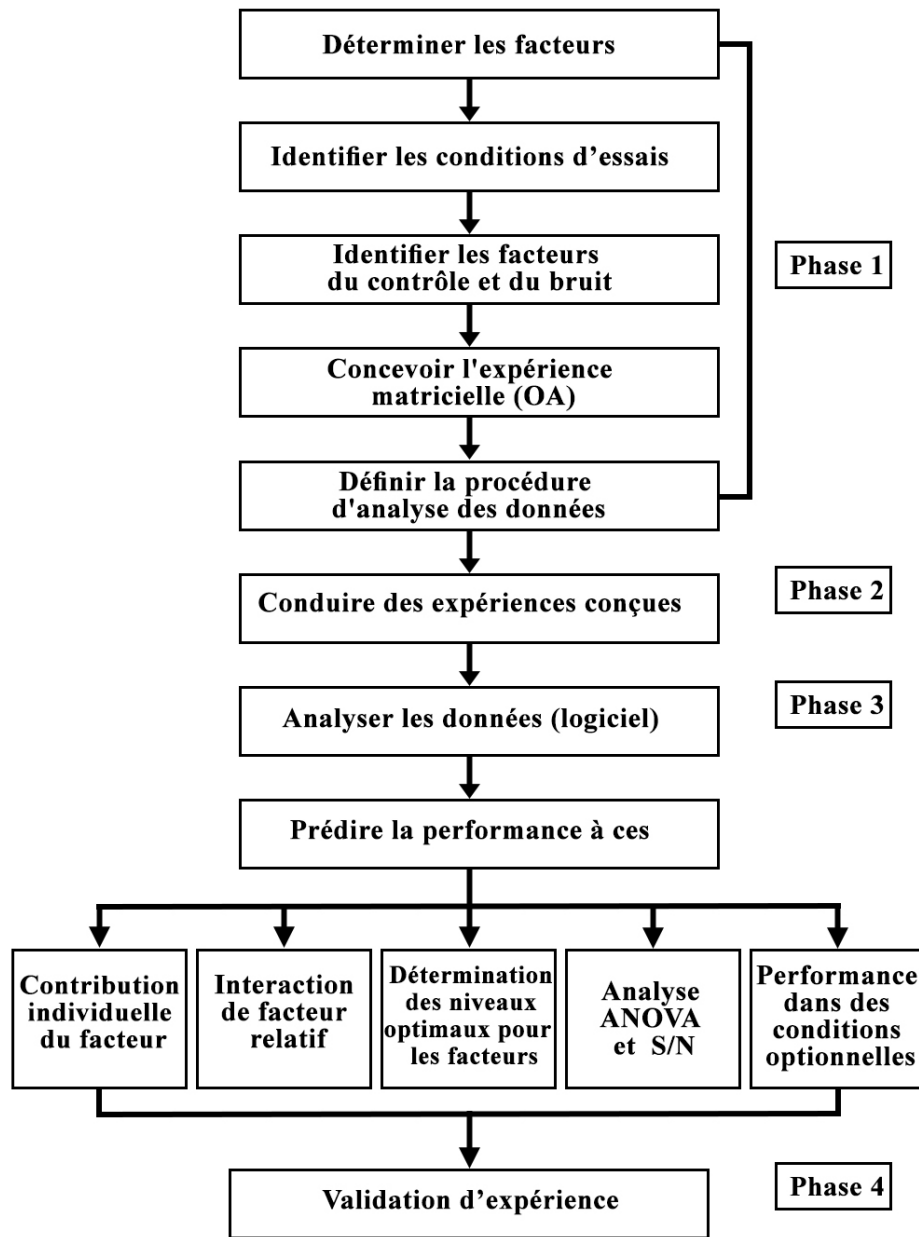


FIGURE 2.2 – Représentation schématique de la méthodologie Taguchi [89].

Cette phase consiste l'analyse des données des expériences avec des logiciels spéciaux (comme Minitab, Excel...), et la prédiction des conditions optimales aussi que l'interaction de facteur relatif, cela avec l'analyse de S/N et l'analyse d'ANOVA.

- **Phase 4 : validation**

Dans cette phase, les résultats obtenus et la mise en œuvre des solutions sont vérifiés par des expériences de suivi.

L'application efficace des méthodes Taguchi dans la conception expérimentale nécessite, une planification, une connaissance des processus, une communication, les compétences statistiques et le travail d'équipe sont nécessaires. De plus, fournir le bon environnement et bonnes personnes [110].

2.5 La notion d'interaction

Il y a interaction entre deux facteurs lorsque l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre [3]. À titre exemple, le graphique de la Fig 2.3 étudie les effets des facteurs A et B, ayant chacun deux niveaux. Les cas d'interaction possible sont comme suite :

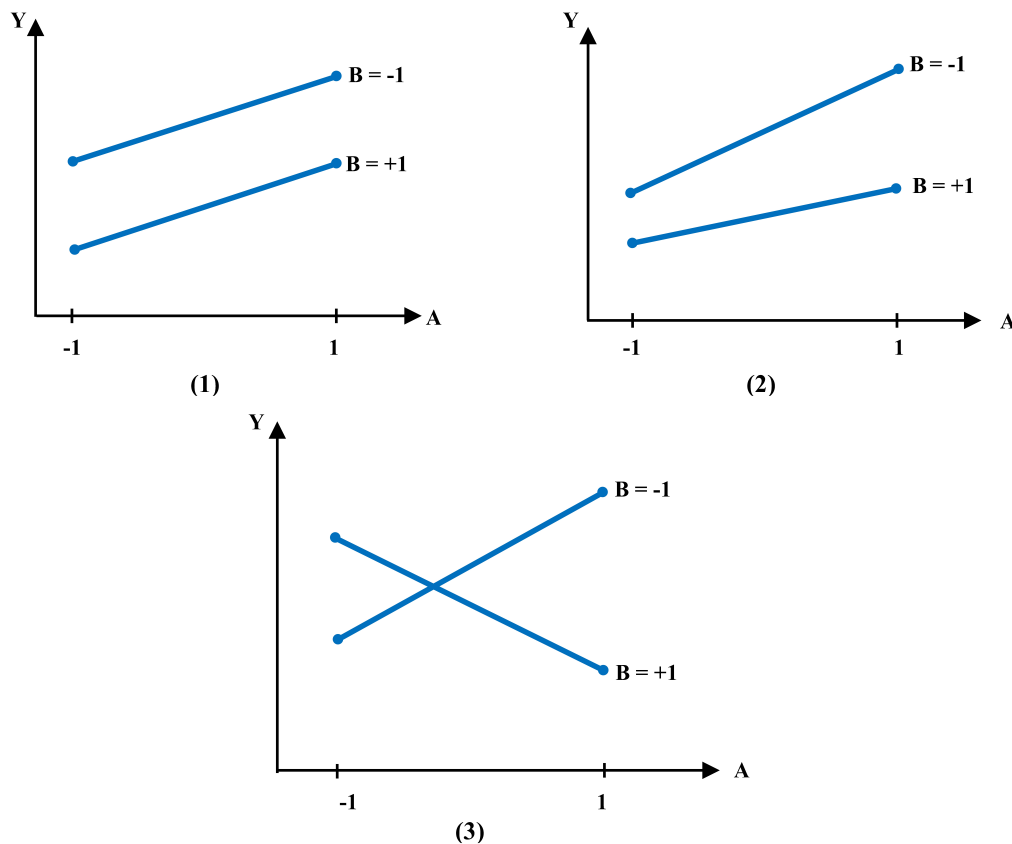


FIGURE 2.3 – Courbes de différent cas d'interactions [3].

- Dans le graphique (1) de la Fig 2.3 : les droites correspondantes sont parallèles, ce qui indique que l'effet du facteur A ne dépend pas des niveaux de B, et de la même façon l'effet de B ne dépend pas des niveaux de A. Cela signifie qu'il n'y a aucune interaction entre les deux facteurs A et B, aux niveaux testés. On dit alors que les facteurs A et B sont indépendants ;
- Dans le graphique (2) de la Fig 2.3 : les droites correspondantes ne sont pas parallèles, ce qui indique qu'il y a une interaction entre les deux facteurs A et B. Cela signifie que l'effet du facteur A n'est pas indépendant des niveaux de facteur B (faible interaction entre A et B) ;

- En observant le graphique 3 de la Fig 2.3 : lorsque les droites se coupent, ce qui indique que les facteurs A et B ne sont pas indépendants. L'effet de A s'inverse suivant le niveau de B, cela signifie que l'interaction est particulièrement forte.

2.6 La notion d'orthogonalité

La méthode Taguchi utilise des matrices spéciales "appelées tableaux orthogonaux (OA)" pour étudier un grand nombre de variables avec le minimum d'expériences, ce qui réduit considérablement le nombre de configurations expérimentales à étudier [79, 89, 96]. Un tableau orthogonal est une petite fraction du plan factoriel complet, il est appelé orthogonal, car pour chaque paire de paramètres, toutes les combinaisons de niveaux de paramètres se produisent un nombre égal de fois [79, 110]. Cette approche utilise des graphiques linéaires, une technique simple permettant de déterminer la relation entre les variables en se concentrant sur les interactions supposées affecter les caractéristiques fonctionnelles étudiées. Autre propriété de tableau orthogonal, où il facilite l'identification de l'influence des facteurs individuels grâce à sa conception équilibrée, en établissant la relation entre les facteurs et les conditions opérationnelles et la performance aux niveaux optimaux obtenus [89].

La méthode Taguchi utilise (OA) pour principalement réduire les erreurs expérimentales et améliorer l'efficacité et la reproductibilité des expériences de laboratoire [110]. Enfin, un tableau orthogonal est sélectionné par l'utilisateur en fonction du nombre de facteurs, des interactions et de leur niveau ; les conclusions tirées par l'expérience à petite échelle sont valables pour l'ensemble de l'espace expérimental couvert par les facteurs de contrôle et leurs niveaux d'ajustement [89, 98, 122].

La méthodologie Taguchi utilise plusieurs types de tableaux orthogonaux qui se concentrent sur les effets principaux et augmente l'efficacité et la reproductibilité des expériences à petite échelle [11, 110, 135].

- Tableaux orthogonaux avec à une série à deux niveaux, telles que $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{12}(2^{11})$, $L_{16}(2^{15})$ ou $L_{32}(2^{31})$, ces tableaux sont pour la recherche d'interactions d'ordre 2 sauf la table $L_{12}(2^{11})$ où il n'a pas utilisable pour déterminer des interactions ;
- Tableaux orthogonaux avec des séries à trois niveaux, telles que $L_9(3^4)$; $L_{27}(3^{13})$ ou $L_{81}(3^{40})$, ces tableaux sont pour la recherche des coefficients d'effets quadratiques même s'il existe des stratégies économiques ;
- Tableaux orthogonaux avec des séries à plus de trois niveaux, telles que $L_{16}(4^5)$, $L_{25}(5^6)$ ou $L_{64}(4^{21})$, ces types de tableaux sont pour l'étude comportant des niveaux discrets et en général ne sont pas beaucoup plus économiques que la réalisation d'un plan ;
- Tableaux orthogonaux avec des matrices à niveaux mélangés, telles que $L_{18}(2 \times 3^7)$ ou $L_{36}(2^3 \times 3^{13})$, ces tables sont implémentées dans différents logiciels et peuvent être utilisées par des utilisateurs avertis.

TABLE 2.1 – Matrice d'expériences L_8 .

N_i essai	Facteurs contrôlés						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	2	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

La désignation symbolique de ces tableaux indique les informations principales sur la taille de l'expérimentation, par exemple (L_4) compte 4 essais. Le degré de liberté total disponible dans ces tableaux est égal au nombre d'essais moins un. La notation $L_n(m^f)$ indique la désignation d'un tableau orthogonal, cette notation est couramment utilisée, avec : (L) indique comme carré latin ; (n) indique le nombre de lignes (nombre d'essais). (m) indique le nombre de modalités pour l'ensemble des facteurs (le nombre des niveaux) et (f) indique le nombre de colonnes, où chaque colonne est composée d'un certain nombre de conditions dépendant des niveaux attribués à chaque facteur [110].

Par exemple, la notation $L_8(2^7)$ indique un tableau de nombres comportant huit lignes et sept colonnes, et qu'il peut être utilisé pour concevoir des expériences comportant jusqu'à sept facteurs à deux niveaux (tableau 2.1). On peut également dire que les huit expériences prescrites par la matrice L_8 font partie des 128 combinaisons possibles des sept facteurs à l'étude. C'est-à-dire, dans la méthode factorielle complète de l'étude expérimentale, une étude d'un processus ou produit en fonction de sept facteurs et deux niveaux nécessiteraient chacun des $(niveau)^{facteurs} = 2^7$ ou 128 expériences ainsi que 2 répétitions pour toutes les combinaisons de paramètres, exiger 256 nombre d'essais pour effectuer 128 expériences. Des résultats similaires peuvent être obtenus en utilisant les expériences sur les tableaux orthogonaux L_8 de Taguchi en effectuant seulement 8 expériences avec 2 répétitions pour chaque expérience.

Taguchi propose une table triangulaire associée à la plupart des matrices standard. Elle sert à définir les colonnes à utiliser pour les interactions à étudier. À titre d'exemple, pour la matrice L_8 , la table triangulaire est illustrée à la Fig 2.4. Il propose en parallèle des graphiques linéaires pour affecter des interactions entre des facteurs dans un tableau afin de calculer des interactions dans la conception d'expériences. Par exemple, la Fig 2.6 présente les deux graphiques linéaires qui sont associés la matrice L_8 . Le graphique linéaire (1) de la Fig 2.6 signifie que l'interaction entre les colonnes 1 et 2 sort de la colonne 3 et que l'interaction entre les colonnes 1 et 4 sort de la colonne 5. La colonne 7 est représentée sous la forme d'un point indépendant du triangle. Alors que le graphique linéaire (2) de la Fig 2.6 signifie une expérience dans laquelle les interactions entre un facteur particulier et certains autres facteurs sont importantes. Donc, chaque matrice d'expériences

est accompagnée d'une table triangulaire et d'un graphe linéaire permettant de savoir dans quelle colonne une interaction donnée est susceptible de se manifester [3, 135].

	N° de la colonne où est affecté le 2 ^e facteur						
	1	2	3	4	5	6	7
(1)		3	2	5	4	7	6
(2)			1	6	7	4	5
(3)				7	6	5	4
(4)					1	2	3
(5)						3	2
(6)							1
	N° de la colonne où est affecté le 1 ^{er} facteur						

FIGURE 2.4 – Table triangulaire L_8 [3].

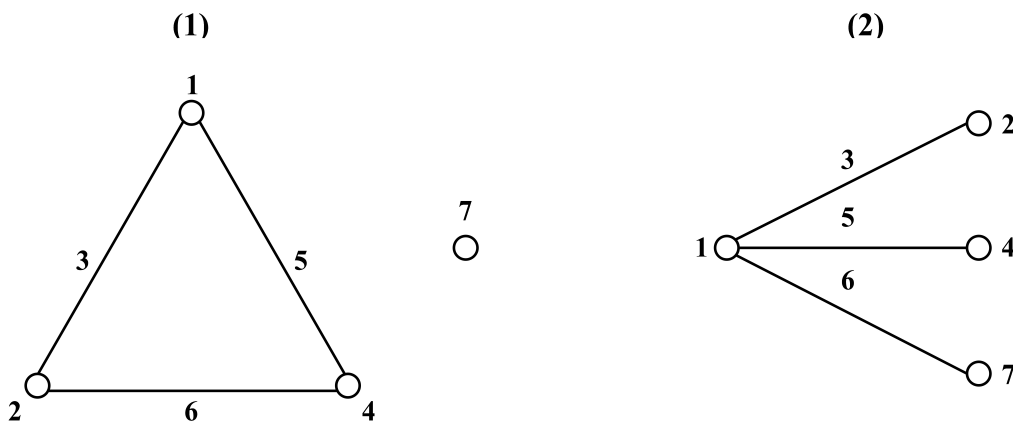


FIGURE 2.5 – Graphes linéaires L_8 [3].

2.7 Le rapport Signal/Bruit

La méthode de Taguchi nécessite l'utilisation des rapports signal sur bruit (S/N) pour estimer l'influence des facteurs sur une réponse. Ce rapport est utilisé comme valeur mesurable au lieu de l'écart-type ; du fait que lorsque la moyenne diminue, l'écart-type diminue également et vice-versa. En d'autres termes, l'écart-type ne peut pas être minimisé en premier et la moyenne portée à la cible [122, 124]. Le signal est un indicateur de l'effet sur la réponse moyenne et le bruit est une

mesure de l'influence sur les écarts par rapport à la réponse moyenne, ce qui explique la sensibilité de la sortie de l'expérience aux facteurs de bruit [96]. L'amélioration de la qualité par la réduction de la variabilité et l'amélioration de la mesure sont les avantages principaux des applications dans lesquels le concept de rapport S/N est utile [122]. En outre, L'indice de robustesse de la qualité, le rapport S/N, montre l'ampleur de l'interaction entre les facteurs de contrôle et les facteurs de bruit. Les facteurs de contrôle et de bruit doivent être assignés à différents groupes pour l'étude de la robustesse, ce qui est significativement différent de l'approche traditionnelle des plans d'expériences, où il n'y a pas de distinction entre les facteurs de contrôle et de bruit [110].

Taguchi classe les problèmes de conception de paramètres robustes en trois catégories en fonction de l'objectif du problème, y compris le plus grand est le meilleur, le nominal est le meilleur et le plus petit est le meilleur. Ces caractéristiques de performance sont évaluées à l'aide des équations suivantes [137, 157, 159] :

- **Plus grand est le mieux** : Dans cette situation, la valeur cible de y, c'est-à-dire la variable de qualité, est infinie et le rapport S/N est défini comme suit :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (2.2)$$

- **Plus petit est le mieux** : Pour ce type de problèmes, la valeur cible de y, c'est-à-dire la variable de qualité, est zéro. Dans cette situation, le rapport signal sur bruit est défini comme suit :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.3)$$

- **Nominal le meilleur** : Pour ce type de problèmes, la valeur cible donnée est donnée pour la valeur y. Dans cette situation, le rapport S/N est défini comme suit :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 \right) \quad (2.4)$$

Où :

S/N : sont des statistiques de performance, définies comme le rapport signal sur bruit ;

n : le nombre de répétitions pour une combinaison expérimentale ;

Y_i : une valeur de performance de la $i^{\text{ème}}$ expérience et la valeur nominale Y_0 souhaitées.

2.8 Avantages et limites des plans d'expériences de Taguchi

La méthode de Taguchi est très pratique pour les chercheurs ayant un grand nombre d'expériences, du fait qu'ils peuvent acquérir rapidement et avec précision des informations techniques pour concevoir et produire des produits et des processus extrêmement fiables, et peut également être

utilisée comme alternative au plan expérimental factoriel complet. L'un des avantages de la méthode de Taguchi par rapport aux méthodes de conception expérimentale classiques, outre le fait de maintenir significative du temps et des coûts nécessaires pour les investigations expérimentales, est de minimiser la variabilité autour de la cible lorsque la valeur de performance est atteinte.

D'autres avantages d'application cette méthode comprends l'optimisation des paramètres de conception ; l'évaluation de la contribution significative de chacun des facteurs de conception ; la prédiction des valeurs variables dans des conditions qui n'ont pas été utilisées dans le modèle original de Taguchi et que les conditions de travail optimales déterminées à partir des travaux de laboratoire peuvent être reproduites dans l'environnement de production réel [89, 110, 124, 137, 159]. La Fig 2.6 représente la différence entre l'approche classique des plans d'expériences et l'approche de Taguchi [110].

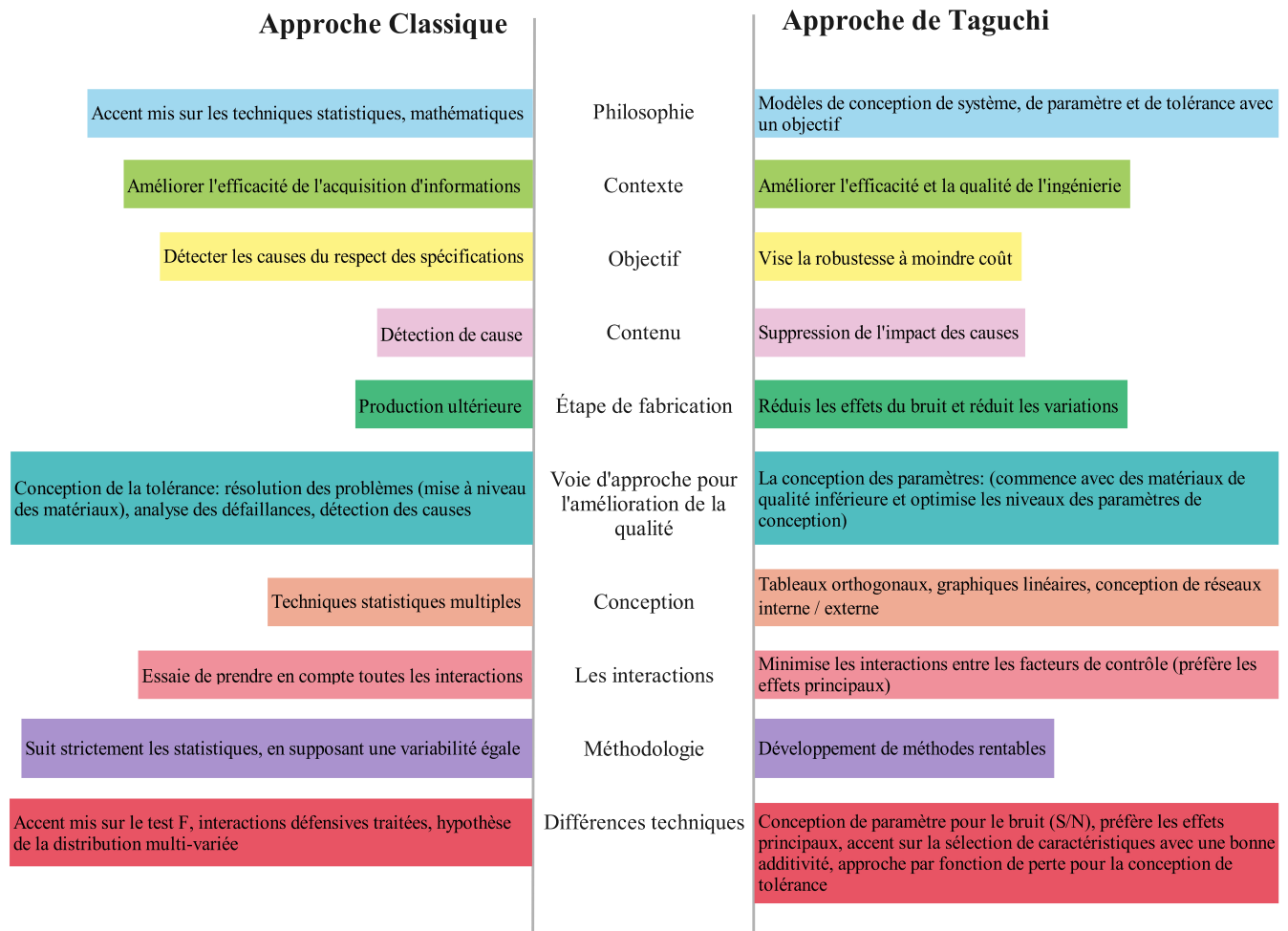


FIGURE 2.6 – Illustration de comparaison de l'approche de Taguchi et l'approche classique [110].

Le principal inconvénient de la méthode Taguchi est que les résultats obtenus ne sont que relatifs et n'indiquent pas exactement quel paramètre a le plus d'effet sur la valeur de la caractéristique de performance. Cette méthode ne doit pas être utilisée avec toutes les relations entre toutes les variables sont nécessaires, car les tableaux orthogonaux ne testent pas toutes les combinaisons de variables. La méthode de Taguchi a été critiquée dans la littérature pour sa difficulté à rendre compte des interactions entre paramètres. Une autre limitation est que les méthodes de Taguchi sont hors ligne, et donc inappropriées pour un processus à changement dynamique tel qu'une étude de simulation. De plus, étant donné que les méthodes de Taguchi traitent de la conception de la qualité plutôt que de la correction de la mauvaise qualité, elles sont appliquées plus efficacement aux premiers stades du développement du processus. Une fois les variables de conception spécifiées, l'utilisation de la conception expérimentale peut être moins rentable [28].

2.9 Application de la méthode Taguchi

La méthode de Taguchi a été utilisée avec succès, pour la détermination des paramètres de processus optimaux, dans le monde entier pour de nombreuses applications de fabrication et de recherche [114, 124]. Elle a été initialement utilisée pour améliorer la qualité des produits manufacturés, mais plus récemment, elle a été appliquée largement et avec succès à d'autres domaines tels que l'aérospatial; l'environnement; l'énergie; etc., [134, 159]. Plus de détails sur l'application de cette technique, dans divers domaines, sont décrits par [114].

En outre, la méthode de Taguchi a été appliquée avec succès au domaine de génie civil tels que la construction [97]; l'étude de la stabilité de pentes [136]; l'érosion des sols [114, 159]; liquéfaction du sol [13]; les tunnels [46]; etc.,.

2.10 La méthode de Taguchi et l'analyse de variance (ANOVA)

Comme mentionner précédemment, la méthode Taguchi utilise le plan orthogonal et l'analyse de la moyenne pour analyser les effets de paramètres, basés sur l'analyse statistique des expériences. Cependant, il nécessite diverses analyses doivent être effectuées pour déterminer la fiabilité des résultats expérimentaux et le degré d'effet des paramètres sur le résultat. Pour cela, une technique statistique standard appelée analyse de variance (ANOVA), couramment utilisée pour fournir une mesure de la confiance [136, 157].

L'analyse ANOVA est une méthode statistique simple, puissante et populaire consiste à vérifier les différences entre les moyennes des méthodes/groupes en examinant l'ampleur de la variation dans chacun des groupes, par rapport à l'ampleur de la variation entre les groupes/méthodes [108, 126]. Cette technique est couramment utilisée en statistique appliquée, pour le cas particulier à partitionner la variation d'une variable de réponse en une variable expliquée et non expliquée par un ou plusieurs prédicteurs catégoriques (appelés facteurs) généralement dans le contexte des

expériences conçues ; où les catégories de chaque facteur représentent les groupes ou traitements expérimentaux et l'objectif est souvent de comparer les moyennes variables de réponse entre les groupes [105].

L'analyse d'ANOVA est particulièrement adaptée aux conceptions expérimentales impliquant l'appariement ou le blocage, à des mesures répétées sur les mêmes sujets, ou pour vérifier si différents facteurs de l'expérience interagissent avec les uns aux autres [126]. Il existe deux types de tests ANOVA, basés sur le nombre de variables indépendantes considérées, à savoir :

- ANOVA unidirectionnelle (*One-Way ANOVA*) ou ANOVA à un facteur (*One-Factor ANOVA*) et ;
- ANOVA bidirectionnelle (*Two-Way ANOVA*) ou ANOVA à deux facteurs (*TwoFactor ANOVA*).

L'analyse pour les situations de recherche où une seule variable indépendante est considérée s'appelle Analyse de variance unidirectionnelle et si deux facteurs sont examinés à la fois, elle s'appelle Analyse de variance bidirectionnelle [108].

L'analyse d'ANOVA est utilisée en plusieurs domaines, notamment, dans les sciences biologiques, la psychologiques, le médicales, l'écologiques et environnementales [4] ; aussi au domaine de la géotechnique [108].

2.11 Conclusion

La méthode des plans d'expériences a toujours été un sujet de premier plan dans les recherches de ces jours. Cette méthode est efficace pour une meilleure organisation de la démarche expérimentale et résoudre les problèmes d'optimisation lors d'une étude. En outre, la méthode Taguchi est une technique réussie pour améliorer la technologie, et le succès de son application nécessite le respect tous les es étapes de la méthodologie de conception motionné ci-dessus. Dans ce contexte, la méthode de Taguchi a été utilisée pour la présente étude.

Partie Pratique

Chapitre 3

Position du problème et méthodologie de travail

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord la problématique du gonflement des sols, puis le secteur d'études choisi ainsi que la base des données sélectionnées pour notre approche. Une classification des sols étudiés en utilisant des classifications classiques proposé, et en fin la méthodologie de travail est présenté en détaille.

3.1 Position du problème

Comme mentionnés dans le premier chapitre, les sols gonflants causent de nombreux problèmes aux structures dans le domaine du génie civil dans le monde entier [1, 20, 41, 94, 149]. Le gonflement des sols dépend du type et de la quantité de minéraux argileux, généralement du groupe montmorillonite, de la teneur en eau et du chargement [43, 111, 162]. Ce type de sol est particulièrement observé dans les régions à climats arides et semi-arides ; tel qu'il subit de fortes déformations volumétriques dues à la variation de la teneur en eau, ce qui pose des problèmes dans les domaines de la géotechnique et du génie civil [20, 57, 154, 161]. En outre, les dépenses dues aux dommages causés par ces types des sols sont significativement élevées, où le coût annuel des dommages aux installations et infrastructures causés par ces types de sols est estimé à plusieurs milliards de dollars dans le monde. Pour cette raison, le problème était si important et ne pouvait être négligé, et il est extrêmement important identifier de tels sols avant la construction pour réduire les dommages coûteux [2, 21, 47, 68, 104].

L'identification des sols gonflants est faite généralement, par des mesures directes à l'aide de l'oedomètre indiquées par des normes d'essai largement répandues dans le monde (ASTM D 4546-90, AFNOR XP standard P94 – 091), ces essais sont très cher et très lent [16, 91, 100], et par des méthodes indirectes qui utilisent les caractéristiques d'identification simples. Ces dernières méthodes sont rapides et moins chères, mais leurs applications n'est pas universelle. Par conséquent, le développement de nouvelles approches fiables, moins chères, de courts durée et d'application universelle pour l'évaluation du gonflement des sol est très important.

De nombreux chercheurs ont indiqué que la teneur en argile (C_c) et l'indice de plasticité (I_p) ont une influence sur le gonflement du sol. Ils ont également lié ces paramètres avec des corrélations empiriques simples [20, 61, 74, 81, 118, 132], ces deux paramètres étant également simples et faciles à déterminer. Par conséquent, ces paramètres ont été sélectionnés comme paramètres d'entrée dans cette étude.

En Algérie, comme dans de nombreuses régions du monde, des problèmes d'ingénierie dus au gonflement des sols ont été signalés. À cet effet, la région Ouest de l'Algérie a été choisie comme secteur de notre étude. La zone étudiée comprend quatre sites (Tlemcen, Sidi Bel-Abbes, Oran, Mascara). Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, et au sud par l'Atlas Saharien et de l'ouest par la frontière Algéro-marocaine.

La carte géologique de la région est indiquée en Fig.3.1, elle est caractérisée par l'existence des formations alluvionnaires d'âge quaternaire continental, des formations marines (argile limoneuse, dunes consolidées) et néogènes (argiles, marnes, calcaires et des gréseux) d'âge Miocène supérieur continental et Marin. Par conséquent, la zone d'étude est dominée par l'existence d'une succession de couches d'âge et de faciès variés.

La région ouest de l'Algérie se trouve soumise à la fois aux influences climatiques méditerranéennes et sahariennes. Par conséquent, elle est caractérisée par un climat typiquement méditerranéen avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. Les pluies sont plus rares dans la

partie ouest où elles atteignent 400 mm par an [83] et donc le climat est considéré comme semi-aride avec des précipitations irrégulières d’une année à l’autre.

Parmi les grands bassins versant qui couvre la région d’étude, on a le bassin du Tafna, bassin de Côtiers Oranais, bassin de la Macta et bassin du chott Chergui. Les principaux niveaux aquifères phréatiques de cette région sont caractérisés par la nappe Karstique, la nappe des grès Mio-pliocène, nappe du calcaire et dolomies du jurassique, nappe superficielle des alluvions quaternaire et nappe de calcaire lacustre. Ces aquifères, qui se trouvent aux différentes profondeurs, sont alimentés par infiltration des eaux de pluie et de ruissellement sur les schistes du jurassique et du crétacé [103].

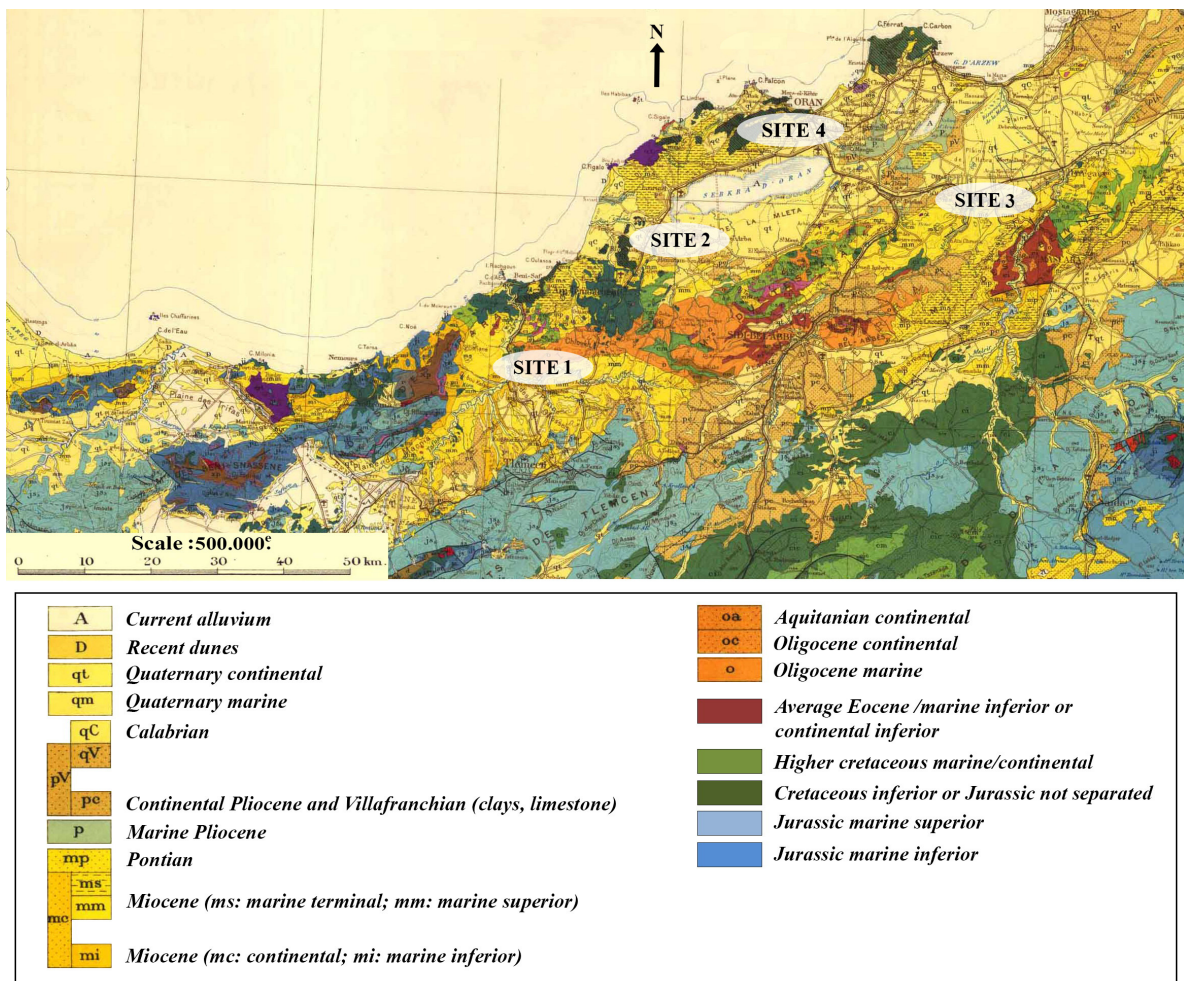


FIGURE 3.1 – Carte géologique du nord-ouest de l’Algérie [17].

3.2 Objective et méthodologie de travail

Cette recherche est basée sur l'application d'une nouvelle approche pour l'évaluation du gonflement des sols. L'objectif principal est de contribuer au développement d'approches plus efficaces par rapport aux méthodes classiques pour la prédiction de ces types de sols et déterminer dans les conditions optimales des deux paramètres (potentiel de gonflement et pression de gonflement) en réponse à différentes combinaisons de facteurs/niveaux en effectuant un nombre d'expériences avec une bonne précision.

L'exécution de cette étude est faite en deux étapes :

La première étape consiste en une étude comparative sur le degré de gonflement des sols à l'aide des nouvelles formules de corrélations. Cette étape comporte une analyse des régressions linéaires simples et multiples, des régressions cubiques et quadratiques de la base de données que nous comparons avec les corrélations de la littérature et déduisons les effets des différents paramètres étudiés, et choisissons les meilleures régressions pouvant être appliquées pour notre cas.

La deuxième étape est consacrée à l'application d'un type de plans d'expériences (méthode de Taguchi). Dans cette étape, une nouvelle approche intégrant des algorithmes ANN et Taguchi est utilisée pour prédire le gonflement du sol et examiner les effets et les interactions avec la détermination des niveaux optimaux des facteurs sélectionnés sur les paramètres étudiés (le potentiel de gonflement et la pression de gonflement). Ensuite une validation avec une analyse ANOVA (analyse de la variance) est proposée.

3.3 Base de données expérimentale

Pour exécuter cette étude, une base de données de 86 essais a été collectée et préparée à partir d'une lecture des principales publications disponibles sur les sols gonflants à la région d'ouest de l'Algérie [10, 15, 52, 53, 55, 56, 139, 140], plus des résultats des travaux effectués par le laboratoire des travaux publics d'Oran (LTPO). L'ensemble de la base de données est résumée dans le [tableau 3.1](#), tels que quatre paramètres ont été déterminés, conformément aux normes internationales ISO : la teneur en argile C_c (%) (NF P94-056, NF P94-057), l'indice de plasticité I_p (%) (NF P94-051), le potentiel de gonflement S_p (%) (ASTM D 4546-90), la pression de gonflement et le coefficient de gonflement C_g (%) P_s (kPa) (XP P94 - 091).

TABLE 3.1 – Base de données expérimentale [10, 15, 52, 53, 55, 56, 139, 140], LTPO 2015.

Essai n°	C_c $2\mu m$	$< I_p$ (%)	C_g (%)	S_p (%)	P_s (kPa)	Essai n°	C_c $2\mu m$	$< I_p$ (%)	C_g (%)	S_p (%)	P_s (kPa)
1	19	46.65	0.097	/	/	46	3	49.09	0.065	/	/
2	19	55.12	0.077	/	/	47	3	44.11	0.045	/	/
3	23	42.08	0.085	/	/	48	3	24.14	0.069	/	/
4	8	14.98	0.014	/	/	49	1	23.91	0.099	/	/
5	37	22.89	0.043	/	/	50	12	30	0.089	/	/
6	9	30.38	0.06	/	/	51	100	40.52	0.067	/	/
7	8	28	0.086	/	/	52	17	20.46	0.036	/	/
8	24	29.16	0.052	/	/	53	21	21.32	0.088	/	/
9	17	32.74	0.08	/	/	54	26	17.58	0.043	/	/
10	43	35.41	0.057	/	/	55	26	27.5	/	9.5	175
11	15	22.31	0.08	/	/	56	32	27.3	/	22	310
12	3	25.57	0.053	/	/	57	35	46.8	/	19.5	100
13	22	45.94	0.063	/	/	58	42	62	/	38.7	252
14	21	45.28	0.058	/	/	59	60	71	/	20.4	200
15	9	28.58	0.019	/	/	60	34	62.5	/	31.9	150
16	3	25.57	0.053	/	/	61	46	48.5	/	19	46
17	11	30.61	0.034	/	/	62	55	44.2	/	25.2	80
18	2	36.45	0.055	/	/	63	52	50.3	/	28.9	84
19	2	27.38	0.02	/	/	64	52	50.4	/	26.3	/
20	3	23.38	0.015	/	/	65	27	29	/	21.2	/
21	20	34.98	0.052	/	/	66	53	33.00	0.080	5.72	201.3
22	34	18.14	0.094	/	/	67	46	32.50	0.080	5.72	201.3
23	28	35.19	0.048	/	/	68	51	32.00	0.080	5.72	201.3
24	25	37.46	0.04	/	/	69	69	35.00	0.080	5.72	201.3
25	9	32.67	0.048	/	/	70	40.0	83.43	0.120	27.08	447
26	2	39.35	0.037	/	/	71	55.3	22.00	/	4.75	65
27	22	18.48	0.014	/	/	72	61.2	83.00	/	11.89	148
28	7	17.8	0.012	/	/	73	48	14	/	0.87	23
29	2	26.91	0.058	/	/	74	60	93	/	4.00	900
30	8	16.83	0.015	/	/	75	60	93.50	/	6.50	852
31	26	30.32	0.057	/	/	76	44	37.42	/	2.17	120
32	50	27.98	0.033	/	/	77	48	36.20	/	23.44	33
33	4	34.13	0.038	/	/	78	48.8	42.04	/	70.00	43
34	4	34.13	0.046	/	/	79	50	87.94	/	47.50	158
35	4	25.68	0.036	/	/	80	40	81.60	0.163	/	/
36	10	19.41	0.051	/	/	81	2	13.43	0.045	/	/
37	72	32.02	0.068	/	/	82	2	33.29	0.050	/	/
38	77	34.16	0.051	/	/	83	1	27.05	0.040	/	/
39	1	50.2	0.043	/	/	84	9	29.62	0.044	/	/
40	1	40.08	0.073	/	/	85	29	17.1	/	9.7	100
41	3	36.35	0.06	/	/	86	42	22.3	/	13.5	100
42	37	49.49	0.052	/	/						
43	3	45.23	0.074	/	/						
44	3	44.18	0.07	/	/						
45	3	37.96	0.09	/	/						

3.4 Analyse statistique descriptive des données utilisées

Le [tableau 3.2](#) représente une analyse statistique descriptive de chaque paramètre de la base de données disponible pour cette étude : la teneur en argile, l'indice de plasticité, le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et le coefficient de gonflement. Cette analyse a pour but de fournir des informations sur les paramètres pris en compte dans cette étude notamment, valeur maximale, valeur minimale, valeur moyenne et écart type.

TABLE 3.2 – Analyse statistique descriptive des données utilisées.

	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart type</i>
$C_c(\%)$	100	1	26.224	22.444
$I_p(\%)$	93.5	13.43	37.298	17.888
$S_p(\%)$	70	0.87	18.773	15.709
$P_s(KPa)$	900	23	207.65	222.4
$C_g(\%)$	0.0163	0.012	0.0585	0.027

3.5 Classification des sols étudiés

Cette étape est consacrée à la classification des sols étudiés selon le diagramme de classification de Casagrande, de la méthode proposée par Van der Merwe et selon la classification de Philipponnat (les trois systèmes de classification sont présentés dans le [chapitre.1](#)) ; ces classifications ont pour objectif de donner une idée sur la classification des sols étudiés.

3.5.1 Classification de Casagrande

Selon le diagramme de plasticité de Casagrande ([Fig.3.2](#)), 48% de ces sols sont des argiles à plasticité élevé (CH), 36% sont très plastiques et 16% sont des argiles à faible plasticité (CL). Les valeurs de l'indice de plasticité et de la limite de liquidité des sols étudiés varient respectivement de 14 à 93% et de 31 à 167%.

3.5.2 Classification de Van der Merwe

La méthode de Van der Merwe [\[145\]](#) a été couramment utilisée pour la classification des sols [\[132, 142\]](#), cette méthode est basée sur l'utilisation d'une carte d'argile gonflant pour relier l'indice de plasticité, l'activité et la teneur en argile avec le potentiel de gonflement. Selon le diagramme de classification de Van der Merwe ([Fig.3.3](#)), plus de 75% des sols étudiés ont des potentiels de gonflement élevés et très élevés ; avec des valeurs de la teneur en argile allant de faibles (1%) à des valeurs élevées (100%).

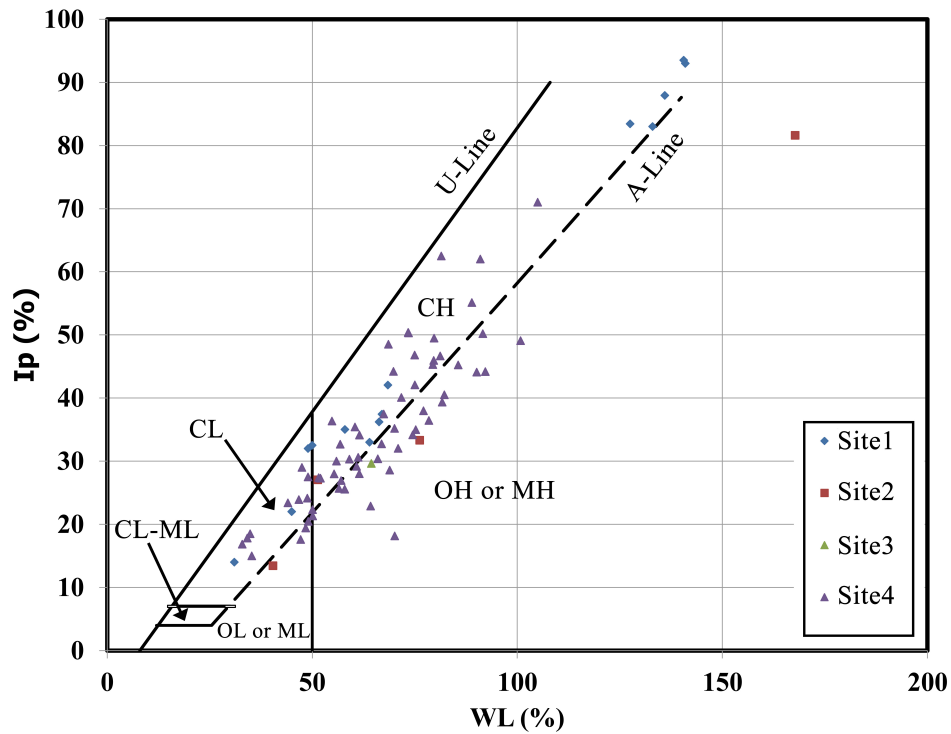


FIGURE 3.2 – Diagramme de plasticité de Casagrande pour les échantillons de sols étudiés.

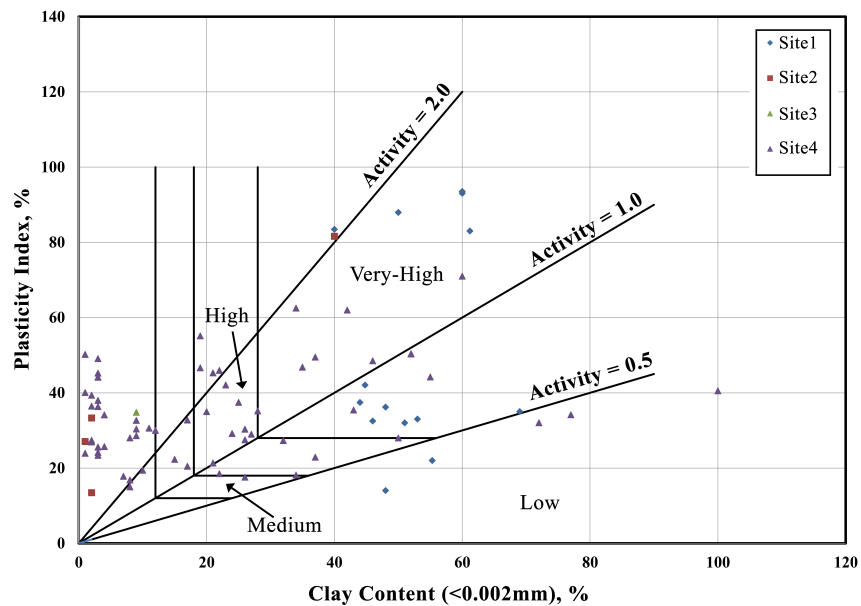


FIGURE 3.3 – Classification de Van der Merwe pour les sols étudiés.

3.5.3 Classification de Philipponnat

Une classification supplémentaire basée sur la méthode de Philipponnat [66, 100], qui utilise le coefficient de gonflement pour identifier et classer le degré de gonflement (comme indiqué au [Tableau.1.3](#)), a été faite. Les résultats obtenus indiquent que la plupart des sols présentent un risque de gonflement très élevé ([Fig.3.4](#)), où les valeurs des coefficients de gonflement pour les sols étudiés varient entre 0.012 et 0.163.

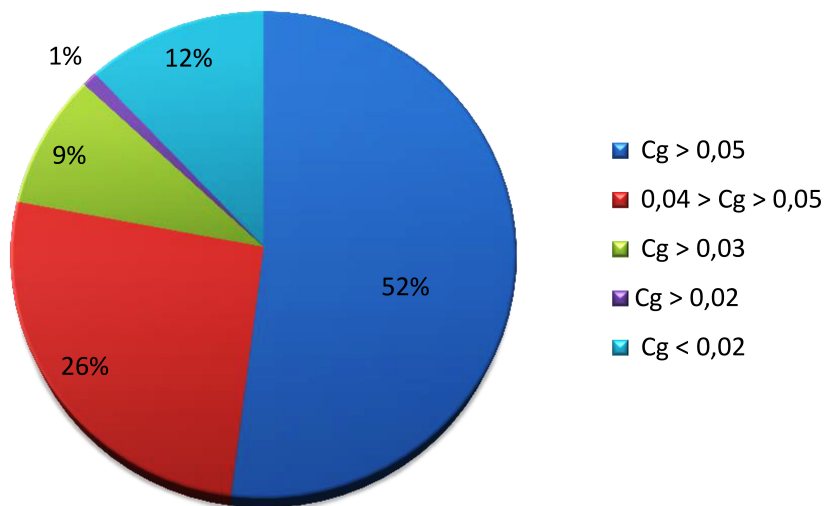


FIGURE 3.4 – Valeurs des coefficients de gonflement pour les sols étudiés.

Chapitre 4

Corrélations pour l'évaluation du gonflement des sols

Les ingénieurs géotechniciens cherchent toujours à développer des nouvelles approches, moins chers, de courte durée et avec une grande précision, afin de résoudre les problèmes complexes rencontrés lors de la réalisation dans les différents projets notamment le gonflement des sols. À cet effet, beaucoup de chercheurs ont proposé des approches basées sur des corrélations empiriques et des statistiques classiques pour la prévision des sols gonflants.

Les corrélations dans le domaine de la géotechnique sont très utilisées et d'une fiabilité acceptable, selon des études antérieures. Ces techniques consiste en l'estimation d'un paramètre inconnue sur la base d'autres déterminées lors de la reconnaissance géotechnique. L'Eurocod 7 partie 1 (EN 1997-1) [39] précise explicitement l'usage de l'expérience et des corrélations. Les corrélations doivent être faites entre les résultats d'au moins deux types d'essais [35, 160]. Cette technique consiste à développer des corrélations empiriques entre le potentiel de gonflement et la pression de gonflement avec d'autres paramètres simples à identifier par les ingénieurs.

L'application des corrélations pour la prédiction du gonflement des sols est simple, rapide et peu coûteuse par rapport aux essais oedométrique. Malgré cette simplicité, les modèles de prévision établis par ce type de méthodes sont souvent non universel, elle est valide seulement pour les sols de la région étudiée [16, 154], et fait appel souvent à plusieurs paramètres et approches souvent compliquées et qui permettent d'obtenir une pléthore de résultats souvent difficilement exploitables.

4.1 Méthodologie de travail

Dans cette étude, des nouvelles corrélations seront développées. Ces corrélations permettent d'estimer les paramètres des sols gonflants de la région ouest de l'Algérie en utilisant différents types de régressions. Il est fourni également une comparaison et une évaluation entre les paramètres d'identification du sol, on déduit les effets des divers paramètres, prévoyons le degré de gonflement et choisissons les meilleures régressions pouvant être appliquées pour notre cas.

Quatre types des régressions ont été testées pour formuler les modèles empiriques (des régressions linéaires simples ; multiples ; quadratiques et cubiques). Deux variables indépendantes simples sont employées pour formuler ces modèles empiriques, l'indice de plasticité (I_p) et la teneur en argile (C_c), elles sont corrélées avec le potentiel de gonflement (S_p) ; la pression de gonflement (P_s) et le coefficient de gonflement (C_g). Ces analyses des régressions seront développées avec le logiciel MINITAB version 18 à l'aide de la boîte d'outils des régressions sur un ordinateur personnel.

4.2 Résultats et interprétations

Dans le logiciel MINITAB18, les valeurs du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement en plus du coefficient de gonflement sont introduites comme des paramètres de sortie (réponse). Alors que la teneur en argile et l'indice de plasticité sont introduits comme paramètres d'entrées (prédicteur).

Tous les coefficients des variables utilisés dans cette analyse correspondent à un niveau de confiance de 95%. En plus, le coefficient de corrélation (R^2) sera présenté comme une statistique globale pour évaluer l'ajustement du modèle. Il est calculé par le rapport entre la somme des carrés résiduels (SSE) et la somme totale des carrés d'écart par rapport à la moyenne (SST) (formule (4.1)) [7]. Le R^2 est toujours compris entre 0 et 100%, et plus le R^2 est grand (proche de 100%), plus le modèle est adapté.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.1)$$

Où :

SSE est la somme des carrés résiduels (Error Sum of Squares),

SST est la somme des carrés totaux (Total Sum of Squares)

n est le nombre total des données.

y_i la valeur de la mesure i

\hat{y} représente la valeur prédite de y

\bar{y} représente la moyenne des réponses

Par la suite, les résultats d'analyse des régressions sont comme suivants :

4.2.1 Régressions linéaires simples

Le modèle de régression linéaire simple exprime la relation linéaire entre une variable expérimentale x (un prédicteur) et la réponse Y . Les résultats de cette analyse dans notre cas est comme suit :

Dans la Fig.4.1, les résultats d'une analyse de la régression linéaire simple de P_s ; S_p et C_g , en fonction de C_c présentent des corrélations très faibles, où les valeurs des coefficients de corrélations R^2 ne dépassent pas 7,3%, ce qui indique que le modèle est mal adapté aux données. Les équations obtenues par cette régression sont bien linéaires sous la forme :

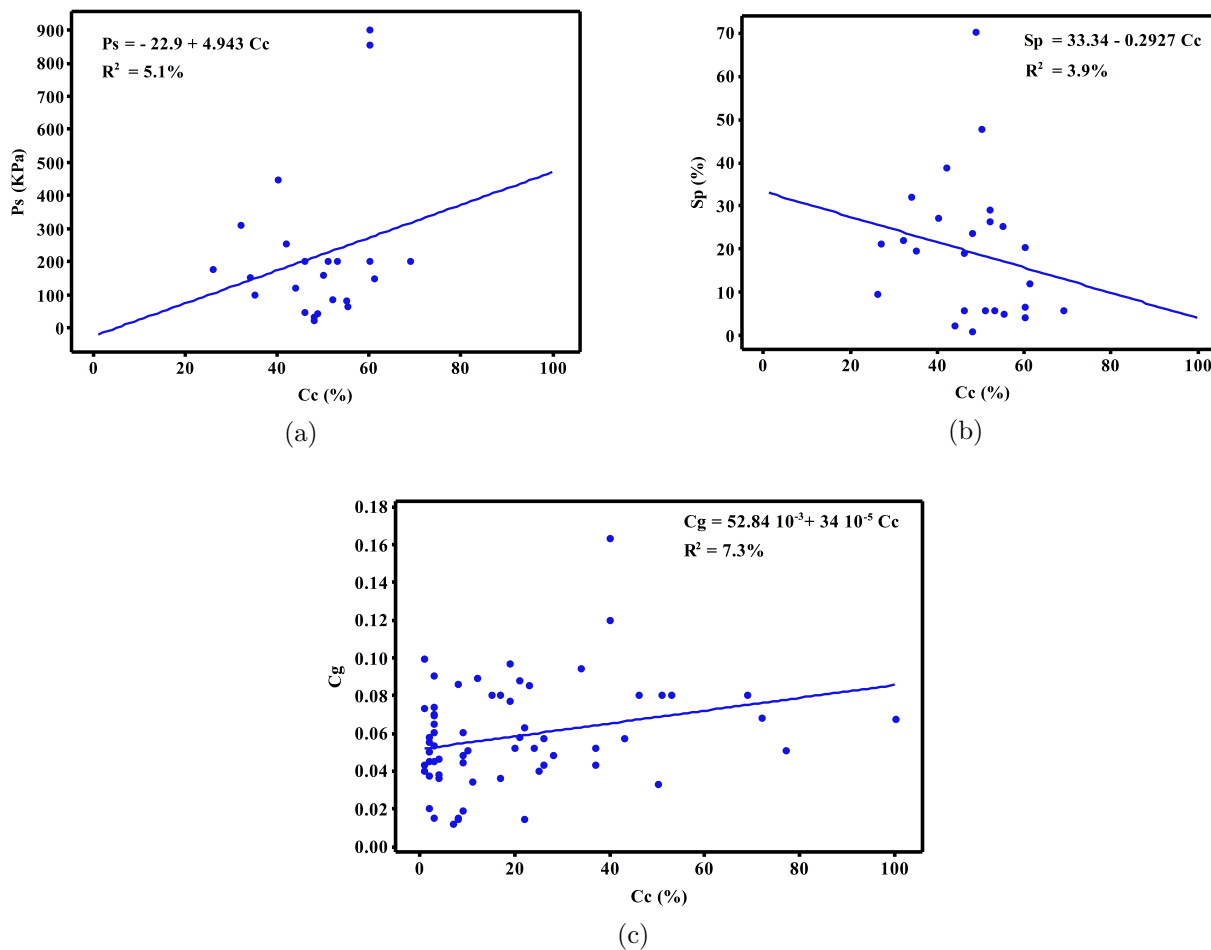


FIGURE 4.1 – Régressions linéaires simples de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c .

$$y = a x + b \tag{4.24}$$

Avec : $y = P_s$ (ou S_p , or C_g) et le variable $x = C_c$, tels que :

$$P_s = -22.9 + 4.943 C_c \tag{4.25}$$

$$S_p = 33.34 - 0.2927 C_c \quad (4.26)$$

$$C_g = 52.84 \cdot 10^{-3} + 34 \cdot 10^{-5} C_c \quad (4.27)$$

L'Eq.(4.26) obtenue par cette analyse correspond aux modèles empiriques (Eq.(1.10); Eq.(1.12)) proposés par Sabtan et Muntohar [91, 113], qui présentaient une corrélation linéaire entre le potentiel de gonflement et la teneur en argile, comme montrer dans le Tableau.1.4.

L'analyse de la régression linéaire simple de S_p en fonction de I_p montre de faibles corrélations, où les valeurs de R^2 ne dépassent pas 5.4%. D'autre part, l'analyse de la régression linéaire simple de P_s et C_g en fonction de I_p montre des corrélations moyennes comme indique en Fig.4.2, où les valeurs de R^2 varient de 33.6% à 39.9%. Les équations obtenues par cette régression, dans ce cas, sont linéaires et similaires à l'Eq.(4.24). Avec $y = P_s$ (ou S_p , ou C_g) et la variable $x = I_p$.

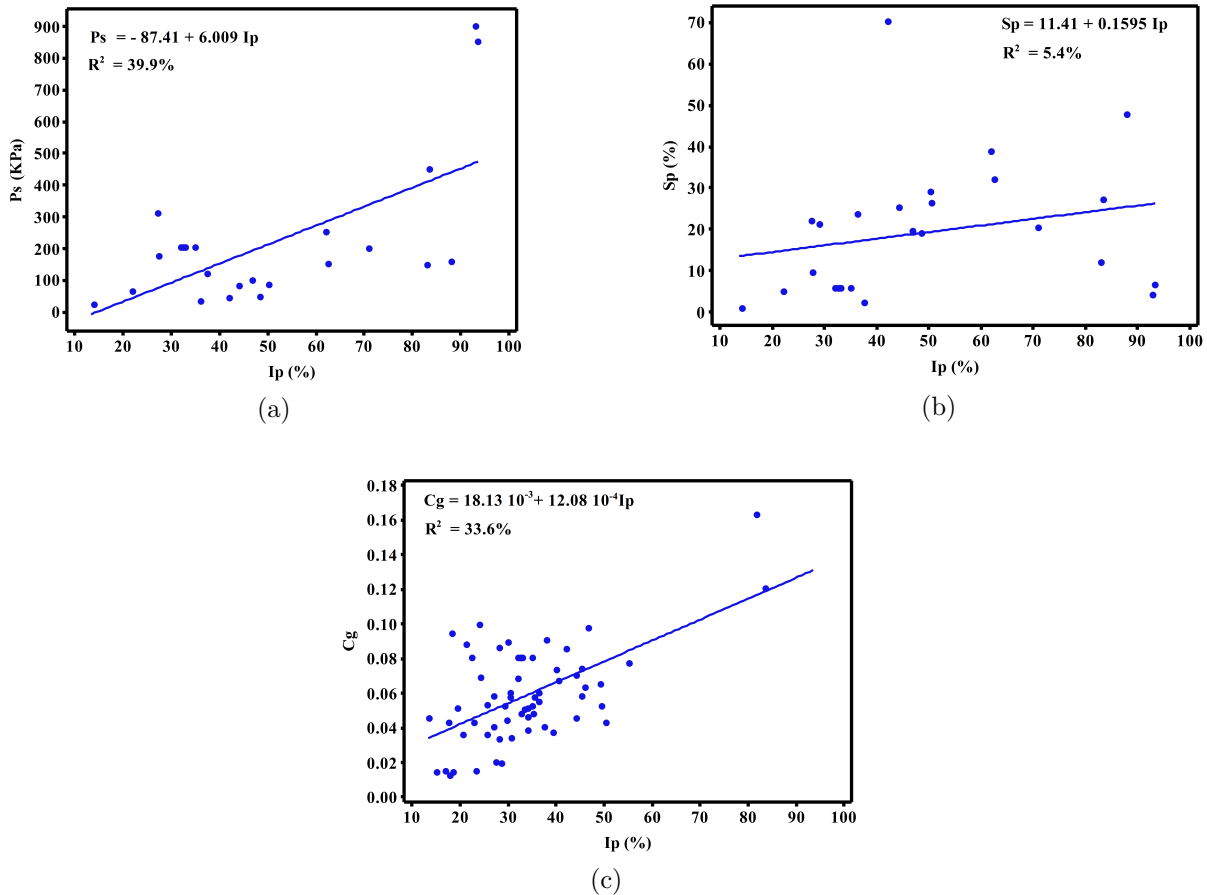


FIGURE 4.2 – Régressions linéaires simples de P_s , S_p et C_g en fonction de I_p .

$$P_s = -87.41 + 6.009 I_p \quad (4.28)$$

$$S_p = 11.41 + 0.1595 I_p \quad (4.29)$$

$$C_g = 18.13 \cdot 10^{-3} + 12.08 \cdot 10^{-4} I_p \quad (4.30)$$

les résultats de cette analyse indique également que l'Eq.(4.28) est similaire aux modèles empiriques (Eq.(1.1) ; Eq.(1.3)) trouvés par Berrah et al. [16] et Popescu [102]. Aussi que l'Eq.(4.29) est similaire aux modèles empiriques (Eq.(1.8) ; Eq.(1.13) ; Eq.(1.19)) proposés par Sabtan, Muntohar, Komornik et David [72, 91, 113]. .

4.2.2 Régressions linéaires multiples

Le modèle de régression linéaire multiple exprime la relation linéaire entre deux variables expérimentales ou plus x (deux prédicteurs ou plus) et la réponse Y .

Les résultats de l'analyse de la régression linéaire multiple du potentiel de gonflement S_p et du coefficient de gonflement C_g en fonction de C_c et I_p , comme indiqué à la Fig.4.3, représentent des moyennes corrélations, où les valeurs R^2 varient de 13.73% à 36.30%. D'autre part, les résultats de cette analyse du potentiel de gonflement P_s en fonction de C_c et I_p représentent de bonnes corrélations avec $R^2 = 40.11\%$ ce qui indique que le modèle est bien adapté aux données dans ce cas. Les équations d'analyse de régression linéaire multiple sont linéaires sous forme :

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + b \quad (4.31)$$

Avec $y = P_s$ or S_p , les deux variables $x_1 = C_c$ et $x_2 = I_p$, tels que :

$$P_s = -137 + 1.16 C_c + 5.87 I_p \quad (4.32)$$

$$S_p = 29.6 - 0.452 C_c + 0.228 I_p \quad (4.33)$$

$$C_g = 16.17 \cdot 10^{-3} + 21.1 \cdot 10^{-5} C_c + 11.42 \cdot 10^{-4} I_p \quad (4.34)$$

Les deux corrélations (Eq.(4.32) et Eq.(4.33)) sont similaires aux relations empiriques (Eq.(1.2) et Eq.(1.14)) déterminés par Sabtan [113], juste que ce dernier propose une corrélation linéaire multiple entre le potentiel de gonflement et la pression de gonflement et les trois paramètres suivants, la teneur en argile, l'indice de plasticité et la limite de liquidité. En outre, Nayak et Christensen [93] montrent de multiples relations non-linéaires (Eq.(1.5) et Eq.(1.17)) entre ces trois paramètres, comme indiqué au Tableau.1.4.

Par conséquent, les résultats obtenus par l'analyse de régression linéaire simple et multiple montrent que les méthodes de régression linéaire multiples sont mieux adaptées aux corrélations dans notre cas, avec des R^2 acceptable en géotechnique.

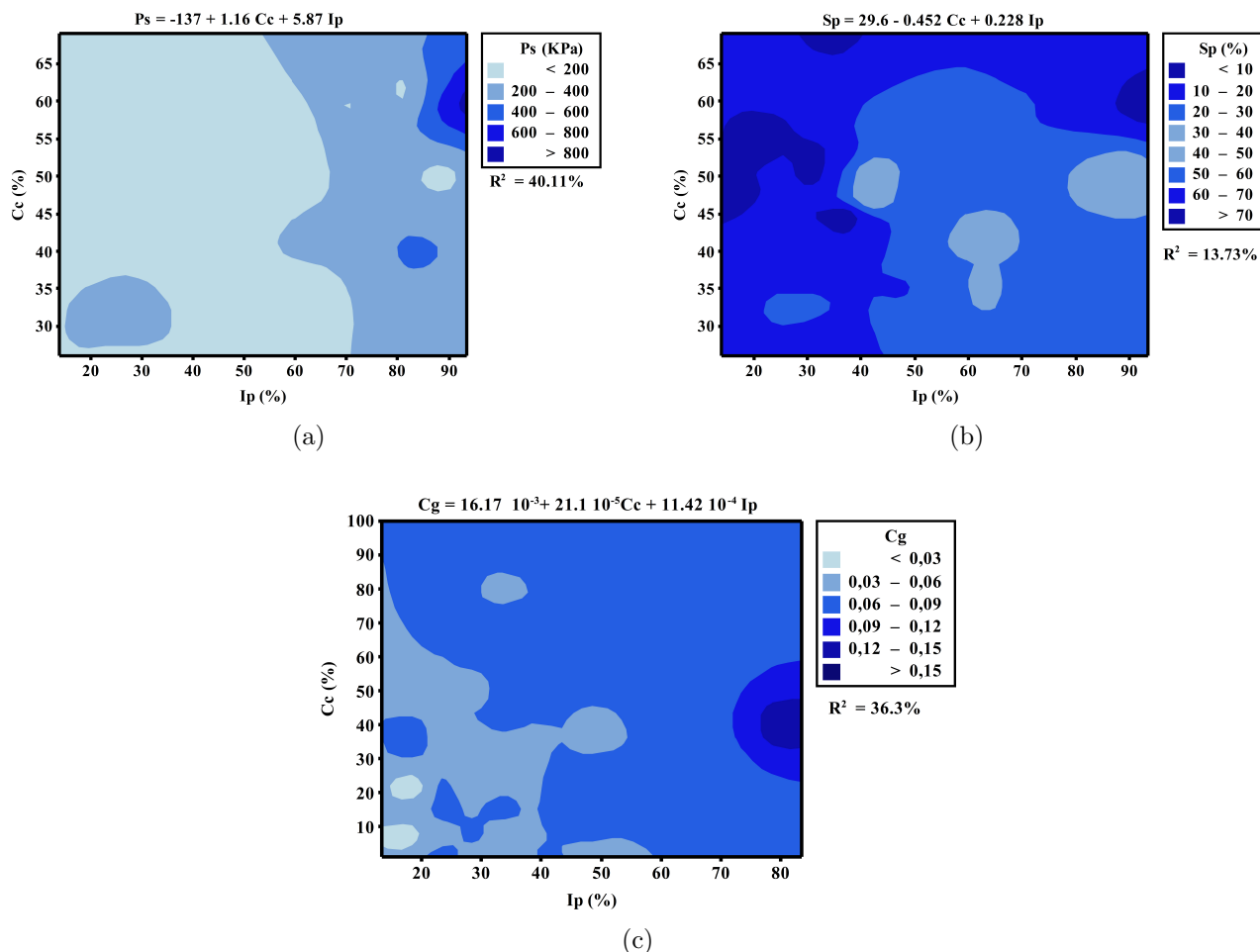


FIGURE 4.3 – Régressions linéaires multiples de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c et I_p .

4.2.3 Régressions quadratiques

Le modèle polynomial linéaire exprime les relations non-linéaires entre des variables expérimentales x (prédicteurs) et des réponses y . Les types des modèles polynomiaux linéaires qui sont utilisés dans notre analyse sont le modèle quadratiques et le modèle cubique. Les résultats d'analyse du modèle quadratique sont comme suit :

Les résultats d'analyse de la régression quadratique du potentiel de gonflement S_p , de la pression de gonflement P_s et du coefficient de gonflement C_g en fonction de la teneur en argile C_c sont présentés à la Fig.4.4 et exprimés par les équations indiquer ci-dessous (Eq.(4.35), Eq.(4.36) et Eq.(4.37)). Ces résultats montrent une faible corrélation ; les valeurs du coefficient de régression R^2 ne dépassent pas 11.4%. Dans ce cas, le modèle quadratique est mal adapté aux données.

$$P_s = 794.5 - 31.48 C_c + 38.62 \cdot 10^{-2} C_c^2 \quad (4.35)$$

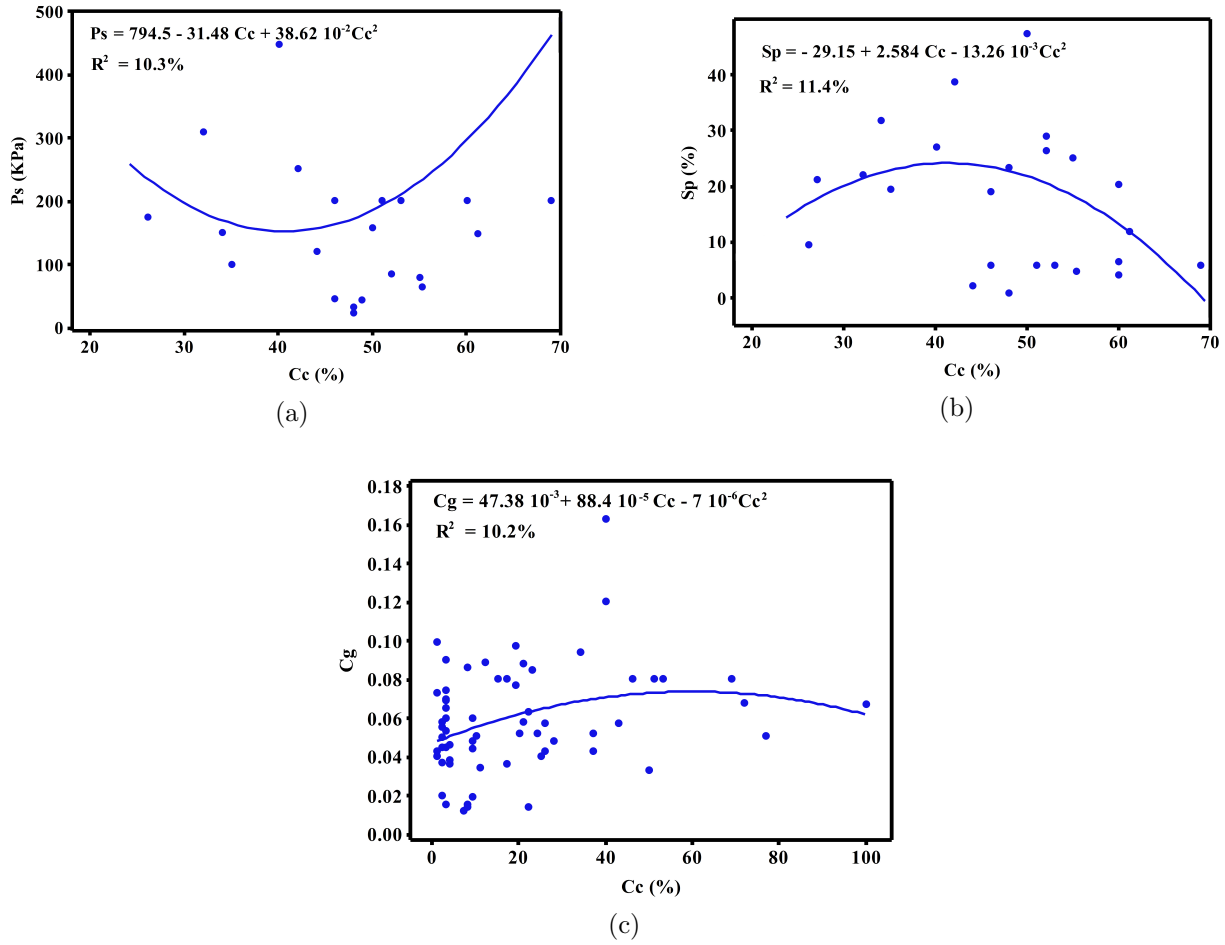


FIGURE 4.4 – Régressions quadratiques de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c .

$$S_p = -29.15 + 2.584 C_c - 13.26 \cdot 10^{-3} C_c^2 \quad (4.36)$$

$$C_g = 47.38 \cdot 10^{-3} + 88.4 \cdot 10^{-5} C_c - 7 \cdot 10^{-6} C_c^2 \quad (4.37)$$

De même, la Fig.4.5 montre les corrélations obtenues par l'analyse quadratique du potentiel de gonflement S_p , de la pression de gonflement P_s et du coefficient de gonflement C_g en fonction de l'indice de plasticité I_p . les résultats sont exprimés avec les équations ci-dessous.

$$P_s = 433.1 - 16.40 I_p + 19.69 \cdot 10^{-2} I_p^2 \quad (4.38)$$

$$S_p = -29.33 + 1.909 I_p - 15.41 \cdot 10^{-3} I_p^2 \quad (4.39)$$

$$C_g = 40.69 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-5} I_p + 1.4 \cdot 10^{-5} I_p^2 \quad (4.40)$$

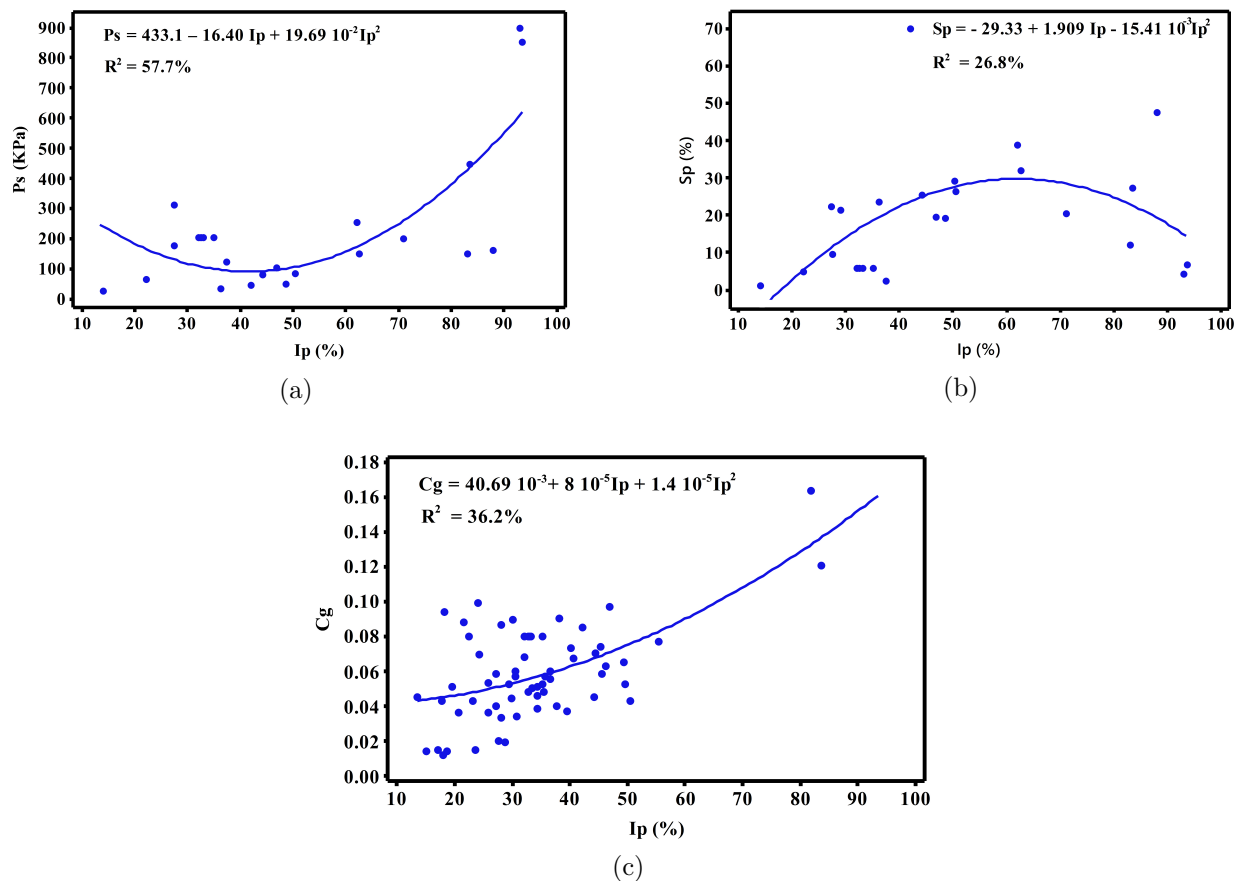


FIGURE 4.5 – Régressions quadratiques de P_s , S_p et C_g en fonction de I_p .

Avec des valeurs de R^2 jusqu'à 57.7% ; ces résultats montrent de bonnes corrélations et indiquent que le modèle quadratique est mieux adapté aux données dans ce cas.

4.2.4 Régressions cubiques

Les résultats d'analyse du modèle cubique pour la présente étude sont comme suite :

La Fig.4.6 indique les résultats d'analyse de la régression cubique du potentiel de gonflement S_p , de la pression de gonflement P_s et du coefficient de gonflement C_g en fonction de la teneur en argile C_c . Cette dernière montre des corrélations faibles exprimées par les équations suivantes :

$$P_s = 2251 - 131.9 C_c + 2.584 10^{-2} C_c^2 - 15.38 10^{-3} C_c^3 \quad (4.41)$$

$$S_p = -105.5 + 7.95 C_c - 15.01 10^{-2} C_c^2 + 8.39 10^{-4} C_c^3 \quad (4.42)$$

$$C_g = 48.67 10^{-3} + 59.9 10^{-5} C_c + 2 10^{-6} C_c^2 \quad (4.43)$$

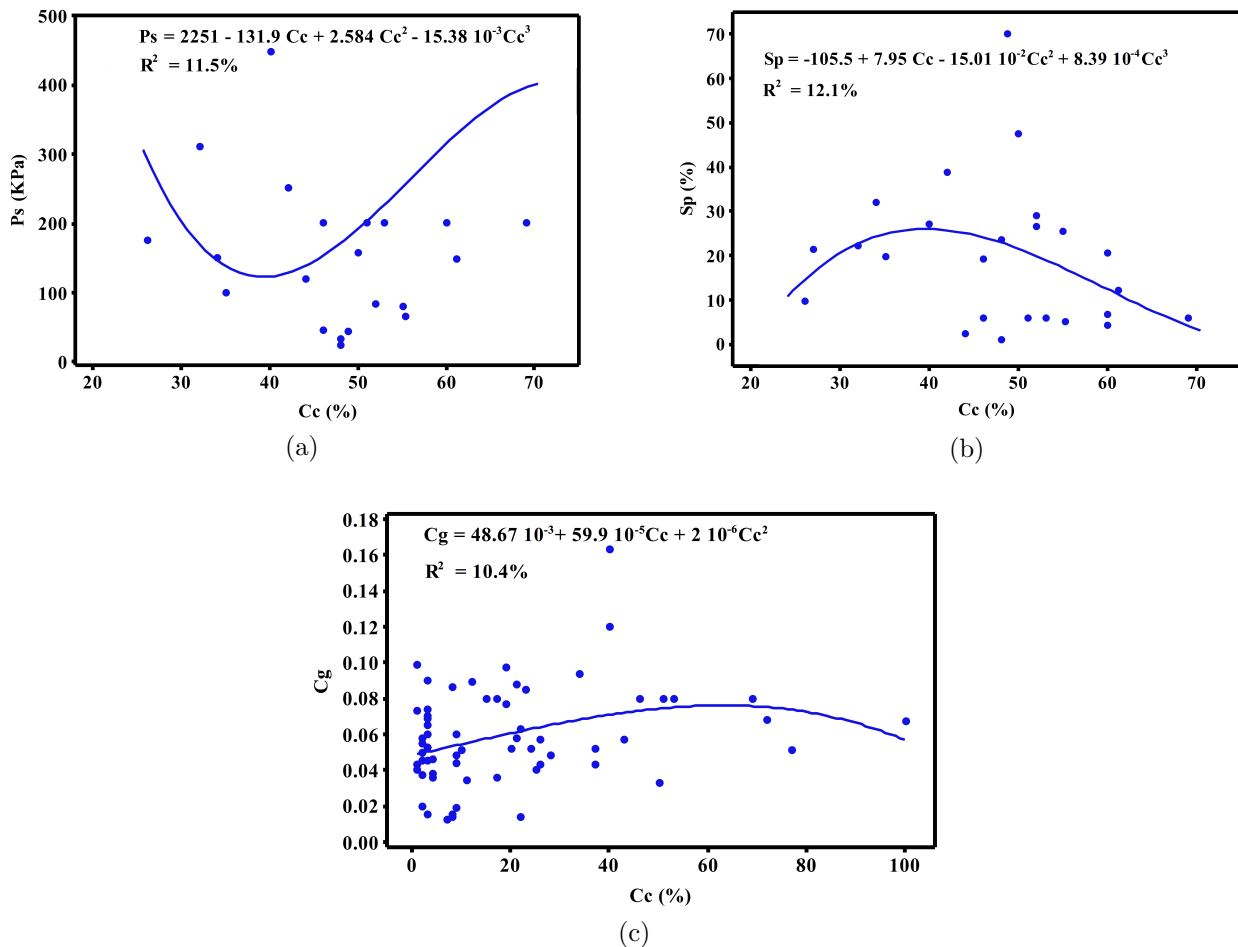


FIGURE 4.6 – Régressions cubiques de P_s , S_p et C_g en fonction de C_c .

En outre, les valeurs de R^2 varient de 10.4% à 12.1% ce qui indique que le modèle cubique est mal adapté aux données dans ce cas.

Les résultats d'analyse de la régression cubique du potentiel de gonflement S_p , de la pression de gonflement P_s et du coefficient de gonflement C_g en fonction de l'indice de plasticité I_p , sont indiqués à la Fig.4.7 et sont exprimées par les équations ci-dessous (Eq.(4.44), Eq.(4.45) et Eq.(4.46)). De plus, les valeurs de R^2 atteignent 72,6% ; donc, les résultats obtenus montrent de bonnes corrélations, le modèle cubique est mieux adapté aux données dans ce cas.

$$P_s = -438.7 + 47.21 I_p - 1.146 I_p^2 + 83.13 \cdot 10^{-4} I_p^3 \quad (4.44)$$

$$S_p = -7 + 29.3 \cdot 10^{-2} I_p + 18.58 \cdot 10^{-3} I_p^2 - 2.10 \cdot 10^{-4} I_p^3 \quad (4.45)$$

$$C_g = -19.32 \cdot 10^{-3} + 51.09 \cdot 10^{-4} I_p - 11.3 \cdot 10^{-5} I_p^2 + 10^{-6} I_p^3 \quad (4.46)$$

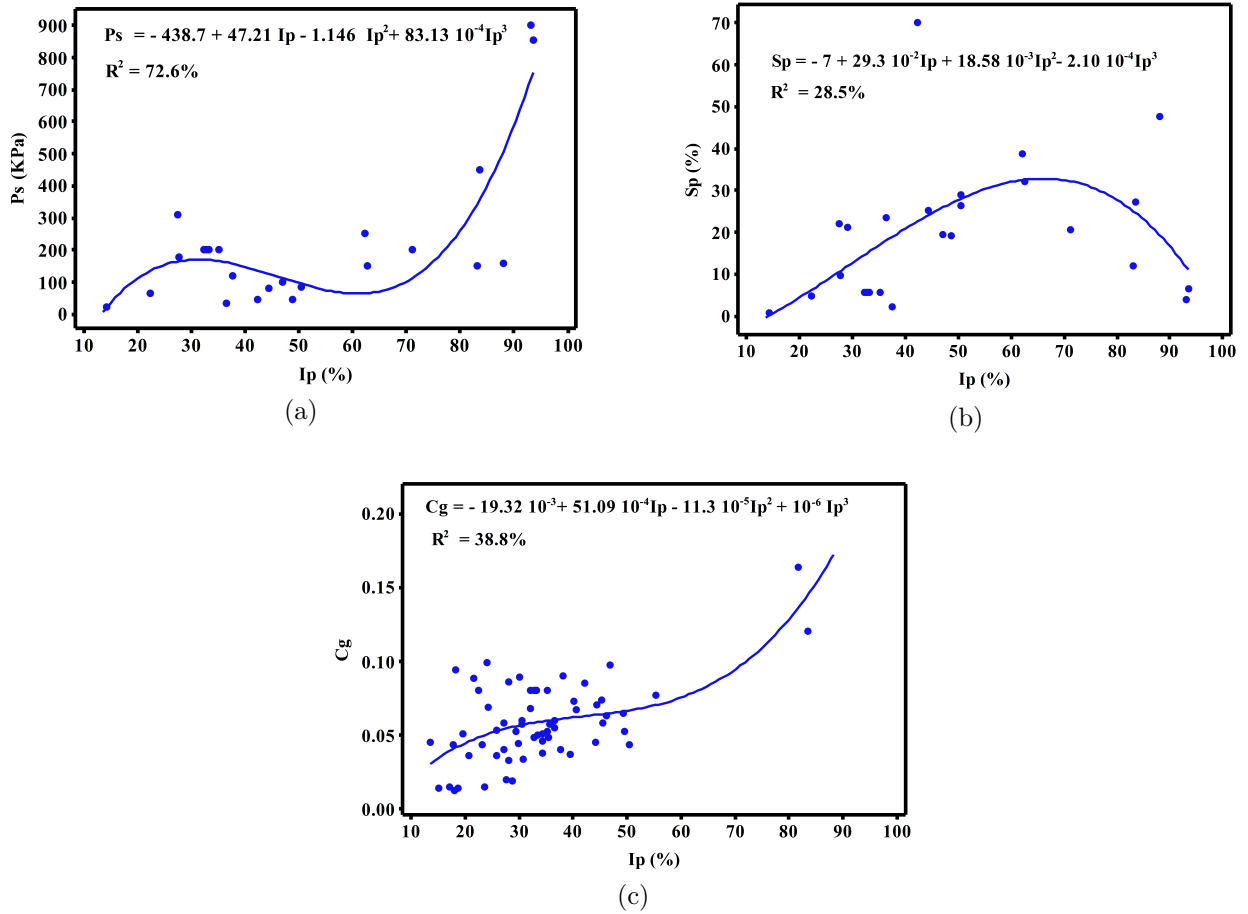


FIGURE 4.7 – Régressions cubiques de P_s , S_p et C_g en fonction de I_p .

Les équations Eq.(4.36) ; Eq.(4.39) ; Eq.(4.42) et Eq.(4.45) obtenues par l'analyse de la régression quadratique et cubique du potentiel de gonflement S_p , sont représentées en fonction de l'indice de plasticité I_p et de la teneur en argile C_c sous forme de :

$$S_p = a_1 x + a_2 x + a_3 x^2 \quad (4.47)$$

$$S_p = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (4.48)$$

Ces équations ne coïncident pas avec les modèles proposés par Seed et al., Azam et al., et Muntohar [8, 91, 118] qui sont présentés comme des relations empiriques simple non-linéaire entre S_p et I_p de type :

$$S_p = a x^b \quad (4.49)$$

Avec : a et b des constantes ; et : $x = I_p$ ou C_c .

Les résultats de l'analyse de la régression cubique de C_g en fonction de C_c sont sous forme d'une équation quadratique (Eq.(4.43)), dans laquelle le dernier coefficient est égal à zéro ($a_4 = 0$).

4.3 Comparaisons entre les types des régressions

La comparaison des quatre méthodes a indiqué que le modèle multiple de régression linéaire, les modèles de régressions non-linéaire cubique et quadratique donnent les meilleures corrélations comparées aux modèles de régression linéaire simples dans notre cas.

Les corrélations obtenues par l'analyse des quatre types de régressions du potentiel de gonflement, la pression de gonflement et le coefficient de gonflement en fonction de l'indice de plasticité donnent de bons coefficients de corrélations (R^2). Par conséquent, l'indice de plasticité a une grande influence sur le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et le coefficient de gonflement comparé aux la teneur en argile dans la présente étude.

Comme mentionné au chapitre 1, la plupart des chercheurs qui ont étudié le phénomène de gonflement des sols ont indiqué que le potentiel de gonflement et la pression sont les deux principaux paramètres qui quantifient le gonflement des sols. Ils ont proposé de nombreuses formes d'équations empiriques qui relient ces deux paramètres avec certaines propriétés physiques des sols, comme la limite de liquidité, la teneur en argile et l'indice de plasticité, à l'exception de quelques auteurs [66, 100, 158] qui ont constaté que le coefficient de gonflement est le paramètre le plus significatif pour identifier le risque de gonflement du sol et ils ont corrélé ce paramètre avec la valeur du bleu de méthylène [66] et l'indice de compression [158]. Enfin, des nouvelles corrélations entre ce paramètre (C_g) et l'indice de plasticité et la teneur en argile (Eq.(4.27) ; Eq.(4.30) ; Eq.(4.34) et Eq.(4.40) ; Eq.(4.43) et Eq.(4.46)) ont été proposés dans ce travail, qui peuvent être utilisés pour évaluer le gonflement dans la zone étudiée et peut dans d'autres parties du monde.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude des caractéristiques et du degré de risque du gonflement de quatre sites dans la partie ouest de l'Algérie a été faite. Sur cette base, des nouvelles corrélations ont été développées entre le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et le coefficient de gonflement en fonction la teneur en argile et de l'indice de plasticité. Les résultats obtenus dans cette étude apportent des données supplémentaire au contexte de la recherche sur les sols gonflants.

Chapitre 5

Application des plans d'expérience

La prévision du gonflement des sols est un problème très complexe qui dépend des facteurs géologiques, environnementaux et structurels en plus d'autres facteurs. Les méthodes statistiques classiques proposées pour prédire le gonflement des sols nécessitant de nombreuses expériences longues et coûteuses. À cet effet, une nouvelle approche sera présentée dans ce chapitre pour étudier ce type de sols. Cette approche consiste à utiliser un type de plan d'expérience pour examiner les effets et les interactions avec la détermination des niveaux optimaux des facteurs choisis sur le potentiel de gonflement et la pression de gonflement des sols.

Ce chapitre comprend trois parties. La première partie présente la méthodologie de Taguchi L_9 , qui a été choisi pour cette étude. La deuxième partie est consacrée à la méthode des réseaux neuronaux artificiels, qui a été appliqué pour terminer la conception orthogonale de Taguchi L_9 . La troisième partie comprend la validation des résultats obtenus par la méthode de Taguchi en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA).

5.1 Méthodologie de travail

La conception du plan d'expérience de Taguchi est faite par une base de données qui est extraite à partir de la base de données principale illustrée dans le [tableau 3.1](#). Après éliminations des valeurs aberrantes et des valeurs manquantes de la base, la base de données est réduite à 21 expériences.

Ensuite, une conception d'un tableau orthogonal de Taguchi est faite pour l'estimation du potentiel de gonflement. Pour cela, deux facteurs à trois niveaux ont été sélectionnés. Les facteurs sélectionnés sont la teneur en argile et l'indice de plasticité (comme mentionné au [paragraphe 3.1](#)). Les trois niveaux pour chacune des deux facteurs sélectionnés sont présentés dans le [tableau 5.1](#), dans la quelle :

- le symbole 1 indique un potentiel de gonflement de degré faible ;
- le symbole 2 indique un potentiel de gonflement de degré moyen ;
- le symbole 3 indique un potentiel de gonflement de degré élevé à très.

TABLE 5.1 – Facteurs et niveaux [\[33\]](#).

Facteurs	niveaux		
	1	2	3
C_c : teneur en argile (%)	29	32	60
I_p : indice de plasticité (%)	17.1	27.3	93.5

Les trois niveaux ont été choisis selon la classification du BRE, 1980 (voir [tableau 5.2](#)). On a utilisé les mêmes niveaux des paramètres pour l'estimation de la pression de gonflement.

TABLE 5.2 – Potentiel de gonflement selon le BRE « Building Research Establishment », (1980) [\[33\]](#).

I_p (%)	$C_c < 2um$ (%)	S_p (%)
> 35	> 95	Très élevé
22–30	60–95	Élevé
18–22	30–60	Moyen
< 18	< 30	Faible

Dans la méthode factorielle complète de l'étude expérimentale, les mesures du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement en fonction de deux facteurs a trois niveaux nécessiteraient chacun des $(niveaux)^{facteurs} = 3^2$ ou 9 expériences ainsi que 3 répétitions pour toutes les combinaisons de paramètres, donc exige 27 nombres d'échantillons pour effectuer 9 expériences. Afin d'économiser sur le coût et le temps d'expérience, la matrice orthogonale de Taguchi sera appliquée pour obtenir des résultats similaires pour l'estimation du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement. Le tableau orthogonal L_9 s'est avéré approprié et il a été donc choisi.

Le [tableau 5.3](#) indique la conception du plan de Taguchi L_9 . Seulement, il a été constaté que les données disponibles ne correspondaient pas à celles requises pour la conception du tableau orthogonal de Taguchi L_9 , qui a été choisie pour cette étude en raison de la non-orthogonalité du tableau. Par conséquent, un réseau de neurones artificiel a été créé avec la base des données expérimentales disponibles pour calculer la pression de gonflement et le potentiel de gonflement du teneur en argile et de l'indice de plasticité afin de compléter la conception de tableau orthogonal de Taguchi L_9 . Pour que le tableau soit orthogonal, il faut qu'entre chaque paire de colonnes, chaque combinaison de variables apparaisse comme un nombre égal de fois [\[109\]](#). Cependant, il était impossible de définir les valeurs du premier paramètre (teneur en argile) pour un niveau et de fixer le second paramètre (l'indice de plasticité) dans l'autre niveau ou le niveau opposé dans ce cas.

Dans le [tableau 5.3](#), les niveaux des combinaisons de variables connus sont (1,1), (2,2), (3,3) et les combinaisons de variables inconnues sont calculées par le réseau de neurones.

TABLE 5.3 – Conception expérimentale utilisant un tableau orthogonal Taguchi L_9 [\[33\]](#).

C_c	I_p
1	1
1	2
1	3
2	1
2	2
2	3
3	1
3	2
3	3

Enfin, la conception du réseau orthogonal L_9 de Taguchi était complété. Par la suite, une analyse de Taguchi a été faite pour déterminer les différents effets et les interactions ainsi que les conditions optimales des paramètres étudiés. La structure de la méthodologie suggérée est illustrée à la [Fig 5.1](#).

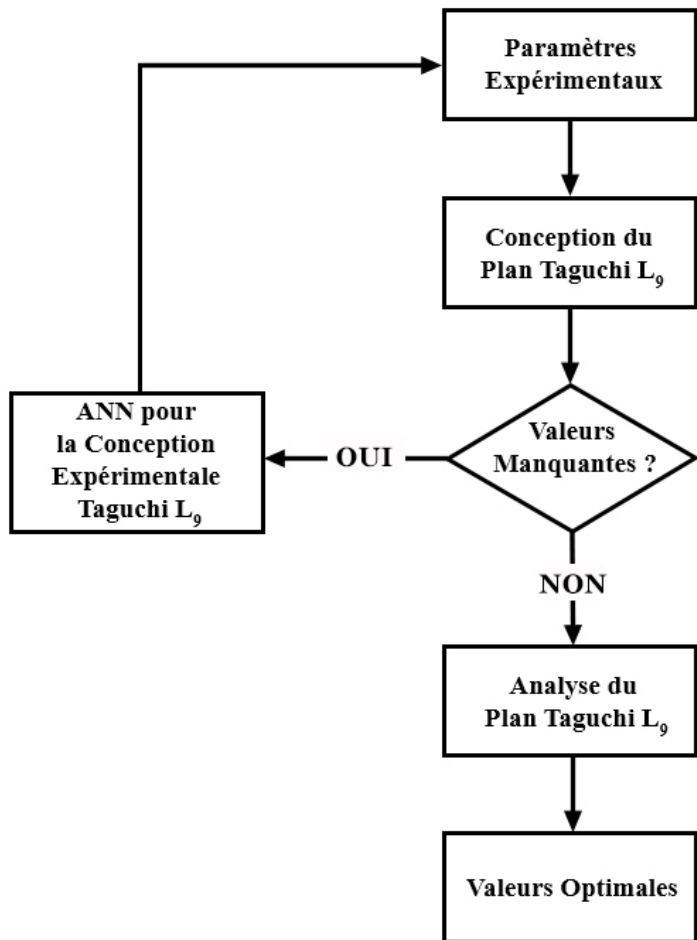


FIGURE 5.1 – Structure de la méthodologie proposée.

5.2 Méthode d'ANN pour compléter le plan d'expérience de Taguchi

Les réseaux de neurones artificiels (*Artificial Neural Networks* 'ANN') sont des méthodes de calcul intelligentes et efficace pour modéliser le comportement des phénomènes physiques. Ces types de méthodes ont été développés pour la modélisation des problèmes complexes dans lesquels la relation entre les variables du modèle est inconnue, et ceci en prenant des échantillons de données plutôt que l'ensembles des données pour arriver à des solutions. Elles inspirent par le comportement du cerveau et du système nerveux humains [27, 64, 106, 120]. En outre, la généralisation, l'adaptation, l'approximation universelle des fonctions, traitement parallèle des données, robustesse, etc., sont les autres caractéristiques avantageuses de cette technique qui permet d'économiser le temps et l'argent [78, 106].

Récemment, les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été largement appliqué avec succès dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, et cela, selon les auteurs [40, 120] qui ont aussi mentionné nombreuses d'applications de l'ANN dans la littérature en génie civil et géotechnique. Par exemple, les ANN ont été utilisés dans l'étude de la liquéfaction [13, 14, 58, 71]; de la stabilité des pentes et les ouvrages de soutènement [45, 115], de la prédiction de la pression de gonflement du sol [27], de la conception des tunnels et des fouilles souterraines [123] et le tassement des structures [119, 121], etc.

L'architecture du réseau neuronal, généralement comprend un nombre de couches cachées, le nombre de nœuds ou neurone cachés, la fonction d'activation (sigmoïde, linéaire, tangente) et le nombre de nœuds de sortie, comme illustré à la Fig 5.2. Le neurone de la couche précédente et de la couche suivante est relié avec des poids ajustables (w_i), dans lequel, chaque neurone a une connexion complète à toutes les neurones de la couche suivante, mais il n'y a pas de connexion entre les neurones d'une même couche. De plus, chacune a une valeur de seuil ($bais_j$) qui la fait fonctionner ou pas, en fonction du niveau du signal d'entrée, cette valeur est la somme des poids multipliés par l'entrée de chaque élément de traitement dans la couche d'entrée précédente. Ensuite, cette entrée est traitée par la fonction de transfert qui donne la sortie de neurone.

La formule (5.1) décrit la somme pondérée des composantes des entrées de chaque neurone où (j) est le nombre de neurones dans la couche antérieure [33, 96, 106].

$$(input)_i = \sum_{k=0}^n w_{ij} + bias_j \tag{5.1}$$

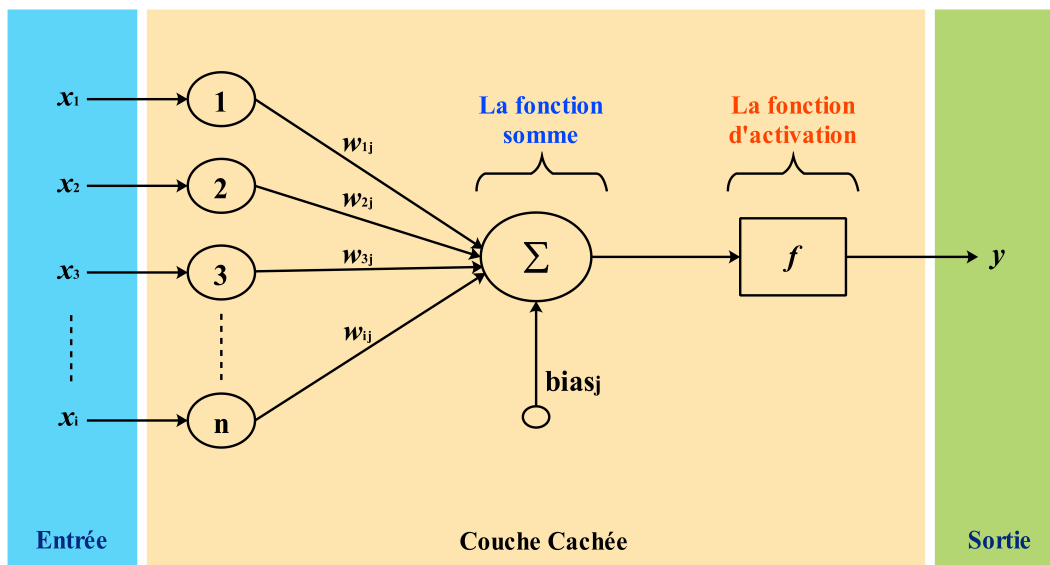


FIGURE 5.2 – Structure d'un réseau de neurones simple.

Le but de cette partie est d'utiliser la technique des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour développer un modèle capable de prédire avec précision le potentiel de gonflement et la pression de gonflement, afin de compléter le plan de Taguchi proposé. Pour cela, un modèle est construit et valorisé selon deux paramètres : la teneur en argile et l'indice de plasticité. Ensuite et sur la base des données expérimentales rassemblées, une application de la technique de réseau neuronal est réalisée pour obtenir une formulation d'ANN précis pour la prédiction du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement en fonction des deux paramètres cités ci-dessus.

5.2.1 Modélisation ANN

Dans la présente étude, 21 expériences sont disponibles pour former le réseau. D'autre part, trois processus importants doivent être pris en compte dans la construction d'un réseau ANN performant : la phase d'apprentissage, la phase de validation et la phase de test. De ce fait, l'ensemble complet des données sera divisé en trois sous-ensembles, qui sont les suivantes :

- **le sous-ensemble d'apprentissage**, composé de **70%** d'expériences de la base de données complète, il sera essentiellement utilisé dans le processus d'apprentissage ;
- **le sous-ensemble de validation**, composé de **15%** de l'ensemble complet des données, il permet de vérifier si les capacités des solutions de généralisation sont à des niveaux acceptables ;
- **le sous-ensemble de test**, composé de **15%** de l'ensemble de données complet, il est utilisé pour évaluer les performances de prédiction du modèle.

L'ensemble des données d'apprentissage, pour le potentiel de gonflement et la pression de gonflement, sont présentés aux [tableaux 5.4](#) et [5.5](#), respectivement. Les entrées sont traitées du début à la fin de ce réseau par une *fonction de transfert sigmoïde* dans la couche cachée et une *fonction de transfert linéaire* dans la couche de sortie.

En outre, l'algorithme d'apprentissage «back-propagation» a été utilisé pour cette étude. Cette méthode consiste essentiellement à ajuster les poids et les biais jusqu'à la stabilisation du réseaux, en rendant les sorties très proche des sorties cibles du réseau, ceci se fait par les calculs itératifs qui sont mis à jour à l'erreur quadratique moyenne (MSE) entre la sortie calculée et les cibles souhaitées avec l'envoi du signal de correction de la fin du réseau à son début.

Les [formules \(5.2\)](#) et [\(5.3\)](#) décri le coefficient de corrélation (R) et l'erreur quadratique moyenne (MSE) respectivement, Où (Y_m) indique les valeurs cibles réelles mesurées, (Y_p) indique les valeurs de sortie prévues et N représente le nombre total des données. Ces deux analyses statistiques sont utilisées pour évaluer la performance du modèle dans notre étude. L'estimation du modèle est plus précise quand l'erreur quadratique moyenne est très petite et la valeur du (R) est proche de 1. En d'autres termes, les résultats souhaités et les résultats de l'ANN pour l'ensemble de formation deviennent très proches les uns des autres.

$$R = \sqrt{\frac{\sum Y_m^2 - \frac{(\sum (Y_m - Y_p))^2}{N}}{\sum Y_m^2}} \quad (5.2)$$

$$MSE = \left(\frac{\sum (Y_m - Y_p)}{N}\right)^2 \quad (5.3)$$

Pour la formation, le modèle de réseaux ANN est développé avec le logiciel MATLAB (R2015b) à l'aide de la boîte d'outils du réseau neuronal, et cela sur un ordinateur personnel.

TABLE 5.4 – L'ensemble de données d'apprentissage pour S_p [33].

Entrée		Sortie
C_c	I_p	S_p
55.3	22	4.75
61.2	83	11.89
48	14	0.87
26	27.5	9.5
32	27.3	22
35	46.8	19.5
42	62	38.7
60	71	20.4
34	62.5	31.9
46	48.5	19
55	44.2	25.2
52	50.3	28.9
29	17.1	9.7
42	22.3	13.5
69	35	5.72
40	83.43	27.08
60	93.5	47.5
44	37.42	4
48	36.2	6.5
44.8	42.04	2.17
50	87.94	23.44

TABLE 5.5 – L'ensemble de données d'apprentissage pour P_s [33].

Entrée		Sortie
C_c	I_p	P_s
55.3	22	65
61.2	83	148
48	14	23
26	27.5	175
32	27.3	310
35	46.8	100
42	62	252
60	71	200
34	62.5	150
46	48.5	46
55	44.2	80
52	50.3	84
29	17.1	100
42	22.3	100
69	35	201.3
40	83.43	447
60	93.5	852
44	37.42	120
48	36.2	33
44.8	42.04	43
50	87.94	158

5.2.2 Résultats et interprétations

Afin de déterminer l'architecture optimale du réseau neuronal (*ANN*) utilisée pour cette étude, plusieurs itérations ont été effectuées avec différents nombres de nœuds et de couche cachée et les résultats sont comme suite :

a) L'architecture optimale du réseau neuronal sélectionnée pour la modélisation du potentiel de gonflement est indiquée à la [Fig 5.3](#). Le réseau comporte deux couches d'entrée, une couche cachée et d'une couche de sortie. Le réseau sélectionné est de taille 2-12-1-1 dans laquelle :

- le nombre d'unités de couche d'entrée est égal à deux (2), Cela signifie qu'il y a 2 nœuds dans la couche d'entrée correspondant à deux paramètres, à savoir : la teneur en argile C_c et l'indice de plasticité I_p .
- le nombre de couche cachée est égal à douze (12 neurones).
- le nombre d'unité de couche de sortie est égal à un (1).

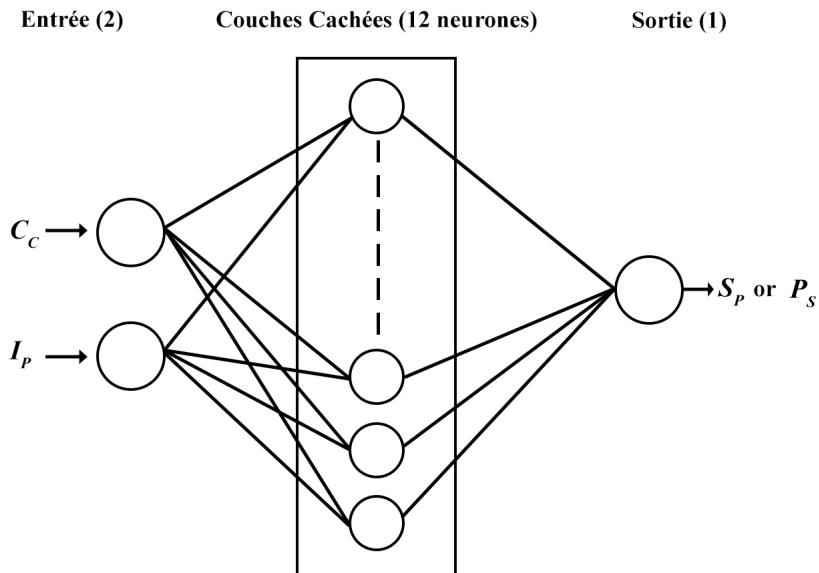


FIGURE 5.3 – Structure d'ANN proposée [33].

Les valeurs statistiques du potentiel de gonflement obtenues à partir de l'apprentissage, de la validation et des tests du modèle *ANN* montrent que l'erreur quadratique moyenne (*MSE*) à une valeur de $6.67 \cdot 10^{-09}$ et un coefficient de corrélation (*R*) égale presque à 1 entre la sortie calculée et les cibles souhaitées de l'ensemble d'apprentissage. Ces résultats sont illustrés dans le [tableau 5.6](#) et à la [Fig 5.4](#) et qui signifie qu'un très bon accord entre la production et la cible été atteint. Par conséquent, l'analyse du modèle donne de bons résultats pour la validation de l'ensemble de tests et pour la prédiction du potentiel de gonflement.

L'expression mathématique suivante présente le modèle élaboré pour la prédiction du potentiel de gonflement :

$$Output = purelin(Lw(logsig(iw * input + b_1)) + b_2) \quad (5.4)$$

Où,

input : indique les valeurs d'entrées (C_c et I_p)

Output : indique la valeur de sortie (S_p)

iw : poids de la couche cachée

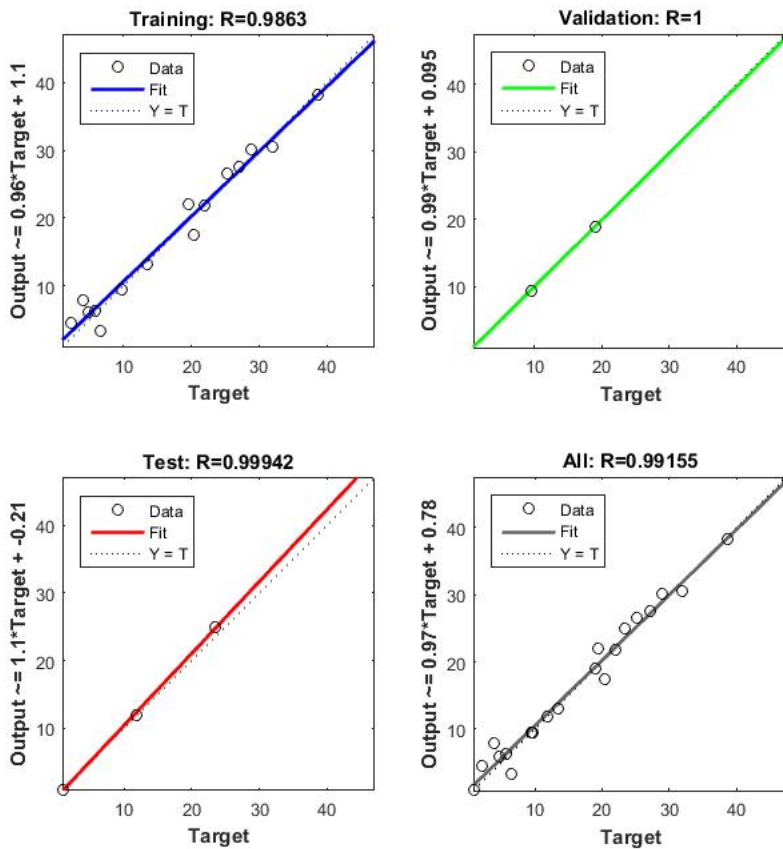


FIGURE 5.4 – Résultats d'analyse ANN pour le potentiel de gonflement S_p .

$$iw = \begin{pmatrix} -0.36192 & 5.6612 \\ 5.0392 & 1.05 \\ 4.1222 & -2.5638 \\ 5.2626 & 0.32798 \\ 2.1136 & 4.2167 \\ 1.3102 & -5.9121 \\ 3.5574 & 4.9895 \\ 1.5591 & 3.0934 \\ 2.6435 & -4.2016 \\ 5.0879 & -3.7719 \\ 4.8493 & 5.7752 \\ -1.6621 & 5.0393 \end{pmatrix}$$

Lw : Poids de la couche de sortie

$$Lw = (0.5019 \quad -0.9389 \quad -0.2611 \quad 1.0258 \quad -1.4795 \quad -0.8763 \quad 0.1901 \quad -1.0111 \quad -0.8155 \quad 0.5814 \quad 0.4477 \quad 0.9761)$$

b_1 : indique le *bias* de la couche cachée

$$b_1 = \begin{pmatrix} 4.2707 \\ -3.7812 \\ -2.8389 \\ -1.96 \\ -1.4922 \\ -0.70159 \\ -0.28959 \\ 1.5135 \\ 2.1806 \\ 2.319 \\ 1.062 \\ -4.2943 \end{pmatrix}$$

b_2 : indique le *bias* de la couche de sortie

$$b_2 = (-0.21586)$$

b) Les résultats de l'analyse ANN pour la prédiction de la pression de gonflement ont montrés que l'architecture optimale obtenue est désignée comme 2-12-1-1, c'est la même architecture de réseau neuronal indiqué dans la [Fig 5.3](#).

Les valeurs statistiques obtenues à partir de l'apprentissage, de la validation et des tests de ce modèle indiquent une valeur de $1.82 \cdot 10^{-10}$ de l'erreur quadratique moyenne (*MSE*) et un coefficient de corrélation (*R*) entre la sortie calculée et les cibles souhaitées de l'ensemble d'apprentissage presque égale à 1. Ces résultats sont illustrés dans le [tableau 5.6](#) et à la [Fig 5.5](#) et qui indique que le modèle de réseau de neurones proposé s'avèrent assez satisfaisants pour la prédiction du potentiel de gonflement.

La même expression mathématique ([formule \(5.4\)](#)) élaboré pour la prédiction de la pression de gonflement avec :

input : indique les valeurs d'entrées (C_c et I_p)

Output : indique la valeur de sortie (P_s)

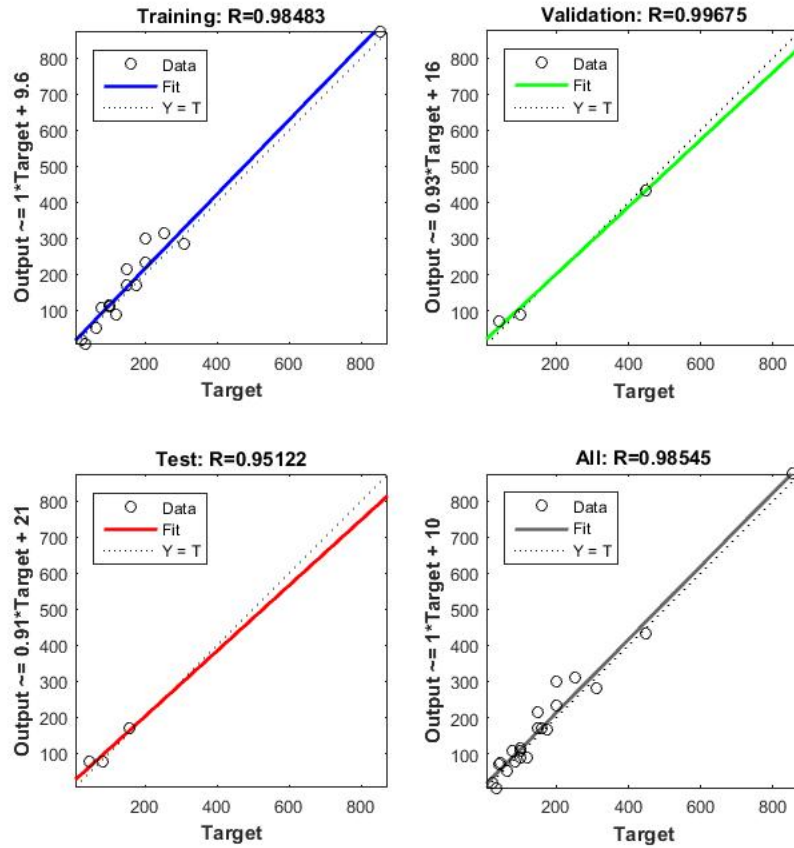


FIGURE 5.5 – Résultats d’analyse ANN pour la pression de gonflement P_s .

$$iw = \begin{pmatrix} -0.5711 & 12.6717 \\ -1.7889 & 10.0855 \\ 9.5708 & -3.1887 \\ -7.8323 & -2.5501 \\ 10.1174 & -2.4082 \\ -7.7942 & -5.5748 \\ 9.7303 & 0.083049 \\ -9.2117 & -0.093067 \\ -0.74691 & 11.5797 \\ 3.6877 & 8.4551 \\ 8.6657 & 4.5209 \\ -9.1103 & -2.6385 \end{pmatrix}$$

$$Lw = (5.6874 \ 0.4827 \ 1.191 \ 0.6681 \ 1.0141 \ -0.38583 \ -1.6626 \ -0.4277 \ 0.4933 \ -0.1309 \ -1.0939 \ -0.9567)$$

$$b_1 = \begin{pmatrix} -13.6132 \\ 7.0888 \\ -5.6932 \\ 6.2318 \\ -0.9472 \\ 0.119 \\ 0.1667 \\ -3.946 \\ 0.649 \\ 7.0789 \\ 8.0461 \\ -9.9539 \end{pmatrix}$$

b_2 : indique le bias de la couche cachée 2

$$b_2 = (-0.22095)$$

TABLE 5.6 – Les valeurs statistiques des modèles ANN sélectionnés [33].

Modèle ANN pour	Paramètres statistiques				
	apprentissage	validation	tests	All apprentissage	MSE
	R	R	R	R	
Potentiel de gonflement	0.986	1	0.999	0.991	$6.67 \cdot 10^{-09}$
Pression de gonflement	0.984	0.996	0.951	0.985	$1.82 \cdot 10^{-10}$

5.3 Analyse de Taguchi

Dans cette partie, les données non-disponibles dans le plan orthogonal de Taguchi L_9 pour l'estimation du potentiel de gonflement et la pression de gonflement (voir [paragraphe 5.1](#)) ont été calculées avec les modèles d'ANN proposé ci-dessus (voir [paragraphe 5.2.1](#)). Les plans orthogonaux de Taguchi L_9 ont été donc complétés et indiqués dans le [tableau 5.7](#) et le [tableau 5.8](#), respectivement. Ces tableaux orthogonaux ont été désignés par le code L_9 , lequel est composé de 9 lignes et de 3 colonnes, telles que présentées ci-dessus.

Comme signalé dans le [chapitre 2](#), la méthode Taguchi nécessite l'utilisation du rapport Signal/bruit (S/N) afin d'évaluer l'influence des facteurs sur une réponse. Le rapport S/N représente la mesure de l'écart carré moyen par rapport à la fonction idéale. Ce rapport S/N est calculé pour trois catégories en fonction de l'objectif du problème (les trois catégories ont été présentées dans le [paragraphe 2.7](#)).

TABLE 5.7 – Conception orthogonale de Taguchi L_9 pour le potentiel de gonflement [33].

C_c	I_p	S_p
29	17.1	9.700
29	27.3	17.510
29	93.5	49.118
32	17.1	10.075
32	27.3	22.000
32	93.5	45.069
60	17.1	22.015
60	27.3	28.113
60	93.5	47.500

TABLE 5.8 – Conception orthogonale de Taguchi L_9 pour la pression de gonflement [33].

C_c	I_p	P_s
29	17.1	100.000
29	27.3	255.080
29	93.5	674.991
32	17.1	202.483
32	27.3	310.000
32	93.5	751.389
60	17.1	219.276
60	27.3	289.914
60	93.5	852.000

L'un des objectifs les plus importants dans une étude sur le gonflement du sol est d'identifier les conditions optimales dans lesquelles le gonflement du sol est maximal. Par conséquent, l'analyse *plus élevé est le meilleur* a été utilisée pour faire cette étude. Selon Taguchi [33, 134], l'équation utilisée pour calculer le rapport (S/N) pour *la plus élevé est le meilleur* est comme suit :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.5)$$

Où :

- y est la moyenne des données observées ;
- n est le nombre de répétitions de l'essai i

Les diagrammes des effets principaux sont également utilisés pour voir quels facteurs influencent plus sur la réponse et avec la comparaison des changements dans les moyennes de chaque niveau ; tel qu'il représente la moyenne des réponses de chaque niveau de facteur relié par une ligne. Si la ligne est horizontale (parallèle à l'axe des X), cela signifie qu'aucun effet n'est principal, et que chaque niveau du facteur affecte la réponse de la même manière et la moyenne de réponse est la même pour tous les niveaux de facteurs. Si la ligne n'est pas horizontale, cela indique l'existence

d'un effet principal et que les niveaux du facteur affectent la réponse différemment. En outre, plus la pente de la ligne est raide, plus la valeur de l'effet principal est élevée [13].

Enfin, une analyse des plans orthogonaux de Taguchi a été effectuée pour calculer les rapports moyens et les rapports S/N de chaque paramètre (S_p et P_s).

5.3.1 Résultats et interprétations

Les résultats d'analyses de Taguchi, qui ont été effectuée afin d'évaluer les effets des paramètres C_c et I_p sur les le potentiel de gonflement et la pression de gonflement en utilisant le logiciel MINITAB18 sont comme suit :

5.3.1.1 Analyse de Taguchi L_9 pour l'estimation du potentiel de gonflement

Les résultats d'analyse de Taguchi L_9 pour l'estimation du potentiel de gonflement (S_p) sont indiqués au graphique des effets principaux pour les moyennes et le rapport S/N (Fig 5.6 et 5.7). L'examination de ces graphiques montre que les deux paramètres sélectionnés (C_c et I_p) ont un effet significatif sur le potentiel de gonflement. En outre, ces résultats ont également montré que le potentiel de gonflement augmente à mesure que l'indice de plasticité et la teneur en argile augmentent, et que l'indice de plasticité a le plus grand effet sur le potentiel de gonflement.

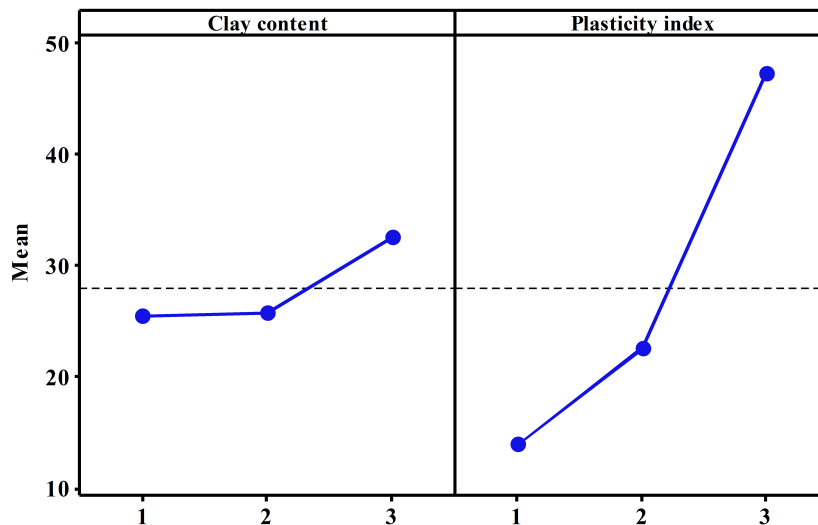


FIGURE 5.6 – Effets de C_c et de I_p sur le potentiel de gonflement [33].

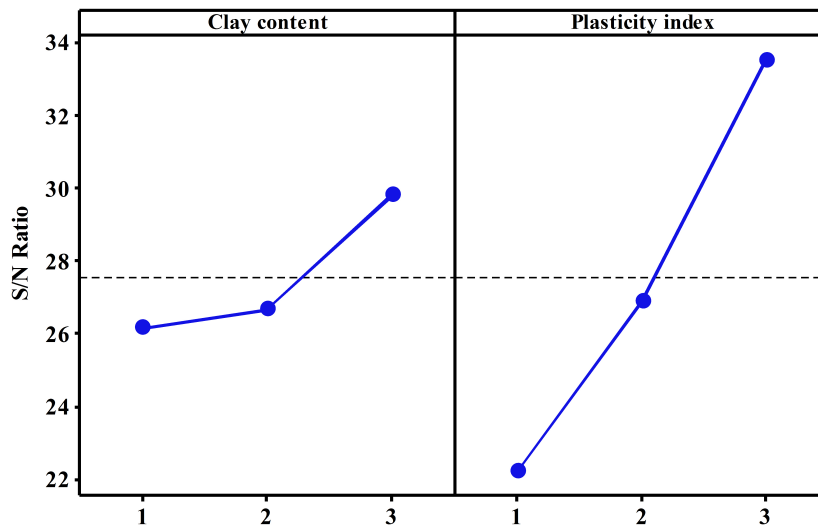


FIGURE 5.7 – Rapport S/N pour le potentiel de gonflement [33].

Les niveaux les plus élevés (3, 3) spéciaux pour un effet sur les moyennes et les rapports S/N ont donné d'excellente combinaison de niveaux, par conséquent, la combinaison optimale du potentiel de gonflement prédite pour les paramètres examinés est l'indice de plasticité $I_p = 93.5\%$ et la teneur en argile $C_c = 60\%$.

L'effet factoriel le plus important est noté pour l'indice de plasticité. Ces résultats peuvent être confirmés dans le [tableau 5.7](#), où la plus grande valeur du potentiel de gonflement était au niveau le plus élevé (3, 3), ainsi que la sortie du réseau neuronal pour l'entrée (60, 93.5) était $S_p = 47,632\%$.

5.3.1.2 Analyse de Taguchi L_9 pour l'estimation de la pression de gonflement

Les résultats d'analyse de Taguchi L_9 pour l'estimation de la pression de gonflement sont présentés selon le tracé de la moyenne et du rapport S/N , dans les [Fig 5.8](#) et [5.9](#). Ces résultats montrent que la pression de gonflement augmente à mesure que l'indice de plasticité I_p et la teneur en argile C_c augmentent, et que l'indice de plasticité a l'effet le plus élevé sur la pression de gonflement suivi par la teneur en argile.

L'analyse indique aussi que les niveaux les plus élevés (3, 3), ont un très grand effet sur les moyennes et les rapports S/N et ont donné d'excellente combinaison de niveaux. Par conséquent, la combinaison optimale de la pression de gonflement prévue pour les paramètres examinés est l'indice de plasticité $I_p = 93.5\%$, la teneur en argile $C_c = 60\%$.

Ces résultats peuvent être confirmés dans le [tableau 8](#), où la plus grande valeur de pression de la gonflement était au niveau le plus élevé (3, 3), et où la sortie du réseau neuronal pour l'entrée

(60, 93.5) était $P_s = 877,575kPa$. Dans ce cas, les facteurs ayant le plus d'effet sont l'indice de plasticité suivie par la teneur en argile.

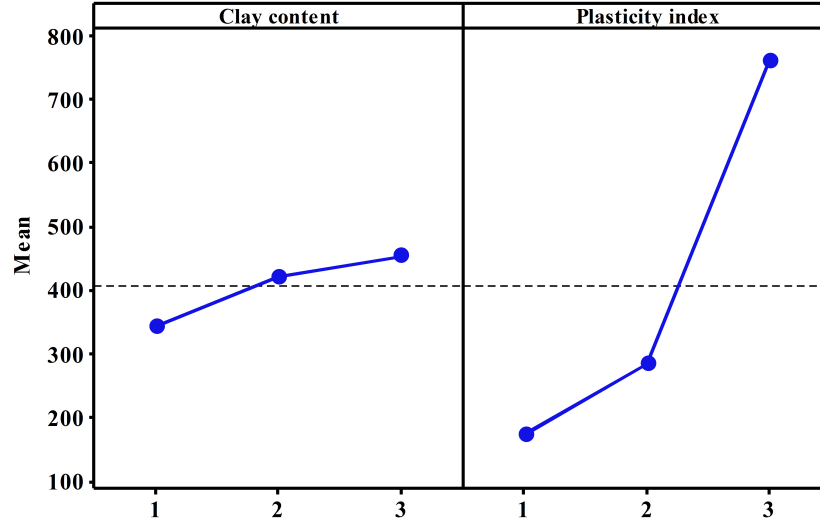


FIGURE 5.8 – Effets de C_c et de I_p sur la pression de gonflement [33].

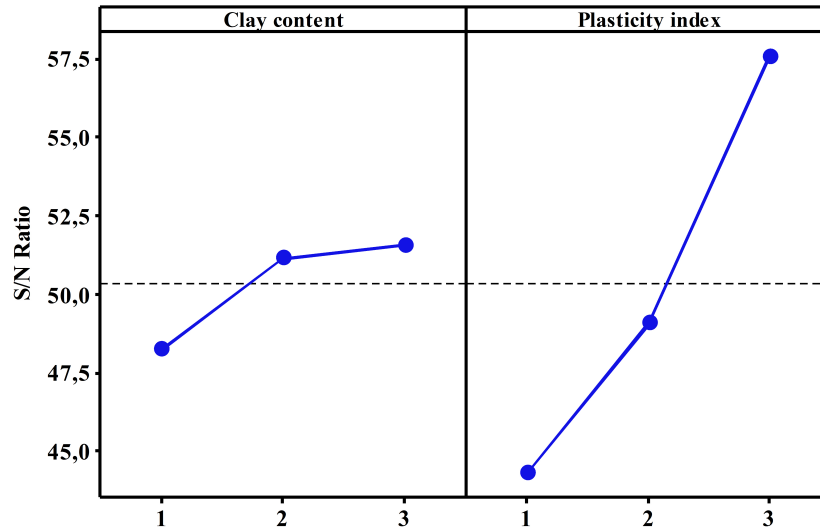


FIGURE 5.9 – Rapport S/N pour la pression de gonflement [33].

5.3.2 Conclusion

Les résultats de la méthode proposée (Taguchi L_9) ont montré l'ampleur de l'effet des deux paramètres, la teneur en argile et l'indice de plasticité, sur le potentiel de gonflement et la pression de gonflement, de la sorte que, plus le pourcentage de la teneur en argile et de l'indice de plasticité sont élevés, plus le degré de gonflement est important.

Dans cette étude, le gonflement du sol commence à partir d'une valeur $C_c = 29\%$ et $I_p = 17.1\%$ et atteint une valeur maximale pour $C_c = 60\%$ et $I_p = 93.5\%$. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs qui ont étudié et classer le gonflement des sols à partir de ces deux paramètres (C_c et I_p).

De plus, la méthode de Taguchi appliquée aux études d'ingénierie géotechnique en général et pour la prévision de gonflement des sols en particulier, est assuré avec une précision très élevées de l'effet et de la robustesse de chaque paramètre séparément sur le gonflement du sol, par rapport à l'utilisation des autres méthodes statistiques classiques.

5.4 Validation des résultats d'analyse de Taguchi avec ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est une technique statistique standard qui a été utilisée pour déterminer la fiabilité des résultats de l'expérience Taguchi et fournit des informations sur l'effet de chaque facteur de la matrice orthogonale sur le résultat (voir [paragraphe 2.10](#)). Cette analyse a été effectuée avec niveau de confiance de 95% et un niveau de signification de $\alpha = 0.05$. La valeur P dans l'analyse ANOVA est une probabilité pour déterminer les différences entre les facteurs moyens qui sont statistiquement significatifs, à savoir que si la valeur P est inférieure à 0.05, cela indique que les facteurs sélectionnés ont un effet significatif. Le pourcentage de contribution pour chaque facteur est représenté par le rapport de la somme pure à la somme totale des carrés, il est calculé comme suit [\[89, 114\]](#) :

$$Contribution(\%) = \frac{SS_F - (DOF_F V_{Er})}{SS_T} \times 100 \quad (5.6)$$

Où :

SS_F est la somme factorielle des carrés ;

$$SS_F = \frac{mn}{L} \sum_{k=1}^L (Y_K^F - Y_T)^2 \quad (5.7)$$

Dans laquelle,

Y_K^F est la valeur moyenne des résultats de mesure d'un certain facteur du $k^{i\grave{e}me}$ niveau.

DOF_F représente le degré de liberté pour chaque facteur, qui est obtenu en soustrayant un du numéro du niveau de chaque facteur (L).

V_{Er} : la variance d'erreur est donnée par ;

$$V_{Er} = \frac{SS_T - \sum_{F=A}^D SS_F}{m(n-1)} \quad (5.8)$$

SS_T : La somme totale des carrés est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$SS_T = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n Y_i^2 \right)_j - mn(Y_T) \quad (5.9)$$

Y_T : est calculé comme suit :

$$Y_T = \frac{\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n Y_i)}{mn} \quad (5.10)$$

Où :

m : représente le nombre d'expériences effectuées dans cet étude

n : représente le nombre de répétitions sous la même conditions expérimentales.

5.4.1 Analyse ANOVA pour le potentiel de gonflement

Le [tableau 5.9](#) montre les résultats de l'analyse ANOVA pour le potentiel de gonflement avec la contribution en pourcentage de chaque facteur à la colonne 4. On observe que l'indice de plasticité a la plus haute signification (91.66%) suivi par la teneur en argile (4.97%). De plus, la valeur P pour l'indice de plasticité est inférieure à 0.05 et indique que ce facteur a eu un effet significatif sur le potentiel de gonflement.

TABLE 5.9 – Analyse d'ANOVA pour le potentiel de gonflement [\[33\]](#).

Source	DF	Seq SS	Contribution (%)	Adj SS	Adj MS	F	P
teneur en argile	2	97.10	4.97	97.10	48.55	2.94	0.164
Indice de plasticité	2	1792.50	91.66	1792.50	896.25	54.33	0.001
Erreur	4	65.98	3.37	65.98	16.50		
Total	8	1955.58	100				

5.4.2 Analyse d'ANOVA pour la pression de gonflement

Les résultats de l'ANOVA pour la pression de gonflement dans le [tableau 5.10](#), indiquent la contribution en pourcentage de chaque facteur. Il a été constaté que le facteur le plus influent était l'indice de plasticité représentant environ 95.77%, suivi par la teneur en argile avec un pourcentage de 3.19%. De même, la valeur P pour l'indice de plasticité est inférieur à 0.05, ce qui signifie que ce facteur a eu un effet significatif sur la pression de gonflement.

TABLE 5.10 – Analyse d'ANOVA pour la pression de gonflement [33].

Source	DF	Seq SS	Contribution (%)	Adj SS	Adj MS	F	P
teneur en argile	2	19308	3.19	19308	9654	6.09	0.061
Indice de plasticité	2	580310	95.77	580310	290155	183.15	0.000
Erreur	4	6337	1.05	6337	1584		
Total	8	605955	100				

Les résultats de l'analyse ANOVA montrent que les interactions entre les facteurs sélectionnés n'ont aucune signification statistique ni contribution au potentiel de gonflement ou à la pression de gonflement. De plus, l'analyse ANOVA confirme les résultats prédits par l'analyse Taguchi, qui a donné un très bon résultat dans la détermination des conditions optimales pour estimer le potentiel et la pression de gonflement.

Conclusion générale

Le gonflement des sols pose un sérieux problème d'ingénierie. Plusieurs approches basées sur des méthodes statistiques classiques ont été proposées dans la littérature pour la prédiction du gonflement de ces types de sols. À cet effet, l'objectif de cette thèse était de développer des nouvelles approches fiables, peu coûteuse, de courte durée et d'application universelle pour prédire le potentiel de gonflement de ces types de sol. Ces approches consistent à utiliser les plans d'expériences de type Taguchi pour examiner les effets et les interactions des différents paramétrés ainsi que la détermination des niveaux optimaux des facteurs sélectionnés sur le potentiel de gonflement et la pression de gonflement des argiles.

Une nouvelle approche intégrant des algorithmes ANN et la méthode de Taguchi était présentée pour résoudre les problèmes d'estimation du gonflement des sols. Les résultats assez prometteurs de cette recherche montrent que la méthode de Taguchi L_9 et ANN peut être largement efficace pour prédire deux paramètres essentiels pour l'ingénieur, difficiles à déterminer (le potentiel et la pression de gonflement) à partir de deux paramètres simplement mesurables (la teneur en argile et l'indice de plasticité). Les observations suivantes peuvent être synthétisées :

- De nouvelles relations empiriques ont été trouvées entre la pression de gonflement et le potentiel de gonflement ces corrélations sont en bonnes concordances avec la littérature.
- Les régressions cubiques, quadratiques et multiples semblent être en bonne concordance et mieux adaptée que les modèles de régression linéaire simples dans le cas présenté.
- L'utilisation de la méthode ANN peut combler les lacunes des données expérimentales non-disponibles pour la conception de tableaux orthogonaux Taguchi L_9 . Cette approche a la capacité de prédire le gonflement du sol, dans lequel les résultats donnent des coefficients de corrélation élevés (R^2) avec une très petite erreur quadratique moyenne (MSE) dans les ensembles de validation et d'essai.
- L'expérimentation de tableaux orthogonaux $L_9(3^2)$ de Taguchi est utilisée avec succès pour évaluer et analyser les paramètres d'estimation du potentiels et de la pression de gonflement.
- Le rapport S/N a confirmé la force de l'effet de la teneur en argile et de l'indice de plasticité sur le potentiel de gonflement et la pression de gonflement. De plus, l'utilisation d'un rapport

S/N plus élevé, est mieux pour des conditions optimales pour lesquelles le gonflement du sol était maximal.

- Les résultats de la méthode de Taguchi montrent que l'indice de plasticité est le facteur le plus important influençant le potentiel de gonflement et la pression de gonflement.

L'analyse de la variance (ANOVA) a également confirmé que la fiabilité des résultats des algorithmes proposés est très acceptable. Enfin, cette approche a la capacité de prédire et de déterminer les conditions optimales du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement dans un temps très court avec un coût peu coûteux, par rapport à d'autres méthodes, et ce, en réponse à différentes combinaisons de *facteurs/niveaux* et en effectuant un petit nombre d'expériences avec une bonne précision. Des recherches supplémentaires peuvent être menées pour faire progresser cette méthodologie.

Les difficultés rencontrées dans la conduite de ce travail de recherche peuvent être résumés comme suit :

- L'incomplétude et la fiabilité de la base des données, plus précisément à cause des valeurs manquantes et des valeurs aberrantes.
- Les paramètres utilisés pour la conception du tableau de Taguchi sont non-contrôlables, afin de surmonter ce problème, nous avons utilisé la méthode ANN.

Afin d'enrichir ce travail, les prescriptives possibles sont :

- Application de cet algorithme pour l'estimation du potentiel et de la pression de gonflement avec d'autres paramètres tel que (la valeur du bleu de méthylène, la densité sèche, la nature et la teneur des cations échangeables,...).
- Application de cette approche pour l'évaluation du risque de gonflement des sols sur les constructions.

Bibliographie

- [1] Al-Rawas, A. A., Guba, I., and McGown, A. (1998). Geological and engineering characteristics of expansive soils and rocks in northern oman. *Engineering Geology*, 50(3-4) :267–281.
- [2] Al-Shamrani, M. and Dhowian, A. (2003). Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soils. *Engineering Geology*, 69(1-2) :63–81.
- [3] Alexis, J. (1995). *Pratique industrielle de la méthode Taguchi : les plans d'expériences*. Afnor.
- [4] Anderson, M. and Braak, C. T. (2003). Permutation tests for multi-factorial analysis of variance. *Journal of statistical computation and simulation*, 73(2) :85–113.
- [5] ASTM, D 4546-90, . (1993). Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils. annual book of astm standards, d 4546-90, 04.08 (1993) 853–859.
- [6] ASTM, D 4546-90, . (1995). One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils.
- [7] Asuero, A. G., Sayago, A., and Gonzalez, A. (2006). The correlation coefficient : An overview. *Critical reviews in analytical chemistry*, 36(1) :41–59.
- [8] Azam, S. (2003). Study on the swelling behaviour of blended clay-sand soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25 :369–381.
- [9] Azam, S., Shah, I., Raghunandan, M. E., and Ito, M. (2013). Study on swelling properties of an expansive soil deposit in saskatchewan, canada. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72 :25–35.
- [10] Azzouz, F. (2015). Stabilisation des sols argileux de la région de tlemcen par les sels. *ElWahat pour les Recherches et les Etudes*, 8 :108–117.
- [11] Baillet, F. (2017). *Manuel d'utilisation des plans d'expériences -Une méthodologie robuste pour modéliser empiriquement un phénomène*. Ellipses Marketing.
- [12] Basma, A. (1993). Prediction of expansion degree for natural compacted clays. *Geotechnical Testing Journal*, 16 :542–549.
- [13] Baykasoglu, A., Cevik, A., Ozbakır, L., and Kulluk, S. (2009). Generating prediction rules for liquefaction through data mining. *Expert Systems with Applications*, 36 :12491–12499.

-
- [14] Baziar, M. and Jafarian, Y. (2007). Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ann model : capacity energy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(12) :1056–1072.
- [15] Belabbaci, Z., Mamoune, S., and Bekkouche, A. (2012). Stabilization of expansive soils with milk of lime : the case of clays of tlemcen, algeria. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17 :1293–1304.
- [16] Berrah, Y., Boumezbeur, A., Kherici, N., and Charef, N. (2016). Application of dimensional analysis and regression tools to estimate swell pressure of expansive soil in tebessa (algeria). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77 :1155–1160.
- [17] Bétier, M. (951–1952). Carte géologique de l’algérie. *Carte étudié par Ingénieur générale des mines étant directeur du service de la carte géologique, 2ème édition.*
- [18] Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions, Asce*, 113 :901–991.
- [19] Cawse, J. N. (2003). *Experimental design for combinatorial and high throughput materials development.* Wiley-Interscience New York.
- [20] Chen, F. (Elsevier, New York, 1975). *Foundations on Expansive Soil.*
- [21] Çimen, Ö., Keskin, S. N., and Yıldırım, H. (2012). Prediction of swelling potential and pressure in compacted clay. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(6) :1535–1546.
- [22] Cokca, E. (2001). Use of class c fly ashes for the stabilizationof an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 :568–573.
- [23] Cox, D. R. and Reid, N. (2000). *The theory of the design of experiments.* Chapman and Hall/CRC.
- [24] Czitrom, V. (1999). One-factor-at-a-time versus designed experiments. *The American Statistician*, 53(2) :126–131.
- [25] Dakhshanamurthy, V. and Raman, V. (1975). Review of expansive soils. *Discussion, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101 :463.
- [26] Daniel, C. (1976). *Applications of statistics to industrial experimentation*, volume 124. John Wiley & Sons.
- [27] Das, S., Samui, P., Sabat, A., and Sitharam, T. (2010). Prediction of swelling pressure of soil using artificial intelligence techniques. *Environmental Earth Sciences*, 61 :393–403.
- [28] Davis, R. and John, P. (2018). Application of taguchi-based design of experiments for industrial chemical processes. *Statistical Approaches with Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*, page 137.

-
- [29] Derriche, Z. and Kebaili, M. (1998). Prévision du gonflement des argiles d'in-am enas. *Bulletin des Laboratoires des ponts et Chauss ees*, 218 :15–23.
- [30] Didier, D., Lareal, P., and Gielly, J. (1983). Prediction of potential and swelling pressure of soils. *in : Proc. 8th ICSMFE*, 2 :67–72.
- [31] Djedid, A., Bekkouche, A., and Aissa Mamoune, S. (2001). Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées France*, 233 :67–75.
- [32] Donaldson, G. (1969). The occurrence of problems of heave and the factors affecting its nature. In *Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, pages 25–36. Texas A & M Press.
- [33] Dounane, N. and Trouzine, H. (2020). Integrated approach of ANN and genetic algorithms for soils swelling estimation. *International journal of sustainable building technology and urban development*, 11 :244–257.
- [34] Dudal, R. and Bramao, D. (1965). Dark clay soils of tropical and subtropical regions. *FAO Agricultural Development paper No. 8, FAO (Food and Agriculture Organization), Rome, 1965*.
- [35] Dysli, M., Steine, W., and Fontana, A. (2013). Correlations in soil mechanics. *2 updated edition. Polytechnic presses and universities, 2013*.
- [36] El Sayed, S. and Rabbaa, S. (1986). Factors affecting behavior of expansive soils in the laboratory and field-a review. *Geotechnical Engineering*, 17(1) :89–107.
- [37] Elarabi, H. A. (2004). Factors influencing swelling behaviour of expansive soils. *BRR Journal*, 6(1) :20–29.
- [38] Elbadry, H. (2017). Simplified reliable prediction method for determining the volume change of expansive soils based on simple physical tests. *HBRC journal*, 13 :353–360.
- [39] EN1997-1. European standard Eurocode 7. part 1 : General rules 1.
- [40] Erzin, Y. (2007). Artificial neural networks approach for swell pressure versus soil suction behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 :1215–1223.
- [41] Estabragh, A. R., Moghadas, M., and Javadi, A. A. (2013). Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying. *Soils and Foundations*, 53 :617–627.
- [42] Fisher, R. A. (1937). *The design of experiments*. Oliver And Boyd ; Edinburgh ; London.
- [43] Galaviz-Gonz ale, R., Horta, J., Rojas, E., de la Luz Pérez-Rea, M., and Robles-Sotelo, J. (2016). Predicting the volumetric variation due to changes in, applied stress and swelling pressure. *E3S Web of Conferences*, 9 :1–6.

-
- [44] Garbulewski, K. and Zakowicz, S. (1995). Suction as an indicator of soil expansive potential. In *Proceedings of the first international conference on unsaturated soils/unsat'95/paris/france/6-8 september 1995. Volume 2*.
- [45] Goh, A., Wong, K., and Broms, B. (1995). Estimation of lateral wall movements in braced excavation using neural networks. *Canadian Geotechnical Journal*, 32 :1059–1064.
- [46] Gong, W., Wang, L., Juang, C. H., Zhang, J., and Huang, H. (2014). Robust geotechnical design of shield-driven tunnels. *Computers and Geotechnics*, 56 :191–201.
- [47] Goodarzi, A., Akbari, H., and Salimi, M. (2016). Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*, 132 :675–684.
- [48] Goupy, J. and Creighton, L. (2009). *Introduction aux plans d'expériences : avec applications*. Dunod.
- [49] Gourley, C., Newill, D., and Schreiner, H. D. (1993). Expansive soils : The research strategy. *Proc., 1st Int. Symp. on Engineering Characteristics of Arid Soils*.
- [50] Grim, R. (1959). Physic-chemical properties of soils : Clay mineralogy. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85 :1–17.
- [51] Grim, R. E. (1953). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, Inc ; New York ; Toronto ; London.
- [52] Gueddouda, M., Idriss, G., and Bencha, B. (2013). Effet de chaux, ciment et sel sur le potentiel de gonflement des argiles gonflantes des régions arides en Algérie.
- [53] Gueddouda, M., Lamara, M., Aboubaker, N., and Taibi, S. (2008). Hydraulic conductivity and shear strength of dune sand-bentonite mixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13 :1–15.
- [54] Guo, H. and Mettas, A. (2010). Design of experiments and data analysis. In *2012 Annual Reliability and Maintainability Symposium*.
- [55] Hachichi, A., Bourokba Mrabent, S., and Bengraa, L. (2011). Influence de l'ajout de chaux sur le potentiel de gonflement et de la microstructure d'une argile naturelle d'Algérie. *Séminaire International, Innovation et Valorisation en génie civil et matériaux de construction*, 1P–259 :1–7.
- [56] Hachichi, A. and J.M, F. (1999). Characterization of a few expansive soils from Algeria. *Revue française de géotechnique*, 86 :37–51.
- [57] Hajjalilue-Bonab, M. and Behrooz-Sarand, F. (2016). Physical and numerical modeling of canal lining on expansive soil. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2 :484–489.
- [58] Hanna, A. M., Ural, D., and Saygili, G. (2007). Neural network model for liquefaction potential in soil deposits using turkey and taiwan earthquake data. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 :521–540.

-
- [59] Holtz, R. and Kovacs, W. (1973). *Fundamental Mechanisms Involved in Expansion of Clays as Particularity related to clay Mineralogy*, volume 1. Publication of : Royal Norwegian Council Sci, Ind Res.
- [60] Holtz, R. and Kovacs, W. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal.
- [61] Holtz, W. and Gibbs, H. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121 :641–677.
- [62] Holtz, W. G. (1959). *Expansive clays : Properties and problems*. US Bureau of Reclamation.
- [63] Huang, R. and Lizhou, W. (2007). Stability analysis of unsaturated expansive soil slope. *Earth Science Frontiers*, 14(6) :129–133.
- [64] Hubick, K. (1992). Artificial neural networks in australia. *Department of Industry, Technology and Commerce, Commonwealth of Australia, Canberra, 1992*.
- [65] Indraratna, B. (1996). Utilization of lime, slag and fly ash for improvement of a colluvial soil in new south wales, australia. *Geotechnical, Geological Engineering*, 14 :169–191.
- [66] Jacquard, C. (2007). Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux retour d'expérience en midi-pyrénées. *Revue Française de Géotechnique*, (120–121) :155–164.
- [67] Jennings, J. and Knight, K. (1957). The prediction of total heave from the double oedometer test. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, 7(9) :285–291.
- [68] Jones Jr, D. E. and Holtz, W. G. (1973). Expansive soils-the hidden disaster. *Civil Engineering*, 43.
- [69] Kariuki, P. C. and Van Der Meer, F. (2004). A unified swelling potential index for expansive soils. *Engineering geology*, 72(1-2) :1–8.
- [70] Khemissa, Mohamed, L. M. and Bakir, N. (2008). Comportement oedométrique des argiles expansives de m'sila (algérie). *SEC'2008 : Symposium international sécheresse et constructions, Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France*, pages 229–234.
- [71] Khozaghi, S. S. H. and Choobbasti, A. J.-Z. (2007). Predicting of liquefaction potential in soils using artificial neural networks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12.
- [72] Komornik, A. and David, D. (1969). Prediction of swelling pressure of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, 95 :209–225.
- [73] Lambe, T. (1953). The structure of inorganic soil. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 79.
- [74] Lambe, T. (1960). The character and identification of expansive soils. *Fed. Housing Admin. Rep. 701. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, 1960*.

-
- [75] Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1959). *The role of effective stress in the behavior of expansive soils*. Soil Engineering Division, Massachusetts Institute of Technology.
- [76] Look, B. (2016). The weighted plasticity index in road design and construction. *Australian Geomechanics Journal*, 51(3) :21–35.
- [77] Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, Å., Pettersen, J., and Bergman, R. (1998). Experimental design and optimization. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 42(1-2) :3–40.
- [78] Madić, M. and Radovanović, M. (2011). Optimal selection of ann training and architectural parameters using taguchi method : A case study. *FME Transactions*, 39 :379–86.
- [79] Madić, M. J. and Radovanović, M. R. (2011). Optimal selection of ann training and architectural parameters using taguchi method : A case study. *FME Transactions*, 39(2) :79–86.
- [80] Mahamedi, A. and Khemissa, M. (2015). Stabilization of an expansive overconsolidated clay using hydraulic binders. *HBRC Journal*, 11 :82–90.
- [81] McCormack, D. and Wilding, L. (1975). Soil properties influencing swelling in canfield and geeburg soils. *Soil Science Society of America Journal*, 39 :496–502.
- [82] McKeen, R. G. (1992). A model for predicting expansive soil behavior. In *Proc., 7th Int. Conf. on Expansive Soils*, volume 1, pages 1–6. ASCE Reston, VA.
- [83] Medd, H. and Meddi, M. (2009). Variabilité des précipitations annuelles du nord-ouest de l’Algérie. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20(1) :57–65.
- [84] Medjnoun, A., Khiatine, M., and Bahar, R. (2014). Caractérisation minéralogique et géotechnique des argiles marneuses gonflantes de la région de médéa, algérie. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73 :1259–1272.
- [85] Minitab (1999). Inc.12 ed. state college, PA.
- [86] Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*, volume 3. New York : John Wiley ; Sons.
- [87] Mitchell, T. and Raad, L. (1973). Control of volume changes in expansive earth materials. *Publication of : Frost I Jord/Norway/*, 2(Workshop Proceedings).
- [88] Mohan, D. and Jain, G. (1961). Bearing capacity of bored piles in expansive clays. *Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris*, 2.
- [89] Mohan, S. V., Sirisha, K., Rao, R. S., and Sarma, P. (2007). Bioslurry phase remediation of chlorpyrifos contaminated soil : Process evaluation and optimization by Taguchi design of experimental (DOE) methodology. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 68 :252–262.

-
- [90] Mouroux, P., Margron, P., and Pinte, J.-C. (1988). *La construction économique sur sols gonflants*, volume 14. Editions BRGM.
- [91] Muntohar, A. S. (2006). Swelling characteristics and improvement of expansive soil with rice husk ash. *Expansive Soils : Recent Advances in Characterization and Treatment*. Taylor & Francis Group, pages 435–451.
- [92] Murthy, V. N. S. (2003). *Geotechnical engineering : principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. New York ; Basel : Marcel Dekker.
- [93] Nayak, N. and Christensen, R. (1971). Swelling characteristics of compacted, expansive soils. *Clays and Clay Minerals*, 19 :251–261.
- [94] Nelson, J. and Miller, D. J. (1992). *Expansive soils : problems and practice in foundation and pavement engineering*. Wiley, London.
- [95] Oehlert, G. W. (2010). *A first course in design and analysis of experiments*.
- [96] Olabi, A., Casalino, G., Benyounis, K., and Hashmi, M. (2006). An ann and taguchi algorithms integrated approach to the optimization of co2 laser welding. *Advances in Engineering Software*, 63 :643–648.
- [97] Peyronnard, O. and Benzaazoua, M. (2012). Alternative by-product based binders for cemented mine backfill : Recipes optimisation using taguchi method. *Minerals Engineering*, 29 :28–38.
- [98] Phadke, M. S. (1989). *Quality engineering using robust design*, ptr prentice-hall. Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- [99] Phanikumar, B. R. and Singla, R. (2013). Swell-consolidation characteristics of fibre-reinforced expansive soils. *Soils and Foundations*, 56 :138–143.
- [100] Philipponnat, G. (1991). Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Revue Française de géotechnique*, (57) :5–22.
- [101] Philipponnat, G. and Hubert, B. (2015). *Fondations et ouvrages en terre*. Eyrolles, 9ème tirage.
- [102] Popescu, M. (1974). Correlation between the index properties and swelling-shrinking characteristics of active clays. in : *Proc. 7th Asian Reg. Conf., Haifa*, 1 :71–75.
- [103] Programme, M. (2010). Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau en algérie. *Rapport réalisé par SOFRECO en groupement avec Carl Bro, Progress et OIEAU pour Ministère des Ressources en Eau de la République Algérienne Démocratique et Populaire, EuropeAid/126155/D/SER/DZ*.
- [104] Qi, S. and Vanapalli, S. (2015). Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes. *Computers and Geotechnics*, 70 :68–82.

-
- [105] Quinn, G. P., Keough, M. J., et al. (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press.
- [106] Rahali, B., Aissa Mamoune, S., and Trouzine, H. (2018). Using artificial neural networks approach to estimate compressive strength for rubberized concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62 :858–865.
- [107] Rahimi, H. and Barootkoob, S. (2002). Concrete canal lining cracking in low to medium plastic soils. *Irrigation and Drainage : The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 51(2) :141–153.
- [108] Rani, C. S. and Rao, K. M. (2013). Technology (ijciet). *Journal Impact Factor*, 4(2) :104–117.
- [109] Rao, R., Kumar, C., Prakasham, R., and Hobbs, P. (2008a). The taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications : A critical appraisal. *Biotechnology Journal*, 3 :510–523.
- [110] Rao, R. S., Kumar, C. G., Prakasham, R. S., and Hobbs, P. J. (2008b). The taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications : a critical appraisal. *Biotechnology Journal : Healthcare Nutrition Technology*, 3 :510–523.
- [111] Rao, V. P. (2013). Swelling pressure of soil predictive tool. *International Journal of Computer Application*, 63 :27–32.
- [112] Rauch, A. F., Harmon, J. S., Katz, L. E., and Liljestrang, H. M. (2002). Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay. *Transportation Research Record*, 1787(1) :33–41.
- [113] Sabtan, A. A. (2005). Geotechnical properties of expansive clay shale in tabuk, saudi arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(5) :747–757.
- [114] Sadeghi, S., Moosavi, V., Karami, A., and Behnia, N. (2012). Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the taguchi method. *Journal of Hydrology*, 448–449 :174–180.
- [115] Sakellariou, M. and Ferentinou, M. (2005). A study of slope stability prediction using neural networks. *Canadian Geotechnical Geotechnical and Geological Engineering*, 23 :419–445.
- [116] Schneider, G. and Poor, A. (1974). The prediction of soil heave and swell pressures developed by an expansive clay. *Contraction Research Center, University of Texas, 1974*.
- [117] Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., and García, B. (2011). Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, 51(3) :348–352.
- [118] Seed, H., Woodward, R., and Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88 :53–87.

-
- [119] Shahin, M., Jaksa, M., and Maier, H. (2000). Predicting the settlement of shallow foundations on cohesionless soils using back-propagation neural networks. *Research Report No. R167, the University of Adelaide, Adelaide, Australia*, page 19.
- [120] Shahin, M., Jaksa, M., and Maier, H. (2001). Artificial neural network applications in geotechnical engineering. *Australian geomechanics*, 36 :49–62.
- [121] Shahin, M., Maier, H., and Jaksa, M. (2002). Predicting settlement of shallow foundations using neural networks. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 :785–793.
- [122] Shetty, R., Pai, R. B., Rao, S. S., and Nayak, R. (2009). Taguchi’s technique in machining of metal matrix composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31(1) :12–20.
- [123] Shi, J., Ortigao, J., and Bai, J. (1998). Modular neural networks for predictive settlement during tunnelling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 :389–395.
- [124] Shiri, N. D., Bhat, S., Babisha, K., Moger, K. M., D’almeida, M. P., and Menezes, C. J. (2016). Taguchi analysis on the compressive strength behaviour of waste plastic-rubber composite materials. *American Journal of Materials Science*, 6 :88–93.
- [125] Shuai, F. and Fredlund, D. (1998). Model for the simulation of swelling-pressure measurements on expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1) :96–114.
- [126] Smalheiser, N. (2017). Data literacy.
- [127] Snethen, D. R. and Johnson, L. D. (1980). Evaluation of soil suction from filter paper. Technical report, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Geotechnical Lab.
- [128] Soundara, B. and Robinson, R. (2017). Hyperbolic model to evaluate uplift force on pile in expansive soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(3) :746–751.
- [129] Sowers, G. and Kennedy, C. (1967). High volume change clays of the south-eastern coastal plain. In *Proc. 3rd Pan Am. Conf. Soil Mechanics Foundation Engng*, pages 99–120.
- [130] Stat-Ease, I. (2000). Design expert users’s guide. *The Stat-Ease Inc.*
- [131] Steinberg, D. M. and Hunter, W. G. (1984). Experimental design : review and comment. *Technometrics*, 26(2) :71–97.
- [132] Sudjianto, A., Suryolelono, K., Rifa, A., and Mochtar, I. (2011a). The effect of variation index plasticity and activity in swelling vertical of expansive soil. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 11 :117–123.
- [133] Sudjianto, A. T., Suryolelono, K. B., and Mochtar, I. B. (2011b). The effect of variation index plasticity and activity in swelling vertical of expansive soil.

-
- [134] Taguchi, G. (1990). Introduction to quality engineering. *McGraw-Hill, New York, USA*, page 191.
- [135] Taguchi, G., Chowdhury, S., and Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. Wiley.
- [136] Tan, O. (2006). Investigation of soil parameters affecting the stability of homogeneous slopes using the taguchi method. *Eurasian Soil Science*, 39 :1248–1254.
- [137] Tan, O., Zaimoglu, A. S., Hinislioglu, S., and Altun, S. (2005). Taguchi approach for optimization of the bleeding on cement-based grouts. *Tunnelling and underground space technology*, 20(2) :167–173.
- [138] Tovey, N. K. (1971). *A Selection of Scanning Elecatron Micrographs of Clays*. University, Engineering Department.
- [139] Trouzine, H. (2008). Pneusol sous fondations en sols gonflants. *Thèse de doctorat, Université Djillali Liabés, 2008*.
- [140] Trouzine, H., Bekhiti, M., and Asroun, A. (2012). Effects of scrap tyre rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in algeria. *Geosynthetics International*, 19 :124–132.
- [141] Turkoz, M., Savas, H., Acaz, A., and Tosun, H. (2014). The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. *Applied Clay Science*, 101 :1–9.
- [142] Turkoz, M. and Tosun, H. (2011). The use of methylene blue test for predicting swell parameters of natural clay soils. *Scientific Research and Essays*, 6(8) :1780–1792.
- [143] Turkoz, M. and Vural, P. (2013). The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(4) :395–405.
- [144] USBR (1974). Field permeability tests in boreholes, designation e-18. In *Earth Manual, 2nd ed. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington*, page 810.
- [145] Van der Merwe, D. (1964). The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese*, 1964(v6i6) :103–107.
- [146] Venkata Mohan, S., Chandrasekhara Rao, N., Krishna Prasad, K., Murali Krishna, P., Sreenivas Rao, R., and Sarma, P. (2005). Anaerobic treatment of complex chemical wastewater in a sequencing batch biofilm reactor : Process optimization and evaluation of factor interactions using the taguchi dynamic doe methodology. *Biotechnology and Bioengineering*, 90(6) :732–745.
- [147] Vessely, M. J. and Wu, J. T. (2002). Feasibility of geosynthetic inclusion for reducing swelling of expansive soils. *Transportation research record*, 1787 :42–52.
- [148] Vijayvergiya, V. and Ghazzaly, O. I. (1973). Prediction of swelling potential for natural clays. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, volume 1, pages 227–236.

-
- [149] Viswanadham, B., Phanikumar, B., and Mukherjee, R. (2009a). Effect of polypropylene tape fibre reinforcement on swelling behaviour of an expansive soil. *Geosynthetics International*, 16 :393–401.
- [150] Viswanadham, B., Phanikumar, B., and Mukherjee, R. V. (2009b). Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 :73–76.
- [151] Wang, M. and Chen, G. (2011). A novel coupling model for risk analysis of swell and shrinkage of expansive soils. *Computers & Mathematics with Applications*, 62(7) :2854–2861.
- [152] Wang, Y., Jing, H., Han, L., Yu, L., and Zhang, Q. (2014). Risk analysis on swell–shrink capacity of expansive soils with efficacy coefficient method and entropy coefficient method. *Applied Clay Science*, 99 :275–281.
- [153] Williams, A. A. and Donaldson, G. W. (1980). Building on expansive soils in south africa : 1973-1980. In *Expansive Soils*, pages 834–844. ASCE.
- [154] Wójcik, E. and Gawriuczenkow, I. (2017). Determination of swell index and swelling pressure from suction tests –a case study of neogene clays from war saw (poland). *Geological Quarterly*, 61 :738–750.
- [155] Yilmaz, I. and Civelekoglu, B. (2009). Gypsum : an additive for stabilization of swelling clay soils. *Applied Clay Science*, 44(1-2) :166–172.
- [156] Yilmaz, I. and Kaynar, O. (2011). Multiple regression, ann (rbf, mlp) and anfis models for prediction of swell potential of clayey soils. *Expert systems with applications*, 38(5) :5958–5966.
- [157] Yıldız, A., Öztürk, N., Kaya, N., and Öztürk, F. (2007). Hybrid multi-objective shape design optimization using taguchi’s method and genetic algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 34 :317–332.
- [158] Yongli, Y. and Aissa, M. H. (2016). Geotechnical characteristics of miocenemarls in the region of medea north-south highway, algeria. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 10 :940–944.
- [159] Zhang, F., Wang, Z., and Yang, M. (2015). Assessing the applicability of the taguchi design method to an interrill erosion study. *Journal of Hydrology*, 521 :65–73.
- [160] Zhang, W. G. and Goh, A. T. C. (2013). Multivariate adaptive regression splines for analysis of geotechnical engineering systems. *Computers and Geotechnics*, 48 :82–95.
- [161] Zumrawi, M. (2013a). Geotechnical aspects for roads on expansive soils. *International Journal of Science and Research*, 3 :1–6.
- [162] Zumrawi, M. (2013b). Prediction of swelling pressure for compacted expansive soils. *UofKEJ*, 3 :35–39.