

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة حسيبة بن بو علي- الشلف  
Université Hassiba Benbouali –Chlef  
كلية الهندسة المدنية و المعمارية  
Faculté de Génie Civil et d'Architecture  
قسم الهندسة المدنية  
Département de Génie-civil



**Mémoire de Master**  
**Filière: Travaux Publics**  
**Spécialité: Voies et Ouvrages d'Art**

*Thème*

**Analyse des performances de quelques modèles de prédiction  
des caractéristiques de gonflement des sols routiers**

**Présenté par :**

EL-MOUSTAPHA EbabeBabah

MOHAMED EL-HOUSSEIN CheikhSidiya

**Dirigé par :**

Dr : SARI AHMED Billal

Pr : GHRICI Mohamed

**Promotion : 2023/2024**

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail ...*

*A mes parents spécialement à ma mère **ZEYNEBOU Cheikh sidiya** ;*

*A mon frère **EZE EDINNE Habiboullah** et mon cousin  
**AHMED cheikh sidiya**. Pour leur soutien inconditionnel,*

*A mes professeurs et encadrants: **Dr. SARI AHMED Bilal, Pr.  
GHRICI Mohamed**. Pour leurs conseils avisés,*

*A mes amis pour leur encouragement, et à toutes les personnes  
ayant contribué à sa réalisation.*

*MOHAMED EL-HOUSSEIN Cheikh Sidiya*

# الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إلى كل من علمني حرفاً في هذه الدنيا الفانية،  
إلى والدي العزيز، الذي علمني قيمة العلم والاجتهاد،  
إلى أُمِّي العزيزة الغالية مصدر عمي و سندي،  
إلى إخوتي وأخواتي، شركاء رحلتي وأعمدة قوتي الذين كانوا دائماً بجانبني،  
إلى جميع الأصدقاء والأصحاب الذين قدموا لي الدعم والمساندة،  
إلى أساتذتي الكرام، الذين لم يخلوا علي بنصائحهم و علمهم،  
إلى كل هؤلاء و هؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع،  
نسأل الله تعالى أن ينفعنا بعلمه

آمين يا رب العالمين

المصطفى أبابه باباه

# REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions **ALLAH**, le miséricordieux, le tout puissant et le plus clément qui nous aide et nous donne le courage de tout faire.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.

Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance au directeur de ce mémoire, **Dr. SARI AHMED Bilal**, enseignant à l'Université de Chlef, et également à notre Codirecteur de mémoire, **Pr. GHRICI Mohamed**, Professeur à l'Université de Chlef, pour avoir relu et corrigé notre mémoire, pour leurs patience et leurs expertise qui ont été des atouts précieux ayant grandement contribué à la réalisation de ce travail, leurs encouragements et leurs conseils d'or, pour leurs encadrement bienveillant et pour leurs critiques constructives et l'intérêt qu'ils ont porté tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions également **Mr. HAMDAOUI Khaled**, Doctorant à l'Université de Chlef, pour sa disponibilité et son engagement, ses conseils de rédaction qui ont été très précieux et son appui constant.

Nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Nous désirons aussi remercier les professeurs de l'Université de Chlef, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à toutes les personnes qui, par leurs compétences, leur présence et leurs commentaires, ont contribué à l'élaboration et à la bonne conduite de ce travail de thèse.

## Résumé

Ce mémoire traite des défis posés par les sols argileux en raison de leur potentiel de gonflement lorsqu'ils absorbent de l'eau, entraînant des problèmes structurels importants. L'évaluation expérimentale de ce potentiel et de la pression de gonflement est souvent coûteuse et chronophage, ce qui a conduit plusieurs chercheurs à proposer des modèles empiriques basés sur des propriétés élémentaires telles que la plasticité, les paramètres de compactage et les caractéristiques granulométriques. L'objectif de ce mémoire est de réaliser une étude statistique pour évaluer quelques-uns de ces modèles empiriques importants pour la prévision des paramètres de gonflement des sols argileux. À cet effet, une base de données contenant les propriétés géotechniques de 161 échantillons de sols, collectées dans la littérature, a été utilisée pour évaluer six modèles empiriques de prévision du potentiel et de la pression de gonflement des sols argileux. Des indicateurs statistiques tels que le coefficient de détermination ( $r^2$ ) et des tests statistiques comme le test de Fisher ( $F$ -test) et le test de Student ( $t$ -test) ont été employés pour cette évaluation. L'étude a révélé que les approches prédictives empiriques présentent plusieurs limitations. Notamment, les modèles intégrant plusieurs propriétés en tant que variables d'entrée fournissent des résultats statistiques supérieurs à ceux utilisant une ou deux propriétés seulement. Pour surmonter ces limitations, le mémoire propose l'utilisation d'approches basées sur l'intelligence artificielle, notamment l'apprentissage automatique avec le processus de régression gaussienne (GPR). En utilisant des métriques statistiques telles que le MAE, le MSE et le RMSE, le modèle développé a montré une forte corrélation entre les valeurs prédites et réelles, avec un faible taux d'erreur. Les études paramétriques ont également mis en évidence l'impact crucial de certains paramètres géotechniques comme l'indice de plasticité et la teneur en eau sur le potentiel de gonflement. Ainsi, l'intégration du Machine Learning, en particulier la GPR, offre des outils précieux pour améliorer la précision des prédictions géotechniques, apportant une valeur ajoutée significative aux chercheurs et praticiens de l'ingénierie géotechnique.

**Mots clés :** Sols argileux, Gonflement des sols, Modèles empiriques, Machine Learning, Régression gaussienne (GPR), Études paramétriques.

## **Abstract**

This thesis addresses the challenges posed by clay soils due to their swelling potential when they absorb water, leading to significant structural problems. Experimental assessment of this potential and the swelling pressure is often costly and time-consuming, prompting several researchers to propose empirical models based on basic properties such as plasticity, compaction parameters, and granulometric characteristics. The aim of this thesis is to conduct a statistical study to evaluate some of these important empirical models for predicting the swelling parameters of clay soils. For this purpose, a database containing the geotechnical properties of 161 soil samples, collected from the literature, was used to evaluate six empirical models for predicting the swelling potential and pressure of clay soils. Statistical indicators such as the coefficient of determination ( $r^2$ ) and statistical tests like the Fisher test ( $F$ -test) and the Student's test ( $t$ -test) were employed for this evaluation. The study revealed that empirical predictive approaches have several limitations. Notably, models incorporating multiple properties as input variables provide superior statistical results compared to those using only one or two properties. To overcome these limitations, the thesis proposes the use of artificial intelligence-based approaches, specifically machine learning with Gaussian Process Regression (GPR). Using statistical metrics such as MAE, MSE, and RMSE, the developed model showed a strong correlation between predicted and actual values, with a low error rate. Parametric studies also highlighted the crucial impact of certain geotechnical parameters, such as the plasticity index and water content, on the swelling potential. Thus, integrating Machine Learning, particularly GPR, offers valuable tools to improve the accuracy of geotechnical predictions, providing significant added value to researchers and practitioners in geotechnical engineering.

**Keywords:** Clay soils, Soil swelling, Empirical models, Machine Learning, Gaussian Process Regression (GPR), Parametric studies

## الملخص

يتناول هذا البحث التحديات التي تطرحها التربة الطينية بسبب قدرتها على الانتفاخ عند امتصاص الماء، مما يؤدي إلى مشكلات هيكلية كبيرة. يعد تقييم هذه القدرة وضغط الانتفاخ تجريبياً مكلفاً ويستغرق وقتاً طويلاً، مما دفع العديد من الباحثين إلى اقتراح نماذج إحصائية تستند إلى خصائص أساسية مثل اللدونة ومعايير الدمك والخصائص الحبيبية. هدف هذا البحث هو إجراء دراسة إحصائية لتقييم بعض من هذه النماذج المهمة لتوقع معايير الانتفاخ للتربة الطينية. لهذا الغرض، تم استخدام قاعدة بيانات تحتوي على خصائص جيوتقنية لـ 161 عينة من التربة، تم إستخراجها من الأبحاث المنشورة، لتقييم ستة نماذج إحصائية لتوقع قدرة وضغط الانتفاخ للتربة الطينية. تم استخدام مؤشرات إحصائية مثل معامل التحديد ( $r^2$ ) واختبارات إحصائية مثل اختبار فيشر (F-test) واختبار ستودنت (t-test) لهذا التقييم. أظهرت الدراسة أن هذه النماذج الإحصائية لها عدة قيود. على وجه الخصوص، النماذج التي تدمج خصائص متعددة كمدخلات توفر نتائج إحصائية أفضل مقارنةً بتلك التي تستخدم خاصية واحدة أو اثنتين فقط. للتغلب على هذه القيود، يقترح البحث استخدام أساليب تعتمد على الذكاء الاصطناعي، خاصة التعلم الآلي مع عملية الانحدار الغاوسي (GPR). باستخدام مقاييس إحصائية مثل MAE و MSE و RMSE، أظهر النموذج المطور ارتباطاً قوياً بين القيم المتوقعة والفعلية، مع معدل خطأ منخفض. كما أظهرت الدراسات البارامترية التأثير الحاسم لبعض المعايير الجيوتقنية مثل مؤشر اللدونة ومحتوى الماء على قدرة الانتفاخ. وبالتالي، فإن دمج التعلم الآلي، ولا سيما (GPR)، يوفر أدوات قيمة لتحسين دقة التنبؤات الجيوتقنية، مما يقدم قيمة مضافة كبيرة للباحثين والممارسين في مجال الهندسة الجيوتقنية.

**الكلمات المفتاحية:** التربة الطينية، انتفاخ التربة، النماذج الإحصائية، التعلم الآلي، الانحدار الغاوسي (GPR)، الدراسات البارامترية

## TABLE DES MATIERES

Dédicace1.....	I
Dédicace2.....	II
Remerciements.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Table des matières.....	VII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIV
Liste des notations.....	XV

### Introduction Générale

Généralités.....	2
Objectif du travail.....	3
Plan de mémoire.....	3

### Chapitre 1 Caractéristiques des sols gonflants

1.1. Introduction.....	6
1.2. Définition des sols .....	6
1.3. Texture des sols.....	7
1.4. Généralités sur sol routier .....	7
1.4.1. Définition.....	7
1.4.2. Caractéristiques du route.....	8
1.4.3. La Chaussée.....	8
1.4.3.1. Structure des chaussées.....	8
1.4.3.2. Rôle des couches.....	10
1.5. Argiles. ....	10
1.5.1. Définition.....	10
1.5.2. Origine des argiles.....	11
1.5.3. propriétés géotechniques et pédologiques des argiles.....	11
1.5.4. Nature et différents types de sols argileux.....	12
1.6. Principaux problèmes des sols instables.....	13

1.6.1. Gonflement du sol.....	13
1.6.2. Mécanisme de gonflement.....	14
1.6.3. Nature du phénomène de gonflement.....	14
1.6.4. Définition des paramètres du gonflement.....	15
1.6.5. Identification des sols gonflant.....	17
1.6.6. Paramètres de gonflement.....	17
1.6.6.1. Pression de gonflement.....	18
1.6.6.2. Potentiel de gonflement.....	18
1.6.6.3. Indice de gonflement.....	18
1.6.7. Retrait des sols gonflant.....	19
1.7. Facteurs qui influencent le gonflement du sol.....	20
1.7.1. Facteurs intrinsèques.....	20
1.7.2. Facteurs externes.....	22
1.8. Impact du gonflement sur les ouvrages.....	23
1.8.1. Ouvrages superficiels.....	24
1.8.2. Ouvrages souterrains.....	28
1.8.3. Recommandations pratiques pour la construction sur sols gonflants.....	28
1.9. Conclusion.....	29

## Chapitre 2

### Prévision du gonflement des sols argileux : Synthèse bibliographique

2.1. Introduction.....	31
2.2. Les corrélations en géotechnique.....	31
2.2.1. Conditions d'utilisation des corrélations.....	31
2.3. Prévision des paramètres de gonflement des sols.....	32
2.4. Modèles empirique pour la prévision des paramètres du gonflement.....	32
2.5. Modèles basés sur les propriétés de plasticité.....	33
2.6. Modèles basés sur les paramètres de compactage.....	37
2.7. Modèles empirique basées sur des entés de différents type.....	46
2.8. Modèles (IA) pour la prévision du gonflement des sols.....	50
2.9. Conclusion.....	55

## Chapitre 3

### Analyse statistique des méthodes de prévision du gonflement des sols

3.1. Introduction.....	57
3.2. Présentation de la base de données .....	57
3.2.1. Propriétés de plasticité.....	58
3.2.2. Caractéristiques granulométriques .....	60
3.2.3. Paramètres de compactage.....	62
3.2.4. Paramètres de gonflement.....	63
3.3. Corrélation entre les différentes propriétés de la de bases de données.....	65
3.4. Analyse statistique des modèles de prévision du potentiel et de la pression de gonflement....	73
3.4.1. Modèles de prévision du pression de gonflement.....	73
3.4.1.1. Modèle de Nayak et al (1971).....	74
3.4.1.2. Modèle de Kormonik et David (1969).....	75
3.4.1.3. Modèle de Sabtan (2005) .....	77
3.4.2. Modèles de prévision du potentiel de gonflement.....	79
3.4.2.1. Modèle de Guiras-Skandji (1996) .....	79
3.4.2.2. Modèle de Seed et al. (1962).....	80
3.4.2.2. Modèle de Kayabali et Yaldiz (2014) .....	82
3.5. Conclusion.....	84

## Chapitre 4

### Apprentissage automatique pour la prévision du gonflemer des sols argileux

4.1. Introduction.....	86
4.2. L'intelligence artificielle en géotechnique.....	86
4.3. Approches informatiques de l'intelligence artificielle .....	86
4.3.1. Apprentissage Bio-inspiré (BL).....	87
4.3.2. Apprentissage Hybride (HL).....	87
4.3.3. Apprentissage Profond (DL).....	89
4.3.4. Apprentissage Automatique (ML).....	89
4.4. Modèle Régression par Processus Gaussien.....	90
4.5. Application du Machine Learning pour la prévision du gonflement des sols.....	92

4.5.1. Base des données.....	92
4.5.2. Évaluation de la Précision des Prédications .....	94
4.5.3. Amélioration de la Prédiction du Potentiel et de la Pression de Gonflement des Sols....	94
4.6. Études paramétriques.....	97
4.7. Discussion des résultats .....	100
4.8. Conclusion.....	101

## Conclusions générales

Conclusions générales.....	103
Perspectives et recommandations.....	104
Liste Des Références.....	107

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b>	Composition d'un massif sol (Holtz et Kovacs, 1991) .....	6
<b>Figure 1.2</b>	Les couches de la chaussée (Dokodzo 2013).....	8
<b>Figure 1.3</b>	Coupe type d'une chaussée souple (Dokodzo 2013) .....	9
<b>Figure 1.4</b>	Coupe type d'une chaussée rigide (Dokodzo 2013).....	9
<b>Figure 1.5</b>	Pression des charges sur les chaussées (Dokodzo, 2013).....	9
<b>Figure 1.6</b>	Argile naturelle MEB (Cefor et al, 2016).....	11
<b>Figure 1.7</b>	Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976).....	13
<b>Figure 1.8</b>	Mécanisme du phénomène de retrait-gonflement.....	13
<b>Figure 1.9</b>	Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen 1988).....	14
<b>Figure 1.10</b>	Gonflement ou augmentation de volume d'un élément de sol ou de roche et les mécanismes opposés (Bekkouche et al, 2009).....	16
<b>Figure 1.11</b>	Courbe de retrait (Tripathy et al 2002).....	19
<b>Figure 1.12</b>	Abaque pour l'identification des sols gonflants d'après Williams et Donaldson...	21
<b>Figure 1.13</b>	Abaque d'évaluation du potentiel de gonflement d'après Seed et al (1962).....	22
<b>Figure 1.14</b>	Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale Alonso et al. (1987) .....	22
<b>Figure 1.15</b>	Variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche. Sridaharan et al (1986).....	23
<b>Figure 1.16</b>	Tassement différentiel du terrain sous Les fondations d'une station de pompage Benaissa (2011).....	24
<b>Figure 1.17</b>	Hôpital Moulay Ismaïl, (Meknès) dégradations dues au gonflement du sol Benaissa (2011).....	25
<b>Figure 1.18</b>	Crête du barrage Joe Pool (Puppala 2021).....	25
<b>Figure 1.19</b>	Dégâts causés par le gonflement des sols expansifs (Puppala 2021).....	26
<b>Figure 1.20</b>	Asphalte gonflé (Palinchak 2010).....	26
<b>Figure 1.21</b>	Route exposée au retrait-gonflement des sols (Cerema 2021).....	27
<b>Figure 1.22</b>	Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel (Benaissa 2011).....	28
<b>Figure 2.1</b>	Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites de la pression de gonflement : sols GB et KB (Nayak et Christensen 1970).....	39
<b>Figure 2.2</b>	Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites de la pression de gonflement pour tous les sols (Nayak et Christensen 1970).....	39
<b>Figure 2.3</b>	Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites du potentiel de gonflement : sols GB et KB (Nayak et Christensen 1970).....	40
<b>Figure 2.4</b>	Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites du potentiel de gonflement pour tous les sols (Nayak et Christensen 1970).....	40

<b>Figure 2.5</b>	Comparaison des méthodes de prévision du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement des sols étudiés par : (a) Nayak et Christensen 1970 (b) Seed et al. (1962).....	41
<b>Figure 2.6</b>	Variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche (Sridaharan 1986).....	43
<b>Figure 2.7</b>	Comparaison des pressions de gonflement mesurées/prédites (Erzin et Erol 2004).....	44
<b>Figure 2.8</b>	Classification des sols gonflants (Mouroux et al 1969).....	44
<b>Figure 2.9</b>	Comparaison entre le pourcentage de gonflement expérimental et le pourcentage de gonflement par SANN (Basma et al 2003).....	51
<b>Figure 2.10</b>	Comparaison des valeurs mesurées et prédites de la pression de gonflement latéral par ANN et MLR en fonction du numéro de test (Ikizler et al. 2009).....	52
<b>Figure 2.11</b>	Comparaison des prévisions de gonflement vertical entre les modèles ANN pour diverses valeurs de limites de liquidité (Bekhor et al, 2013).....	52
<b>Figure 2.12</b>	Etude paramétrique des effets des variables sur le potentiel de gonflement du sol expansif traité à partir du modèle ANFIS (Onyelowe et al. 2021.....	53
<b>Figure 2.13</b>	Comparaison des Prévisions de Pression de Gonflement Expérimentale et Modélisée Utilisant les Techniques GEP et MEP sur les Données d'Entraînement (Jalal et al.2023).....	54
<b>Figure 3.1</b>	Carte de Casagrand des sols de la base de données selon la classification USCS....	58
<b>Figure 3.2</b>	Distribution des limites de liquidité LL.....	59
<b>Figure 3.3</b>	Distribution des limites de plasticité LP.....	59
<b>Figure 3.4</b>	Distribution des indices de plasticité IP.....	60
<b>Figure 3.5</b>	Distribution des teneurs des composants des argiles.....	61
<b>Figure 3.6</b>	Distribution des densités sèche ( $\gamma_d$ ).....	62
<b>Figure 3.7</b>	Distribution des teneurs en eau (WC).....	63
<b>Figure 3.8</b>	Distribution de potentiel de gonflement SP (%).....	64
<b>Figure 3.9</b>	Distribution de pression de gonflement Ps (KN/m <sup>2</sup> ).....	64
<b>Figure 3.10</b>	Matrice des corrélations entre les propriétés de la base de données.....	66
<b>Figure 3.11</b>	Corrélations entre la potentiel de gonflement (Sp) et la limite de liquidité (LL)....	67
<b>Figure 3.12</b>	Corrélations entre l'indice de plasticité (IP) et la potentiel de gonflement (Sp)....	67
<b>Figure 3.13</b>	Corrélations entre la limite de plasticité (LP) et la potentiel de gonflement (Sp)...	68
<b>Figure 3.14</b>	Corrélations entre la teneur en eau (WC) et la potentiel de gonflement (Sp).....	68
<b>Figure 3.15</b>	Corrélations entre la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et la potentiel de gonflement (Sp).....	69
<b>Figure 3.16</b>	Corrélations entre la teneur en argile (Argiles) et la potentiel de gonflement (Sp).	69
<b>Figure 3.17</b>	Corrélations entre la limite de liquidité (LL) et la pression de gonflement (Ps)....	70
<b>Figure 3.18</b>	Corrélations entre l'indice de plasticité (IP) et la pression de gonflement (Ps).....	70
<b>Figure 3.19</b>	Corrélations entre la limite de plasticité (LP) et la pression de gonflement (Ps).....	71

<b>Figure 3.20</b>	Corrélations entre la teneur en eau (WC) et la pression de gonflement (Ps).....	71
<b>Figure 3.21</b>	Corrélations entre la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et la pression de gonflement (Ps).....	72
<b>Figure 3.22</b>	Corrélations entre la teneur en eau (Argiles) et la pression de gonflement (Ps).....	72
<b>Figure 3.23</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales de la pression de gonflement et celles prédites par le modèle de Nayak et al. (1971).....	75
<b>Figure 3.24</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales de la pression de gonflement et celles prédites par le modèle de Kormonik et David (1969).....	77
<b>Figure 3.25</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales de la pression de gonflement et celles prédites par le modèle de Sabtan (2005).....	78
<b>Figure 3.26</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales du potentiel de gonflement et celles prédites par le modèle de Guiras-Skandji (1996) .....	80
<b>Figure 3.27</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales du potentiel de gonflement et celles prédites par le modèle de Seed et al. (1962).....	81
<b>Figure 3.28</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales du potentiel de gonflement et celles prédites par le modèle de Kayabali et Yaldiz (2014).....	83
<b>Figure 4.1</b>	Approches de l'intelligence artificielle utilisant les techniques d'informatique souple (Khatti et Grover 2023).....	88
<b>Figure 4.2</b>	Organigramme montrant les étapes pour développer le modèle de GPR.....	92
<b>Figure 4.3</b>	Comparaison entre le potentiel de gonflement réel et prédit : données de d'entraînement.....	95
<b>Figure 4.4</b>	Comparaison entre la pression de gonflement réel et prédit : Données de d'entraînement.....	95
<b>Figure 4.5</b>	Comparaison entre le potentiel de gonflement réel et prédit : Données de test.....	96
<b>Figure 4.6</b>	Comparaison entre la pression de gonflement réel et prédit : données de de test.....	96
<b>Figure 4.7</b>	Relation entre l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement pour différents teneurs en eau.....	97
<b>Figure 4.8</b>	Relation entre l'indice de plasticité et pression de gonflement pour différents teneurs en eau.....	98
<b>Figure 4.9</b>	Relation entre la teneur en eau et le potentiel de gonflement pour différents indices de plasticité.....	98
<b>Figure 4.10</b>	Relation entre la teneur en eau et la pression de gonflement pour différents indices de plasticité.....	99

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1</b>	Propriétés texturales et autres caractéristiques des sols (Holtz et Kovacs 1991)....	7
<b>Tableau 2.1</b>	Potentiel de gonflement d'après Seed et al (1962).....	33
<b>Tableau 2.2</b>	Potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayana (1965).....	34
<b>Tableau 2.3</b>	Potentiel de retrait d'après Holtz et Gibbs (1956).....	34
<b>Tableau 2.4</b>	Potentiel de gonflement d'après Holtz et al (1973).....	35
<b>Tableau.2.5</b>	Potentiel de gonflement d'après le BRE (1980).....	36
<b>Tableau.2.6</b>	Pression et potentiel de gonflement d'après Chen (1988).....	36
<b>Tableau 2.7</b>	Paramètres utilisés pour configurer le système ANFIS (Onyelowe et al. 2021)....	54
<b>Tableau 3.1</b>	Résumé des paramètres de la base de données.....	65
<b>Tableau 3.2</b>	Analyse statistique du modèle de Nayak et al (1971).....	74
<b>Tableau 3.3</b>	Analyse statistique du modèle de Kormonik et David (1969).....	76
<b>Tableau 3.4</b>	Analyse statistique du modèle de Sabtan (2005).....	78
<b>Tableau 3.5</b>	Analyse statistique du modèle de Guiras-Skandji (1996).....	79
<b>Tableau 3.6</b>	Analyse statistique du modèle de Seed et al. (1962).....	80
<b>Tableau 3.7</b>	Analyse statistique du modèle de Kayabali et Yaldiz (2014).....	82
<b>Tableau 4.1</b>	Statistiques descriptives pour les variables d'entrées.....	93
<b>Tableau 4.2</b>	Métriques de performance pour le potentiel et la pression de gonflement.....	94

## LISTE DES NOTATIONS

Sp	%	Potentiel de gonflement
Ps	KPa	Pression de gonflement
Fs	%	Gonflement libre
yd	KN/m <sup>3</sup>	densité sèche maximum
Wc ; W <sub>0</sub>	%	Teneur en eau initiale
W <sub>opt</sub> , OMC	%	teneur en eau optimum Proctor modifié
LL	%	limite de liquidité
LP	%	limite plasticité
IP	%	indice de plasticité
SI	%	Indice de retrait
CEC	meq/100g	capacité d'échange cationique
LR	%	limite de retrait
CBR	-	essai California Bearing Ratio
AC	%	l'activité
MVB	g	valeur de bleu méthylène
Limon	%	teneur en limon
Argile ; C	%	teneur en argile
sable	%	teneur en sable
Fines	%	teneur en fins
σ <sub>v</sub>	KPa	pression de confinement
MH	-	Limon graveleux et/ou sableux de haute plasticité
QD	-	la poussière de carrière
Ch	-	La chaux
ML	-	Limon graveleux ou sableux
CH	-	Argile limoneuse, graveleuse et/ou sableuse
SC	-	Sable avec un peu d'argile
CL	-	Limon argileux, graveleux et/ou sableux
R <sup>2</sup> , r <sup>2</sup>	-	Coefficient de détermination
F-test	-	Fisher test
t-test	-	Student test
P> t	-	P value of Student test
α= 0,05	-	Seuil de significativité statistique de 5%
RME	%	Erreur moyenne relative
Std.Err	-	Standard Error

t value	-	Student value of Student test
Conf. Interval	-	Confidence interval
Signif.	-	Significativité statistique
E	%	Erreur relative entre la valeur expérimentale et théorique
P <sub>r</sub>	-	P value of Fisher test
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
GEP	-	programmation d'expression génique
MEP	-	programmation d'expression multigénique
NF	-	Norme Française
EN	-	Norme européenne
USCS	-	Unified Soil Classification System
AASHTO	-	American Association of State Highway and Transportation Officials
psi	(unité)	Livre-force par pouce carré (Pound-force per square inch)

---

# **Introduction Générale**

## Généralités

Les sols argileux sont composés de fines particules formant une structure poreuse partiellement ou entièrement remplie d'eau. Ces particules, en raison de leurs compositions chimiques et minéralogiques, possèdent des charges qui leur permettent d'absorber des molécules d'eau, provoquant ainsi le phénomène de gonflement. Lorsque l'argile peut se déformer librement, cette absorption d'eau entraîne une augmentation de volume. En revanche, si la déformation est empêchée, une "pression de gonflement" se développe. Cette augmentation de volume peut causer divers problèmes, notamment pour les bâtiments, les ouvrages de soutènement, les tunnels et les forages pétroliers.

Étant donné la complexité et l'importance du phénomène de gonflement, diverses méthodes expérimentales ont été développées pour le caractériser. Cependant, ces méthodes sont souvent fastidieuses, longues, coûteuses, et peuvent produire des résultats très variés. L'objectif principal de ce travail est de revoir et d'analyser les modèles existants pour la prédiction du potentiel et de la pression de gonflement des sols routiers. Nous chercherons à identifier les paramètres influençant le gonflement et à établir des corrélations entre ces paramètres et les caractéristiques de gonflement. En effet, certains modèles statistiques, basés sur diverses techniques ont été proposés dans la littérature pour évaluer le potentiel de gonflement des sols routiers à partir de propriétés élémentaires du sol, telles que les propriétés de plasticité et les propriétés de compactage. Une observation commune dans la plupart de ces recherches est l'absence de certains paramètres statistiques importants, comme l'étude de validation des modèles et une évaluation précise à l'aide de tests statistiques appropriés pour ce type d'étude. Cela permettrait de déterminer si les paramètres inclus dans les modèles proposés ont une contribution significative sur les propriétés étudiées, autrement dit, d'évaluer les capacités explicatives des modèles. De plus, la plupart des approches proposées dans les recherches publiées ont été développées en utilisant des données expérimentales limitées, ce qui remet en question la fiabilité et l'applicabilité des modèles à d'autres sols similaires. Pour cette raison, un grand nombre de données ont été collectées à partir de plusieurs études géotechniques sur des sols routiers, et utilisées comme bases de données pour analyser, ajuster et valider les modèles existants.

## **Objectif du Travail**

Ce travail vise à analyser les performances de divers modèles de prédiction des caractéristiques de gonflement des sols routiers, en s'appuyant sur une base de données collectée à partir de la littérature existante. Après avoir ajusté les relations proposées à cette base de données, une analyse statistique sera réalisée, incluant notamment les tests de Student ( $t$ -test) et de Fisher ( $F$ -test). Cette démarche permettra d'évaluer la robustesse et la précision des modèles sélectionnés, fournissant ainsi des outils fiables pour les ingénieurs et chercheurs en géotechnique.

De plus, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle et de machine learning, en particulier le processus de régression gaussienne (GPR), sera explorée pour proposer une méthode de prévision du potentiel et de la pression de gonflement, en utilisant la base de données collectée. En combinant ces techniques avancées avec une analyse statistique rigoureuse, cette recherche a pour objectif de développer des modèles prédictifs fiables et efficaces pour les sols routiers, contribuant ainsi à une meilleure gestion et prévention des risques associés au gonflement des sols.

## **Plan de mémoire**

Afin d'atteindre les objectifs tracés, ce travail est structuré en quatre chapitres principaux

### **Le premier chapitre : Caractéristiques des sols gonflants**

Ce chapitre présente un panorama sur les notions fondamentales des sols argileux. Il traite des problèmes liés aux sols gonflants, des paramètres contrôlant le gonflement, ainsi que des méthodes d'identification et de mesure du potentiel de gonflement.

### **Le deuxième chapitre : Prévion du gonflement des sols argileux : Synthèse bibliographique**

Ce chapitre propose une synthèse bibliographique des travaux de recherche importants effectués par d'autres chercheurs sur l'élaboration des modèles de prévision du potentiel de gonflement des argiles. Il rappelle également quelques notions fondamentales de la statistique couramment utilisées pour les études de corrélation en mécanique des sols.

**Le troisième chapitre : Analyse statistique des méthodes de prévision du gonflement des sols**

Ce chapitre est consacré à l'analyse, à l'ajustement, à la validation et à l'évaluation d'un ensemble de modèles empiriques proposés par d'autres chercheurs, estimant le potentiel et la pression de gonflement des sols argileux. Une partie de ce chapitre présente la base de données géotechnique collectée de la littérature, utilisée pour les opérations d'ajustement et d'évaluation des modèles.

**Le quatrième chapitre : Apprentissage automatique pour la prévision du gonflement des sols argileux**

Dans ce chapitre, nous utilisons des techniques d'intelligence artificielle (IA) et de machine Learning, notamment le processus de régression gaussienne (GPR), pour prédire le potentiel de gonflement et la pression de gonflement des sols argileux. Des études paramétriques sont menées afin d'évaluer les relations entre les variables indépendantes et les variables dépendantes (propriétés étudiées), en utilisant un modèle prédictif basé sur l'IA.

Enfin, en dernier lieu, nous allons finir avec des conclusions générales, des perspectives et des recommandations.

# Chapitre 1

---

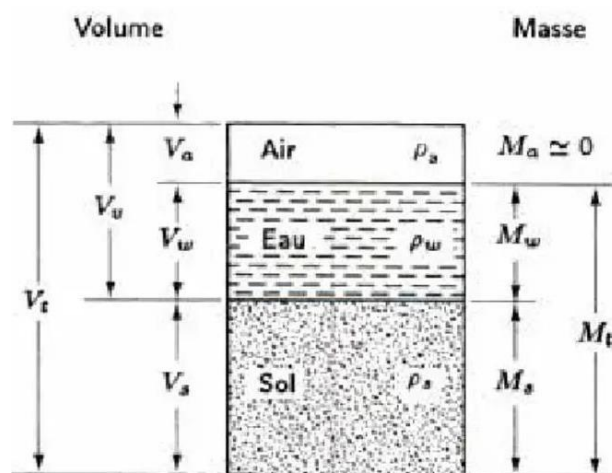
## Caractéristiques des sols gonflants

## 1.1. Introduction

Les sols argileux sont sensibles aux variations de l'humidité, ce qui peut affecter leur cohésion et leur comportement mécanique, sont souvent utilisés dans la construction de routes mais ils posent des défis particuliers en raison de leur sensibilité à l'eau, ils peuvent se dilater et devenir instables, ce qui peut endommager les routes construites dessus. Les sols argileux ont tendance à gonfler lorsqu'ils absorbent de l'eau, ce phénomène appelé 'gonflement', est dû à la capacité des particules d'argile à retenir l'eau entre leurs couches. Dans des nombreuses régions, les routes sont construites sur des dépôts d'argile, ce qui nécessite des mesures spéciales pour assurer la stabilité et la durabilité de la chaussée. Cela peut inclure des techniques ou la mise en place de systèmes de drainage pour prévenir les problèmes liés au gonflement et au retrait des sols argileux. Certains sols argileux changent de volume en fonction de leur teneur en eau et peuvent, de ce fait entraîner différents types de désordres dans les infrastructures routières. Ces désordres peuvent compromettre la sécurité et la durabilité des routes, d'où l'importance de prendre en compte les caractéristiques des sols argileux lors de la conception et de la construction des routes. Ce chapitre consiste en une recherche bibliographique sur la caractérisation des sols argileux gonflants.

## 1.2. Définition des sols

De façon générale, on peut dire qu'un sol est constitué d'un ensemble de particules solides entourées de vides. Les particules solides sont des grains minuscules de différents minéraux alors que les vides peuvent être remplis d'eau, d'air ou d'air et d'eau en proportions variables. La figure 1.1 montre la composition d'un massif de sol (Holtz et Kovacs 1991).



**Figure 1.1** Composition d'un massif de sol (Holtz et Kovacs, 1991)

### 1.3. Texture des sols

La texture d'un sol et, en particulier, celle d'un sol grossier, est directement liée à ses propriétés géotechniques. En réalité, la texture est à la base de certains systèmes de classification utilisés en agronomie plutôt qu'en mécanique des sols. Cependant, certains termes employés pour décrire la texture (gravier, sable, limon et argile) sont utiles en géotechnique (Tableau 1.1). La présence d'eau dans les sols à grains fins influence considérablement le comportement de ces sols. En fait, elle joue un rôle beaucoup plus important que la grosseur ou la texture des grains. L'eau modifie les forces qui agissent sur les grains et peut influencer leur plasticité et leur cohésion. Selon leur texture, les sols peuvent être classés en deux catégories : les sols à grains grossiers et les sols à grains fins. On remarquera également que la substantive argile désigne aussi bien une catégorie de minéraux appelés minéraux argileux (Holtz et Kovacs 1991)

**Tableau 1.1** Propriétés texturales et autres caractéristiques des sols (Holtz et Kovacs 1991)

Propriétés	Graviers, sables	Limons	Argiles
Grosseur des grains	Gros grains visibles à l'œil nu	Grains fins invisibles à l'œil nu	Grains fins invisibles à l'œil nu
Caractéristiques	Pulvérulents, non plastiques, granulaires	Pulvérulents, non plastiques, granulaires	Cohérents, plastiques
Effets de l'eau sur le comportement du sol	Sans grande importance (sauf matériaux granulaires lâches, saturés et soumis à des charges dynamiques)	Importants	Très importants
Effets de la distribution granulométrique sur le comportement du sol	Importants	Sans grande importance	Sans grande importance

### 1.4. Généralités sur sol routier

#### 1.4.1. Définition

La route se définit comme une voie de circulation créée et aménagée pour supporter le trafic et les charges pour une durée donnée (Dokodzo 2013).

### 1.4.2. Caractéristiques de la route

La route est l'ensemble formé par : le sol support ou terrain, le terre-plein centrale, les accotements ou trottoirs, les ouvrages routiers et essentiellement par la chaussée (Figure 1.2).

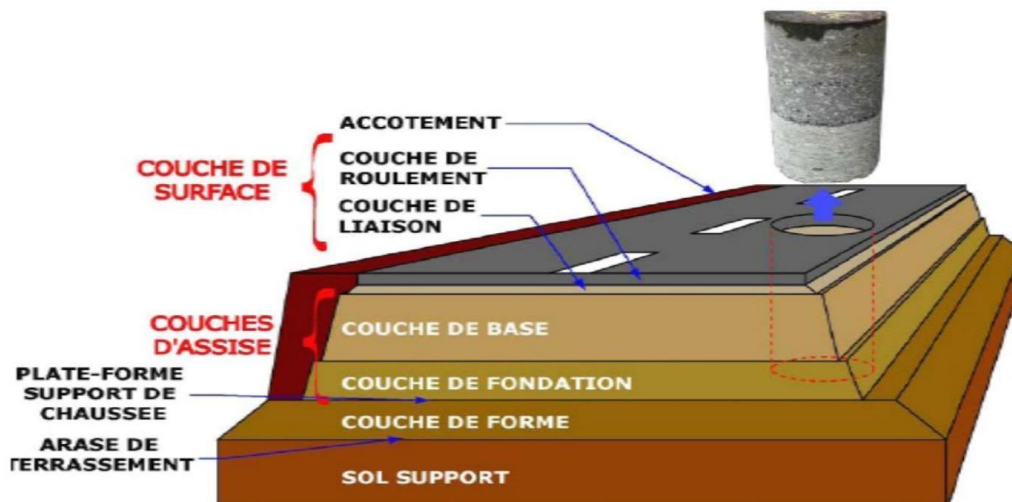


Figure 1.2 Les couches de la chaussée (Dokodzo 2013)

### 1.4.3. La Chaussée

Sur le plan structural, les chaussées se présentent comme des structures multicouches disposées horizontalement et mises en œuvre sur un ensemble géologique appelé plate-forme. Celle-ci est constituée du sol du terrain naturel terrassé (sol support), surmonté au besoin d'une couche de forme. De bas en haut, le corps de chaussée comporte généralement les éléments suivants : la couche de fondation ; la couche de base ; et la couche de surface.

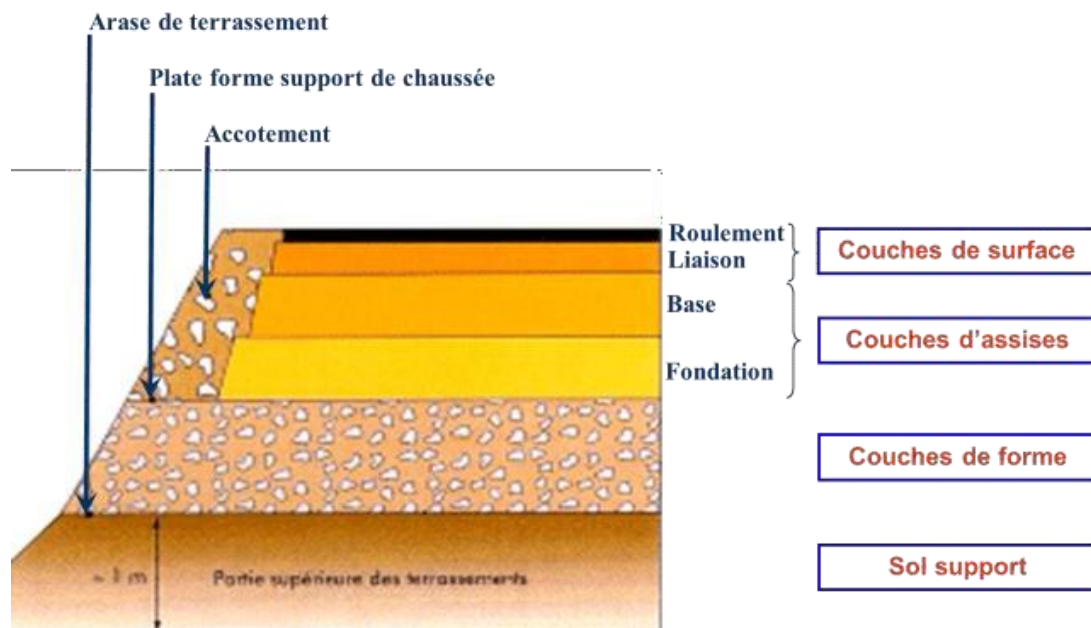
#### 1.4.3.1. Structure des chaussées

Il existe deux catégories principales de chaussées : les chaussées souples et les chaussées rigides. Les chaussées souples utilisent des matériaux granulaires et bitumineux pour leur flexibilité. Les chaussées rigides sont faites de dalles de béton, offrant une grande résistance.

##### a. Chaussée souple

Les chaussées souples sont constituées d'une couche de surface en matériau bitumineux qui surmonte une assise en grave non traitée, l'ensemble reposant sur le sol support. Ce type de chaussée présente une faible rigidité, due à l'absence de liant au niveau de la couche d'assise et d'une couche de roulement de faible épaisseur. Le rôle principal de cette assise, est de

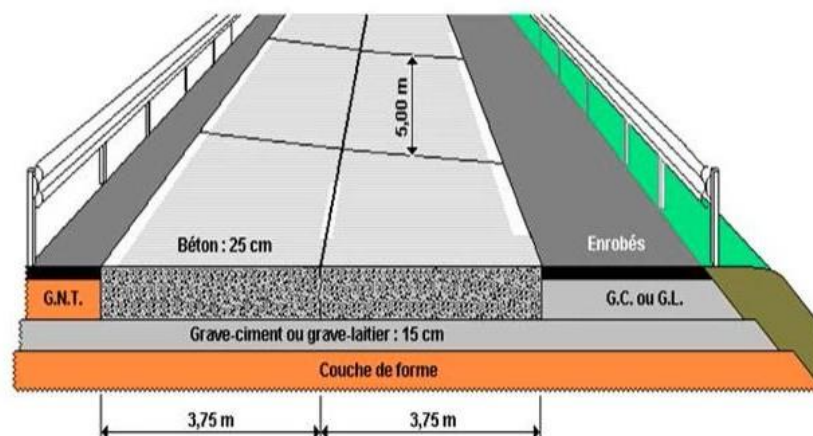
diffuser les contraintes dues à des charges roulantes, afin de les amener à des niveaux de contraintes compatibles avec les caractéristiques du sol en place (Figure 1.3).



**Figure 1.3** Coupe type d'une chaussée souple (Dokodzo 2013)

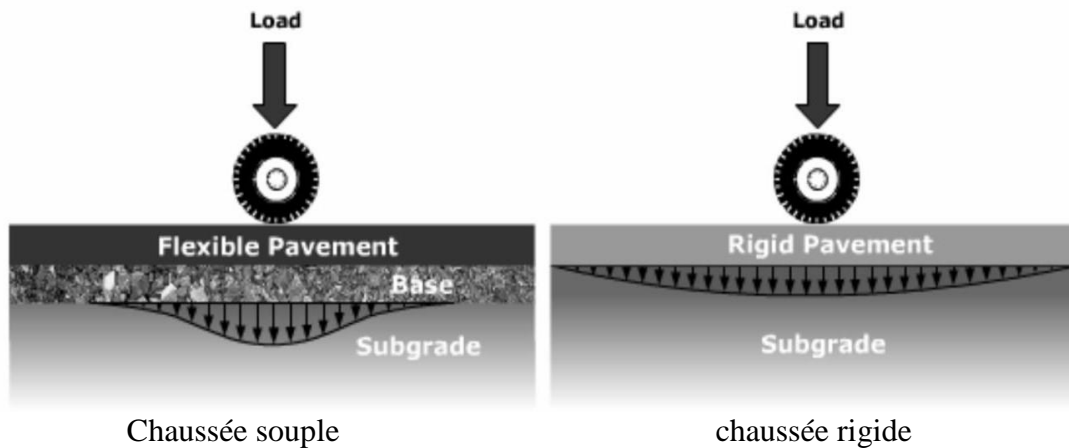
### b. Chaussées rigides

Une chaussée rigide se compose d'une dalle de béton de ciment Portland reposant sur un sol compacté, ou sur une mince fondation de pierre ou de gravier concassé, ou sur une fondation stabilisée. La couche de béton assume la responsabilité structurale et fonctionnelle. Les couches inférieures de cette chaussée ont la mission d'assumer le support stable et uniforme pour la couche de surface (Figure 1.4).



**Figure 1.4** Coupe type d'une chaussée rigide (Dokodzo 2013)

La pression qui règne sur ces dalles au passage des charges ne dépend guère de l'épaisseur de la dalle. Ces pressions sont largement réparties sous la charge et la déformée de la dalle est une faible dépression très étalée. Pour diffuser ces pressions, il faut combiner entre l'épaisseur et résistance du béton de la dalle (Figure 1.5).



**Figure 1.5** Pression des charges sur les chaussées (Dokodzo, 2013)

#### 1.4.3.2. Rôle des couches

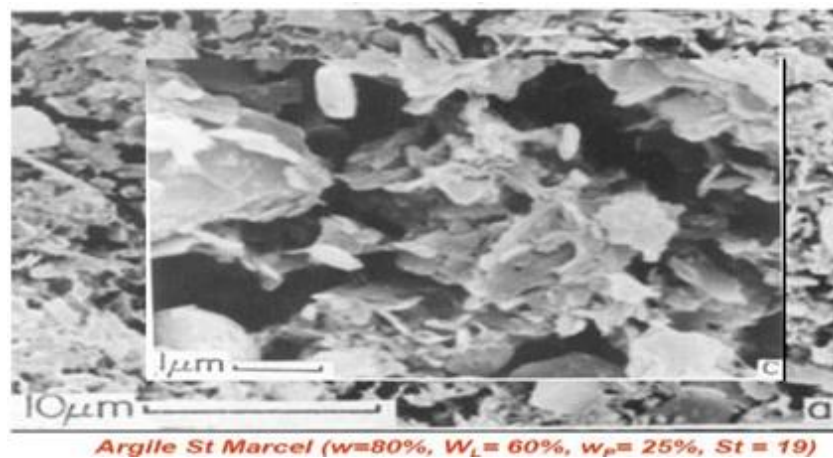
Les différentes couches d'une chaussée ont pour objectif de répartir l'effort mécanique sur le sol et d'assurer une décroissance progressive de la charge transmise jusqu'au sol de fondation. La couche de forme, si elle est requise, a plusieurs fonctions essentielles. Elle vise à augmenter l'homogénéité de la plate-forme, à empêcher les remontées d'eau grâce à son effet anti-capillaire, à éviter les remontées d'argiles, jouant ainsi un rôle anti-contaminant, à niveler le fond de forme pour une surface plane et à permettre un bon compactage du corps de la chaussée. Le corps de chaussée constitue la partie résistante de la structure, capable de transmettre efficacement les pressions vers le terrain naturel. Il se compose de la couche de base et de la couche de fondation. La couche de roulement a pour objectifs de transmettre les charges de roulement, d'imperméabiliser la chaussée pour la protéger de l'eau et d'assurer une surface unie et régulière pour la circulation.

### 1.5. Argiles

#### 1.5.1. Définition

On définit les argiles comme des sols de diamètre moyen inférieur à  $2\mu\text{m}$ . Il s'agit donc d'un sous-groupe des sols fin.

Les argiles proviennent de l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicates (Figure 1.6).



**Figure 1.6** Argile naturelle MEB (Cefor et al, 2016)

Les argiles jouent un rôle crucial dans les sols en raison des propriétés mécaniques qu'elles apportent, telles que la cohésion et la liaison des particules du sol. Elles sont également essentielles pour la fertilité des sols, grâce à leur capacité à stocker les éléments nécessaires à la croissance des plantes. Toutefois, la signification des argiles peut varier selon la perspective adoptée, qu'elle soit géologique, pédologique ou géotechnique (Cefor et al, 2016).

### 1.5.2. Origine des argiles

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et déposés. Certains dépôts se transforment par diagenèse (déshydratation et compactage) et forment des roches argileuses compactes et des schistes. (Ceforet al 2016).

### 1.5.3. Propriétés géotechniques et pédologiques des argiles

Les argiles déterminent sensiblement les propriétés de la fraction fine du sol, en particulier en raison de leur comportement avec l'eau. Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont la forte affinité pour l'eau est connue. Une humidification de ces sols à partir d'un certain état induit des gonflements importants dus, pour une part à la saturation progressive des pores du sol, qui fait disparaître les forces capillaires, et d'autre part, à l'absorption de molécules d'eau sur la surface extérieure des particules d'argile et à la pénétration de ces molécules entre les feuillets d'argiles (Aissiou, 2010).

Les argiles ont une affinité pour les liquides polaires tels que l'eau, en raison de la nature dipolaire de cette molécule, qui possède un pôle positif (hydrogène) et un pôle négatif (oxygène). Elles jouent un rôle important dans le stockage des éléments nutritifs pour les plantes, car certaines argiles possèdent une capacité d'échange cationique (CEC) très élevée (Cefor, 2016).

Dans la pratique, une meilleure connaissance de l'état de l'eau et ces propriétés de rétention et de transfert à travers les argiles permet de mieux comprendre le comportement d'ouvrages bâtis en sol non saturé tels que les ouvrages en sol compacté (remblai routier, barrage en terre, barrières géologiques d'étanchéité de centre de stockage de déchets) (Delage et al., 1999).

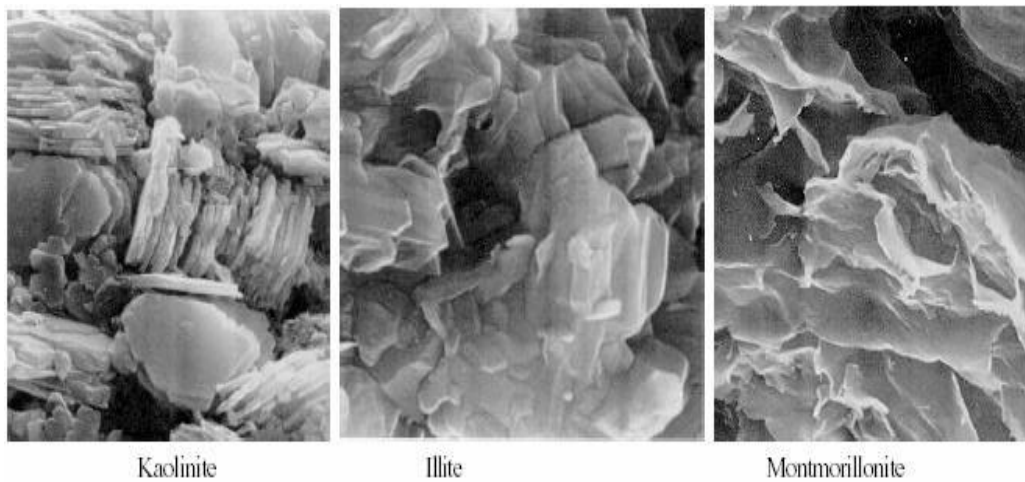
Les sols argileux sont connus pour leur forte propension à réagir avec l'eau. Une humidification des particules argileuses provoque le gonflement. Ce phénomène est complexe, il est dû d'une part à la saturation des pores du sol qui neutralise les forces capillaires et d'autre part à l'absorption des molécules d'eau sur la surface des particules argileuses avec pénétration d'eau entre les feuillettes qui constituent ces particules. En cas d'évaporation de l'eau contenue dans l'échantillon, une diminution de volume se produit, ce qui provoque l'apparition de fissures de retrait. Ces phénomènes de gonflement et de retrait causent de nombreux désordres pour les structures de génie civil fondées en surface des sols gonflants et pour les ouvrages enterrés (Asselman, 2012).

Un nombre important de routes à faible et moyen trafic, construites sur de l'argile expansive, ont souffert de fissures importantes dans la chaussée et de dégradations prématurées. Ces routes se trouvent souvent en mauvais état à cause des variations de volume liées aux fluctuations saisonnières de l'humidité dans les sols sous-jacents (Manosuthkij, 2011).

#### **1.5.4. Nature et différents types de sols argileux**

Les particules argileuses sont un mélange de particules élémentaires de nature, dimensions, forme et propriétés de surface différentes. Les particules élémentaires peuvent être subdivisées en minéraux différents : kaolinite, illite, montmorillonite, ... etc.

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite. Ces différents types d'argiles se comportent différemment vis à vis de l'eau (Figure 1.7).



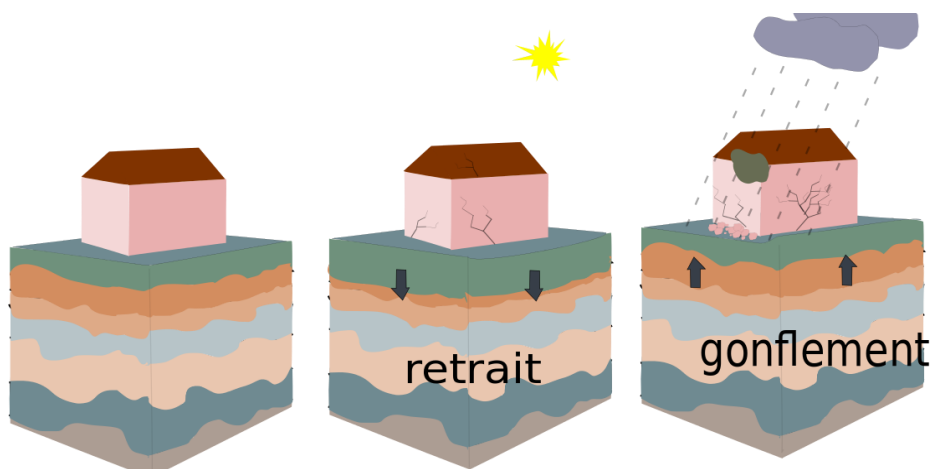
**Figure 1.7** Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976)

## 1.6. Principaux problèmes des sols instables

Dans la nature, on trouve différents types de sols : des sols grenus et des sols fins. Les sols fins, tels que les argiles, les limons et les marnes, peuvent causer des problèmes tels que le gonflement, le tassement et le glissement. Le phénomène qui nous intéresse particulièrement est celui du gonflement.

### 1.6.1. Gonflement du sol

Le gonflement des sols naturels est spécifique à certains sols argileux. Il est principalement lié aux variations de la teneur en eau. A une teneur en eau constante, il n'y a pas, ou il y'a peu de variation de volume. Au contraire, indépendamment des variations des contraintes extérieures (Figure 1.8), lorsqu'on observe une augmentation de la teneur en eau, un phénomène de gonflement se produit. Inversement, lorsque la teneur en eau diminue, un phénomène de retrait-tassement se manifeste.



**Figure 1.8** Mécanisme du phénomène de retrait-gonflement

### 1.6.2. Mécanisme de gonflement

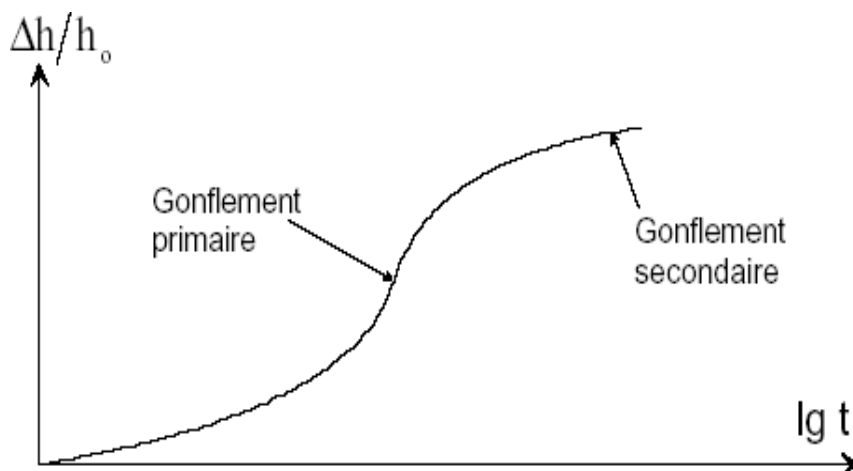
Le processus de gonflement des sols argileux au contact de l'eau et des sels dissous met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés.

### 1.6.3. Nature du phénomène de gonflement

En général, le gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau se modifie. Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les sables et les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais d'une amplitude bien plus petite. Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants aux bâtis au cours des périodes de sécheresse prolongée. En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche (Nowamooz et al 2007).

Le gonflement divisé en un gonflement primaire et un gonflement secondaire, (Chen 1988) (figure) représente la variation relative de la hauteur d'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement (Figure 1.9):

- Gonflement primaire: qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- Gonflement secondaire : qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe.



**Figure 1.9** Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen 1988)

#### 1.6.4. Définition des paramètres du gonflement

Les gonflements des sols naturels est spécifique à certains sols argileux. Il est principalement lié aux variations de la teneur en eau. A teneur en eau constante, il n'y a pas, ou peu, de variation de volume. Au contraire, indépendamment des variations des contraintes extérieures, lorsque la teneur en eau augmente, on observe un phénomène de gonflement et lorsque la teneur en eau diminue, on observe un phénomène de retrait- tassement (Mezhoudet al, 2019).

L'eau joue un rôle majeur dans le comportement des sols non saturés. Sa cohabitation avec l'air dans les pores prend des formes variées, selon que l'eau domine et l'air ne peut se déplacer librement, ou au contraire que l'air occupe l'essentiel des pores et l'eau est bloquée aux contacts des particules, ou encore que l'eau et l'air peuvent se déplacer tous les deux. (Souhilaet al 2009). Les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le gonflement des sols et des roches sont largement répandus. Le phénomène intéresse en effet de vastes secteurs géographiques, prend corps dans de nombreux matériaux et affecte différents types d'ouvrages. Le besoin de tester les sols et les roches en laboratoire par des essais de gonflement, destinés à caractériser ce mode de comportement et à déterminer les paramètres associés utiles à la conception d'ouvrages neufs ou au confortement d'ouvrages existants, s'est donc fait sentir depuis longtemps (Serratrice et Soyez, 1996).

Le gonflement d'un sol argileux peut résulter de la diminution des contraintes en place après une excavation, d'un déchargement ou de l'imbibition du sol sous un état de contraintes constant. Il se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non. Pour leur part, les roches composées d'anhydrite gonflent par hydratation. Le gonflement peut avoir des conséquences néfastes sur les structures adjacentes, voire mettre en cause leur stabilité par les déformations ou les pressions qu'il développe aux limites de l'ouvrage (Serratrice et Soyez, 1996).

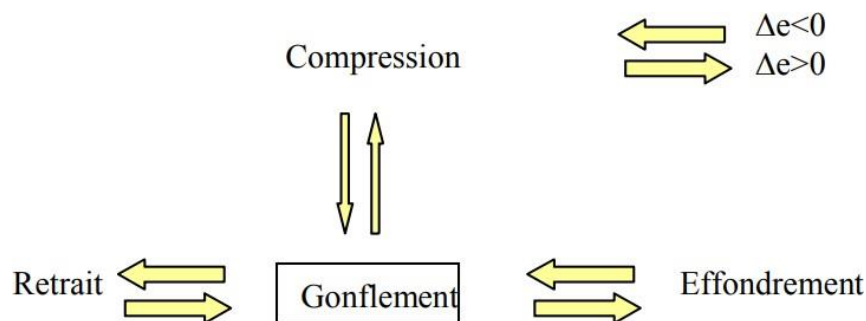
La prévision du gonflement des sols est un élément important des études géotechniques dans les régions où l'on trouve des horizons d'argiles gonflantes et sur consolidées. De nombreux modèles ont été proposés pour la prévision des amplitudes du gonflement à partir de paramètres géotechniques élémentaires, tels que l'indice de plasticité, la teneur en eau initiale, la limite de liquidité, le poids volumique, l'activité, l'indice de retrait, la profondeur d'échantillonnage (Derriche et al, 1998).

La reconnaissance du sol gonflant se fait progressivement tout en se basant sur des données existantes et d'autres recherches. La formation argileuse est connue pour sa sensibilité aux variations de la teneur en l'eau. C'est la raison pour laquelle le phénomène de gonflement se manifeste dans les régions à climat aride et semi-aride. L'importance de ce phénomène dépend essentiellement de la quantité des minéraux gonflants. Son étude se base sur plusieurs aspects à savoir : géologique, climatologique et géotechnique (Medjnou et al, 2014).

Lorsqu'on étudie les problèmes de gonflement rencontrés sur des ouvrages, on s'aperçoit que le gonflement du terrain est étroitement lié aux apports d'eau du milieu extérieur ou environnant et que ce phénomène dépend fortement du type de terrain rencontré (Bekkouche et al, 2009). Par modification de leur teneur en eau, les terrains superficiels argileux varient de volume : retrait lors d'une période d'assèchement, gonflement lorsqu'il y a apport d'eau. Cette variation de volume s'accompagne d'une modification des propriétés mécaniques de ces sols (Figure 1.10).

- $\Delta e > 0$  indique une augmentation de volume
- $\Delta e < 0$  indique une diminution de volume.

Avec  $e$  est l'indice des vides.



**Figure 1.10** Gonflement ou augmentation de volume d'un élément de sol ou de roche et les mécanismes opposés (Bekkouche et al, 2009)

La pénétration d'eau dans les pores du sol ne suffit pas à initier le processus de gonflement. Il faut qu'il s'y développe une pression capable d'augmenter la distance entre les particules du sol et de briser leurs liaisons structurales. C'est pourquoi seules les argiles denses, dans lesquelles la distance entre les particules minérales est inférieure à l'épaisseur des enveloppes hydratées, possèdent la capacité de gonfler. Et plus le sol est dense, moins la distance entre les particules est grande et plus il gonfle fortement. Lorsque le sol se trouve à l'état lâche et que

la distance entre les particules est supérieure ou égale à l'épaisseur des enveloppes hydratées, le sol ne gonfle pas (Ejjaaouani, 2008).

Le pourcentage de gonflement d'un sol devrait augmenter proportionnellement à son poids volumique, à sa limite de liquidité, à sa teneur en argile, à ses indices de plasticité et de retrait, ainsi qu'à sa pression de préconsolidation (Seed et al 1962 ; Ranganatham et Satyanarayana, 1965 ; Nayak et Christensen 1971 ; Vijayvergiya et Gazzhaly 1973). Ces mêmes études rapportent que le gonflement d'un sol expansif devrait être inversement proportionnel à sa teneur en eau naturelle (Komornik et David 1969).

La conception rationnelle d'une chaussée dicte l'identification et l'estimation des caractéristiques de gonflement des couches argileuses sous la structure de la chaussée pour éviter les dommages. Les paramètres liés au gonflement, en particulier la pression, peuvent être estimés lors de l'étude préliminaire du site par l'utilisation des corrélations disponibles dans la littérature. Les expressions empiriques relient les paramètres de gonflement à d'autres caractéristiques géotechniques déterminées par des essais pertinents (Yilmaz, 2006).

#### **1.6.5. Identification des sols gonflant**

Parmi les indicateurs qui donnent une idée sur le potentiel de gonflement des argiles : la limite de retrait, la fraction argileuse (Mccrone and Delly, 1973), la composition minéralogique, analyses thermiques (Barshad, 1965), capacité d'échanges cationiques (Chapman, 1965). Des tests sont également disponibles pour évaluer l'expansion des sols, comme l'essai de gonflement libre, qui permet de déterminer le potentiel d'expansion (Holtz and Gibbs, 1956), l'essai gonflement à volume constant ou à sous charge constante pour déterminer indice de gonflement (Lambe, 1960), l'essai de gonflement CBR (Yoder and Witezak, 1975), l'essai de déformation linéaire d'un sol naturel pour mesurer le coefficient d'extensibilité linéaire (Brasher et al. 1966). De nombreuses méthodes prédictives ont été proposées pour évaluer le potentiel de gonflement en se basant sur des caractéristiques du sol aisément mesurables.

#### **1.6.6. Paramètres de gonflement**

La complexité des phénomènes physico-chimiques et des mécanismes à différentes échelles, accompagnés des éventuelles modifications de la structure du terrain pendant le gonflement, pose d'énormes défis pour caractériser les paramètres hydromécaniques des sols gonflants. Dans ce contexte complexe, une approche macroscopique semble plus appropriée en géotechnique, qui identifie trois concepts clés : la pression de gonflement, le potentiel de

gonflement et l'indice de gonflement. Ces concepts ne sont pas considérés comme des propriétés intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent être définis objectivement car ils dépendent des conditions spécifiques de gonflement. Malgré cette subjectivité, ils sont largement utilisés et ont influencé les procédures d'essais en laboratoire dans le domaine géotechnique.

#### **1.6.6.1.Pression de gonflement (Ps)**

La pression de gonflement d'un composant de sol ou de roche, dont l'état initial est déterminé, représente la contrainte nécessaire pour préserver son volume constant sans aucune distorsion pendant l'absorption d'eau jusqu'à ce qu'il soit complètement saturé (Hossein Nowamouz, 2007).

#### **1.6.6.2.Potentiel de gonflement (SP)**

Le potentiel de gonflement d'un élément de sol ou de roche, dont l'état initial est défini, correspond à la déformation maximale ( $\Delta h/h$ ) induite par l'absorption de cet élément lorsqu'il est soumis à une contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à ce qu'il soit entièrement saturé.

#### **1.6.6.3.Indice de gonflement (Cg)**

L'indice de gonflement traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation par gonflement est obtenue au bout d'un temps d'équilibre.

En principe, ces trois phénomènes sont évalués sur des échantillons soumis à une compression isotrope ou œdométrique. Alors que la pression de gonflement et le potentiel de gonflement sont mesurés à la saturation du sol, l'indice de gonflement est obtenu par un processus de déchargement mécanique.

Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'effet de l'eau incluent les sols argileux naturels (en fonction de leur composition minéralogique, de leur saturation et de la composition chimique de l'eau), les sols argileux compactés, les marnes, les roches argileuses et les roches contenant de l'anhydrite. Le gonflement peut affecter les massifs de sol ou de roche de manière globale ou localisée, en fonction des variations, des fissures, et de la présence de failles remplies de produits d'altération, ainsi que de la géométrie des frontières d'imbibition. Une clarification de la définition du gonflement est nécessaire, mais il est d'abord important

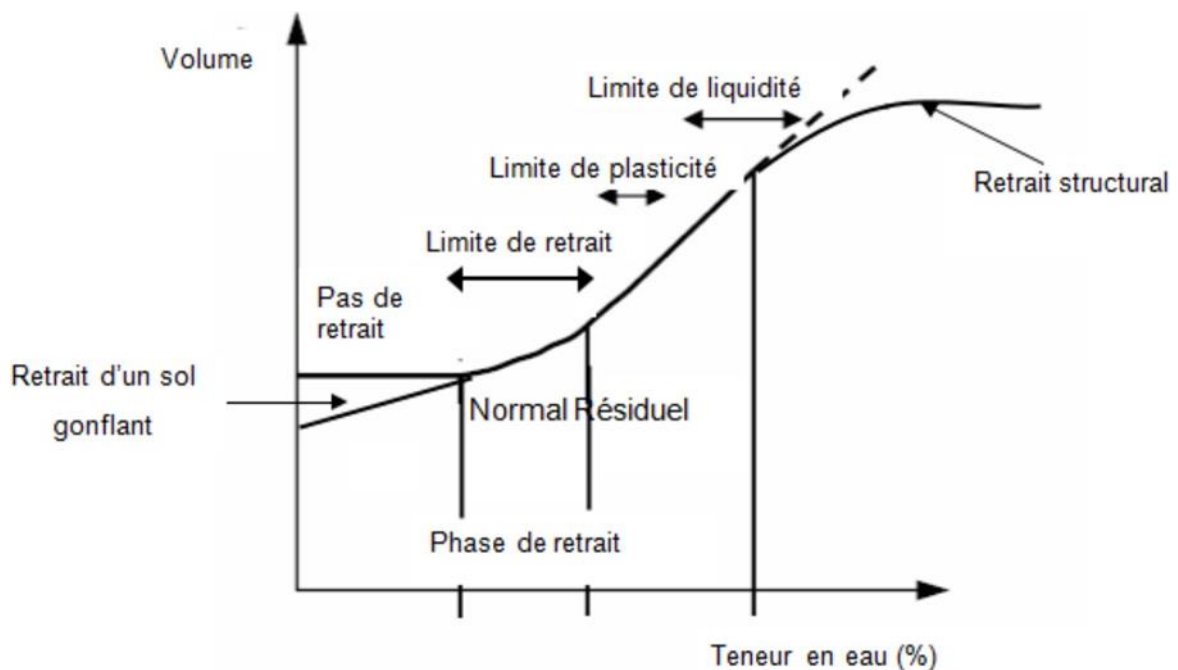
d'identifier les phénomènes physico-chimiques et mécaniques impliqués individuellement ou en combinaison dans le processus de gonflement (Serratrice et Soyez 1996).

### 1.6.7. Retrait des sols gonflants

Le retrait-gonflement des sols argileux est un phénomène naturel qui affecte les routes construites sur des sols argileux. Ce phénomène est causé par les variations de teneur en eau des sols argileux en réponse aux changements de conditions climatiques, qui peuvent conduire à des mouvements du sol.

Le déroulement du retrait peut être décrit en trois phases (Figure 1.11), en fonction de la diminution du volume d'eau et de sol : retrait normal, retrait résiduel et absence de retrait (Tripathy et al, 2002) :

- Retrait normal : la diminution du volume du sol est égale au volume d'eau perdu; dans cette phase, le sol est toujours saturé et donc, l'air n'entre pas dans les pores.
- Retrait résiduel : une fois la limite de retrait atteinte, l'air entre et occupe les vides du sol (point d'entrée d'air), de telle sorte que la diminution du volume de sol est beaucoup plus faible que le volume d'eau perdue.
- L'absence de retrait : le volume du sol ne peut plus varier du fait de l'agencement des particules, mais l'eau continue de s'évaporer.



**Figure 1.11** Courbe de retrait (Tripathy et al, 2002)

## 1.7. Facteurs qui influencent le gonflement du sol

Le gonflement du sol est un phénomène complexe qui peut avoir des conséquences significatives sur les structures bâties et les infrastructures. Ce processus de gonflement est influencé par une multitude de facteurs qui peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les facteurs intrinsèques et les facteurs externes.

### 1.7.1. Facteurs intrinsèques

#### a. Composition minéralogique

Ce facteur est très important pour estimer le gonflement d'un sol. Les propriétés gonflantes du matériau seront d'autant plus marquées que le pourcentage d'éléments argileux est grand (<2  $\mu\text{m}$ ). Par l'étude de (Suratman, 1985) de gonflement libre de trois types d'argile : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. Il remarque une supériorité pour la montmorillonite par les trois argiles utilisées des différences dans le taux et la cinétique du gonflement.

#### b. Capacité d'échange cationique (CEC)

C'est la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles et représente la charge (sous forme de cations attirés à la surface de la particule) nécessaire pour l'électro neutralité.

#### c. Surface spécifique d'une particule argileuse

Elle est comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

#### d. Activité des argiles

Les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et ceci représente la quantité d'argile présente dans le sol.

Skempton (1953) a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ( $C < 2\mu\text{m}$ ).

$$A = \frac{I_p}{C} \quad (1.1)$$

Les classifications des argiles selon leurs activités par rapport Skempton comme suit :

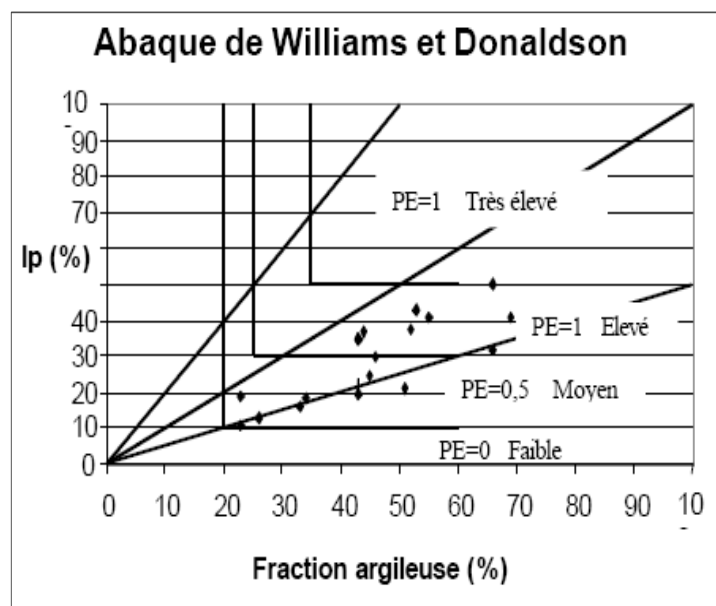
1. Argile inactives : pour ceux qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de kaolinite, ou qui contiennent peu de minéraux argileux.
2. Argile normale qui a une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
3. Argile active dont l'activité est comprise entre 1,25 et 2.
4. Argile très active ceux qui ont une activité supérieure à 2.

Seed et al.(1962) ont modifiés formulation de Skempton pour les argiles compactées (Figure 1.13) :

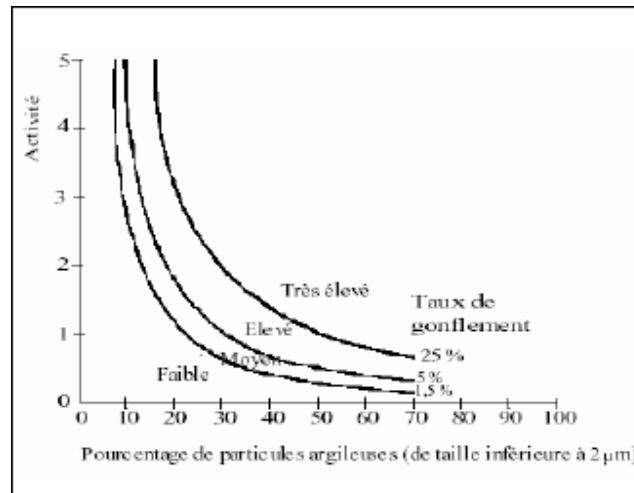
$$A = \frac{Ip}{C - n} \quad (1.2)$$

$n = 5$  cas des sols naturels,  $n = 10$  cas des sols reconstitués.

D'après l'abaque donnée par Williams et Donaldson (Seed et al, 1962) l'activité est proportionnelle à l'indice de plasticité et inversement proportionnelle à la teneur en éléments inférieurs à deux microns (Figure 1.12). Williams et Donaldson ont proposés un abaque permettant évaluation le potentiel de gonflement à partir de l'activité et du pourcentage de particules fines ( $C < 2\mu\text{m}$ ).



**Figure 1.12** Abaque pour l'identification des sols gonflants d'après Williams et Donaldson



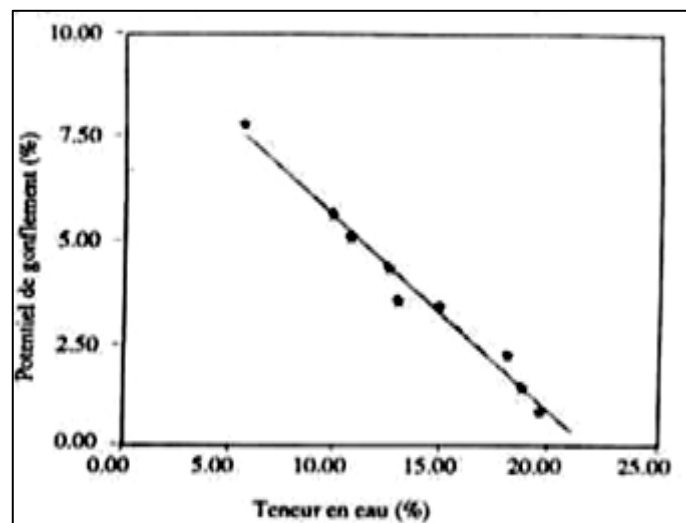
**Figure 1.13** Abaque d'évaluation du potentiel de gonflement d'après Seed et al (1962)

### 1.7.2. Facteurs externes

Ces facteurs sont définis à l'échelle macroscopique contrairement aux facteurs précédents qui interviennent à l'échelle microscopique.

#### a. Teneur en eau initiale

C'est le poids d'eau contenu dans le volume rapporté à l'unité de poids des grains solides contenu. Le gonflement pour différentes teneurs en eau initiales suit une loi linéaire. La nature de cette relation autorise la définition d'une teneur en eau critique (égale à 22%) qui donnerait lieu à un gonflement apparent nul (Alonso et al 1987) (Figure 1.14).



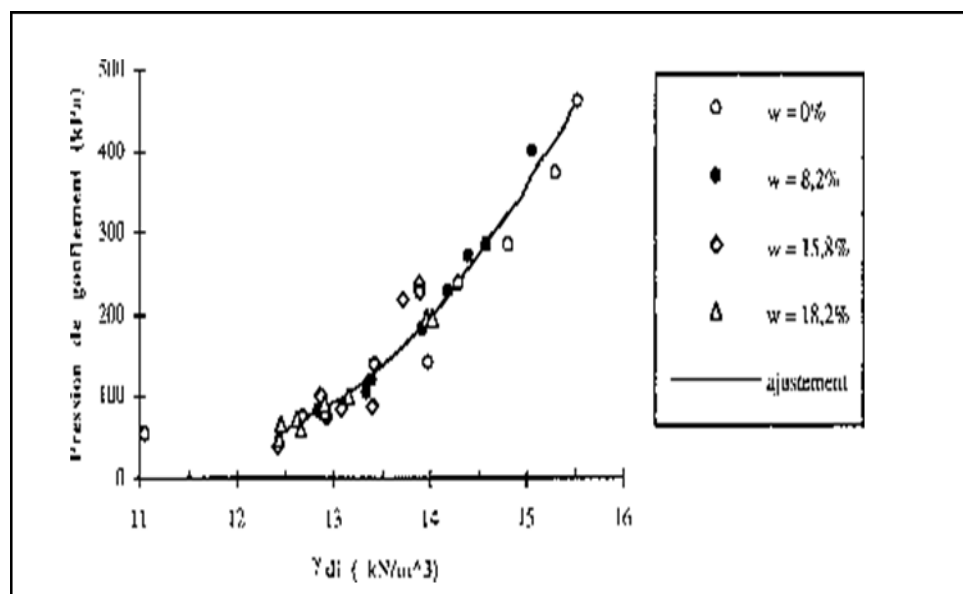
**Figure 1.14** Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale. (Alonso et al. 1987).

Edil et Alanazy (1992) trouvent que la teneur en eau initiale des échantillons compactés à la même densité sèche à une influence considérable sur les caractéristiques du gonflement, le gonflement latéral et vertical augmente lorsque la teneur en eau initiale diminue.

Hachichi et Fleureau (1999) montrent qu'il y'a une tendance à la diminution du gonflement lorsque la teneur en eau initiale augmente. Ils confirment que l'augmentation de la teneur en eau initiale ne conduit à une diminution du gonflement qu'au-dessus de la limite de retrait ; pour les teneurs en eau inférieures à cette limite, le gonflement ne change pas.

### b. Densité sèche

C'est le rapport poids volumique d'un sol sec et poids volumique du l'eau. La densité sèche initiale influence considérablement sur le gonflement et la pression de gonflement (Figure 1.15). La pression de gonflement varie proportionnellement à la densité et inversement proportionnelle à la teneur en eau (Sridaharan et al 1986).



**Figure 1.15** Variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche.  
Sridaharan et al (1986)

### 1.8. Impact du gonflement sur les ouvrages

La nécessité de construire sur des sols vastes pour le développement des infrastructures présente plusieurs défis. Le comportement de gonflement/rétrécissement des sols expansifs en raison des variations d'humidité et du changement de pression de l'eau interstitielle induit un changement considérable de volume, ce qui endommage l'infrastructure qui y est construite (Nelson et Miller 1992).

Le phénomène de fissuration peut se produire par des changements volumétriques dans des conditions d'humidité changeantes dans des sous-couches expansives. Ces déformations volumétriques se traduisent généralement par des mouvements différentiels des chaussées souples reposant sur la plate-forme expansive. Par conséquent, des dommages structurels pourraient survenir si aucune mesure spéciale n'a déjà été prise au cours du processus de conception (Ayman, 2007).

Le changement climatique et les périodes de sécheresse/humidification prolongées sont à l'origine d'importants dommages au niveau des infrastructures routières construites sur des sols argileux. En effet, les sols argileux présentent une variation de volume plus ou moins importante en fonction de leur teneur en eau et de leur minéralogie (Es-soufi 2023).

### 1.8.1 Ouvrages superficiels

Dans le domaine du Génie Civil, ces phénomènes de gonflement et de tassement différentiel (retrait) sont à l'origine de nombreux désordres tant pour les structures construites en surface (bâtiments, fondations superficielles, ouvrages de soutènement, remblais,...) que pour les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, fondations profondes, ...) (Figures 1.16 et 1.17).



**Figure 1.16** Tassement différentiel du terrain sous Les fondations d'une station de pompage (Benaissa 2011)

Les structures exposées à l'expansion du sol comprennent principalement les fondations ; les murs de soutènement des bâtiments et des routes. De nombreux problèmes de fissuration rencontrés dans les canalisations enterrées, les trottoirs, les bâtiments et les routes ne résultent pas d'un chargement excessif du sol d'assise mais du gonflement ou du retrait de celui-ci (Hachichi et al 2009).



**Figure 1.17** Hôpital Moulay Ismaïl, (Meknès) dégradations dues au gonflement du sol (Benaïssa 2011)

Les routes construites sur des sols argileux sensibles au phénomène de retrait et gonflement des sols argileux. Le développement des infrastructures, telles que les routes, les autoroutes et les lignes de chemin de fer, nécessite des travaux de terrassement, principalement pour la construction de la plate-forme et de la base de la chaussée (Figures 1.18 à 1.21).



**Figure 1.18** Crête du barrage Joe Pool (Puppala 2021)



**Figure 1.19** Dégâts causés par le gonflement des sols expansifs (Puppala 2021)



**Figure 1.20** Asphalté gonflé (Palinchak 2010)

Les sols expansifs peuvent endommager les structures qui y sont fondées, car ils présentent des changements volumétriques avec le changement de la teneur en humidité (Mukhtar et al, 2010). Les accotements de la route, notamment ceux situés à proximité de la végétation, sont particulièrement sensibles à ce phénomène. Lorsque les sols argileux sont exposés à une sécheresse prolongée, ils ont tendance à se rétracter et à se fissurer, ce qui peut entraîner un affaissement de la chaussée. À l'inverse, lorsque les sols argileux absorbent de l'eau, ils ont tendance à se dilater et à gonfler, ce qui peut entraîner une élévation de la chaussée et des déformations (Tripathy et al 2002).



**Figure 1 .21** Route exposée au retrait-gonflement des sols (Cerema 2021)

Le problème est encore exacerbé lorsque la plate-forme est expansible. Même si la chaussée est correctement conçue, le caractère gonflant de la plate-forme fausse toutes les prévisions. Il est bien connu que les contraintes peuvent être créées lorsque le changement de volume d'un matériau se produit. Les contraintes se reflètent sous la forme de fissurations, de soulèvements et de tassement des chaussées routières. Par conséquent, une augmentation significative des coûts de l'entretien courant, de la réhabilitation et même de la reconstruction des chaussées détériorées sera imposée aux autorités routières (Hyunwook et William 2009).

### 1.8.2 Ouvrages souterrains

Les tunnels en milieu gonflant posent de très importantes difficultés aussi bien lors de leur construction qu'après leur mise en service. Le processus d'excavation d'un tunnel entraîne des changements dans les contraintes autour de la structure (Figure 1.22). Ces modifications conduisent fréquemment à la formation de fissures qui favorisent la circulation de l'eau et l'hydratation des minéraux argileux (Benaïssa 2011).



**Figure 1.22** Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel (Benaïssa 2011)

### 1.8.3 Recommandations pratiques pour la construction sur sols gonflants

Pour garantir la stabilité, la résistance et une exploitation optimale des routes et ouvrages construits sur des sols gonflants, il est essentiel de suivre plusieurs principes clés. Il faut d'abord réaliser une étude géotechnique approfondie afin d'évaluer les propriétés du sol, notamment sa capacité de gonflement, sa plasticité et sa cohésion. Ensuite, il est crucial de

protéger le sol contre toute source d'humidification pour prévenir son gonflement. Il est également important de choisir un tracé de route qui réduit l'impact des sols gonflants, en évitant les zones de sols instables dans la mesure du possible.

La conception d'un système de drainage efficace permettant d'évacuer l'eau loin du sol est indispensable, car elle diminue le potentiel de gonflement. Assurer un compactage adéquat du sol lors de la construction est aussi nécessaire pour minimiser les mouvements futurs du sol. Par ailleurs, il est recommandé de traverser les couches superficielles de sol gonflant pour établir les fondations sur des couches de sol plus profondes et stables. Enfin, il peut être envisagé une substitution totale ou partielle du sol gonflant par un matériau à structure stable pour améliorer la solidité de l'ouvrage.

### **1.9. Conclusion**

La construction de routes sur des sols argileux est confrontée à des défis complexes, notamment le phénomène de gonflement et de retrait du sol. Ces mouvements, souvent déclenchés par les variations d'humidité, peuvent causer d'importants dommages aux infrastructures routières. Les sols argileux, en raison de leur capacité à retenir l'eau, subissent des expansions et des contractions, ce qui peut compromettre la durabilité et la stabilité de la chaussée. En conclusion, une compréhension approfondie des facteurs influençant les mouvements du sol est cruciale pour concevoir des routes durables et résilientes capables de résister aux conditions changeantes. D'après plusieurs chercheurs, diverses propriétés physiques des sols, peuvent fournir une indication préliminaire du potentiel de gonflement des sols. Dans cette cadre, plusieurs méthodes prédictives d'évaluation du potentiel de gonflement ont été suggérées dans la littérature. Le prochain chapitre présente une synthèse d'un grand nombre de ces méthodes de prédiction du potentiel de gonflement, telles qu'elles ont été publiées dans la littérature.

# Chapitre 2

---

**Prévision du gonflement des sols  
argileux : Synthèse bibliographique**

## 2.1. Introduction

Les sols expansifs subissent des variations de volume importantes pendant les changements saisonniers de l'humidité, ce qui peut endommager gravement les routes et d'autres structures telles que les bâtiments de un à deux étages. Les pertes annuelles dues à ces dommages dépassant même ceux causés par des catastrophes naturelles telles que les tornades et les tremblements de terre. Les chercheurs se sont souvent appuyés sur des caractéristiques simples du sol pour comprendre ces sols, mais cela peut conduire à des erreurs dans le soutien de fondation des structures construites sur ces sols. Les méthodes directes mesurent avec précision le gonflement et la pression d'expansion, tandis que les méthodes indirectes utilisent des corrélations basées sur les propriétés des sols. Des modèles prédictifs fiables reliant les propriétés de gonflement à des tests rapides, peu coûteux et non destructifs, seraient précieux pour les premières étapes de conception des structures. Dans ce chapitre, nous examinons l'analyse des performances de différents modèles de prédiction empirique, ainsi que de quelques modèles basés sur l'intelligence artificielle, proposés par des chercheurs pour estimer les caractéristiques de gonflement des sols.

## 2.2. Les Corrélations en géotechnique

La corrélation en géotechnique permet de lier statistiquement différentes variables, comme le contenu en eau d'un sol à son indice de plasticité ou la densité du sol à sa résistance à la compression. Ces corrélations offrent aux géotechniciens un moyen pratique d'évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques des sols, facilitant la compréhension des essais expérimentaux et la vérification des mesures. En compilant ces corrélations, les concepteurs disposent d'outils pour contrôler et évaluer les paramètres géotechniques nécessaires à leurs projets, ce qui permet de valider les valeurs issues des reconnaissances géotechniques (Dysli 2011).

### 2.2.1. Conditions d'utilisation des corrélations

Les conditions d'utilisation des corrélations dépendent de la fiabilité des corrélations utilisées, certains paramètres sont liés, à l'intérieur d'une couche de sol d'un site déterminé, par des relations proches d'une relation mathématique exacte. Par contre, si l'on analyse simultanément des données provenant de deux sites, pour des sols de même nature, on trouve en général que les valeurs des paramètres sont plus dispersées, et cette dispersion augmente quand le nombre de sites s'accroît et quand on regroupe des données relatives à différents types de sols (Amrani 2014). Les ingénieurs doivent être conscients des limites des

corrélations, en tenant compte des incertitudes et en complétant, si possible, les analyses par des essais in situ ou en laboratoire. Il est aussi recommandé de toujours utiliser des corrélations validées par des études antérieures et reconnues par la communauté scientifique pour éviter les erreurs de conception et garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages géotechniques.

### **2.3. Prévision des paramètres de gonflement des sols**

La prévision des paramètres de gonflement des sols, tels que le potentiel de gonflement et la pression de gonflement, est cruciale pour les projets de construction et d'infrastructure. La détermination précise de ces paramètres est traditionnellement une tâche ardue, exigeant des essais en laboratoire longs et coûteux. Afin de réduire les délais et les coûts associés à ces essais, des chercheurs ont mis au point des modèles prédictifs utilisant à la fois des techniques empiriques et des approches basées sur l'intelligence artificielle. Ces modèles permettent d'estimer les paramètres de gonflement des sols de manière fiable sans recourir systématiquement à des tests exhaustifs en laboratoire. Les modèles empiriques reposent sur l'analyse des données historiques et des relations observées entre les différentes propriétés du sol, tandis que les modèles d'intelligence artificielle exploitent des algorithmes d'apprentissage pour identifier des patterns complexes et améliorer la précision des prédictions. Par conséquent, la modélisation statistique et l'intelligence artificielle se présentent comme des solutions efficaces pour anticiper les comportements de gonflement des sols, facilitant ainsi la planification et la gestion des projets de construction (Sari Ahmed, 2019). Dans ce qui suit, nous passerons en revue plusieurs modèles et techniques d'estimation des paramètres de gonflement, tels que publiés dans la littérature scientifique.

### **2.4. Modèles empiriques pour la prévision des paramètres du gonflement**

Les modèles empiriques pour la prévision des paramètres du gonflement des sols sont des outils cruciaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil, permettant de prédire les comportements des sols expansifs sous différentes conditions. Ces modèles s'appuient sur une variété de variables d'entrée pour établir des corrélations fiables. Parmi les propriétés souvent retenues, on trouve la plasticité du sol, caractérisée par des indices tels que l'indice de plasticité (IP) et la limite de liquidité (LL), qui influencent directement la capacité de gonflement. Le compactage, représenté par la densité sèche et le taux de compactage, joue également un rôle essentiel en affectant la structure et la porosité du sol. La granulométrie, décrivant la distribution des tailles de particules, est une autre variable clé, car elle détermine

la texture du sol et sa capacité à retenir l'eau. En combinant ces propriétés, les modèles empiriques peuvent offrir des prévisions plus précises, en tenant compte de l'interaction complexe entre les différentes caractéristiques physiques et mécaniques du sol. Ces combinaisons permettent ainsi de mieux comprendre et anticiper les phénomènes de gonflement, essentiels pour la conception et la maintenance des infrastructures.

## 2.5. Modèles basés sur les propriétés des plasticités

Ces modèles prévisionnels sont développés à partir de données expérimentales et peuvent être utilisés pour aider à la conception et à la construction de structures géotechniques en fournissant des estimations des caractéristiques mécaniques des sols basées sur leurs propriétés de plasticité. Dans ce cadre, Seed et al. (1962) ont avancé une classification présentée dans le tableau 2.1, qui associe le taux de gonflement  $S_p$  à l'indice de plasticité. Ce taux de gonflement  $S_p$  est défini comme le pourcentage d'expansion d'un échantillon d'argile, est exprimé par la relation suivante:

$$S_p = 1,10^{-5} I_p^{2,24} \quad (2.1)$$

IP: l'indice de plasticité (%).

**Tableau 2.1** Potentiel de gonflement d'après Seed et al (1962)

Taux de gonflement	$S_p$ (%)	$I_p$ (%)
Faible	0 - 1,5	0 - 10
Moyen	1,5 - 5	10 - 20
Elevé	5 - 25	20 - 35

Seed et al. (1962) ont suggéré que l'indice de plasticité constitue un indicateur adéquat pour prédire le potentiel de gonflement. Leur étude a donné des résultats cohérents avec les conditions réelles des sols. Cependant, une critique de cette méthode est que la variation de volume a été mesurée sur des échantillons préparés à partir de minéraux d'argile de qualité, ce qui peut ne pas refléter précisément le comportement in situ des matériaux en raison des variations de composition dans la plupart des sols. L'équation proposée est formulée comme suit :

$$S_p = K \times M \times IP^{2,44} \quad (2.2)$$

Dont  $S_p$  : le potentiel de gonflement en (%),  $M$  et  $K$  : des constantes empiriques. L'équation peut être utilisée avec les conditions  $M=60$  pour les sols naturels et 100 pour les sols artificiels, et  $K=3.6 \cdot 10^{-5}$  pour tout type de minéraux argileux.

Ranganatham et Satyanarayana (1965) qui ont réalisé des études de potentiel de gonflement sur quatre sols naturels, ont constaté que l'activité de gonflement (rapport de changement de l'indice de retrait par rapport au correspondant changement de la teneur en argile) (Tableau 2.2). Ranganatham et Satyanarayan (1965) proposent une équation de la forme :

$$S_p = m_1(SI)^{2,67} \quad (2.3)$$

Avec,  $m_1$  constant égale 41,13 pour sol naturel et  $SI$  l'indice de retrait en pourcentage.

**Tableau 2.2** Potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayana (1965)

Ip (%)	Potentiel de gonflement
0 - 20	Faible
20 - 30	Moyen
30 - 60	Fort
> 60	Très fort

D'autres auteurs pensent qu'au moins trois paramètres sont indispensables pour pouvoir apprécier le potentiel de gonflement des sols. La classification de Holtz et Gibbs (1956) donnée dans le tableau 2.3 et la classification de Holtz et al (1973) donnée dans le tableau 2.4 rentrent dans cette catégorie.

**Tableau 2.3** Potentiel de retrait d'après Holtz et Gibbs (1956)

P < 2 $\mu\text{m}$ (%)	Ip (%)	WC (%)	U* (%)	Potentiel de gonflement
> 28	> 35	< 10	< 30	Très élevé
20 - 13	25 - 40	7 - 10	20 - 30	Élevé
13 - 23	15 - 30	10 - 15	10 - 30	Moyen

U\* : Pourcentage de retrait.

**Tableau 2.4** Potentiel de gonflement d'après Holtz et al (1973)

Ip (%)	WC (%)	LL (%)	Potentiel de gonflement
< 18	> 15	20 - 35	Faible
15 - 25	10 - 15	35 - 50	Moyen
25 - 35	7 - 12	50 - 70	Fort

Komornik and David (1969) ont prouvé aussi que le potentiel de gonflement est lié à l'indice de plasticité et ils ont donné deux équations : une pour les marnes et l'autre pour les argiles :

Pour les marnes :

$$Sp = 6,7 + 2,4IP \quad (2.3)$$

Pour les argiles :

$$Sp = 0,9 + 2,11IP \quad (2.4)$$

Komornik et David (1969) ont effectué des essais de pression de gonflement sur divers échantillons de terrains naturels (non perturbés) et souples. En se basant sur une analyse statistique de leurs résultats, ils ont formulé la relation suivante :

$$\log Ps = 2,132 + 0,0208(LL) + 0,000665(\gamma_d) - 0,0269(w_c) \quad (2.5)$$

LL=limite de liquidité.

Nayak et Christensen (1971) ont constaté statistiquement que le pourcentage de gonflement libre en fonction de l'indice de plasticité, la teneur en eau et la teneur en argile peuvent être exprimés comme suit,

$$FS = (2,29 \times 10^{-2})(IP)^{1,45} \frac{C}{w_c} + 6,38 \quad (2.6)$$

Nayak et Christensen (1971) affirment qu'il existe une relation linéaire entre le pourcentage de gonflement libre et la limite de liquidité. Le modèle proposé est le suivant :

$$FS = B'(LL - LL_0) \quad (2.7)$$

Avec  $B'$  et  $LL_0$  les valeurs sont pratiquement constantes et égales à 0,427 et 21,6.

Schneider et Poor (1974) ont proposé un modèle de prédiction du potentiel de gonflement :

$$\log Sp = \left(\frac{1}{12}\right)(0,4LL - w_c + 130,5) \quad (2.8)$$

Chen (1975) a trouvé une relation exponentielle entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité qui s'écrit de la forme :

$$Sp = 0,2558e^{0,0838IP} \quad (2.9)$$

O'Neil et Gazzaly (1977) ont proposé le modèle empirique suivant pour prédire l'amplitude du gonflement d'un sol :

$$Sp = 2,27 + 0,131LL - 0,27w_c \quad (2.10)$$

Ce modèle peut être réécrit sous la forme suivante :

$$Sp = 0,131(LL - LL_0) \quad (2.11)$$

D'autres auteurs proposent de relier le potentiel de gonflement à deux paramètres.

On distingue dans cette catégorie les classifications proposées respectivement par le BRE (Royaume-Uni) (1980) et par Chen (1988) et qui sont données dans les tableaux 2.5 et 2.6.

**Tableau.2.5** Potentiel de gonflement d'après le BRE (1980)

Ip (%)	% < 2 µm	Potentiel de gonflement
> 35	> 95	Très élevé
22 - 35	60 - 95	Élevé
18 - 22	30 - 60	Moyen
< 18	< 30	Faible

**Tableau.2.6** Pression et potentiel de gonflement d'après Chen (1988)

% < 74 µm	WL (%)	Pression de gonflement (6 ans) (MPa)	Potentiel de gonflement
> 95	> 60	1	Très élevé
60 - 95	40 - 60	0,25 - 0,5	Élevé
30 - 60	30 - 40	0,15 - 0,25	Moyen
< 30	< 30	< 0,05	Faible

Guiras-Skandaji (1996) propose une méthode qui constitue une avancée significative dans la simplification de l'évaluation de la pression de gonflement des sols argileux. Cette méthode se base uniquement sur la teneur en eau, selon la formule :

$$S_p = -117,59 + 3,0501w_C \quad (2.12)$$

## 2.6. Modèles basés sur les paramètres de compactage

Ces modèles empiriques sont généralement développés à partir de données expérimentales collectées sur le terrain ou en laboratoire et peuvent varier en précision en fonction des conditions spécifiques du site et des propriétés du sol.

El-Ramli (1965) a découvert que la pression de gonflement pouvait être obtenue à partir de l'équation empirique suivante,

$$P_s = 1,2\gamma_d/w_C \quad (2.13)$$

$\gamma_d$  La densité sèche du sol et  $w_C$  la teneur en eau.

Komornik et al (1969) ont proposé la relation suivante pour estimer la pression de gonflement,

$$\log(P_s) = 2,132 + 0,0208LL + +0,000665\gamma_d - 0,0269w_C \quad (2.14)$$

Cette équation implique les principaux paramètres qui influencent la pression de gonflement, mais il est peu sensible aux variations de densité sèche. Par conséquent, il ne doit pas être utilisé si la densité sèche change.

Komornik et David (1969) ont découvert qu'il existe une corrélation significative entre limite de liquidité, teneur en humidité initiale, densité sèche et la pression de gonflement quand les facteurs indépendants sont combinés.

Komornik et David (1969) ont mis au point un modèle basé sur une méthode expérimentale appliquée à 200 échantillons d'argiles intactes. Leur modèle est exprimé par l'équation suivante :

$$\log P_s = -2,132 + 0,0208LL + 0,000665\gamma_d - 0,0269w_C \quad (2.15)$$

Nayak et Christensen (1970) ont prédit la valeur de la pression de gonflement en fonction de la teneur en humidité initiale de l'échantillon, en classant les sols en deux catégories : un groupe contenant des sols avec des minéraux argileux tels que la grundite et la bentonite (sols

GB), et un autre groupe contenant des sols avec des minéraux argileux tels que la kaolinite et la bentonite (sols KB).

Pour sols GB

$$P_s = (5,05 \times 10^{-3})(I_p)^{1,66} \frac{C^2}{w_0^2} + 4,1239 \quad (2.16)$$

Pour sols KB

$$P_s = (6,982 \times 10^{-4})(I_p)^{1,92} \frac{C^2}{w_0^2} + 9,1191 \quad (2.17)$$

Pour tous sols

$$P_s = (3,5817 \times 10^{-2})(I_p)^{1,12} \frac{C^2}{w_0^2} + 3,7912 \quad (2.18)$$

Nayak et Christensen (1970) ont également prédit le potentiel de gonflement en utilisant le même principe. Pour sols GB

$$S_p = (1,3548 \times 10^{-2})(I_p)^{1,59} \frac{C}{w_0} + 4,8046 \quad (2.19)$$

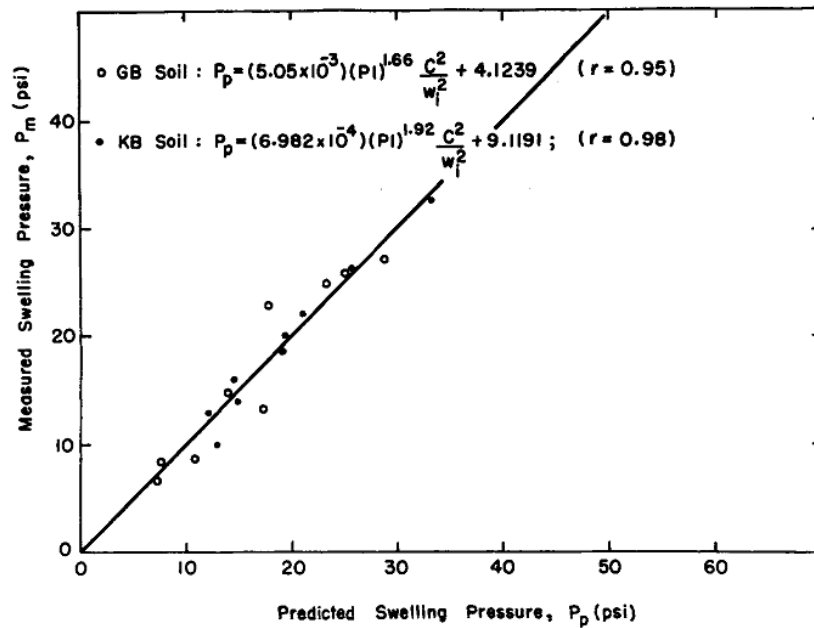
Pour sols KB

$$S_p = (4,4938 \times 10^{-3})(I_p)^{1,74} \frac{C}{w_0} + 14,722 \quad (2.20)$$

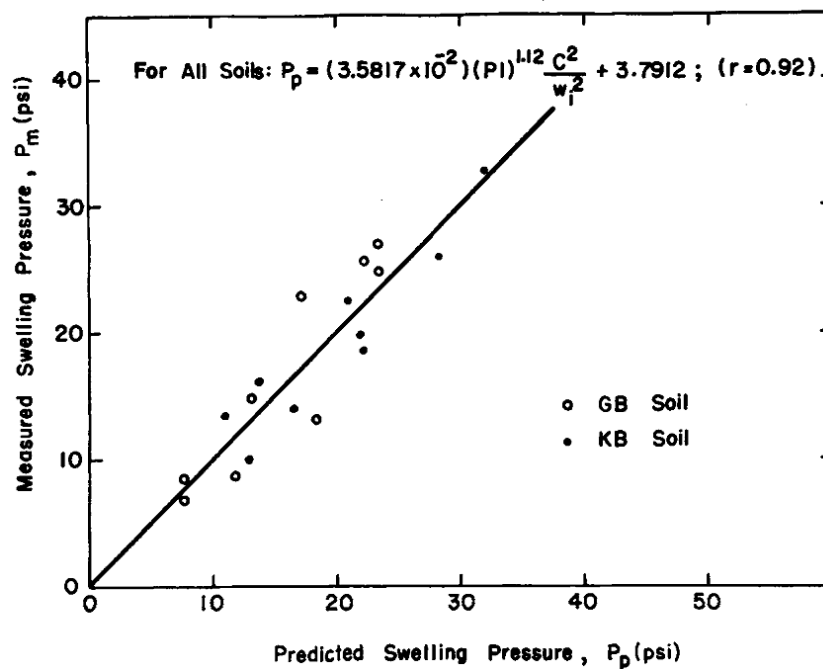
Pour tous sols

$$S_p = (2,29 \times 10^{-2})(I_p)^{1,45} \frac{C}{w_0} + 6,38 \quad (2.21)$$

Dans chacun des six cas, le coefficient de corrélation  $r$  des droites de régression ajustées est très élevé. Cela est illustré par la comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées, comme le montrent les Figures 2.1 à 2.4. Bien sûr, la corrélation est plus forte lorsque des équations distinctes sont adaptées aux sols GB et KB.



**Figure 2.1-** Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites de la pression de gonflement : sols GB et KB (Nayak et Christensen 1970)



**Figure 2.2-** Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites de la pression de gonflement pour tous les sols (Nayak et Christensen 1970)

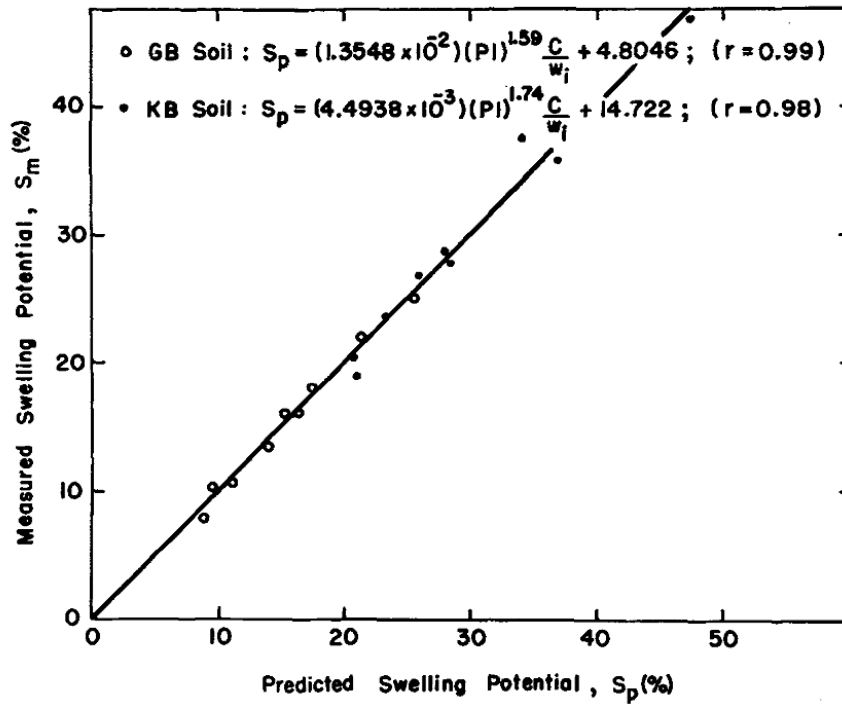


Figure 2.3- Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites du potentiel de gonflement : sols GB et KB (Nayak et Christensen 1970)

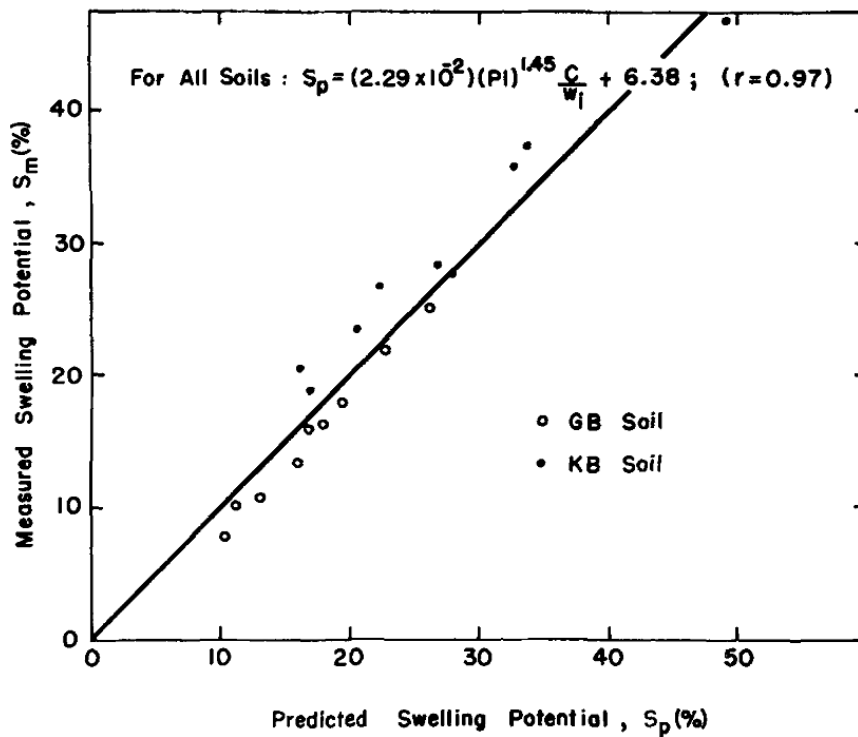
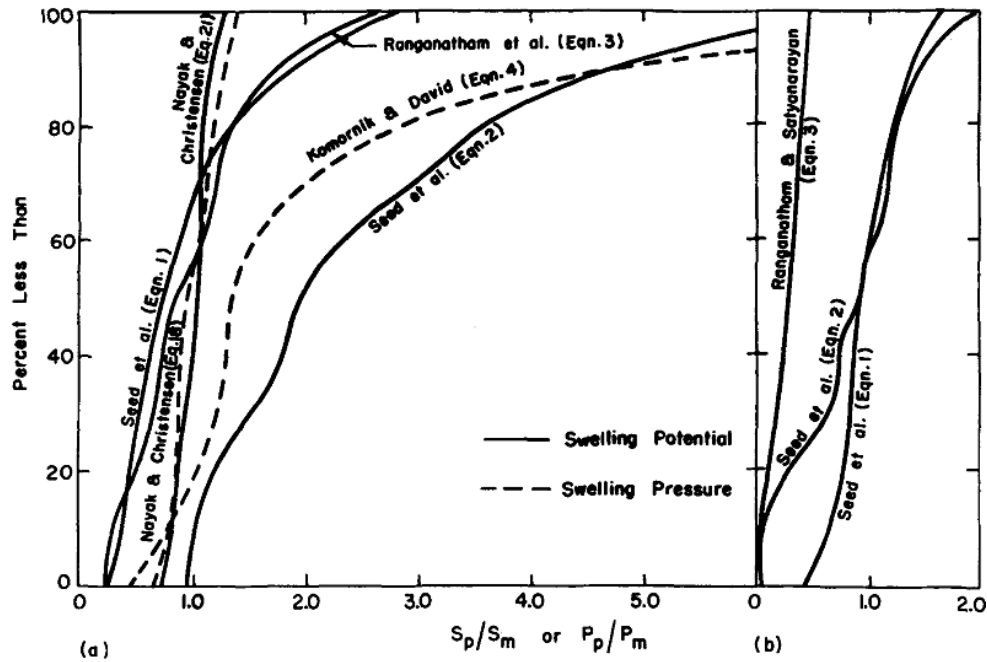


Figure 2.4- Comparaison entre les mesures et les valeurs prédites du potentiel de gonflement pour tous les sols (Nayak et Christensen 1970)



**Figure 2.5**-Comparaison des méthodes de prévision du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement des sols étudiés par :  
 (a) Nayak et Christensen 1970 (b) Seed et al. (1962)

Zacharias (1972) a développé l'équation suivante pour exprimer la pression de gonflement :

$$P_s = a(SI) + b(LL - w_c) + c(SI)(1/S_r) \quad (2.22)$$

Dans cette équation, SI représente l'Indice de retrait,  $S_r$  représente le degré de saturation de l'échantillon avant le début de l'essai,  $w_c$  représente la teneur en eau à  $S_r = 100\%$ . Les valeurs de a, b et c sont respectivement définies comme suit :  $a = -225/6,4$  ;  $b = 290/6,4$  et  $c = 1,2/6,4$ . Il convient de noter que la densité sèche, qui joue un rôle crucial dans la pression de gonflement, n'est pas prise en compte dans cette équation. Par conséquent, cette relation est limitée aux densités sèches comprises entre 17 et 18  $kN/m^3$ , ce qui restreint considérablement son application.

Le modèle de Vijayavergiya et Ghazzaly (1973) est très semblable à celui de Komornik et David. Cependant, Vijayavergiya et Ghazzaly (1973) ne prennent pas en compte la teneur en humidité initiale :

$$\log P_s = \frac{1}{19,5}(\gamma_d + 0,65LL - 139,5) \quad (2.23)$$

Dedier (1973) a formulé deux équations pour décrire la relation entre la pression de gonflement, la densité sèche et le pourcentage d'argile comme suit :

$$\log(P_s) = 2,55 \gamma_d / \gamma_w - 1,705 \quad (2.24)$$

$$\log(P_s) = 0,0294C - 1,923 \quad (2.25)$$

Ces deux équations (2.24) et (2.25) ne prennent pas en compte la teneur en eau initiale du sol. Étant donné que la teneur en eau initiale a un impact significatif sur le pourcentage de gonflement et la pression de gonflement, ces équations ne peuvent pas être appliquées à des sols ayant des teneurs en eau initiales différentes.

Rabba (1975) a formulé deux équations pour décrire la relation entre la pression de gonflement, la densité sèche initiale et le pourcentage d'argile pour les sols sablo-argileux et limono-argileux :

Pour sols sablo-argileux

$$\log(P_s) = 2,17 (\gamma_d + 0,084C) - 3,91 \quad (2.26)$$

Pour sols limono-argileux

$$\log(P_s) = 2,5(\gamma_d + 0,006C) - 4 \quad (2.27)$$

Mowafy (1985) a proposé une équation pour la relation entre la pression de gonflement, la densité sèche et le pourcentage d'argile, avec la mise en garde que cette équation devrait être utilisée avec prudence et qu'il est recommandé de la comparer aux mesures d'essais sur le terrain :

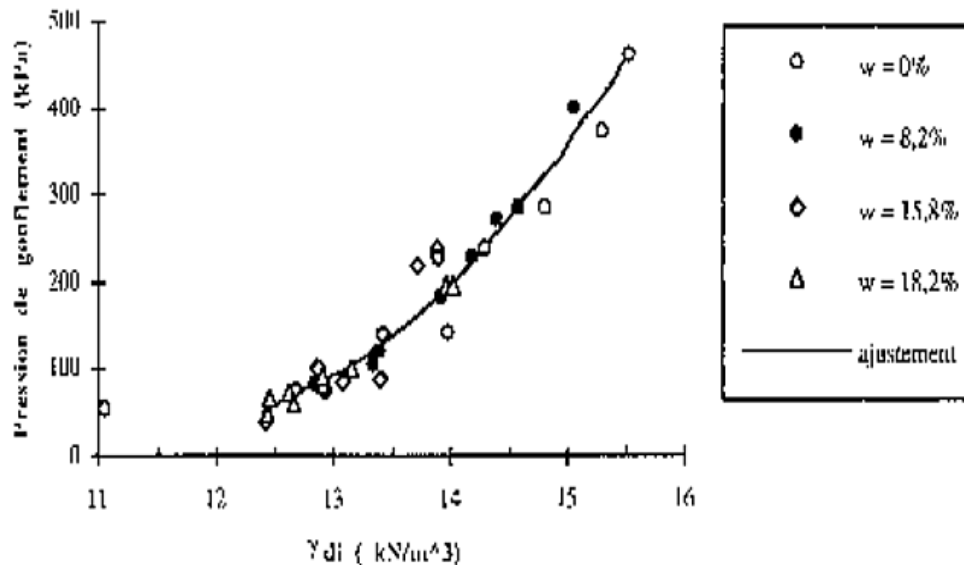
$$\log(P_s) = 1,366\gamma_d + 8,951(10^{-3})C - 2,179(10^{-2})w_c - 2,840 \quad (2.28)$$

Sridaharan (1986) a réalisé 32 essais de gonflement à volume constant, en utilisant quatre teneurs en eau initiale. Il a observé que la pression de gonflement varie de manière proportionnelle à la densité et inversement proportionnelle à la teneur en eau (voir Figure 2.6). Liong et al. (2000) ont remarqué que chaque variation dans les entrées du modèle entraîne un léger décalage dans la sortie correspondante. La sensibilité  $Sp$  de chaque paramètre d'entrée peut être calculée selon les formules suivantes :

$$Sp = -31,321 + 0,592C + 0,717Ip - 0,807CEC - 0,891w_c + 2,668\gamma_d \quad (2.29)$$

$$Sp = -9,567 + 0,606C + 0,636Ip - 0,792w_c + 0,487\gamma_d + 6,289I_1 \quad (2.30)$$

$$Sp = -19,856 + 0,595C + 0,686Ip - 0,769CEC - 1,068w_c + 2,729\gamma_d - 7,189I_1 \quad (2.31)$$



**Figure 2.6** Variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche (Sridaharan 1986).

Sridharan et Gurtug (2004) ont examiné le comportement de gonflement de trois sols chypriotes compactés, qui présentaient de larges variations dans leurs propriétés physiques. Ils ont découvert une relation unique entre le pourcentage de gonflement ( $S_p$ ) et la pression de gonflement ( $P_s$ ), représentée par les équations 2.31 et 2.32. Ils ont affirmé que cette relation s'applique indépendamment du type de sol et du niveau d'énergie de compaction.

$$P_s = 63,78e^{0,1528S_p} \quad (2.32)$$

$$P_s = 48,32S_p \quad (2.33)$$

Erzin et Erol (2004) ont mené des analyses sur 80 échantillons d'argile, étudiant les effets de paramètres tels que l'indice de plasticité ( $I_p$ ), le poids unitaire sec initial ( $\gamma$ ), la teneur en eau initiale ( $w_c$ ), la capacité d'échange cationique (CEC) et d'autres paramètres sur la pression de gonflement. Les modèles développés par Erzin et Erol (2004) sont les suivants :

$$\log P_s = -4,812 + 0,01405I_p + 2,394\gamma - 0,0163w_c \quad (2.34)$$

$$\log P_s = -5,197 + 0,01457I_p + 2,408\gamma - 0,8190I_L \quad (2.35)$$

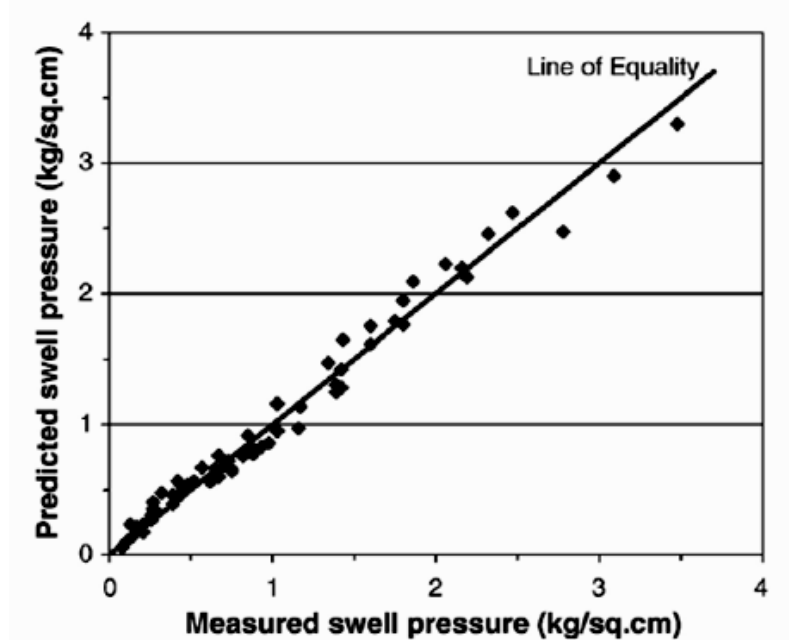
$$\log P_s = -5,020 + 0,01383I_p + 2,356\gamma \quad (2.36)$$

$$S_p = -81,239 + 0,669I_p - 1,166w + 6,415\gamma_d \quad (2.37)$$

$$S_p = -174,311 + 1,855CEC - 1,105w + 12,275\gamma_d \quad (2.38)$$

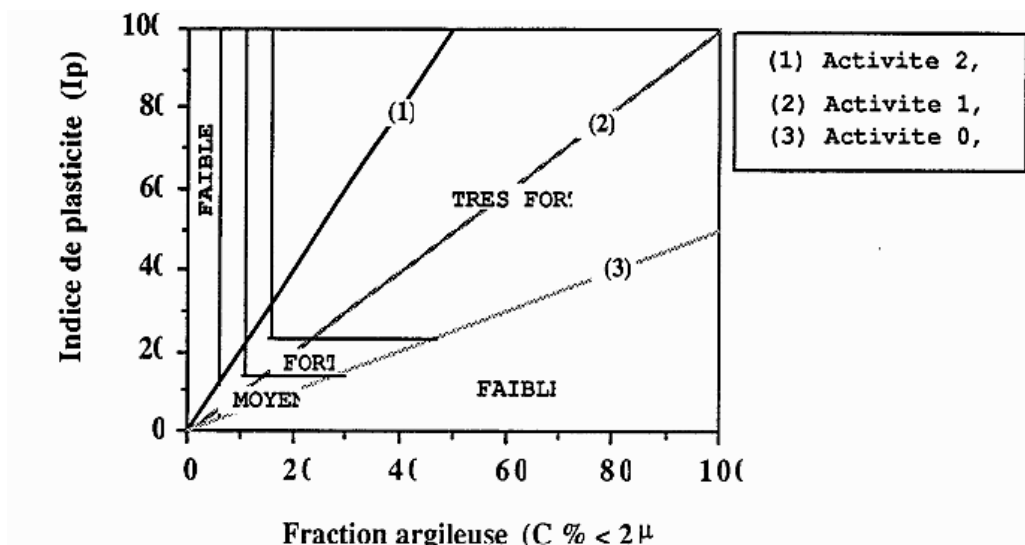
$$Sp = 2,864 + 0,621C - 0,600Ip - 1,027w - 0,409\gamma_d \quad (2.39)$$

$$Sp = -49,846 + 0,727C + 1,401CEC - 0,852Ip + 2,725\gamma_d \quad (2.40)$$



**Figure 2.7** Comparaison des pressions de gonflement mesurées/prédites (Erzin et Erol 2004)

La Figure 2.7 illustre la comparaison entre les pressions de gonflement mesurées et celles prédites par le modèle optimal. La Figure 2.8 présente une classification des sols gonflants en fonction de la fraction argileuse et de l'indice de plasticité, obtenue en appliquant une approche prédictive proposée par Mouroux et al. (1969).



**Figure 2.8** Classification des sols gonflants (Mouroux et al 1969)

Cimen et al. (2010) ont développé un modèle similaire qui prend en compte l'effet combiné de l'indice de plasticité, de la teneur en eau initiale et du poids unitaire sec sur la pression de gonflement. Les données pour ce modèle ont été obtenues à partir de l'analyse de quatre échantillons d'argile perturbés provenant de diverses régions de Turquie. Ils ont élaboré deux équations : une pour chaque condition de teneur en eau.

$$\log P_s = 0,0276IP + 365,2118\gamma^{-2,4616} - 0,0320w_0 + 2,2292 \quad (2.41)$$

L'équation utilisée lorsque le sol est du côté humide de la teneur en eau optimale (structure dispersée) est :

$$\log P_s = 0,0239IP + 1285,3723 - 0,0396w_0 + 2,3238 \quad (2.42)$$

À partir d'une étude statistique sur 200 échantillons, Komornik et David (1969) ont déduit une relation qui permet d'estimer la pression de gonflement. Ajustée aux argiles de la région de Tlemcen, cette relation s'écrit :

$$P_s = 2,08LL + 0,006688\gamma_d - 2,69W_C + 0,132 \quad (2.43)$$

Williams et Donaldson (cités par Mouroux, 1989) ont proposé un modèle qui donne l'amplitude du gonflement en fonction de la charge qui règne dans le sol. Ce modèle s'écrit :

$$S_p = \left(7,3 - \frac{399,6}{I_p} - P_s\right) \cdot (0,525I_p + 4,1 - 0,85W_C) \quad (2.44)$$

Ainsi, pour une amplitude nulle ( $S_p = 0$ ), la pression de gonflement sera donnée par

$$P_s = 7,3 - 399,6/I_p \quad (2.45)$$

Vijayvergiya et Ghazzaly (1971) ont proposé deux modèles pour déterminer la pression de gonflement. Ces modèles sont formulés comme suit :

$$P_s = \frac{1}{12} (0,4LL - w_C + 23,6) \quad (2.46)$$

$$p_s = \frac{1}{19,5} (6,242\gamma_d + 0,65LL - 100) \quad (2.47)$$

Pour l'amplitude de gonflement, les modèles donnent généralement le gonflement libre. O'Neil et Ghazzaly (1977) ont proposé un modèle exprimé par :

$$S_p = 2,77 + 0,131LL - 0,27w_C \quad (2.48)$$

Un modèle similaire proposé par Johnson et Snethen (1978) est formulé comme suit :

$$S_p = 0,036LL - 0,0833w_C + 0,458 \quad (2.49)$$

Sur la base des résultats de 270 essais de gonflement, Vijayvergiya et Ghazzaly (1971) ont établi les corrélations suivantes :

$$P_s = \frac{1}{12} (0,4w_L - w_C + 5,5) \quad (2.50)$$

$$p_s = \frac{1}{19,5} (6,242\gamma_d + 0,65LL - 130,5) \quad (2.51)$$

Le gonflement libre, obtenu à partir des modèles ci-dessus, peut être réduit si le sol est soumis à une pression de confinement  $\sigma_v$  en utilisant la formule suivante proposée par Gogoll (cité par Attwell et al. 1984) :

$$FS = FS(1 - 0,0735\sqrt{\sigma_v}) \quad (2.52)$$

Komine and Ogata (1994), ont stipulé que le potentiel de gonflement peut être estimé en fonction de la densité des argiles. La relation suivante a été proposée :

$$S_p = (K^* \gamma_d - 1) * 10 \quad (2.53)$$

## 2.7. Modèles empiriques basés sur des entrées de différents type

Seed et al. (1962) ont utilisé des échantillons de sol compactés et testés à l'odomètre. Une étude de corrélation élaborée sur les résultats obtenus à montrer la possibilité d'estimer le potentiel de gonflement en utilisant, l'activité corrigée et la fraction argileuse des sols fins. L'équation suivante a été proposée :

$$S_p = 3,6 \times 10^{-5} \times A_c^{2,44} \times C^{3,24} \quad (2.54)$$

Avec :  $A_c$  l'activité corrigée du sol ( $A_c = IP / C$ ), et  $C$  la teneur des argiles.

Nayak and Christensen (1971) ont proposé le développement d'une relation statistique pour l'estimation du pourcentage de gonflement en termes d'indice de plasticité, de teneur en argile et en eau initiale. La relation proposée est la suivante :

$$S_p = (2,29 \times 10^{-2})(I_p^{1,45}) \frac{C}{W_c} \quad (2.55)$$

Nayak et Christensen (1971) ont développé six modèles. Trois de ces modèles ont développé un moyen de prédire la pression de gonflement,

$$P_s = 3,5817 \times 10^{-2}(I_p^{1,12}) \left( \frac{C^2}{w_c^2} \right) + 3,792 \quad (2.56)$$

$$P_s = 2,29 \times 10^{-2}(I_p^{1,45}) \left( \frac{C}{w_c} \right) + 6,38 \quad (2.57)$$

$$P_s = 135 + 2(C + IP - w_c) \quad (2.58)$$

Johnson et al. (1978) développent deux relations d'estimation de potentiel de gonflement entre propriétés de plasticité et changement de volume de gonflement,

$$S_p = 23,82 + 0,7346I_p - 0,1458H - 1,7w_0 + (0,0025I_p)w_0 - (0,0088I_p)H \quad (2.59)$$

$$S_p = -9,18 + 1,5546I_p + 0,08424H + 0,1w_0 - (0,0432I_p)w_0 - (0,01215I_p)H \quad (2.60)$$

Çokça et al. (2002) proposent un modèle pour estimer le potentiel de gonflement en fonction de la valeur du bleu de méthylène (MBV). Le modèle s'exprime comme suit :

$$S_p = -121,807 + 12,1696MBV + 27,6579 \log \Psi_i \quad (2.61)$$

Basma et al. (1995) ont également examiné les effets du pourcentage de fraction d'argile et de l'activité de l'argile sur la pression de gonflement. Quatre modèles ont été développés, un pour chaque test :

$$P_{s_c} = 0,06C + 5,24A - 0,05w_0 + 0,082\gamma - 6,99 \quad (2.62)$$

$$P_{s_z} = 0,05C + 3,12A - 0,023w_0 + 0,13\gamma - 8,92 \quad (2.63)$$

$$P_{s_r} = 14,1C - 12,1w_0 + 58,8\gamma - 874,1 \quad (2.64)$$

$$P_{S_{sd}} = 78.8C - 60,6w_0 + 360,6\gamma - 6757,6 \quad (2.65)$$

Avec  $P_{S_C}, P_{S_Z}, P_{S_r}$ , et  $P_{S_{sd}}$  sont les pression de gonflement modelées par chaque test.

Guiras-Skandji (1996) a proposé un modèle qui représente une avancée significative dans la simplification de l'évaluation de la pression de gonflement des sols argileux. En se basant uniquement sur la teneur en eau, ce modèle permet d'obtenir des estimations plus rapides et économiques, tout en garantissant des résultats fiables pour la conception et l'analyse des structures géotechniques :

$$S_p = -117,59 + 3,0501w_0 \quad (2.66)$$

Par ailleurs, Erguler et Ulusay (2003) ont proposé l'équation de prédiction de la pression de gonflement suivante :

$$P_s = -227,27 + 2,14w_0 + 1,54LL + 72,49\gamma_d \quad (2.67)$$

De plus, Rao et al. (2004) ont développé un modèle original pour les données, prenant en compte le FSI, la teneur en eau initiale et le poids sec initial. Ce modèle est répertorié sous forme d'équations :

$$\log S_p = 0,30\gamma - 0,20w_0 + 0,005FSI - 3 \quad (2.68)$$

$$S_p = 4,24\gamma_d - 0,47w_0 - 0,14q_0 - 0,06FSI - 55 \quad (2.69)$$

Ici, FSI représente l'indice du gonflement libre et  $q_0$  la surcharge initiale.

Ensuite, Sabtan (2005) a prédit l'effet combiné de  $W_c$ ,  $I_p$  et  $C$  en situation de gonflement libre et de pression de gonflement. Cette prédiction a été obtenue grâce à une analyse de régression linéaire multiple des données provenant de 30 échantillons non perturbés, conduisant aux équations suivantes :

$$FS = 1 + 0,06 - (C + I_p - w_c) \quad (2.70)$$

$$P_s = 135 + 2(C + I_p - w_c) \quad (2.71)$$

Schneider et Poor (1974) ont établi des relations statistiques pour les argiles du Texas, reliant le gonflement mesuré sous diverses surcharges à l'indice de plasticité et à la teneur en eau. Ils ont proposé l'équation suivante :

$$\log S_p = f. \left( \frac{I_p}{w_c} \right) - c \quad (2.72)$$

Une autre relation simple a été proposée par Chen (1988) dans le cadre de l'estimation du pourcentage de gonflement ( $Sp$ ) des sols non perturbés en termes d'indice de plasticité ( $IP$ ) sous la forme:

$$Sp = B \times e^{A(IP)} \quad (2.73)$$

Où : A et B sont des constantes égales à 0.0838 et 0.2558, respectivement.

Najjar et al. (2000) ont proposé une relation empirique estimant le pourcentage de gonflement des sols argileux en fonction de l'indice de plasticité ( $IP$ ) et de la fraction argileuse ( $CF$ ). Cette relation s'écrit comme suit :

$$Sp = 2,17 \times 10^{-5} \left[ \frac{IP}{FC - 5} \right]^{2,20} \times FC^{3,44} \quad (2.74)$$

En 2006, Muntohar a constaté que le modèle basé sur une régression linéaire multiple offre le meilleur ajustement pour toutes les conditions de sol. L'équation de ce modèle est la suivante :

$$Sp = 0,171FC + 0,0012LL + 0,409IP - 1,869 \quad (2.75)$$

Hudyma et Avar (2006) ont proposé un modèle pour prédire la variation du pourcentage de gonflement des argiles mélangées au sable. La fonction prend la forme suivante :

$$Sp_{\text{mélange}} = Sp_{\text{sol gonflant}} \times e^{-0,02(\text{sable})} \quad (2.76)$$

Zha et al. 2008 ont indiqué que l'indice de plasticité est un bon indicateur du potentiel de gonflement. Les équations empiriques suivantes ont été proposées :

$$FS^* = 13,31 + 0,82 \times IP^* \quad (2.77)$$

$$Sp^* = 13,11 + 0,81 \times IP^* \quad (2.78)$$

$$Ps^* = 13,00 + 0,79 \times IP^* \quad (2.79)$$

Avec  $FS^* = \frac{FS}{FS_0} \times 100$ ;  $IP = IP/IP_0$  ;  $Sp^* = \frac{SP}{Sp_0} \times 100$  et  $PS^* = \frac{PS}{PS_0} \times 100$

Sabat et al (2012) ont proposé des modèles statistiques pour prédire la pression de gonflement d'un sol expansif stabilisé avec de la poussière de carrière et de la chaux.

$$Ps = 467 - 2,24QD - 0,17Ch - 1,53t + 8,6\gamma_{d\max} - 18,2w_{opt} + 197A_c \quad (2.80)$$

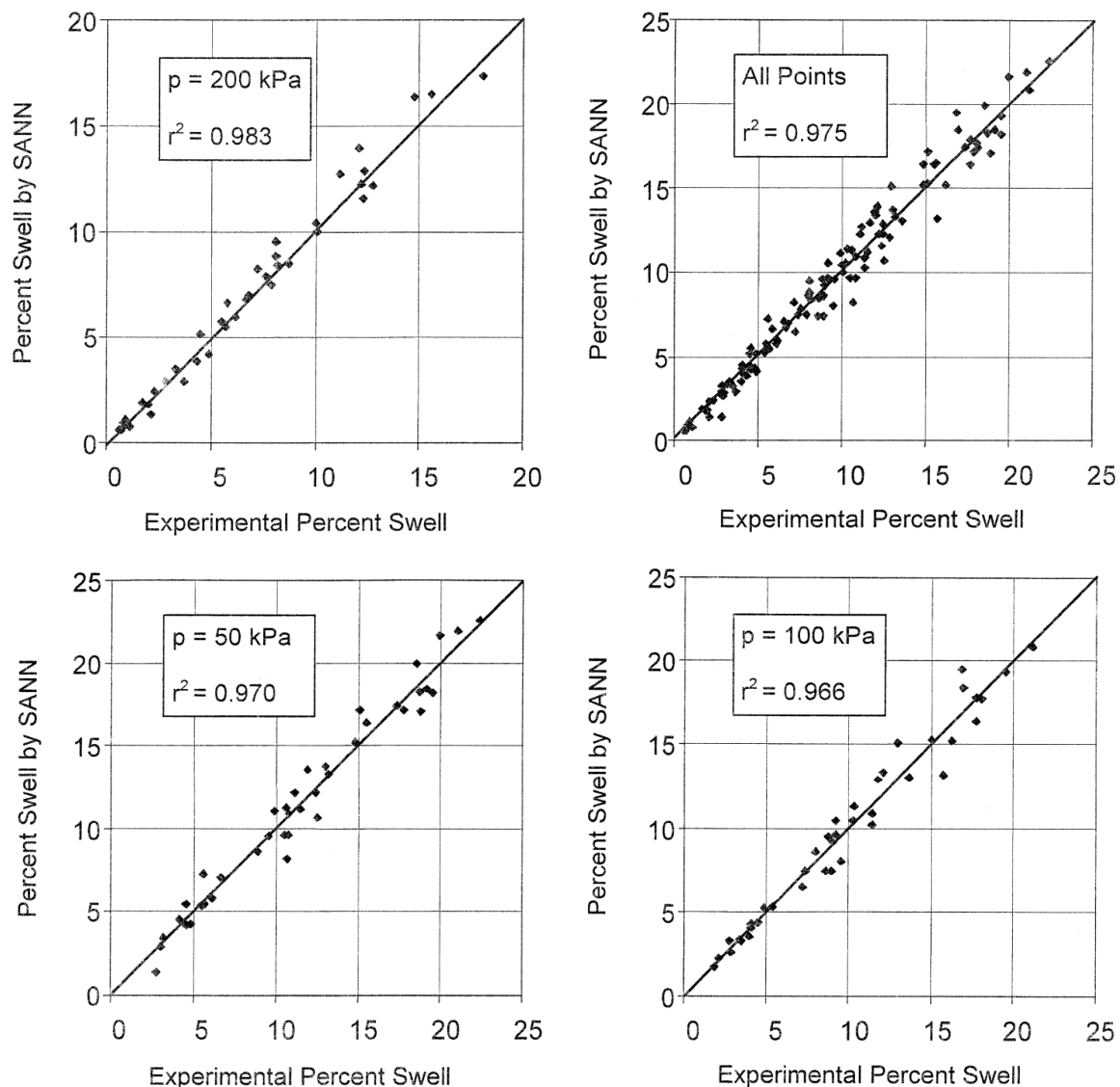
Kayabali et Yaldiz (2014) ont proposé une formule empirique pour estimer la pression de gonflement des sols, en intégrant les limites d'Atterberg dans l'analyse de régression, ainsi que la teneur en eau initiale et la densité sèche,

$$Sp = -30,8w_c + 1025\gamma_d + 6,35LL + 42,4LP - 2208 \quad (2.81)$$

En conclusion, cette section met en lumière l'importance cruciale de cette prévision dans les domaines de la construction et de l'ingénierie civile, soulignant que le gonflement des sols argileux peut causer des dommages structurels significatifs. Parmi les 81 modèles empiriques recensés, divers paramètres sont utilisés pour prédire ce phénomène, incluant les propriétés de plasticité (limite de liquidité, indice de plasticité), les conditions de compactage (densité sèche, teneur en eau de compactage), les caractéristiques granulométriques (distribution granulométrique, taille des particules), ainsi que d'autres paramètres. Ces modèles combinent souvent plusieurs types de paramètres pour améliorer la précision des prévisions. En conclusion, cette diversité et cette approche combinée permettent de développer des modèles plus robustes et précis, essentiels pour prévenir les dommages liés au gonflement des sols argileux.

## 2.8. Modèles (IA) pour la prévision du gonflement des sols

La prévision du gonflement des sols représente un défi majeur dans le domaine de la géotechnique et de l'ingénierie civile. Dans ce cadre, l'avènement de l'intelligence artificielle (IA) a ouvert de nouvelles perspectives pour aborder ce problème complexe. En exploitant des techniques avancées de modélisation et d'apprentissage automatique, il est désormais possible de développer des modèles prédictifs plus précis et fiables. Ces modèles utilisent de grandes quantités de données provenant de diverses sources, telles que des relevés géologiques, des mesures hydrologiques et des conditions climatiques, pour anticiper les variations de volume des sols. Dans ce cadre, Basma et al. (2003) se sont attachés à appliquer des réseaux de neurones artificiels séquentiels (SANN) pour modéliser le gonflement des sols expansifs au fil du temps. Leur étude montre qu'il est possible de développer un modèle SANN général capable de prédire le gonflement en fonction du temps en se basant sur les propriétés fondamentales du sol, avec une précision relativement élevée (corrélation  $R^2 = 0,975$  entre les données prédites et observées).

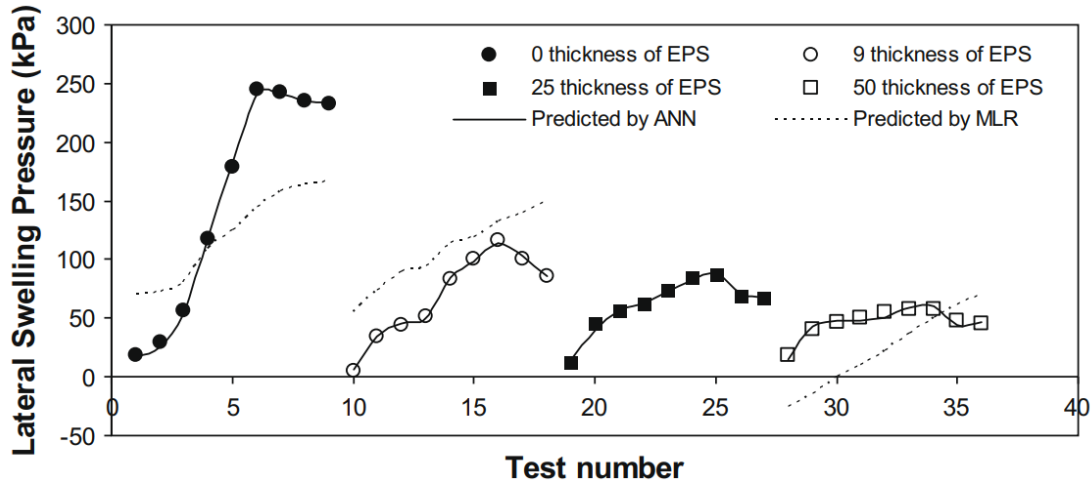


**Figure 2.9** Comparaison entre le pourcentage de gonflement expérimental et le pourcentage de gonflement par SANN (Basma et al 2003)

La figure 2.9 montre une comparaison entre les valeurs expérimentales de gonflement aux trois pressions initiales et les valeurs prédites par le SANN. La proximité des points par rapport à la ligne d'égalité ne sert qu'à indiquer la validité du modèle SANN.

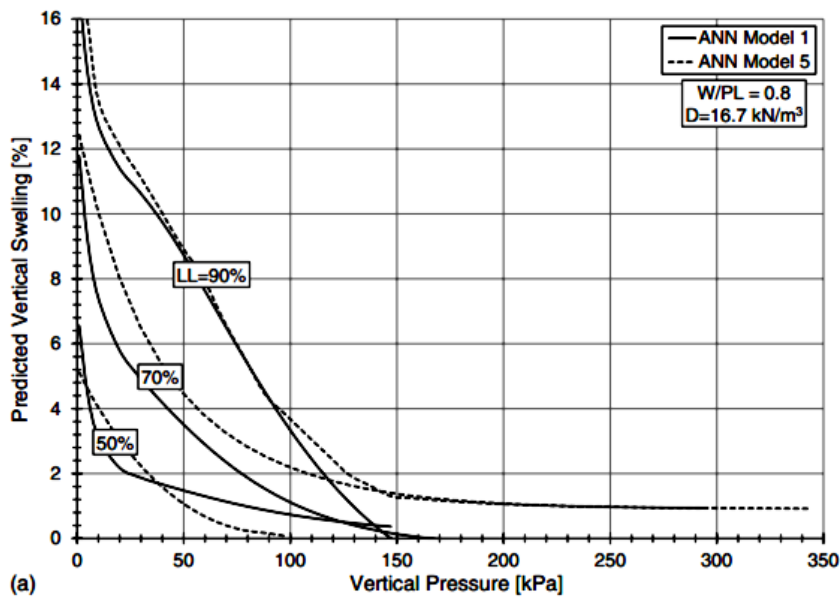
Ikizler et al. (2009) ont mis au point des approches alternatives, développant un modèle de prédiction pour les pressions de gonflement latérales et verticales exercées sur une structure de soutènement en utilisant des méthodes de réseau neuronal artificiel (ANN) et de régression linéaire multiple (MLR). L'étude consiste à mesurer les pressions de gonflement latérales et verticales en utilisant différentes épaisseurs de mousse de polystyrène expansé placée entre une paroi verticale d'une boîte d'essai en acier et le sol expansif. Ces mesures servent ensuite à

entraîner un réseau neuronal artificiel, permettant de prédire les pressions de gonflement latérales et verticales sur une structure de soutènement.



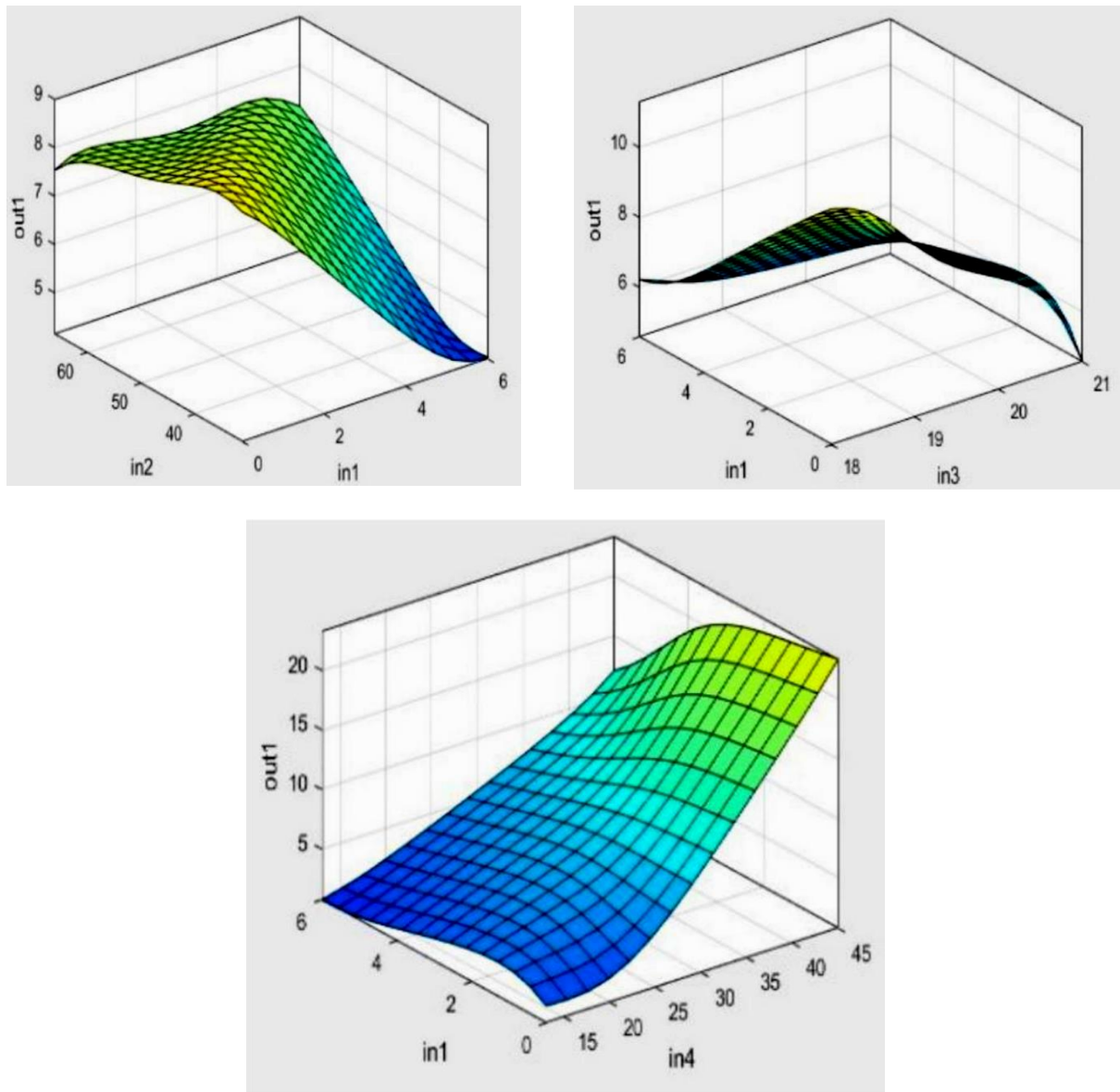
**Figure 2.10.** Comparaison des valeurs mesurées et prédites de la pression de gonflement latéral par ANN et MLR en fonction du numéro de test (Ikizler et al. 2009)

Le modèle ANN surpasse la MLR dans la prédiction des pressions de gonflement latérales et verticales, comme indiqué par les résultats de la figure 2.10. Cette supériorité suggère que l'ANN pourrait réduire le besoin d'essais en laboratoire, offrant ainsi des économies de temps et de coûts substantielles (Ikizler, 2009). Bekhor et al. (2013) ont évalué divers modèles en utilisant une base de données commune. Les modèles basés sur des réseaux neuronaux artificiels (ANN) ont démontré un meilleur ajustement statistique par rapport aux autres modèles.



**Figure 2.11.** Comparaison des prévisions de gonflement vertical entre les modèles ANN 1 et 5 pour diverses valeurs de limites de liquidité (Bekhor et al., 2013)

La figure 2.11 présente une comparaison des prévisions de gonflement vertical entre les modèles ANN 1 et 5 pour différentes valeurs de limites de liquidité, selon l'étude de Bekhor et al. (2013). Onyelowe et al. (2021) ont utilisé 25 résultats expérimentaux dans le déploiement du modèle ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) pour générer le potentiel de gonflement. Ces données ont été employées pour la formation et les tests de l'ANFIS. La figure 2.12 illustre une analyse paramétrique examinant l'impact des variables sur le potentiel de gonflement du sol expansif traité, basée sur le modèle ANFIS.



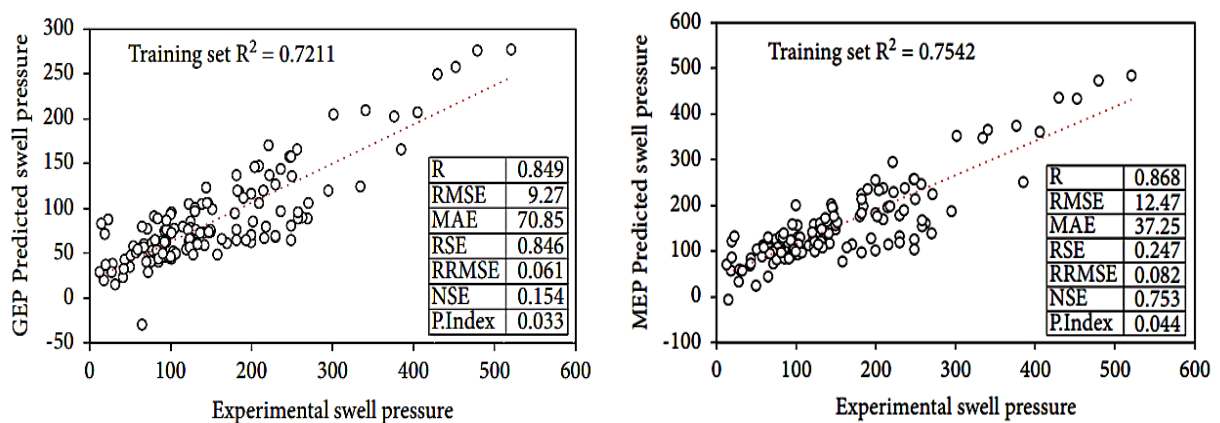
**Figure 2.12** Etude paramétrique des effets des variables sur le potentiel de gonflement du sol expansif traité à partir du modèle ANFIS (Onyelowe et al. 2021)

Le tableau 2.7 présente les paramètres utilisés pour configurer le système ANFIS qui est une technique d'apprentissage automatique hybride qui combine les avantages des réseaux de neurones et des systèmes experts flous.

**Tableau 2.7** Paramètres utilisés pour configurer le système ANFIS utilisé (Onyelowe et al. 2021)

Paramètre	Valeur
Type FIS	Sous-clustering
Plage d'influence	0,5
Facteur de courage	1,25
Accepter le ration	0,5
Taux de rejet	0,15
Méthode d'optimisation	Rétropropagation
Tolérance aux erreurs	0
Époques	20
Fonctions d'adhésion	5
Nombre de règles floues	5

Dans leur étude, Jalal et al. (2023) ont employé les modèles prédictifs de la programmation d'expression génique (GEP) ainsi que la programmation d'expression multigénique (MEP) afin d'estimer la pression de gonflement des sols expansifs ( $P_s$ ). Leur conclusion a suggéré que les modèles GEP et MEP développés pourraient être utilisés de manière efficace pour calculer le  $P_s$ , permettant ainsi de réduire la nécessité de tests laborieux et chronophages.



**Figure 2.13** Comparaison des Prévisions de Pression de Gonflement Expérimentale et Modélisée Utilisant les Techniques GEP et MEP sur les Données d'Entraînement

(Jalal et al., 2023)

En se référant aux données de la figure 2.13, qui présentent les comparaisons entre les valeurs expérimentales et prédites des  $P_s$ , il est possible de conclure que les indices de performance ( $R$ ,  $RMSE$ ,  $MAE$  et  $NSE$ ) démontrent une précision élevée.

## 2.9. Conclusion

Ce chapitre a examiné en détail les diverses approches de prévision des sols gonflants et les méthodes de prédiction de leur potentiel de gonflement, souvent basées sur des propriétés physiques mesurables. Les chercheurs ont développé des modèles empiriques pour prédire la pression de gonflement des sols, offrant ainsi une base solide pour évaluer les risques et guider les décisions de conception et de construction. De plus, l'utilisation croissante de l'intelligence artificielle, notamment les réseaux neuronaux représente une alternative prometteuse pour prédire le potentiel de gonflement des sols. En combinant ces approches, il est possible d'améliorer notre compréhension et notre gestion des risques liés aux sols gonflants, ce qui permettra une prise de décision plus éclairée pour assurer la durabilité et la sécurité à long terme des infrastructures routières. Cette étude bibliographique a mis en lumière aussi les lacunes des méthodes d'évaluation des modèles empiriques, en particulier en ce qui concerne l'absence totale de tests statistiques importants tels que le  $t$ -test et le  $F$ -test. Dans le chapitre suivant, certains des modèles empiriques présentés seront réajustés en utilisant une base de données géotechnique spécialement collectée à cet effet. Des tests tels que le  $t$ -test et le  $F$ -test seront appliqués pour évaluer les performances des modèles sélectionnés.

# Chapitre 3

---

**Analyse statistique des méthodes de  
prévision du gonflement des sols**

### 3.1. Introduction

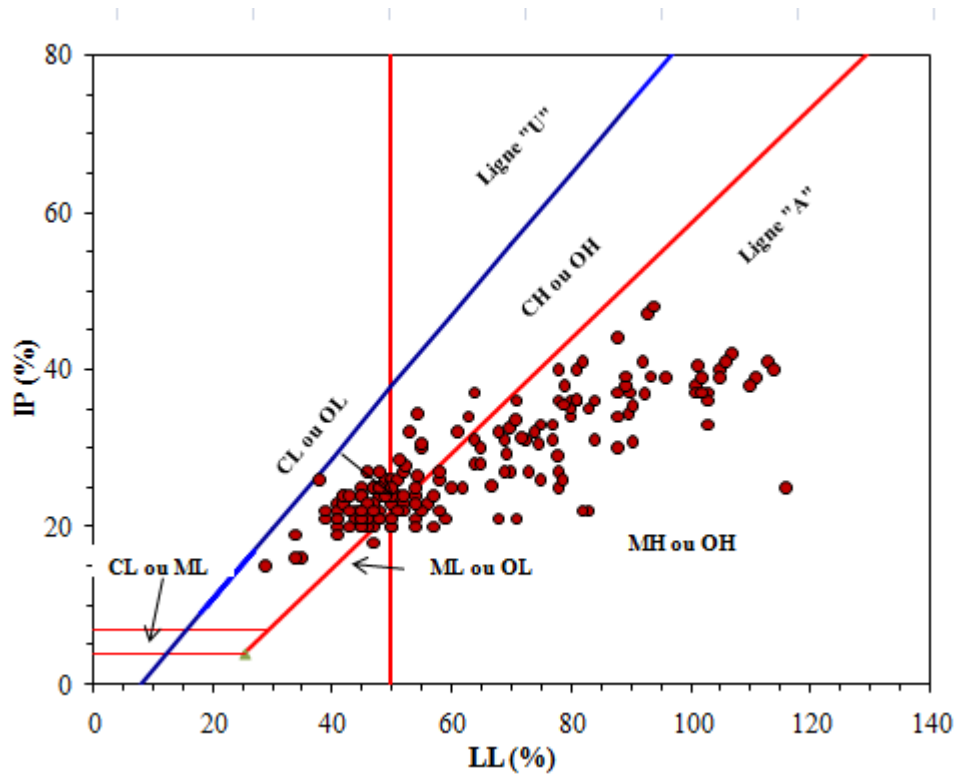
La prévision des paramètres de gonflement des sols argileux revêt une importance cruciale dans le domaine de la géotechnique en raison de l'impact significatif de ces phénomènes sur la stabilité des infrastructures. Par conséquent, de nombreux modèles empiriques de prévision du potentiel et de la pression de gonflement ont été proposés dans la littérature scientifique au fil des années. Cependant, ces modèles sont souvent limités par une base de données restreinte, ce qui peut compromettre la représentativité et la fiabilité des prédictions, ainsi que par une évaluation statistique insuffisante, rendant difficile la vérification rigoureuse de leur performance prédictive. L'objectif de ce chapitre est de réajuster des modèles de prévision du potentiel et de la pression de gonflement en utilisant une base de données étendue, collectée à partir de la littérature, incluant des informations détaillées sur les propriétés géotechniques de 161 échantillons de sol, afin de renforcer la robustesse et la précision des modèles.

Pour atteindre cet objectif, une étude statistique approfondie sera menée pour évaluer les modèles sélectionnés. Cette évaluation s'appuiera sur plusieurs indicateurs statistiques, notamment les tests de Fisher (F-test) et de Student (t-test), afin de garantir une validation rigoureuse des modèles réajustés.

### 3.2. Présentations de la base de données

La base de données utilisée dans ce chapitre a été constituée à partir de la littérature existante, intégrant des informations détaillées sur les propriétés géotechniques de 161 échantillons de sol tirés des recherches publiées par Jones et Hobbs (2005), Choma-Moryl et al. (2007), Lew et al. (2010), Öget et al. (2014), Abu Seif (2015), Debelo et al. (2015), Öztürk et al. (2015), Abu Seif et al. (2017), et Hakami et al. (2019). Ces études couvrent une large variété de sols fins, englobant plus de 160 échantillons, et fournissent des données détaillées sur leurs caractéristiques physiques, mécaniques et granulométriques.

La figure 3.1 illustre les positions des sols de la base de données sur la carte de Casagrande. Les sols analysés se répartissent en différentes classes selon la classification USCS, notamment CL, OL, CH, OH, ML, ou MH (voir Figure 3.1). Outre les paramètres de gonflement, cette base de données comprend des informations sur les propriétés de plasticité, les paramètres de gonflement et les caractéristiques granulométriques.



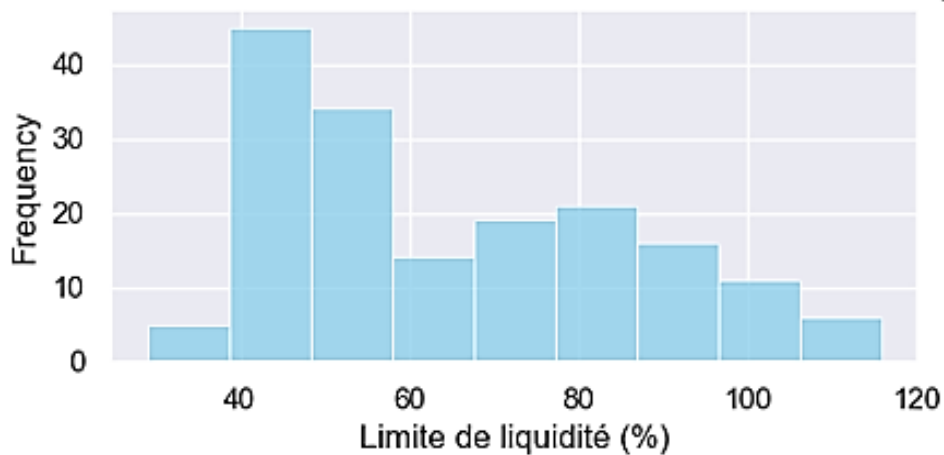
**Figure 3.1** Carte de Casagrand des sols de la base de données selon la classification USCS

### 3.2.1. Propriétés de plasticité

La figure 3.1 illustre la répartition des sols de la base de données dans la carte de Casagrand, conformément à la classification USCS. Cette représentation graphique met en évidence différentes catégories de sols, telles que les argiles plastiques à très plastiques (CL et CH), les sols marneux (ML et MH), ainsi que les sols organiques (OL et OH).

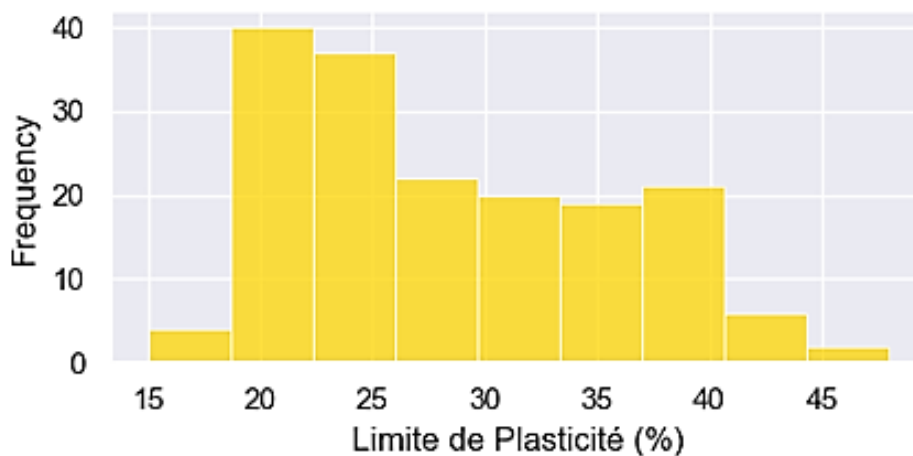
La figure 3.2 représente la distribution des fréquences des limites de liquidité présentes dans cette base de données. On peut y observer une concentration significative des limites de liquidité dans la plage de 40 % et 60 %, avec un pic de fréquences observé à 40 %, qui caractérise les sols ayant plasticité moyenne. Cela suggère que la plupart des sols dans cette base de données ont des limites de liquidité dans cette plage. Il y a relativement peu d'observations avec des limites de liquidité en dessous de 60% ou au-dessus de 80%, ce qui peut indiquer que ces limites sont moins fréquentes ou moins pertinentes dans le contexte de cette base de données particulière. De plus, il existe une asymétrie dans la distribution, avec plus d'observations ayant des limites de liquidité inférieures à la moyenne que des limites de liquidité supérieures

à la moyenne. Cela suggère que les limites de liquidité inférieures sont plus pertinentes ou plus restrictives dans cette base de données spécifique.



**Figure 3.2** Distribution des limites de liquidité LL

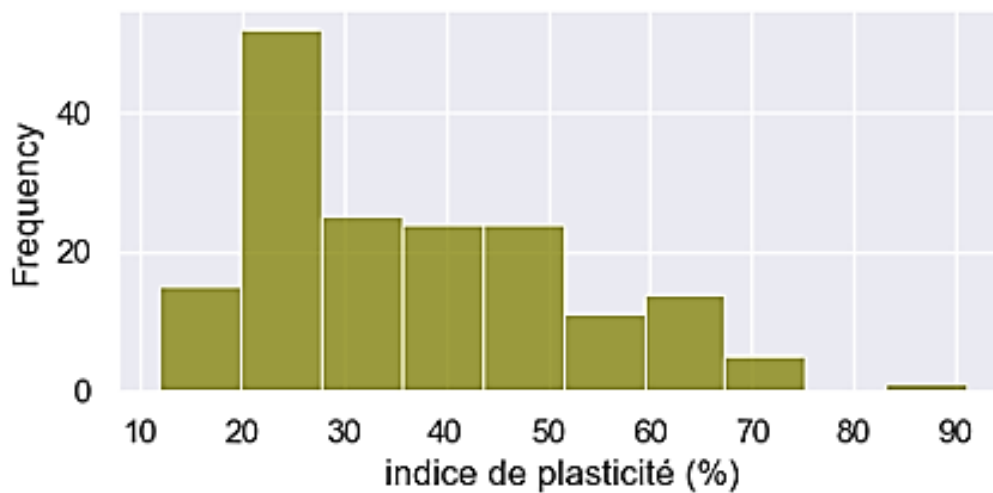
La figure 3.3 représente la distribution des fréquences. La limite de plasticité indique la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique permanente sous contrainte. L'analyse de ces données peut fournir des informations utiles sur les propriétés mécaniques des matériaux.



**Figure 3.3** Distribution des limites de plasticité LP

Les résultats montrent que la majorité des limites de plasticité se situent dans la plage de 20 à 25, ce qui indique que la plupart des matériaux dans la base de données ont une bonne résistance à la déformation plastique. Cela est corroboré par le nombre relativement faible de fréquences dans la valeur la plus faible (15) et la plus élevée (45). Il est également intéressant de noter qu'il y a une augmentation significative de la fréquence dans la plage de 15 à 20 et une faible fréquence dans la plage de 40. En fin de compte, cette analyse des données de

distribution des limites de plasticité peut aider les ingénieurs et les scientifiques à mieux comprendre les propriétés des matériaux et à prendre des décisions éclairées en matière de conception et de sélection de matériaux pour des applications spécifiques. En fin pour les indices de plasticité qui représentent les différences numériques entre les limites de liquide et les limite de plasticité du sol, déterminés par la norme ASTM 424-59. L'indice de plasticité est utilisé dans la classification des sols selon le système de classification unifié des sols (USCS) et le système de classification des sols AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), où il permet de distinguer différents types de sols et d'évaluer leurs comportements géotechniques.



**Figure 3.4** Distribution des indices de plasticité IP

Les résultats montrent une distribution des indices de plasticité (figure 3.4), avec un pic de 20%. La distribution des fréquences montre également une constante approximative des fréquences des indices de plasticité des 30,40 et 50%, et on note que la distribution étroite pour les valeurs les plus élevées de l'indice de plasticité, ce qui suggère que peu d'individus ont des niveaux de plasticité très élevés. Enfin, la distribution des fréquences des indices de plasticité peut avoir des implications importantes pour la sélection de caractéristiques pour la classification des individus. Les caractéristiques les plus importantes pour la classification peuvent varier en fonction de l'indice de plasticité considéré.

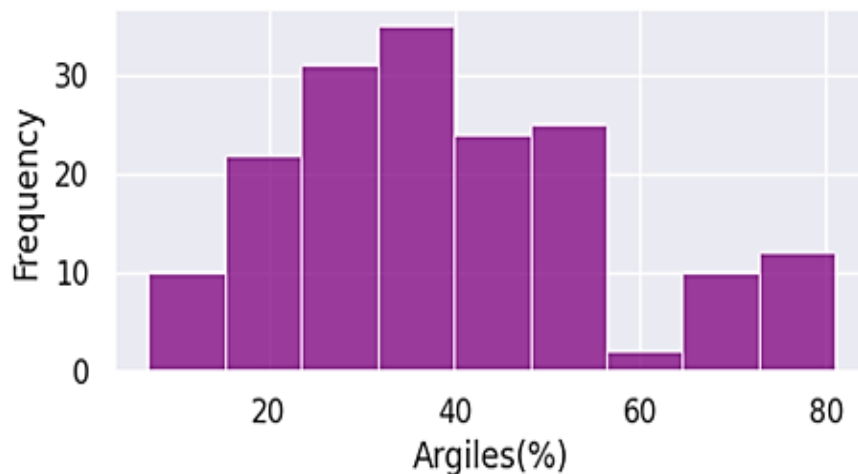
### 3.2.2. Caractéristiques granulométriques

Les caractéristiques granulométriques se réfèrent aux propriétés de la répartition des tailles des particules d'un matériau granulaire, telles que la taille des particules, la distribution granulométrique et la courbe granulométrique. Ces caractéristiques granulométriques

fournissent des informations précieuses sur les propriétés physiques et mécaniques d'un matériau granulaire, telles que la perméabilité, la compaction, la résistance et la capacité de drainage. Elles sont souvent utilisées dans la conception et l'analyse de divers projets d'ingénierie, tels que la construction de routes, les ouvrages hydrauliques, la filtration des sols, etc.

La figure 3.5 illustre la distribution des teneurs des composants fins des sols de la base données à savoir les argiles. Les argiles sont des particules fines d'une taille inférieure à 0,002 mm. Elles sont principalement composées de minéraux argileux tels que la montmorillonite, l'illite et la kaolinite. Les argiles peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés d'ingénierie des sols, notamment leur compressibilité, leur résistance et leur perméabilité.

La figure 3.5 montre que la majorité des sols de l'échantillon présentent une teneur en argile relativement élevée, avec des pourcentages d'argile se situant principalement entre 20 et 50%. Ces valeurs représentent plus de 80 % de l'ensemble des sols étudiés. Les pourcentages les plus fréquents sont 30% et 40 %, avec respectivement 30 et 35 occurrences.



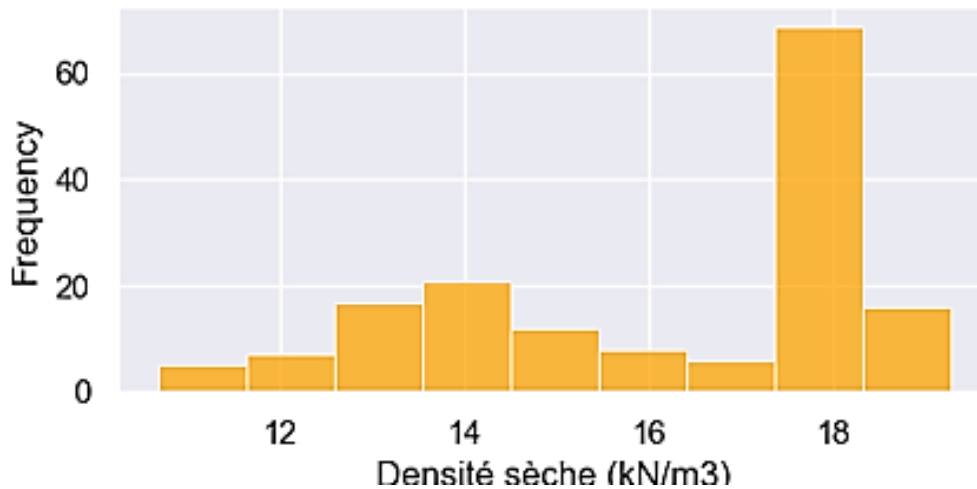
**Figure 3.5** Distribution des teneurs des composants des argiles

Dans les extrêmes de la distribution montrent on note la présence de quelques sols avec des teneurs en argile très faibles, comme 7,5 %, représentant 33 occurrences, ainsi que quelques sols avec des teneurs en argile très élevées, comme 60 %, 67,5 % et 75 %, mais ces derniers représentent un faible nombre d'occurrences.

### 3.2.3. Paramètres de compactage

Les paramètres de compactage des sols dépendent de plusieurs facteurs, notamment la nature du sol, l'objectif du compactage et les exigences spécifiques du projet. La teneur en eau ( $W_c$ ) et la densité sèche sont les paramètres les plus utilisés pour caractériser le compactage des sols qui sont déterminée par des essais de laboratoire tels que l'essai Proctor normal ou l'essai Proctor modifié. Il est important de noter que les paramètres de gonflement peuvent varier en fonction du type de sol, de l'application spécifique et des spécifications du projet. Les normes et les méthodes d'essai spécifiques utilisées, peuvent également influencer les paramètres de compactage des sols.

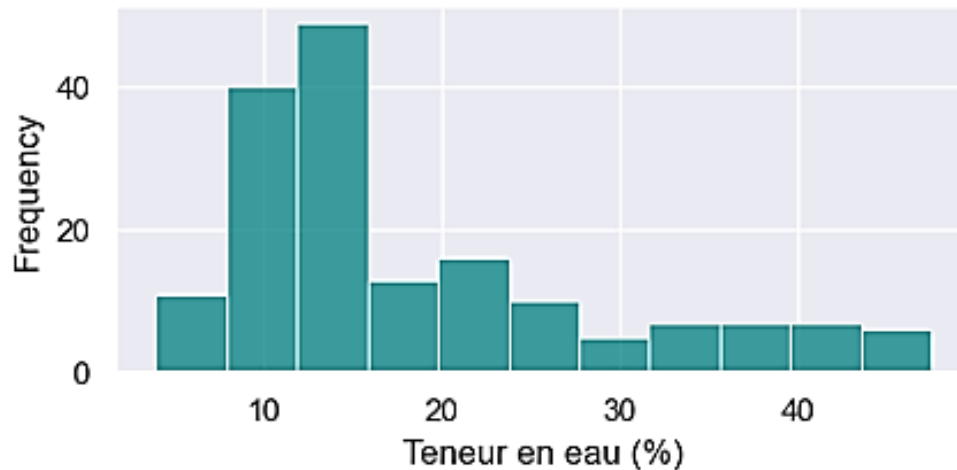
La figure 3.6 présente une distribution des densités sèche ( $\gamma_d$ ) des sols de la base de données. Les résultats présentés indiquent que la majorité des échantillons de sols ont une  $\gamma_d$  de 18 ( $\text{kN/m}^3$ ). Il est important de noter que la distribution des fréquences est très asymétrique, avec une fréquence maximale de 70 échantillons pour une valeur de  $\gamma_d$  de 18 ( $\text{kN/m}^3$ ) et une diminution rapide des fréquences pour les valeurs supérieures et inférieures.



**Figure 3.6** Distribution des densités sèche ( $\gamma_d$ )

Cela peut être interprété comme indiquant que les échantillons de sols de cette plage de ( $\gamma_d$ ) peuvent être considérés comme représentatifs de la population. La figure (3.7) présente une distribution des teneurs en eau ( $W_c$ ) des sols des bases de données. À partir des données, on peut voir que la fréquence la plus élevée (50 occurrences) est observée pour une teneur en eau de 15 %. Cela peut indiquer que cette teneur en eau est la plus couramment utilisée pour obtenir la densité maximale dans la zone d'étude. Cependant, il est important de noter qu'une teneur en eau de 10 % est également fréquemment utilisée (40 occurrences), ce qui indique

que cette teneur en eau peut également donner une densité maximale satisfaisante. En revanche, on peut voir que les fréquences sont relativement faibles pour les teneurs en eau en dehors de la plage de 10 % à 15 %.

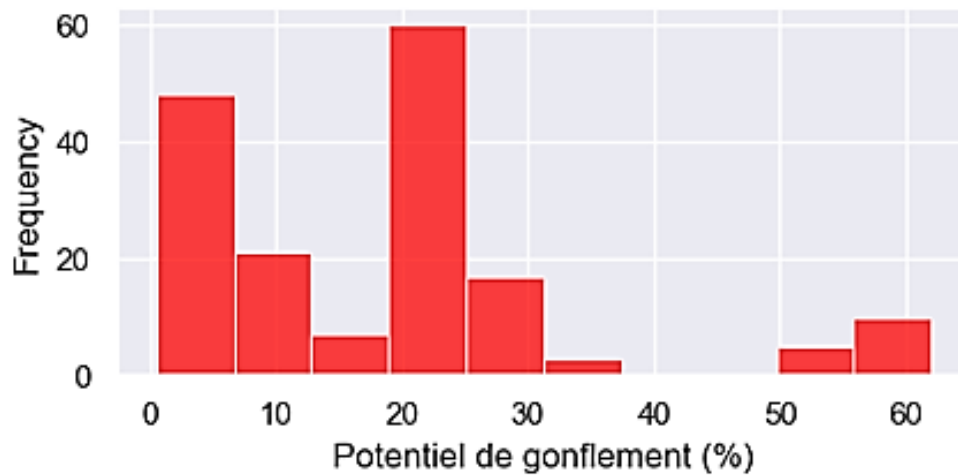


**Figure 3.7** Distribution des teneurs en eau (WC)

### 3.2.4 Paramètres du gonflement

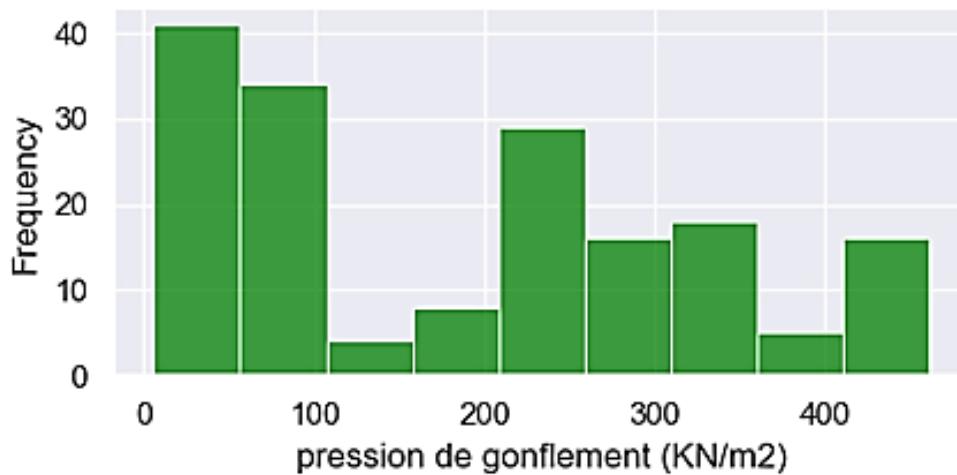
Les paramètres de gonflement sont des caractéristiques des sols expansifs qui déterminent leur comportement de gonflement ou d'expansion lorsqu'ils absorbent de l'eau. Les principaux paramètres associés au gonflement des sols sont le potentiel de gonflement ( $S_p$ ) et la pression de gonflement ( $P_s$ ). Le potentiel de gonflement ( $S_p$ ) fait référence à la capacité d'un sol à subir un gonflement ou une expansion lorsqu'il est soumis à une augmentation de la teneur en eau. Les sols avec un potentiel de gonflement élevé ont tendance à subir des variations de volume importantes en réponse aux changements de la teneur en eau. La pression de gonflement ( $P_s$ ) est la force exercée par un sol expansif lorsqu'il gonfle ou se dilate en raison de l'absorption d'eau. Ces paramètres de gonflement sont souvent mesurés en laboratoire à l'aide de l'essai œdométrique, qui est souvent chronophage.

Figure 3.8 présente une distribution des potentiels de gonflement des sols de la base de données. À partir des données, on peut voir que la fréquence la plus élevée (60 occurrences) est observée pour pourcentage de gonflement de 20 %. Cependant, il est important de noter qu'une potentiel de gonflement de 20 % est également fréquemment utilisée (60 occurrences), En revanche, on peut voir que les fréquences sont relativement faibles pour les pourcentages de gonflement de 35 % à 50 %.



**Figure 3.8** Distribution de potentiel de gonflement SP (%)

La figure 3.9 présente une distribution de pressions de gonflement des sols de la base de données. Les résultats présentés dans cette distribution de fréquences de la pression de gonflement  $P_s$  indiquent que la majorité des échantillons de sols ont une  $P_s$  de 50 (kN/m<sup>2</sup>), on note une fréquence maximale de 40 échantillons pour une valeur de  $P_s$  de 50 (kN/m<sup>2</sup>) et une diminution rapide des fréquences pour les valeurs supérieures et inférieures



**Figure 3.9** Distribution de pression de gonflement  $P_s$  (KN/m<sup>2</sup>)

Le tableau (3.1) résume quelques paramètres statistiques de la base de données considérée dans le présent travail.

**Tableau 3.1** Résumé des paramètres de la base de données

Source	DATA	LL(%)	IP(%)	Densité (KN/m <sup>3</sup> )	Wc(%)	SP(%)	Ps (kPa)	Argiles (%)
Jones et Hobbs 2005	10	45.0 - 64.0	23.0 - 36.0	14.9 - 18.8	17.5 - 24.6	3.0 - 10.6	16.2 - 90.9	32.1 - 74.1
Choma-Moryl 2007	20	41.0 - 84.0	20.0 - 53.0	4.0 - 25.0	4.0 - 25.0	10.0 - 34.0	37.5 - 75.0	12.0 - 81.0
Lew 2010	5	51.5 - 55.0	22.1 - 27.9	15.5 - 17.9	12.2 - 15.8	2.1 - 12.7	24.4 - 45.0	19.8 - 25.0
Öget 2014	20	29.0 - 88.0	12.0 - 59.0	13.8 - 18.5	16.0 - 29.0	1.1 - 20.0	7.6 - 269.2	7.0 - 50.0
Abu Seif 2015	15	101.0 - 114.0	63.0 - 74.0	17.8 - 18.2	8.4 - 13.4	54.0 - 62.0	411.9 - 460.9	40.9 - 55.1
Debelo 2015	20	66.7 - 101.2	37.1 - 60.6	11.9 - 14.9	32.0 - 47.4	1.8 - 9.8	26.4 - 374.2	54.5 - 80.7
Öztürk et al 2015	10	34.0 - 116.0	15.0 - 91.0	11.7 - 15.3	26.5 - 45.7	0.5 - 9.2	6.0 - 243.0	16.0 - 58.0
Abu Seif 2017	40	39.0 - 63.0	18.0 - 38.0	17.6 - 18.9	5.4 - 13.7	21.0 - 25.0	348.2 - 196.1	33.0 - 53.0
Hakami et al 2019	21	69.0 - 94.0	38.0 - 54.0	17.9 - 18.5	10.9 - 15.4	18.8 - 34.2	281.2 - 442.3	20.1 - 35.7

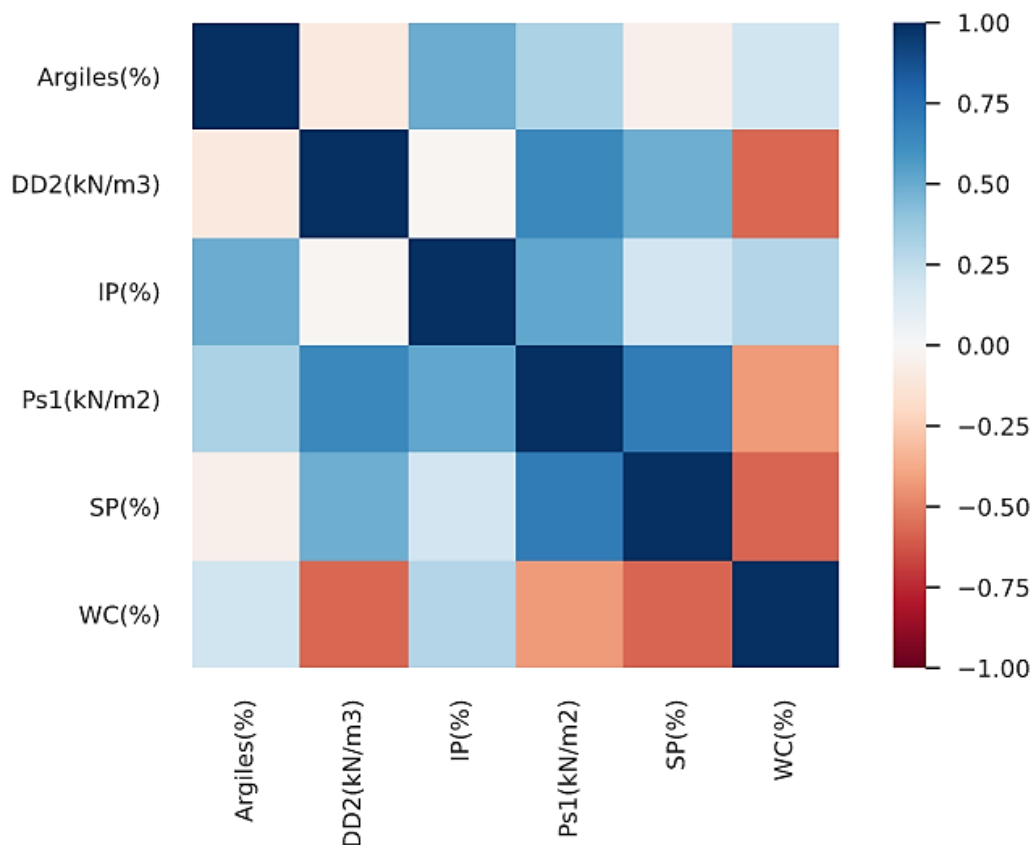
### 3.3. Corrélation entre les différentes propriétés de la base de données

La figure 3.10 illustrent une matrice de corrélation entre quelques propriétés de la base de données. Une matrice de corrélation est utilisée pour analyser les relations entre les différentes propriétés de la base de données géotechnique collectée. Elle permet d'évaluer la force et la direction des corrélations entre les variables, d'optimiser la sélection des variables, de comprendre les interactions entre les propriétés et de valider les performances du modèle de prévision, ce qui est essentiel lors de l'élaboration d'un modèle de prévision.

La matrice de corrélation fournie dans la figure 3.10 représente les corrélations entre différentes propriétés géotechniques mesurées pour la base de données du présent travail. Les valeurs de corrélation varient de -1 à 1, où -1 indique une corrélation négative parfaite, 1 indique une corrélation positive parfaite, et 0 indique l'absence de corrélation linéaire. Les figures 3.11 à 3.22 illustrent les corrélations linéaires entre les variables à expliquer (les

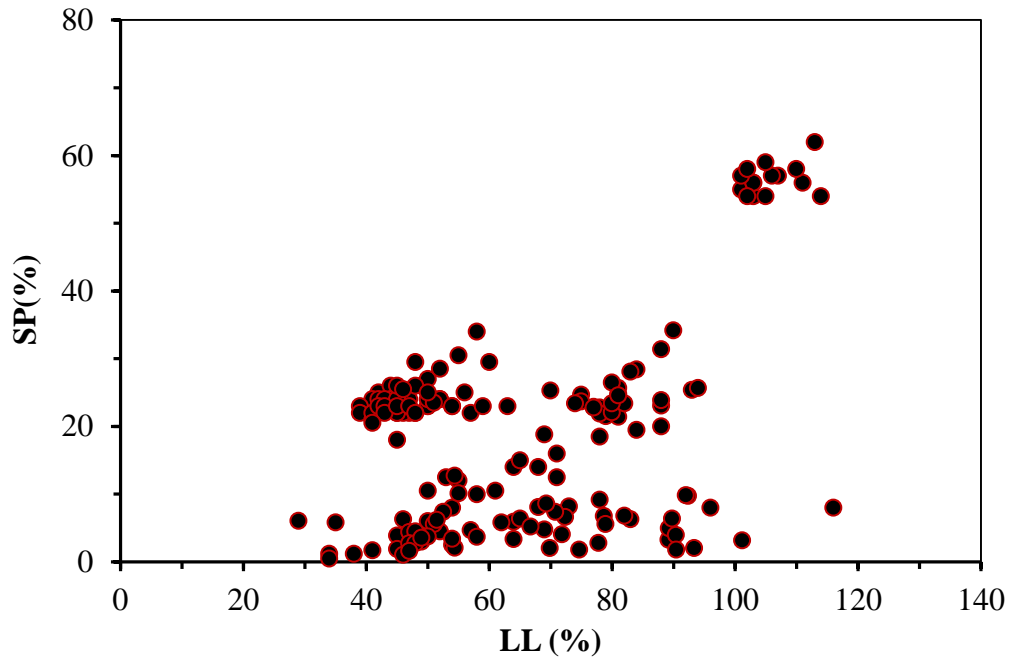
sorties du modèle), caractérisées par le potentiel de gonflement (SP) et la pression de gonflement (Ps), et les variables explicatives (les entrées), représentées par les propriétés de plasticité (LL, LP et IP), de compactage ( $\gamma_d$  et WC) et granulométriques (teneur en argile).

Le potentiel de gonflement présente des corrélations positives avec les paramètres de plasticité tels que la limite de liquidité (LL), l'indice de plasticité (IP) (0,25), et la limite de plasticité (LP). Cela indique que ces paramètres sont liés au potentiel de gonflement (Figures 3.11, 3.12 et 3.13).

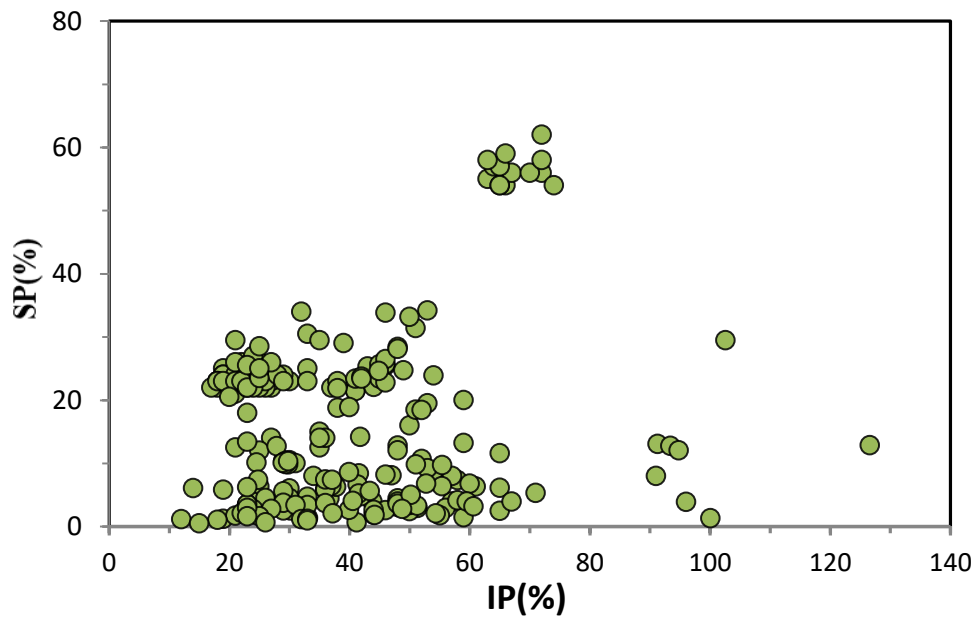


**Figure 3.10** Matrice des corrélations entre les propriétés de la base de données

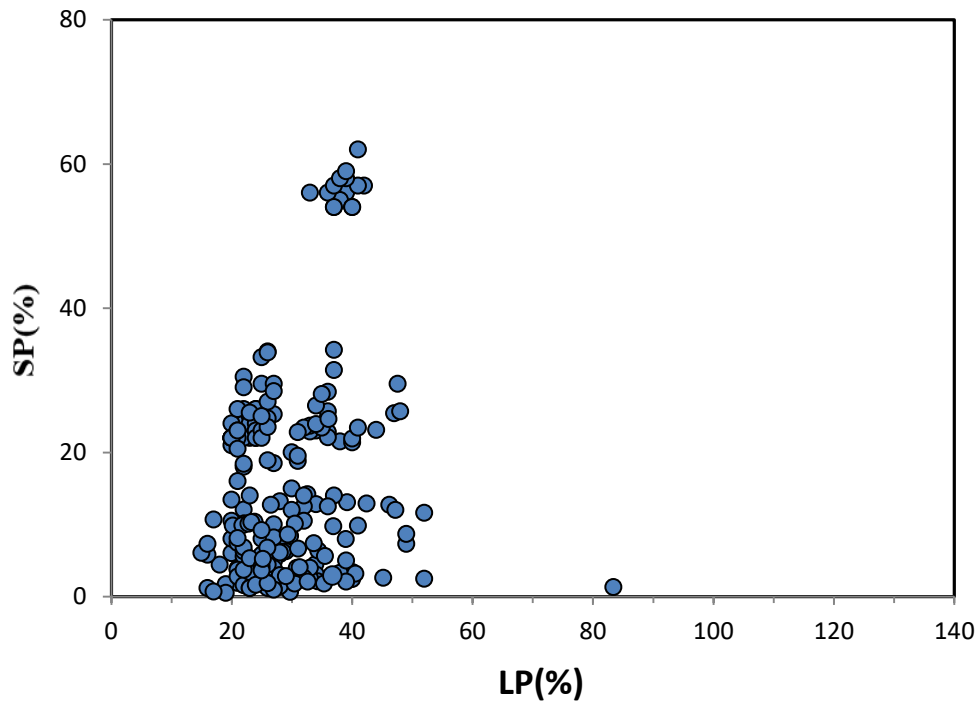
On peut constater aussi que le potentiel de gonflement (Sp) est corrélé négativement avec la teneur en eau (WC) (-0,50). Cela suggère qu'une augmentation de la teneur en eau est associée à une diminution de la (Sp) (Figure 3.14). La matrice de corrélation a montrée aussi que la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et le potentiel de gonflement sont fortement corrélés entre eux (0.50), ce qui indique une relation directe entre ces deux propriétés (Figure 3.15).



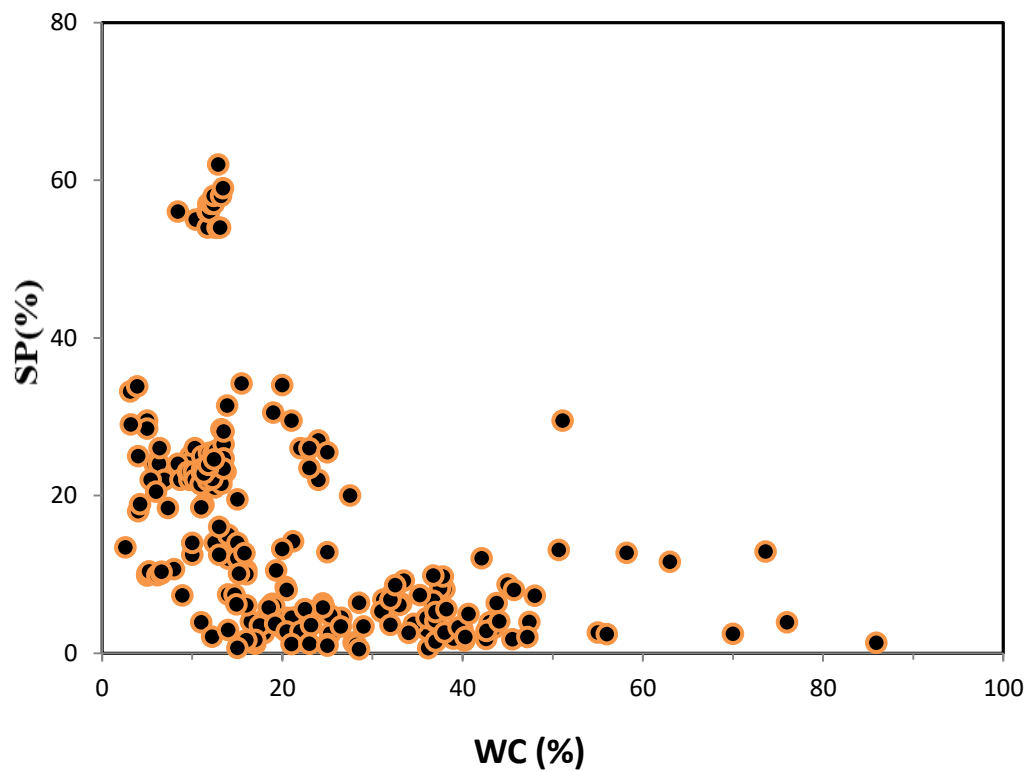
**Figure 3.11** Corrélations entre la potentiel de gonflement (Sp) et la limite de liquidité (LL)



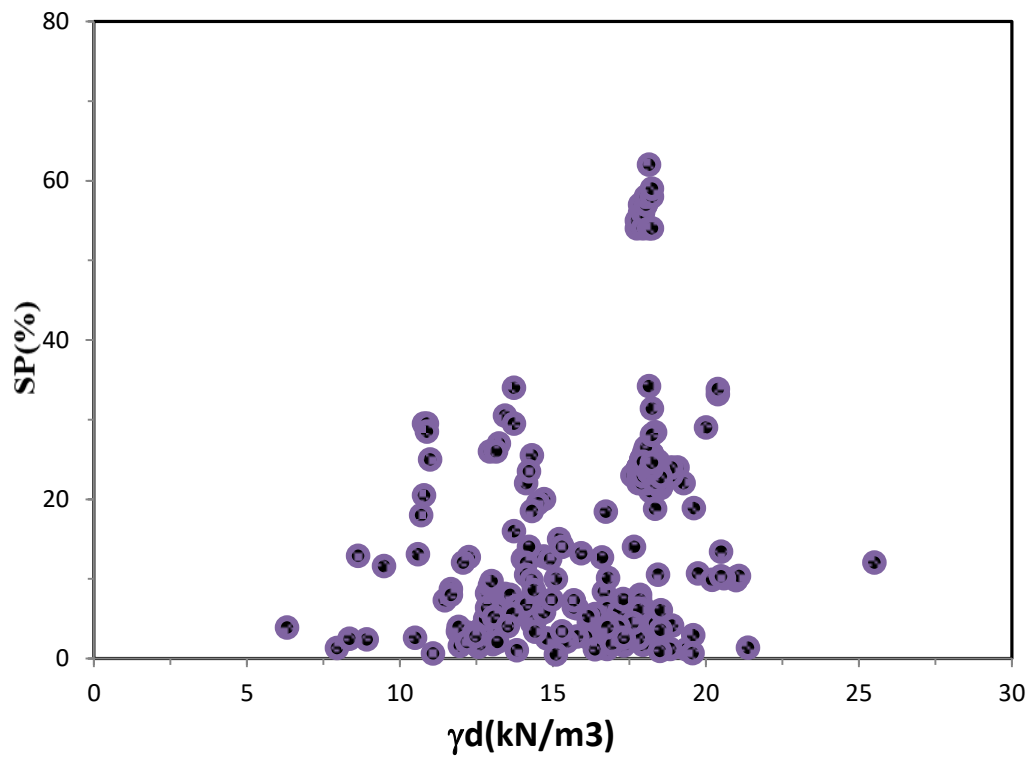
**Figure 3.12** Corrélations entre l'indice de plasticité (IP) et la potentiel de gonflement (Sp)



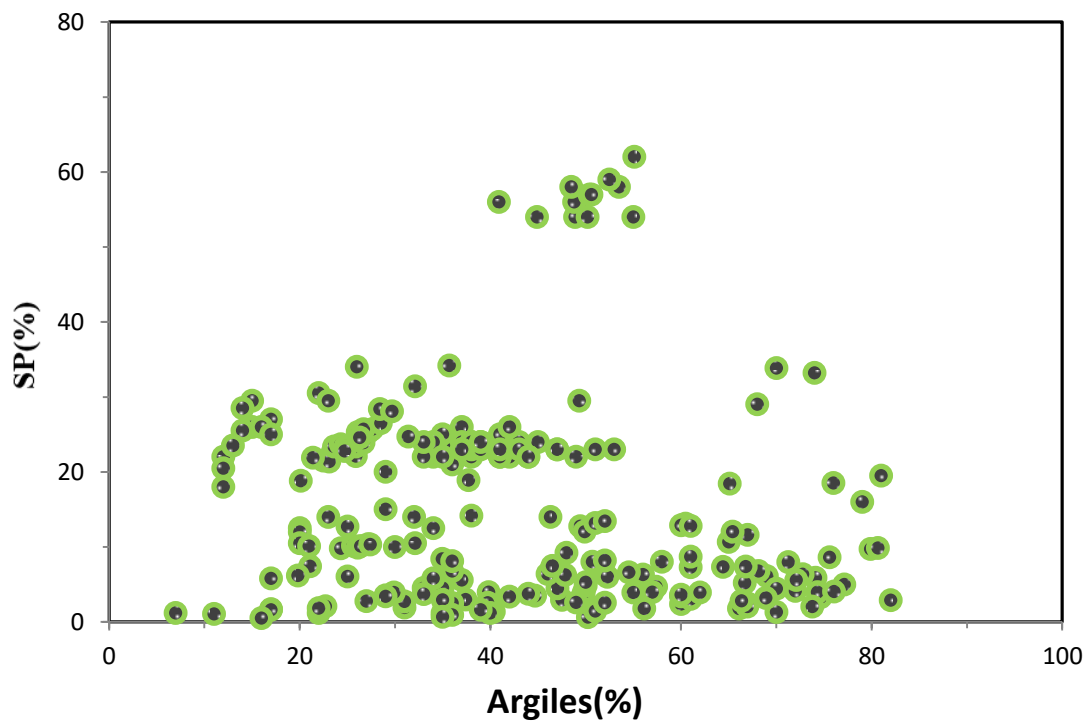
**Figure 3.13** Corrélations entre la limite de plasticité (LP) et la potentiel de gonflement (Sp)



**Figure 3.14** Corrélations entre la teneur en eau (WC) et la potentiel de gonflement (Sp)

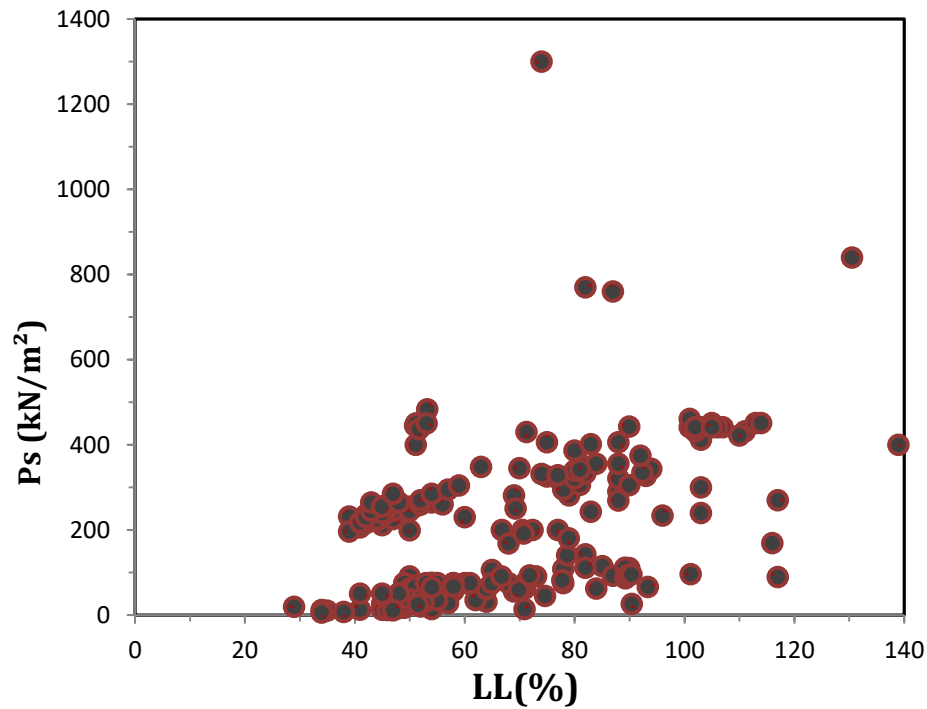


**Figure 3.15** Corrélations entre la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et la potentiel de gonflement (Sp)

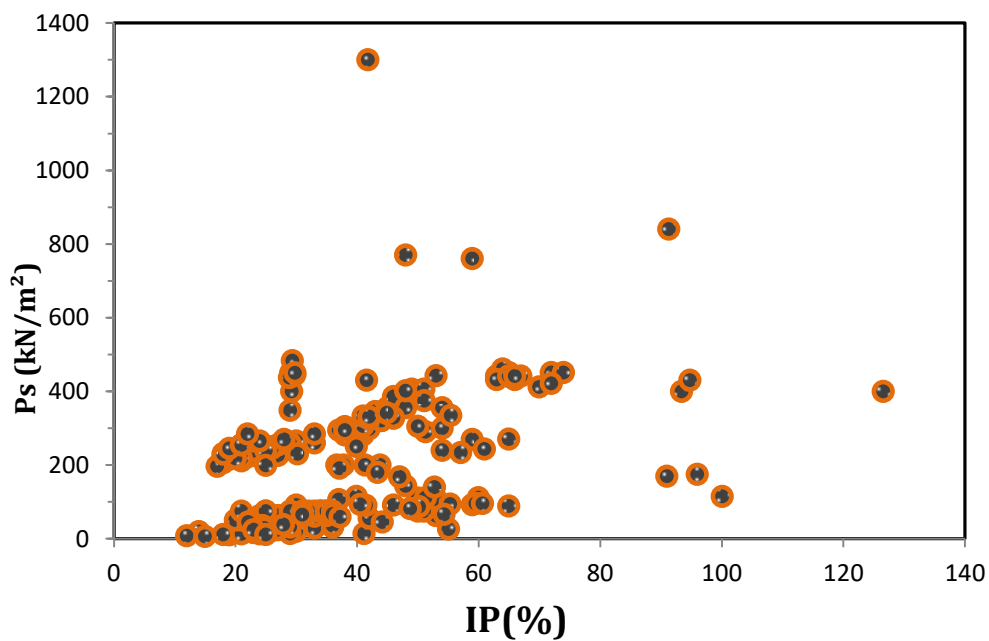


**Figure 3.16** Corrélations entre la teneur en argile et la potentiel de gonflement (Sp)

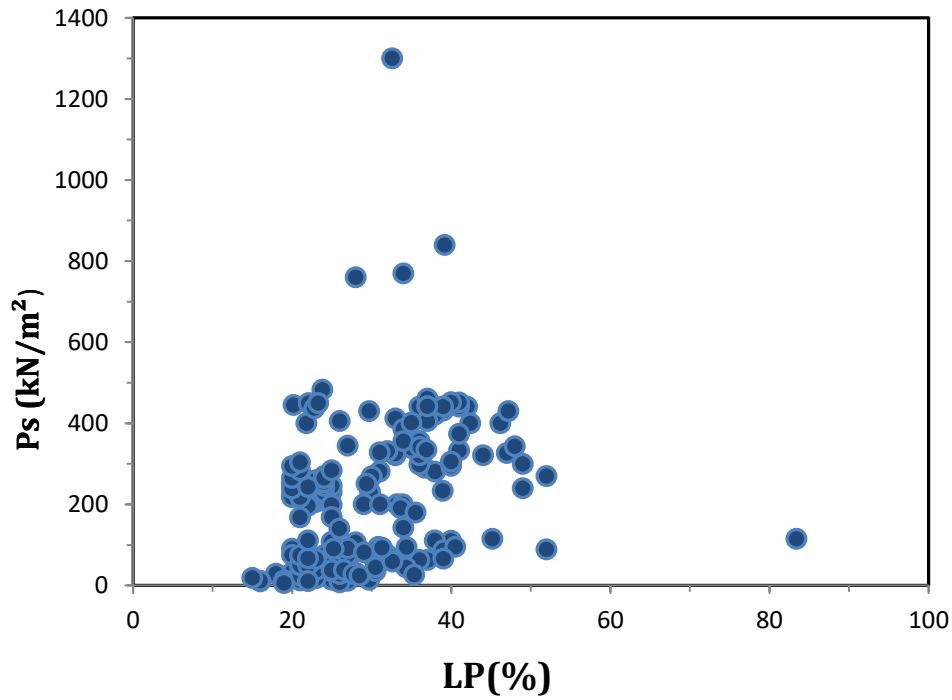
La matrice de corrélation présente une absence de corrélation (proche de 0) entre la teneur en argile et le potentiel de gonflement ( $S_p$ ), indiquant une absence de relation linéaire entre ces deux propriétés (Figure 3.16)



**Figure 3.17** Corrélations entre la limite de liquidité (LL) et la pression de gonflement ( $P_s$ )

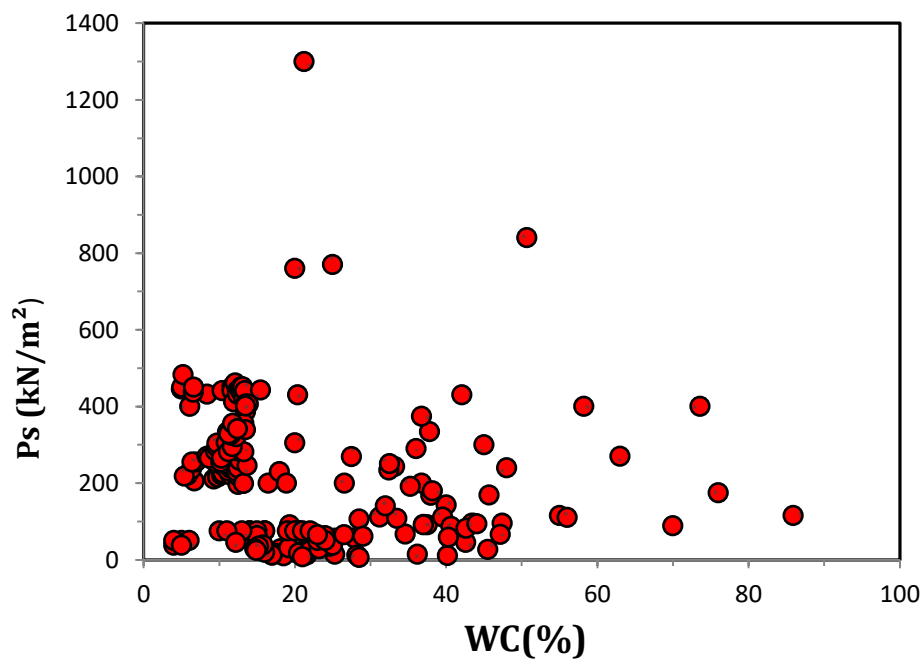


**Figure 3.18** Corrélations entre l'indice de plasticité (IP) et la pression de gonflement ( $P_s$ )



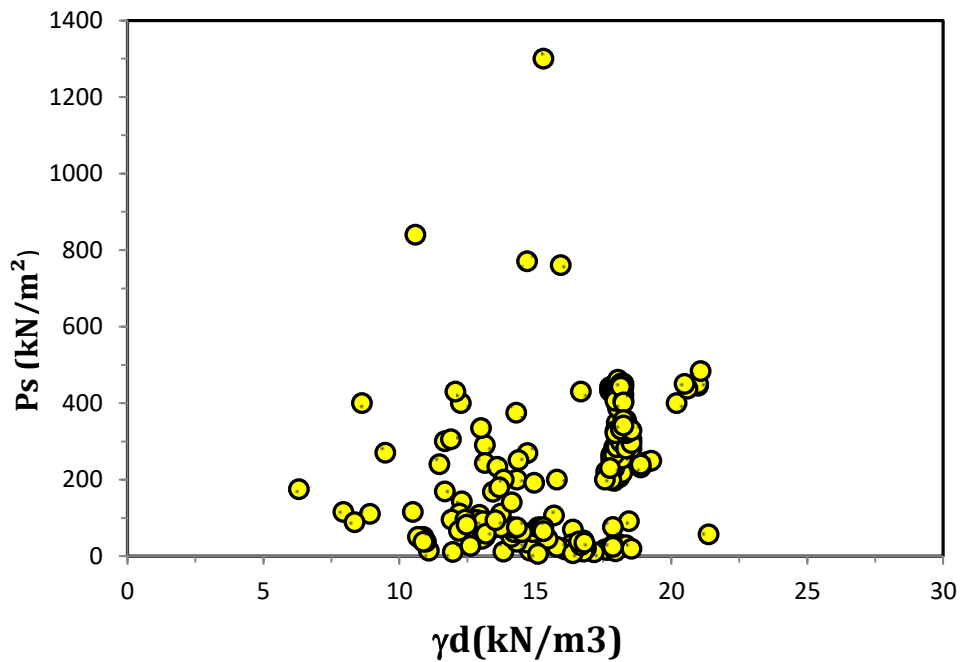
**Figure 3.19** Corrélations entre la limite de plasticité (LP) et la pression de gonflement (Ps)

Les paramètres de plasticité présentent des corrélations positives avec la pression de gonflement (Ps) (Figures 3.17, 3.18 et 3.19).



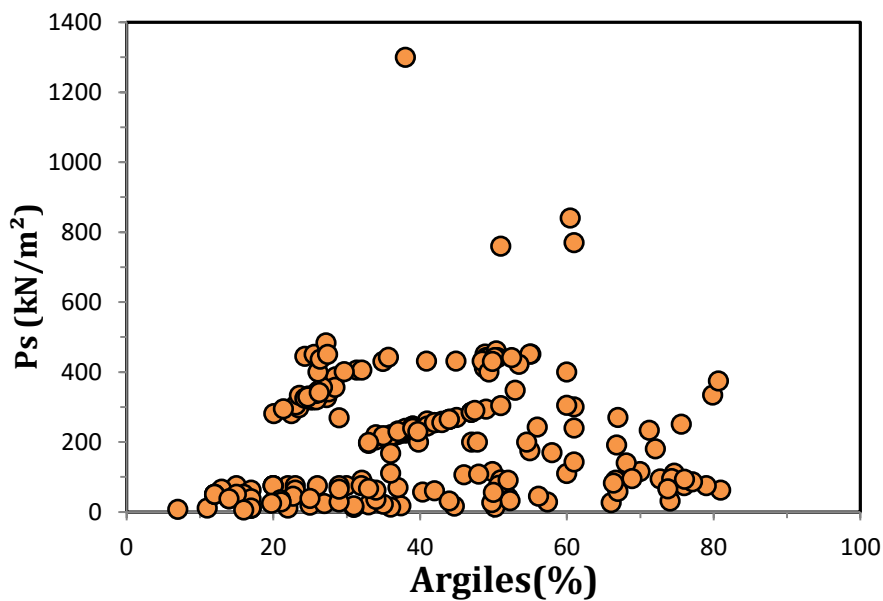
**Figure 3.20** Corrélations entre la teneur en eau (WC) et la pression de gonflement (Ps)

La teneur en eau (WC) présente des corrélations négatives avec la pression de gonflement (Ps)(-0,25). Cela suggère qu'une augmentation de la teneur en eau est associée à une diminution du (Ps) (Figures 3.20).



**Figure 3.21** Corrélations entre la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et la pression de gonflement ( $P_s$ )

La matrice de corrélation présente aussi une corrélation positive significative entre la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et la pression de gonflement ( $P_s$ ) (0,50) (Figure 3.21).



**Figure 3.22** Corrélations entre la teneur en eau (Argiles) et la pression de gonflement ( $P_s$ )

La corrélation entre la teneur en argile et la pression de gonflement ( $P_s$ ) est positivement parfaite (0,25), ce qui indique une relation directe entre ces deux propriétés (Figure 3.22)

Il est essentiel de comprendre que les corrélations observées dans les données géotechniques ne prouvent pas qu'une propriété en cause une autre. Elles montrent seulement qu'il existe une relation linéaire entre ces propriétés. Par exemple, une forte corrélation entre la plasticité et la capacité de gonflement d'un sol ne signifie pas nécessairement que l'une cause l'autre. D'autres facteurs peuvent également influencer ces propriétés, tels que la composition chimique du sol, les conditions environnementales, et les interactions entre différents composants du sol. Ces influences ne sont pas toujours capturées par les simples corrélations. Pour développer des modèles de prévision précis et fiables, il est nécessaire de prendre en compte ces facteurs supplémentaires et de réaliser des analyses plus approfondies. Cela peut inclure des études expérimentales, des modèles théoriques, et l'intégration de données supplémentaires qui peuvent révéler des relations complexes et des interactions entre différentes propriétés du sol. En résumé, bien que les corrélations soient utiles pour identifier des associations potentielles, elles ne suffisent pas à elles seules pour établir des relations de cause à effet ou pour prédire avec précision le comportement des sols.

### **3.4. Analyse statistique des modèles de prévision du potentiel et de la pression de gonflement**

Dans la suite de ce chapitre, nous procéderons à l'ajustement de certains modèles de prévision du potentiel et de la pression de gonflement, en utilisant la base de données décrite dans les sections antérieures. L'objectif est de renforcer la robustesse et la précision de ces modèles. Pour ce faire, nous mènerons une analyse statistique approfondie afin d'évaluer les modèles sélectionnés. Cette évaluation reposera sur divers indicateurs statistiques, notamment les tests de Fisher ( $F$ -test) et de Student ( $t$ -test), garantissant ainsi une validation rigoureuse des modèles ajustés.

#### **3.4.1. Modèles de prévision de la pression de gonflement**

Dans cette section, nous allons présenter et évaluer plusieurs modèles de prévision de la pression de gonflement des sols argileux choisis pour cette étude. Les modèles sélectionnés incluent ceux de Nayak et al. (1971), de Komornik et David (1969) et de Sabtan (2005).

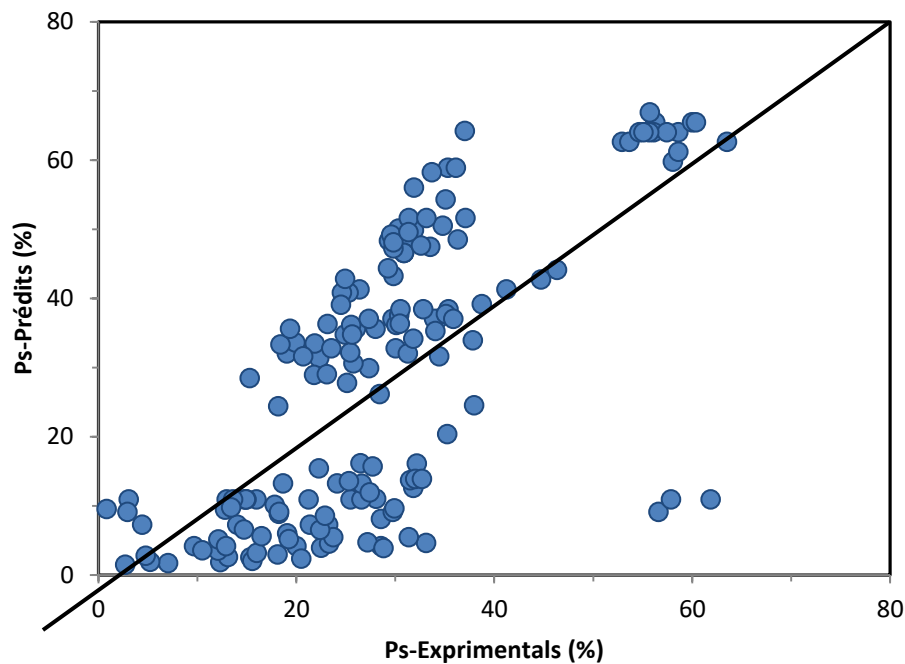
### 3.4.1.1. Modèle de Nayak et al (1971)

Nayak et al. (1971) ont développé un modèle pour prédire la pression de gonflement. Les variables d'entrée de ce modèle sont l'indice de plasticité (IP), la teneur en argile (CF) et la teneur en eau (WC). L'équation du modèle est présentée dans le tableau 3.2. Les constantes empiriques a, b, c et d ont été déterminées par ajustement du modèle aux données récapitulées dans le tableau 3.2. L'ajustement du modèle avec cette base de données a fourni un coefficient de détermination  $R^2 = 0,51$ , indiquant une précision acceptable du modèle.

**Tableau 3.2** Analyse statistique du modèle de Nayak et al (1971)

Equation	Paramètres du modèle	Résultats du <i>t</i> - test	Signif. Pram
$P_s = a \times IP^b \times \left(\frac{\text{Argile}}{WC}\right)^c + d$	a=20,672	Std. Err. = 22,22	Non
		<i>t</i> - value=0,93	
		P>  <i>t</i>  =0,354	
		[95% Conf, Interval] $_{64,54}^{-23,2}$	
	b=0,297	Std. Err. =0,139	Oui
		<i>t</i> - value=2,12	
		P>  <i>t</i>  =0,035	
		[95% Conf, Interval] $_{0,57}^{0,02}$	
	c=0,249	Std. Err. =0,124	Oui
		<i>t</i> - value=2,01	
		P>  <i>t</i>  =0,046	
		[95% Conf, Interval] $_{0,49}^{0,005}$	
	d=-45,81	Std. Err. =34,85	Non
		<i>t</i> - value= -1,31	
		P>  <i>t</i>  =0,191	
		[95% Conf, Interval] $_{22,9}^{-114,6}$	
$r^2$	F value	Pr	Signif. modèle
0.51	57.94	0.0000	Oui

Une analyse statistique du modèle à l'aide du test de Student (t-test) a révélé que deux constantes du modèle, à savoir « a » et « d », n'étaient pas significatives. Cela signifie que ces constantes ne sont pas indispensables pour l'équation de Nayak et al. (1971). En revanche, le test de Fisher (F-test) a montré que le modèle était globalement significatif. La figure 3.23 présente une comparaison entre les pressions de gonflement expérimentales et celles prédites par le modèle de Nayak et al. (1971).



**Figure 3.23-** Comparaison entre les valeurs expérimentales de la pression de gonflement et celles prédites par le modèle de Nayak et al. (1971)

#### 3.4.1.2. Modèle de Kormonik et David (1969)

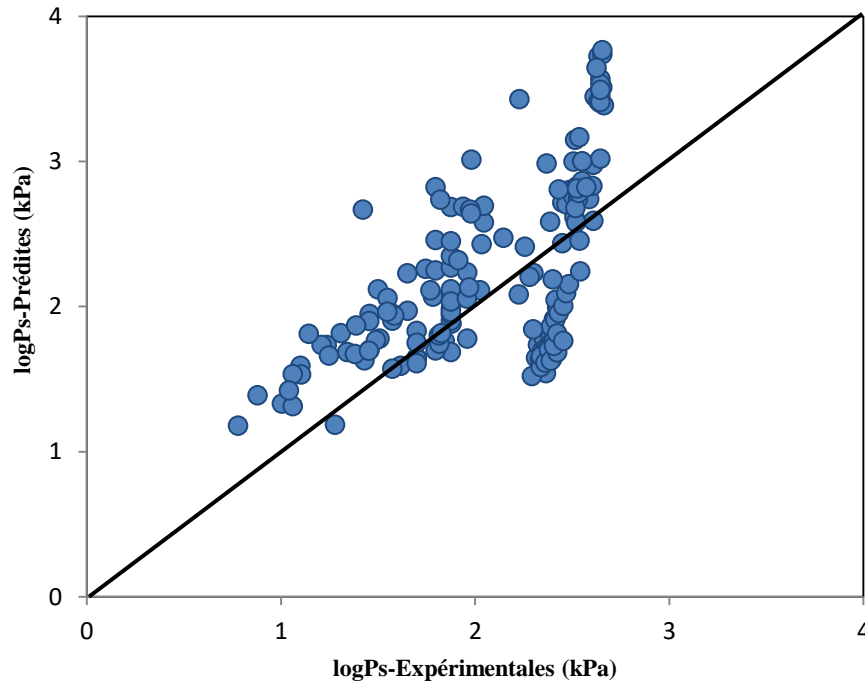
Kormonik et David (1969) ont mis au point un modèle logarithmique pour prédire la pression de gonflement. Ce modèle utilise comme variables d'entrée la limite de liquidité (LL), la densité sèche ( $\gamma_d$ ) et la teneur en eau (WC). L'équation du modèle est présentée dans le tableau 3.3. Les constantes empiriques a, b, c et d ont été déterminées par ajustement aux données figurant dans le tableau 3.3. Cet ajustement a donné un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,53, indiquant une précision acceptable du modèle.

Une analyse statistique du modèle, réalisée à l'aide du test de Student (t-test), a révélé que l'une des constantes du modèle, à savoir la constante « a », n'était pas significative. Cela

signifie que cette constante n'est pas indispensable pour l'équation de Kormonik et David (1969). En revanche, le test de Fisher (F-test) a montré que le modèle était globalement significatif. La figure 3.24 présente une comparaison entre les pressions de gonflement expérimentales et celles prédites par le modèle de Kormonik et David (1969).

**Tableau 3.3** Analyse statistique du modèle de Kormonik et David (1969)

Equation	Paramètres du modèle	Résultats du <i>t</i> - test	Signif. Pram
$\log Ps = a + b \times LL + c \times \gamma d + d \times WC$	a= 0,382	Std. Err. = 0,28	Non
		<i>t</i> - value=1,37	
		P>  <i>t</i>  =0,174	
		[95% Conf, Interval] <sub>0,93</sub> <sup>-0,17</sup>	
	b= 0,030	Std. Err. = 0,001	Oui
		<i>t</i> - value= 4,52	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sub>0,02</sub> <sup>0,01</sup>	
	c=0,066	Std. Err. =0,01	Oui
		<i>t</i> - value=4,52	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sub>0,10</sub> <sup>0,02</sup>	
	d=-0,011	Std. Err. =0,003	Oui
		<i>t</i> - value= -3,65	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sub>-0,01</sub> <sup>-0,02</sup>	
$r^2$	F value	Pr	Signif. modèle
0.53	62.77	0.0000	Oui



**Figure 3.24** Comparaison entre les valeurs expérimentales de la pression de gonflement et celles prédites par le modèle de Kormonik et David (1969)

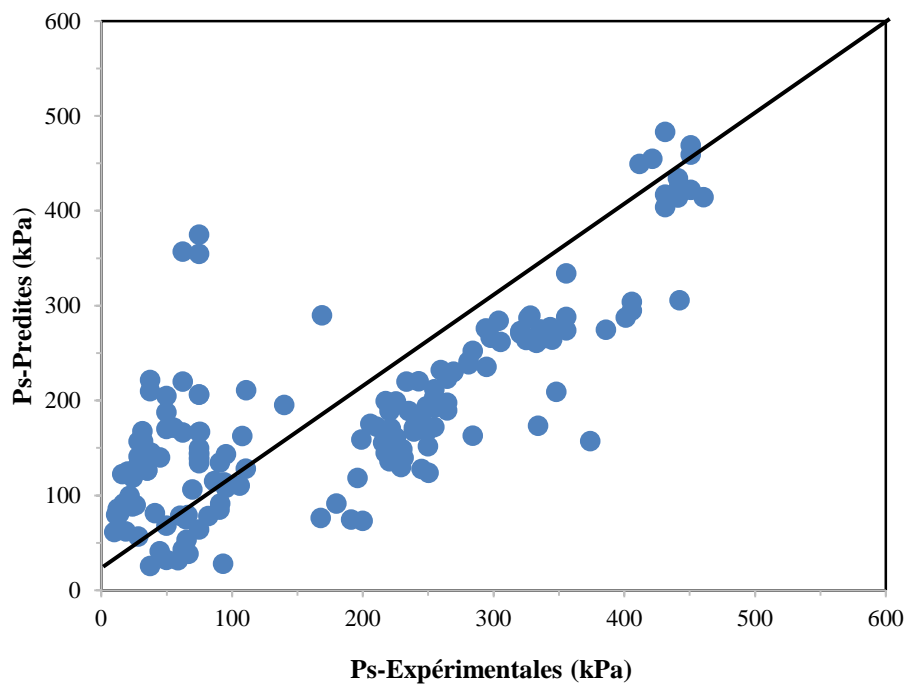
### 3.4.1.3. Modèle de Sabtan (2005)

En 2005, Sabtan a développé une équation empirique pour prédire la pression de gonflement, détaillée dans le tableau 3.4, qui intègre la teneur en argile, l'indice de plasticité et la teneur en eau. Les résultats ont montré que cette équation présente un coefficient de détermination ( $r^2$ ) de 0,63, surpassant ceux obtenus par Kormonik et David (1969) ainsi que par Nayak et al. (1971).

Une analyse statistique du modèle a été réalisée en utilisant le test de Student (t-test), révélant que toutes les constantes du modèle étaient significatives avec des valeurs de probabilité inférieures au seuil critique (0,05). Cela indique que chaque constante du modèle joue un rôle essentiel dans la prédiction de la pression de gonflement. De plus, le test de Fisher (F-test) a confirmé que le modèle dans son ensemble était statistiquement significatif. La comparaison entre les pressions de gonflement expérimentales et celles prédites par le modèle de Sabtan (2005) est illustrée dans la figure 3.25.

**Tableau 3.4** Analyse statistique du modèle de Sabtan (2005)

Equation	Paramètres du modèle	Résultats du t- test	Signif. Pram
$Ps = a + b \times CF + c \times IP + d \times WC$	a=92,358	Std. Err. = 19,35	Oui
		t- value=4,77	
		P> t =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>54,15</sup> <sub>130,56</sub>	
	b=0,297	Std. Err. = 0,48	Oui
		t- value= 2,17	
		P> t =0,031	
		[95% Conf, Interval] <sup>0,09</sup> <sub>1,99</sub>	
	c=5,841	Std. Err. =0,488	Oui
		t- value=11,97	
		P> t =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>4,88</sup> <sub>6,81</sub>	
	d=-8,641	Std. Err. =0,72	Oui
		t- value= -12,01	
		P> t =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>-10,06</sup> <sub>-7,22</sub>	
r <sup>2</sup>	F value	Pr	Signif. modèle
0.63	90.82	0.0000	Oui



**Figure 3.25** Comparaison entre les valeurs expérimentales de la pression de gonflement et celles prédites par le modèle de Sabtan (2005)

### 3.4.2. Modèles de prévision du potentiel de gonflement

Ci-dessous, nous allons examiner trois modèles sélectionnés pour évaluer le potentiel de gonflement des sols argileux dans cette étude : les modèles de Guiras-Skandji (1996), Kayabali et Yaldiz (2014), ainsi que Seed et al. (1962).

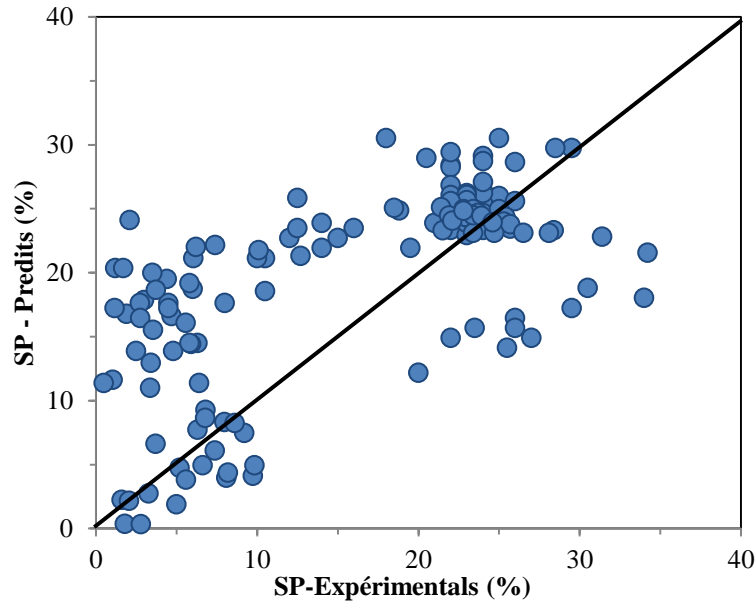
#### 3.4.2.1. Modèle de Guiras-Skandji (1996)

En 1996, Guiras-Skandji a avancé que le potentiel de gonflement peut être prédit à partir de la teneur en eau, proposant une relation linéaire détaillée dans le tableau 3.5. Cependant, l'ajustement de ce modèle aux données de cette étude a montré un coefficient de détermination relativement faible de 0.31. Cela indique que l'utilisation seule de la teneur en eau comme indicateur est insuffisante pour estimer le potentiel de gonflement.

**Tableau 3.5** Analyse statistique du modèle de Guiras-Skandji (1996)

Equation	Paramètres du modèle	Résultats du <i>t</i> - test	Signif. Pram
$SP = a + b \times WC$	a= 33,651	Std. Err. = 1,895	Oui
		<i>t</i> - value=17,76	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>29,91</sup> <sub>37,39</sub>	
	b= -0,781	Std. Err. = 0,088	Oui
		<i>t</i> - value= -8,79	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>-0,96</sup> <sub>-0,61</sub>	
$r^2$	F value	Pr	Signif. modèle
0.31	75.93	0.0000	Oui

Une analyse statistique du modèle a été réalisée en utilisant le test de Student (*t*-test), révélant que toutes les constantes du modèle étaient significatives avec des valeurs de probabilité inférieures au seuil critique (0,05). Cela indique que chaque constante du modèle joue un rôle essentiel dans la prédiction de la pression de gonflement. De plus, le test de Fisher (*F*-test) a confirmé que le modèle dans son ensemble était statistiquement significatif. La comparaison entre les pressions de gonflement expérimentales et celles prédites par le modèle de Guiras-Skandji (1996) est illustrée dans la figure 3.26.



**Figure 3.26** Comparaison entre les valeurs expérimentales du potentiel de gonflement et celles prédites par le modèle de Guiras-Skandji (1996)

**3.4.2.2. Modèle de Seed et al. (1962)**

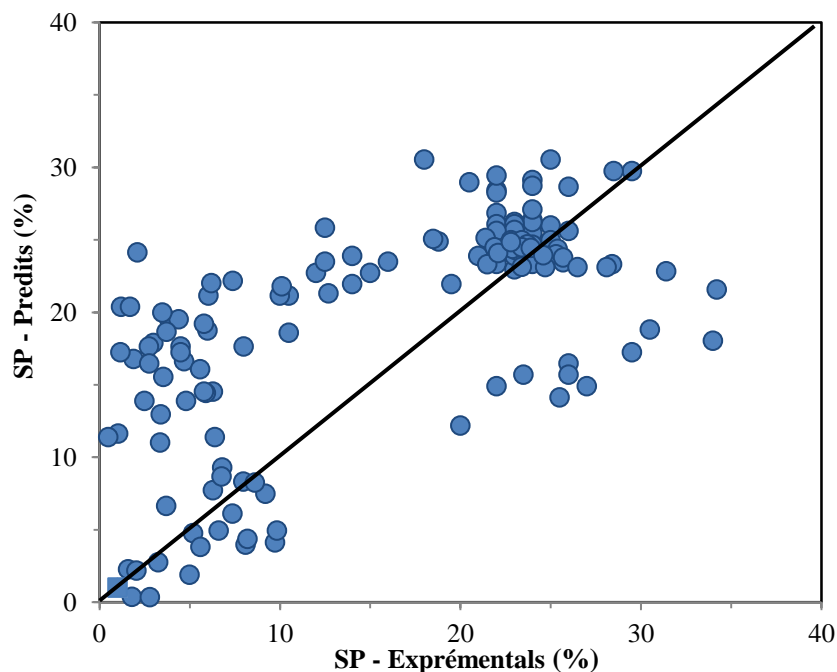
Seed et al. (1962) ont proposé une équation empirique pour estimer le potentiel de gonflement des sols, qui est l'un des modèles les plus connus et utilisés par la communauté scientifique (Tableau 3.6).

**Tableau 3.6** Analyse statistique du modèle de Seed et al. (1962)

Equation	Paramètres du modèle	Résultats du <i>t</i> - test	Signif. Pram
$SP = a \times (Ac)^b \times (CF)^c$	a=1,214	Std. Err. = 0,614	Oui
		<i>t</i> - value=1,97	
		P>  <i>t</i>  =0,050	
		[95% Conf, Interval] <sup>0,003</sup> <sub>2,43</sub>	
	b=1,263	Std. Err. = 0,160	Oui
		<i>t</i> - value= 7,87	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>0,95</sup> <sub>1,58</sub>	
	c=0,754	Std. Err. =0,13	Oui
		<i>t</i> - value=5,64	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] <sup>0,49</sup> <sub>1,02</sub>	
$r^2$	F value	Pr	Signif. modèle
0.50	56.0	0.0000	Oui

Ce modèle permet d'estimer le potentiel de gonflement en utilisant deux paramètres clés : l'activité corrigée des sols ( $A_c = IP/CF$ ) et la fraction argileuse des sols fins ( $CF$ ). Lorsqu'on ajuste cette équation à notre base de données géotechniques, on obtient un coefficient de détermination de 0,50, le plus élevé parmi les modèles testés. Cela signifie que 50 % de la variabilité du potentiel de gonflement des sols dans notre base de données peut être expliquée par ce modèle. Cela suggère une certaine efficacité et pertinence pour prédire le gonflement des sols en se basant sur l'activité corrigée et la fraction argileuse. Cette corrélation indique que le modèle de Seed et al. est relativement robuste pour les analyses de gonflement des sols (Tableau 3.6).

Une étude statistique du modèle a été réalisée en utilisant le test de Student (t-test), révélant que toutes les constantes du modèle étaient significatives avec des valeurs de probabilité inférieures au seuil critique de 0,05. Cela indique que chaque constante du modèle joue un rôle essentiel dans la prédiction de la pression de gonflement. De plus, le test de Fisher (F-test) a confirmé que le modèle dans son ensemble était statistiquement significatif. La comparaison entre les pressions de gonflement expérimentales et celles prédites par le modèle de Seed et al. (1962) est illustrée dans la figure 3.27.



**Figure 3.27** Comparaison entre les valeurs expérimentales du potentiel de gonflement et celles prédites par le modèle de Seed et al. (1962)

### 3.4.2.3. Modèle de Kayabali et Yaldiz (2014)

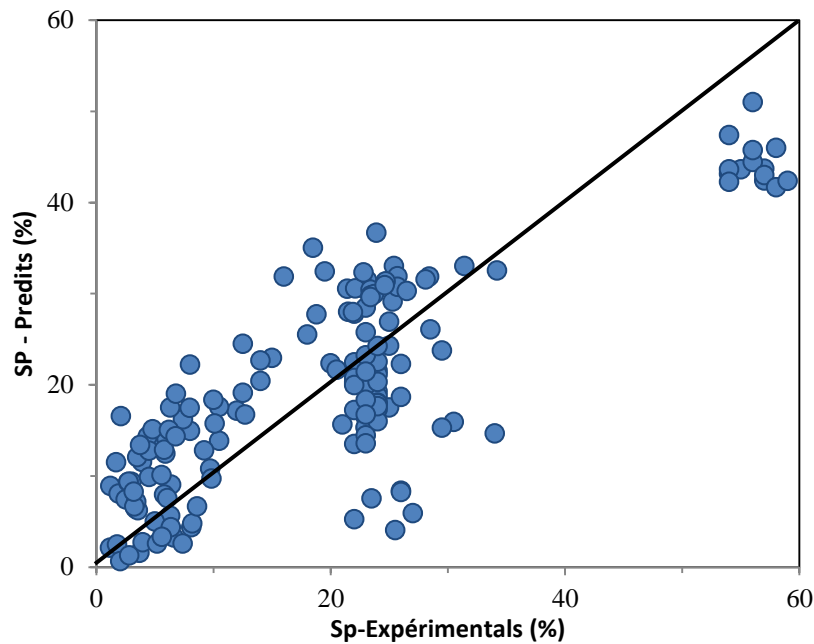
Kayabali et Yaldiz (2014) ont proposé une équation empirique pour estimer le potentiel de gonflement des sols en utilisant des variables géotechniques telles que la teneur en eau, la densité sèche, la limite de liquidité et la limite de plasticité (Tableau 3.7).

**Tableau 3.7** Analyse statistique du modèle de Kayabali et Yaldiz (2014)

Equation	Paramètres du modèle	Résultats du <i>t</i> - test	Signif. Pram
$SP = a \times WC + b \times \gamma d + c \times LL + d \times LP + e$	a=-1,029	Std. Err = 0,08	Oui
		<i>t</i> - value= -17,27	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] $_{0,86}^{-1,19}$	
	b=0,028	Std. Err. = 0,37	Non
		<i>t</i> - value= 0,08	
		P>  <i>t</i>  =0,94	
		[95% Conf, Interval] $_{0,76}^{-0,70}$	
	c=0,578	Std. Err. =0,057	Oui
		<i>t</i> - value=10,04	
		P>  <i>t</i>  =0,000	
		[95% Conf, Interval] $_{0,69}^{0,46}$	
	d=-0,495	Std. Err. =0,17	Oui
		<i>t</i> - value= -3,00	
		P>  <i>t</i>  =0,003	
		[95% Conf, Interval] $_{-0,17}^{-0,82}$	
	e= 14,159	Std. Err. = 7,34	Non
		<i>t</i> - value= -1,93	
		P>  <i>t</i>  =0,055	
		[95% Conf, Interval] $_{28,64}^{-0,33}$	
$r^2$	F value	Pr	Signif. modèle
0.69	92.37	0.0000	Oui

Cette équation comprend cinq constantes empiriques, ajustées pour optimiser la précision des prédictions. Lors de l'ajustement de cette équation sur la base de données du présent travail, le coefficient de détermination obtenu est de 0,69.

Cela signifie que l'équation proposée par Kayabali et Yaldiz explique 69 % de la variance observée du potentiel de gonflement, ce qui est considérable (Tableau 3.7).



**Figure 3.28** Comparaison entre les valeurs expérimentales du potentiel de gonflement et celles prédites par le modèle de Kayabali et Yaldiz (2014)

Un coefficient de détermination de 0,69 indique que le modèle a une capacité prédictive acceptable et que les variables utilisées dans l'équation sont effectivement pertinentes et influentes pour estimer le potentiel de gonflement des sols argileux. Ce niveau de corrélation est significatif dans le contexte des modèles empiriques, où de nombreuses interactions complexes entre les variables peuvent rendre difficile l'obtention de corrélations élevées. L'analyse statistique effectuée sur le modèle à l'aide du test de Student (t-test) a révélé que deux constantes du modèle, « b » et « e », n'étaient pas significatives. Cela indique que ces constantes ne sont pas essentielles pour l'équation de Kayabali et Yaldiz (2014). En revanche, le test de Fisher (F-test) a démontré que le modèle était globalement significatif. La figure 3.27 montre une comparaison entre les pressions de gonflement expérimentales et celles prédites par le modèle de Kayabali et Yaldiz (2014).

Cette étude à montrer que les approches prédictives empiriques pour la prévision du potentiel et de la pression de gonflement des sols argileux présentent plusieurs limitations. D'abord, elles reposent souvent sur des corrélations établies à partir de bases de données spécifiques et peuvent donc manquer de généralité lorsque appliquées à des conditions géotechniques variées. Les propriétés des sols argileux, telles que la minéralogie, la plasticité et la teneur en

eau, varie considérablement d'un site à l'autre, rendant difficile l'extrapolation des résultats empiriques. De plus, ces méthodes ne prennent pas toujours en compte les interactions complexes entre les variables environnementales et les caractéristiques mécaniques du sol, ce qui peut conduire à des prédictions inexactes. Enfin, les approches empiriques ne capturent pas toujours les phénomènes transitoires et dynamiques, tels que les cycles de séchage et de mouillage, qui influencent fortement le comportement de gonflement des sols argileux. En conséquence, les ingénieurs et géotechniciens doivent souvent compléter ces approches avec des analyses plus sophistiquées et des investigations in situ pour obtenir des prévisions fiables et adaptées aux conditions spécifiques de chaque projet.

### 3.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée une base de données géotechnique exhaustive, contenant des informations essentielles sur diverses propriétés des sols, telles que la plasticité, le compactage, la granulométrie, ainsi que le potentiel et la pression de gonflement. L'utilisation de cette base de données a permis l'ajustement et l'évaluation statistique de six modèles de prévision du potentiel et de la pression de gonflement (trois pour chaque type). L'évaluation, basée sur des indicateurs statistiques tels que le coefficient de détermination, le t-test et le F-test, a révélé que les modèles intégrant plusieurs propriétés en tant que variables d'entrée fournissent des indicateurs statistiques supérieurs à ceux utilisant une ou deux propriétés seulement. De plus, plusieurs chercheurs ont souligné l'importance de la teneur en eau comme indicateur clé. Cependant, l'évaluation a également mis en lumière les limitations des approches empiriques en termes d'indicateurs statistiques. Ces limitations peuvent être surmontées en proposant des approches basées sur l'intelligence artificielle, ce qui constitue l'objectif du prochain chapitre.

# Chapitre 4

---

**Apprentissage automatique pour la  
prévision du gonflement des sols  
argileux**

## 4.1. Introduction

Ce chapitre aborde l'application de l'intelligence artificielle (IA), en mettant particulièrement l'accent sur la machine Learning (ML), pour la prédiction du potentiel et la pression de gonflement des sols argileux. L'IA est un domaine en pleine expansion, intégrant des techniques sophistiquées pour analyser et interpréter des données complexes. Parmi ces techniques, Le processus de régression gaussienne (GPR) se distingue par sa capacité à fournir des prédictions fiables, même avec des ensembles de données limités. La GPR utilise une approche probabiliste pour modéliser la relation entre les variables d'entrée et les résultats mais aussi l'incertitude associée à ces prédictions. Ce chapitre se concentre particulièrement sur l'utilisation du GPR pour estimer le potentiel de gonflement des sols, un défi crucial en ingénierie géotechnique. En explorant cette méthode, nous visons à démontrer comment le GPR peut améliorer la précision et l'efficacité des prévisions, offrant ainsi des outils précieux pour les chercheurs et les praticiens dans ce domaine.

## 4.2. L'intelligence artificielle en géotechnique

Le vaste domaine de l'informatique, connu sous le nom d'intelligence artificielle (IA), se concentre sur la création de machines capables d'exécuter des tâches habituellement réalisées par les humains. Comme illustré dans la Figure 4.1, diverses approches informatiques sont utilisées pour classifier l'intelligence artificielle.

Ces techniques informatiques ont été appliquées à l'évaluation des propriétés des sols et des roches, la classification et le profilage des sols, la stabilité des pentes, le compactage de la surface du sol, l'interaction sol-eau, le comportement et la modélisation du sol, les structures d'étalement et de soutènement, les tunnels, la dynamique des sols et des roches, ainsi que les fondations peu profondes et profondes.

## 4.3. Approches informatiques de l'intelligence artificielle

Les approches de calculs souples en intelligence artificielle (IA) englobent diverses méthodes qui imitent les processus de pensée et d'apprentissage humains pour résoudre des problèmes complexes. Les méthodes d'IA se réfèrent aux techniques générales utilisées pour créer des systèmes intelligents capables de simuler des tâches humaines telles que la reconnaissance vocale, la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel, etc. Ces méthodes peuvent inclure des algorithmes heuristiques, la recherche, la logique, la planification, et la prise de décision. Les techniques informatiques douces sont celles qui produisent des résultats très

proches des valeurs réelles. Une branche de l'informatique et de l'intelligence artificielle, appelée "apprentissage automatique", utilise des données et des algorithmes pour simuler la manière dont les êtres vivants apprennent, tout en améliorant progressivement leur précision. Les trois principales caractéristiques de l'apprentissage automatique sont la tâche, l'expérience et les performances. La tâche représente l'objectif que l'apprentissage automatique vise à accomplir. Au cours de son apprentissage, la machine accumule de l'expérience. Ses performances sont évaluées en comparant les résultats réels avec ceux fournis par l'analyse. Il existe différentes techniques d'apprentissage automatique, notamment l'apprentissage bio-inspiré, l'apprentissage hybride, l'apprentissage profond et l'apprentissage automatique.

#### **4.3.1. Apprentissage Bio-inspiré (BL)**

L'apprentissage bio-inspiré (Bio-inspired Learning) utilise des principes et des mécanismes empruntés à la nature pour concevoir des algorithmes d'IA. Des exemples incluent les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaims de particules, et les systèmes immunitaires artificiels. Ces méthodes s'inspirent des processus biologiques pour trouver des solutions optimales ou quasi-optimales à des problèmes complexes

#### **4.3.2. Apprentissage Hybride (HL)**

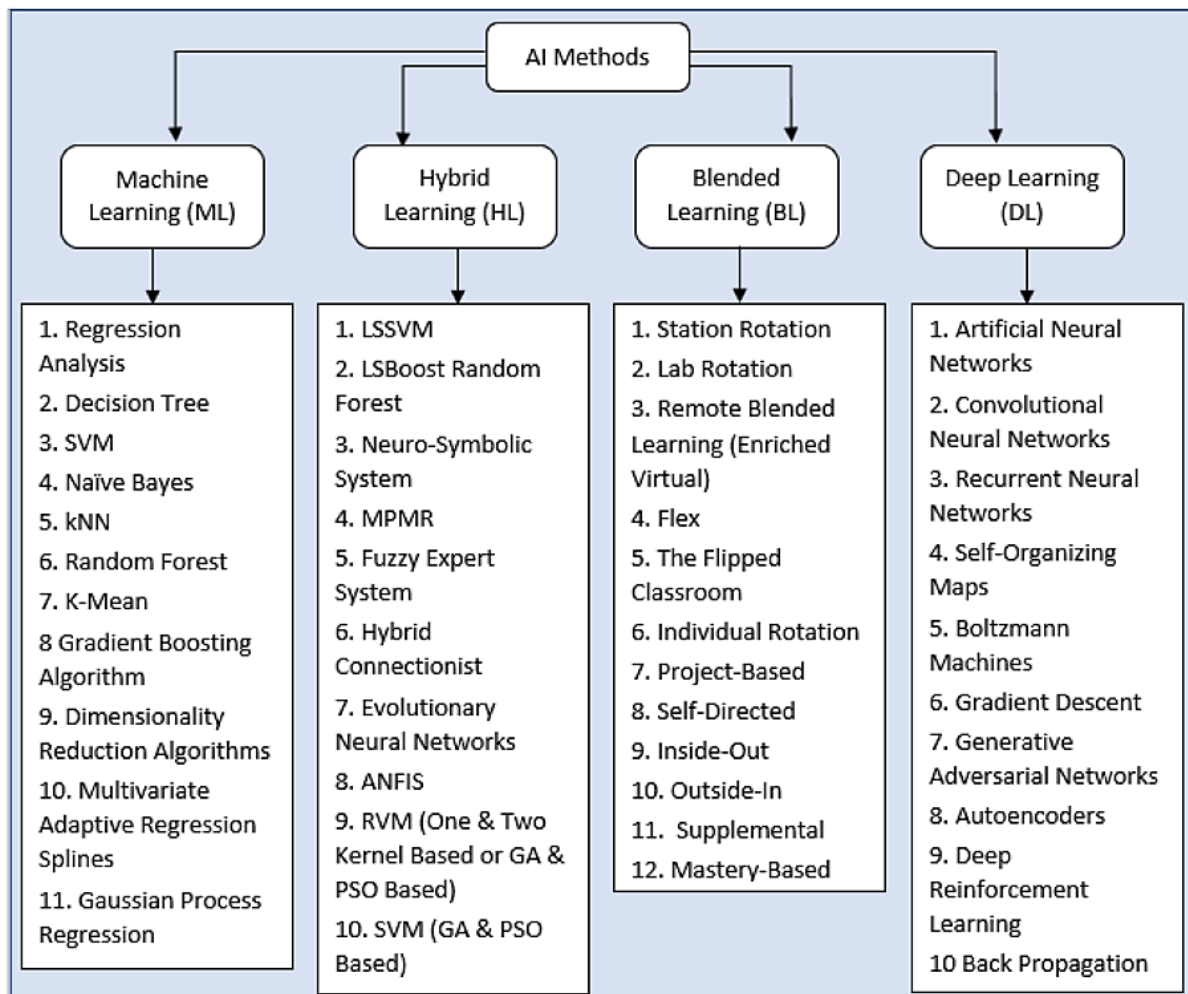
Dans l'apprentissage hybride (Hybrid Learning), plusieurs algorithmes collaborent pour se renforcer et se compléter mutuellement. Les principes de base de l'apprentissage hybride comprennent la structure, la collaboration pédagogique flexible, l'auto-apprentissage, la rétroaction bidirectionnelle et l'autonomie. Dans le système éducatif, l'apprentissage hybride est une stratégie d'enseignement où les enseignants maintiennent le même niveau d'instruction pour les apprenants en présentiel et en ligne (Bostrom et al 2014).

L'apprentissage hybride (ou apprentissage mixte) implique l'intégration de différentes approches ou techniques d'apprentissage automatique pour améliorer les performances globales du système. Ces techniques peuvent inclure des méthodes symboliques comme les systèmes experts flous, des techniques basées sur les statistiques comme les LSSVM, ainsi que des modèles d'inspiration biologique comme les ANFIS.

Le système expert flou (Fuzzy Expert system) est une méthode de l'IA qui utilise des règles linguistiques et des valeurs floues pour modéliser des situations complexes, idéale pour des données vagues ou imprécises.

LSSVM, ou « Least Squares Support Vector Machines », est une technique d'apprentissage automatique qui combine les principes des machines à vecteurs de support (SVM) avec une approche de moindres carrés pour la régression.

ANFIS, ou Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, est un modèle d'apprentissage hybride qui combine les avantages des réseaux de neurones artificiels (ANN) et des systèmes experts flous (FIS).



**Figure 4.1** Approches de l'intelligence artificielle utilisant les techniques d'informatique souple (Khatti et Grover 2023).

### 4.3.3. Apprentissage Profond (DL)

L'apprentissage profond (Deep Learning) est un sous-ensemble de l'intelligence artificielle. L'apprentissage profond est une branche de l'apprentissage automatique qui construit des modèles de réseaux neuronaux substantiels pour résoudre des problèmes complexes. L'apprentissage profond est largement utilisé dans des industries telles que Google, Microsoft, les télécommunications, la médecine et les véhicules automatisés (Kelleher 2019). Les réseaux de neurones artificiels (ANN), les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et les réseaux de neurones récurrents (RNN) sont tous des sous-domaines de l'apprentissage profond (DL), également connu sous le nom d'apprentissage profond ou d'apprentissage de représentations.

Artificial Neural Network (ANN) ou réseau de neurones artificiel est une technique de l'apprentissage profond (Deep Learning) inspirée par la structure et le fonctionnement du cerveau humain. Les Convolutional Neural Networks (CNN) ou réseaux de neurones convolutifs sont une branche spécifique du Deep Learning particulièrement efficace pour les tâches de traitement d'images et de reconnaissance visuelle. Les Recurrent Neural Networks (RNN) ou réseaux de neurones récurrents sont une branche spécifique du Deep Learning, particulièrement efficace pour le traitement des données séquentielles, telles que le texte, la parole et les séries temporelles.

### 4.3.4. Apprentissage Automatique (ML)

Machine Learning une branche de l'informatique et de l'intelligence artificielle appelée "apprentissage automatique" utilise des données et des algorithmes pour simuler comment les êtres vivants apprennent tout en améliorant progressivement leur précision. Les trois premières caractéristiques de l'apprentissage automatique sont : la tâche, l'expérience et la performance. La tâche est un objectif que l'apprentissage automatique est capable d'accomplir. Dans le processus d'apprentissage, la machine acquiert de l'expérience. La performance est basée à la fois sur les résultats réels et sur les conclusions tirées de l'analyse. Le type de défi détermine la performance de l'apprentissage automatique (Samui 2008). Les techniques d'apprentissage automatique telles que SVM, GPR, MRA, DT, et RF sont souvent désignées comme des méthodes conventionnelles.

Le Support Vector Machine (SVM) est une technique d'apprentissage supervisé en Machine Learning (ML) principalement utilisée pour les tâches de classification, bien qu'il puisse également être adapté pour la régression.

MRA (Multiple Regression Analysis), ou analyse de régression multiple, est une technique d'apprentissage supervisé en machine learning utilisée pour modéliser la relation entre une variable dépendante (ou variable cible) et plusieurs variables indépendantes (ou variables prédictives). Cette technique est une extension de la régression linéaire simple qui implique une seule variable indépendante.

Les DecisionTrees (DT), ou arbres de décision, sont une technique d'apprentissage supervisé en machine learning utilisée pour les tâches de classification et de régression.

Random Forest (RF), ou forêt d'arbres décisionnels aléatoires, est une technique d'apprentissage supervisé en machine learning utilisée pour les tâches de classification et de régression.

La régression par processus gaussien (GPR pour Gaussian Process Regression) est une technique de régression non paramétrique utilisée en apprentissage automatique et en statistiques. C'est une généralisation de la distribution normale (ou gaussienne) à des fonctions. En termes simples, au lieu de considérer des variables aléatoires scalaires ou vectorielles, un processus gaussien traite des fonctions aléatoires. Chaque point de la fonction suit une distribution normale, et toute combinaison finie de ces points suit une distribution normale multivariée. Le bénéfice du GPR est qu'il excelle dans la réalisation de prédictions précises sur de petits ensembles de données. Selon Khatti et Grover (2002), le processus gaussien est basé sur la fonction de covariance, qui inclut les covariances linéaires, exponentielles au carré, exponentielles, Matern, périodiques et quadratiques rationnelles (Khatti et Grover 2022).

#### 4.4. Modèle Régression par processus gaussien

Un modèle de processus gaussien est une collection de variables aléatoires, dont n'importe quel nombre fini possède une distribution conjointe gaussienne. Un processus gaussien,  $t(x)$ , est caractérisé par deux fonctions distinctes : la fonction de moyenne (l'équation.4.1) et la fonction de covariance (l'équation 4.2) (Momeni 2020) :

$$m(x) = E(t(x)) \quad (4.1)$$

$$Cov(t(x), t(x')) = k(x, x'; \theta) \quad (4.2)$$

Où  $\theta$  indique les hyperparamètres du modèle qui doivent être ajustés. Un processus gaussien  $t(x)$  est donc défini dans l'équation (4.3) comme suit (Momeni 2020):

$$t(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (4.3)$$

$t(x)$  Suit une loi gaussienne caractérisée par une moyenne  $m(x)$  et une covariance  $k(x, x')$ .

L'objectif principal d'un problème de régression est d'étudier comment une variable cible dépend de certaines variables prédictives  $x_i$ . Chaque valeur de la variable cible  $y$  peut être reliée à une fonction de régression sous-jacente  $t(x)$ , avec un bruit gaussien additif indépendant et identiquement distribué  $\varepsilon$ , qui représente le phénomène de bruit dans les données. Cette relation est formulée dans l'équation (4.4) (Momeni 2020) :

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i \quad (4.4)$$

Le bruit gaussien  $\varepsilon$ , ayant une moyenne nulle et une variance  $\sigma_n^2$ , est introduit. Le processus gaussien décrit dans l'équation (4.3) se développe ensuite vers l'équation (5) (Li 2014) ,

$$t(x) \sim GP(m(x), k(x, x') + \sigma_n^2 I) \quad (4.5)$$

Où  $I$  représente la matrice identité. En raison de la propriété de marginalisation des processus gaussiens et de l'additivité du bruit  $\varepsilon$ , la distribution conjointe des cibles d'entraînement  $y$  aux positions  $X$  et des prédictions de test  $f_*$  aux instances de test  $X_*$  est explicitée dans l'équation (4.6) (Li 2014).

$$\begin{bmatrix} y \\ f_* \end{bmatrix} \sim N \left( \begin{bmatrix} m(X) \\ m(X_*) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} k(X, X + \sigma_n^2 I) & k(X, X_*) \\ k(X_*, X) & k(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) \quad (4.6)$$

L'équation (4.7) décrit la distribution prédictive, en supposant une distribution gaussienne jointe basée sur  $X$ ,  $y$  et  $X_*$

$$p(y_* | X, y, X_*) \sim N(\bar{y}_*, var(y_*)) \quad (4.7)$$

$\bar{y}_*$  Représente la moyenne de la prédiction et  $var(y_*)$  représente sa variance (Momeni 2020).

L'organigramme de la figure 4.2 illustre le développement du modèle de Régression de Processus Gaussiens (GPR). Le processus commence avec le jeu de données principal, suivi de la normalisation des données dans une plage de 0 à 1 pour garantir une contribution égale de toutes les variables au modèle. Les données normalisées sont ensuite divisées en deux sous-ensembles : 80 % pour l'entraînement et 20 % pour les tests, permettant ainsi une validation fiable du modèle.



garantir que le modèle est évalué de manière fiable et qu'il peut généraliser ses prédictions à de nouvelles données (Zhang et al 2023). Taille des ensembles de données, bien que le nombre total d'échantillons (161) soit relativement petit, cela peut être suffisant pour certains types de modèles et de problèmes, surtout si les données sont de haute qualité et bien représentatives du problème étudié. Cependant, pour des modèles plus complexes ou des tâches nécessitant une grande variété de données, cette taille pourrait être une limitation. Avec un nombre total d'échantillons de 161, il pourrait être bénéfique d'envisager des techniques comme la validation croisée pour mieux estimer la performance du modèle. Cela impliquerait de diviser les données en plusieurs sous-ensembles et de former et tester le modèle plusieurs fois pour obtenir une évaluation plus robuste.

Le tableau (4.2) présente des statistiques descriptives pour six variables mesurées sur un ensemble de 161 échantillons. La répartition des valeurs pour chaque variable montre une diversité importante dans les échantillons, ce qui est typique dans les études géotechniques ou des sols.

**Tableau 4.1** Statistiques descriptives pour les variables d'entrées

	IP (%)	Wc (%)	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Argiles (%)	SP (%)	Ps (kN/m <sup>2</sup> )
Nombre	161,00	161,00	161,00	161,00	161,00	161,00
Moyenne	37,27	18,39	16,18	38,61	20,03	197,43
Écart type	15,99	10,90	2,33	17,57	14,83	139,14
Minimum	12,00	4,00	10,69	7,00	0,50	6,00
1er quartile	24,00	11,50	14,12	25,40	6,78	65,50
Médiane	35,00	13,20	17,80	36,00	22,00	217,70
3ème quartile	48,00	23,20	18,04	48,90	24,60	304,00
Maximum	91,00	47,42	19,27	81,00	62,00	460,91

Les grandes plages de valeurs et les écarts types élevés pour certaines variables, comme la teneur en eau (WC) et le pourcentage d'argile (Argiles), indiquent une grande variabilité des conditions des échantillons analysés. Les quartiles montrent que les distributions ne sont pas nécessairement symétriques, suggérant la possibilité de valeurs aberrantes ou de distributions asymétriques.

Ces statistiques descriptives fournissent une bonne vue d'ensemble des propriétés des échantillons et de leur variabilité, essentielle pour comprendre et modéliser le comportement des sols ou des matériaux étudiés.

#### 4.5.2 Évaluation de la Précision des Prédictions

Pour comparer le taux d'erreur entre les valeurs réelles et les valeurs prédites. Les méthodes sont le coefficient de détermination ( $R^2$ ), Erreur quadratique moyenne racine (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE). Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) représente la corrélation entre deux éléments  $R^2$  de 1 indique que le modèle a une grande précision d'ajustement. De même, des valeurs faibles de RMSE et MAE indiquent un faible taux d'erreur dans les prédictions du modèle. Pour évaluer la performance globale de prédiction des modèles,

Le RMSE représente la dispersion des erreurs par un modèle de prédiction, c'est-à-dire la précision des prédictions du modèle ; Le MAE est la différence moyenne absolue entre la prédiction et la valeur réelle ; par conséquent, l'unité de MAE est la même que celle de la mesure ; L'erreur quadratique moyenne (MSE) représente la moyenne des carrés des erreurs, c'est-à-dire la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle. Elle mesure la dispersion des erreurs et est utilisée pour évaluer la précision des prédictions d'un modèle. Les équations des métriques sont présentées dans le chapitre 2.

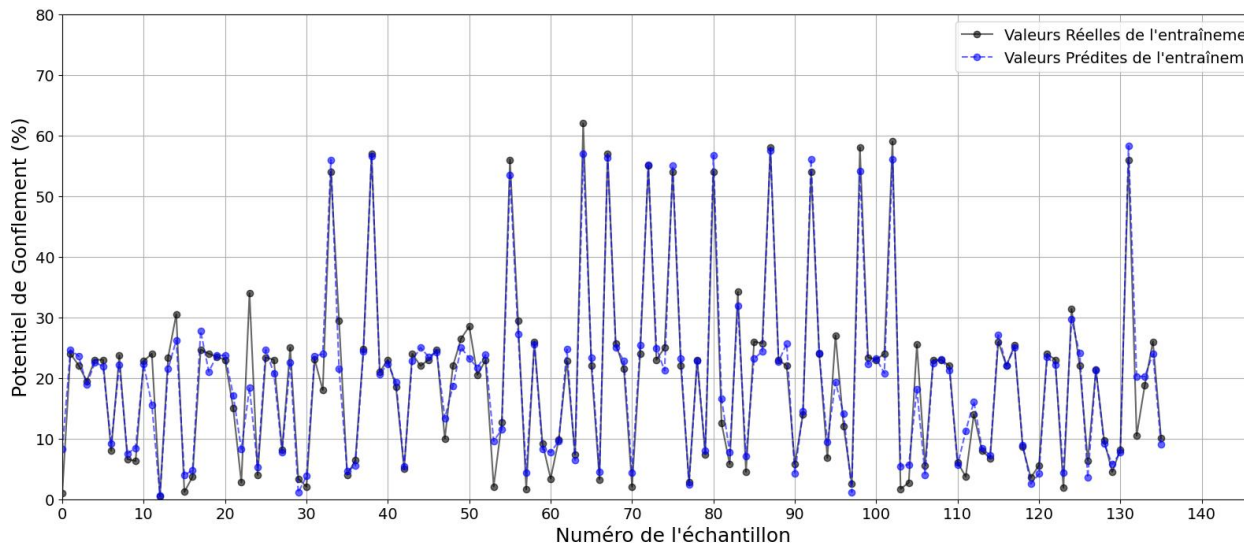
**Tableau 4.2** Métriques de performance pour le potentiel et la pression de gonflement

Métrique	Pression de gonflement (Ps)	Potentiel de gonflement (SP)
Erreur absolue moyenne (MAE)	2,27	32,25
Erreur quadratique moyenne (MSE)	8,07	1540,49
Erreur quadratique moyenne racine (RMSE)	2,84	39,25
Coefficient de détermination ( $R^2$ ) sur l'ensemble de test	0,96	0,92

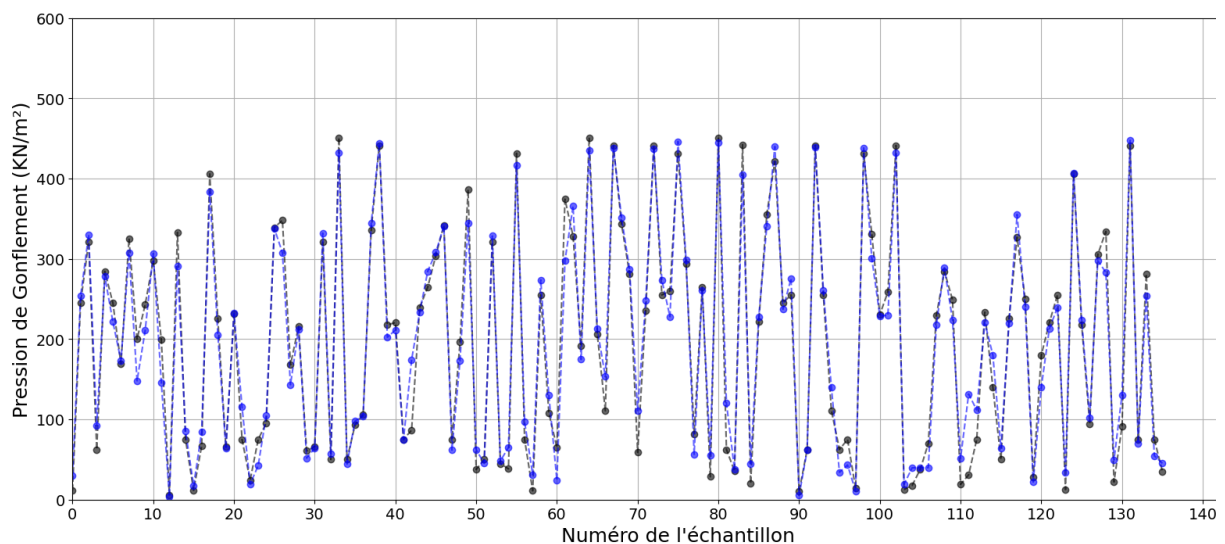
#### 4.5.3. Amélioration de la Prédiction du Potentiel et de la Pression de Gonflement des Sols

L'utilisation de modèles prédictifs pour estimer le potentiel et la pression de gonflement des sols a révélé l'efficacité de la régression par processus gaussien (GPR). Cette méthode se distingue par sa capacité à prédire ces deux variables simultanément à l'aide d'un seul modèle mathématique. En intégrant des informations telles que l'indice de plasticité, la teneur en eau,

la densité sèche et la teneur en argile en tant que variables d'entrée, le modèle GPR peut générer des prédictions précises pour le potentiel et la pression de gonflement. Cette approche permet une compréhension plus complète du comportement des sols en présence de variations dans ces paramètres.



**Figure 4.3** Comparaison entre le potentiel de gonflement réel et prédit : données de d'entraînement

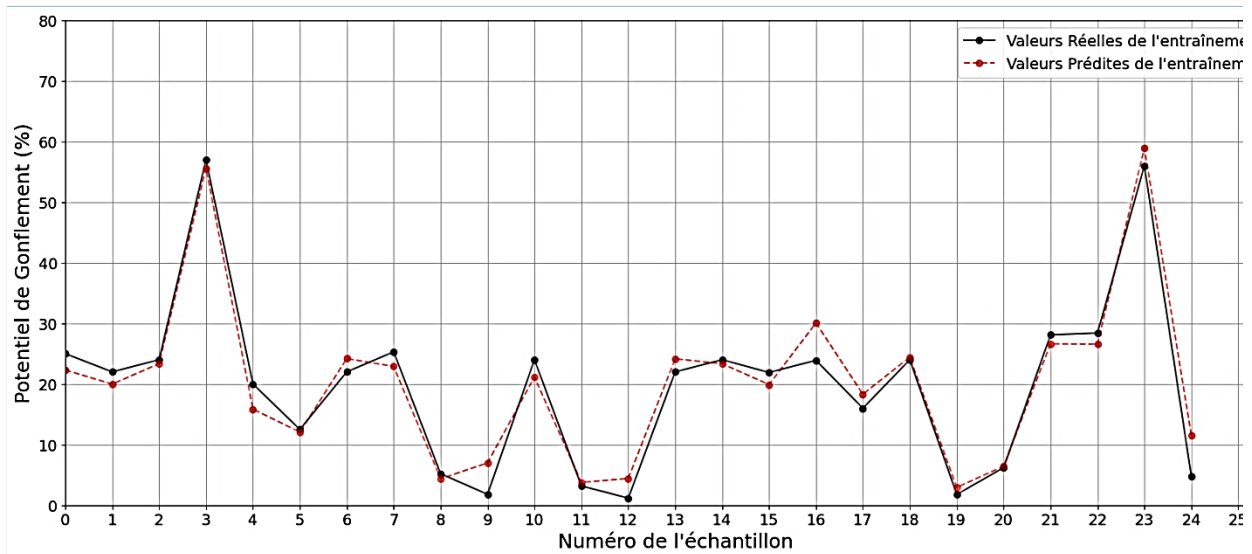


**Figure 4.4** Comparaison entre la pression de gonflement réel et prédit : Données de d'entraînement

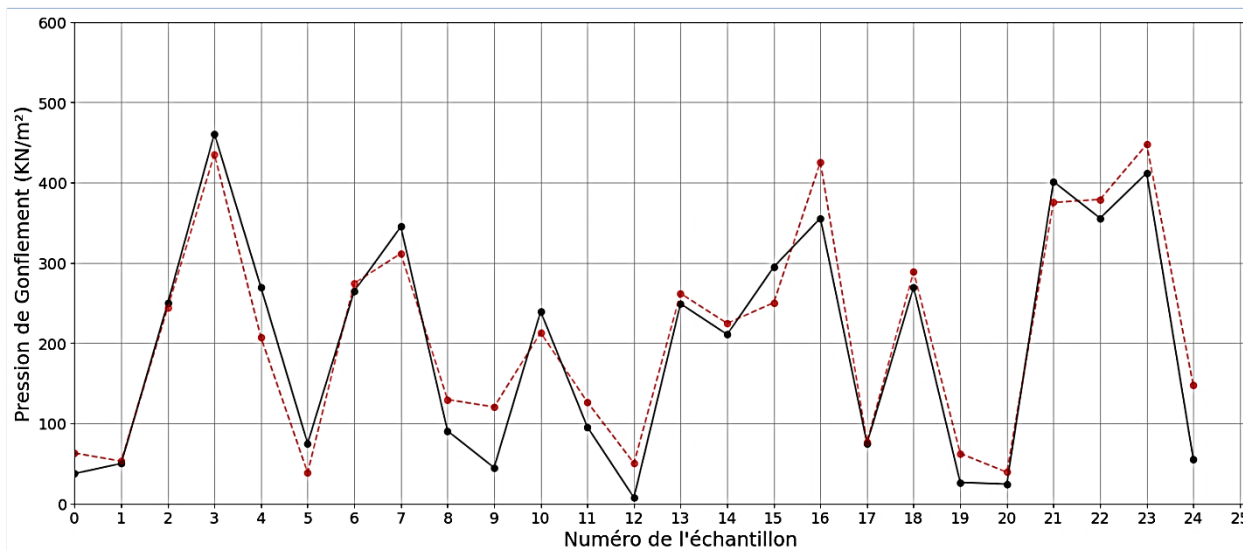
Les graphiques de comparaison des valeurs réelles et prédites pour l'ensemble d'entraînement illustrent efficacement la performance du modèle de régression, suggérant que les prédictions sont proches des valeurs réelles (Figure 4.3 à 4.6).

Cette proximité indique que le modèle a une bonne capacité d'ajustement sur les données d'entraînement, ce qui est confirmé par des coefficients de détermination ( $R^2$ ) élevés. Cependant, il existe des écarts où les valeurs prédites dévient de manière significative des valeurs réelles, ce qui indique que le modèle présente des erreurs de prédiction.

Les figures (4.3), (4.4) et (4.5), (4.6) montrent clairement la robustesse du modèle GPR dans la prédiction des valeurs de potentiel et de pression de gonflement respectivement.



**Figure 4.5** Comparaison entre le potentiel de gonflement réel et prédit : Données de test

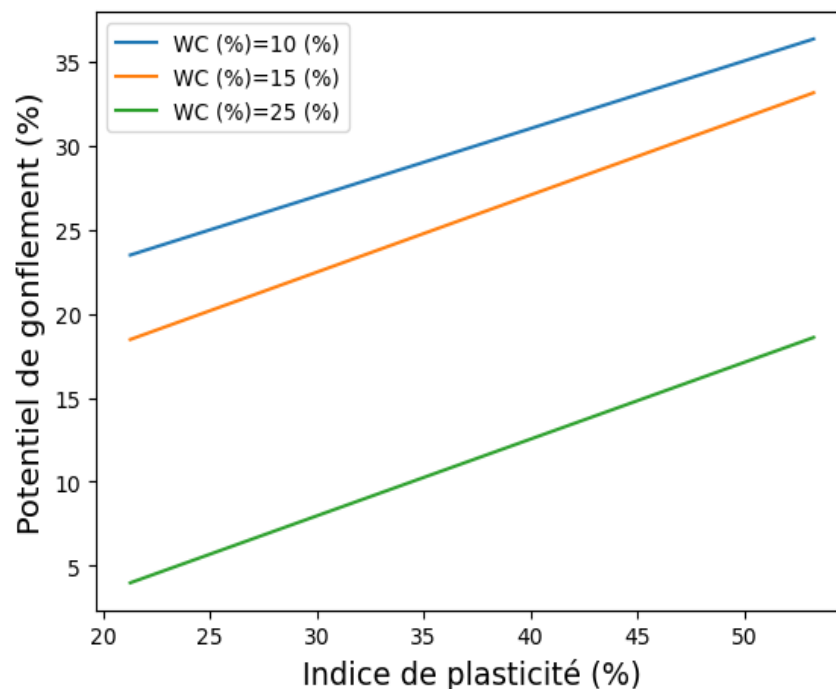


**Figure 4.6** Comparaison entre la pression de gonflement réel et prédit : données de de test

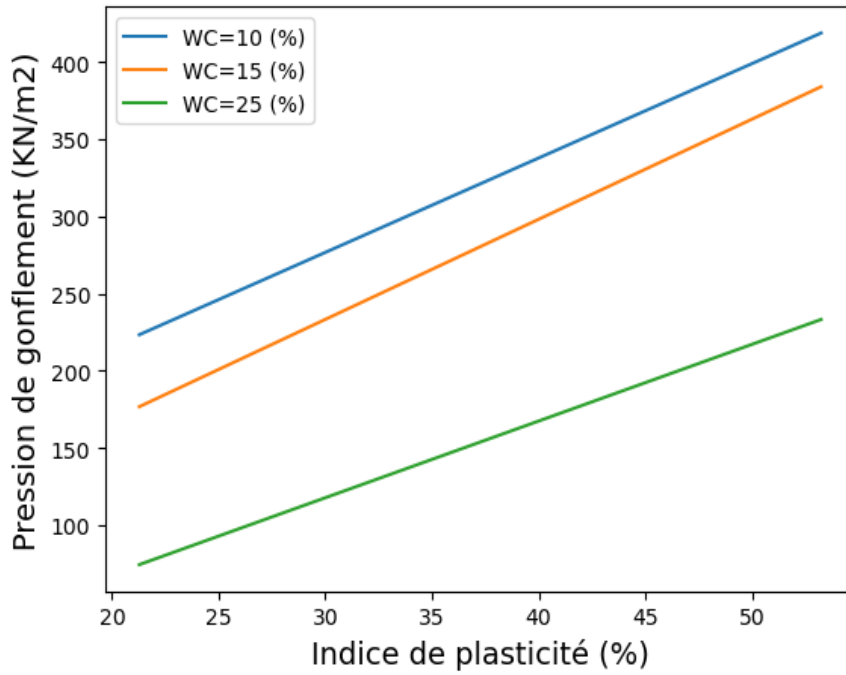
Les figures (4.3) et (4.4) comparent les valeurs réelles et prédites pour le jeu de données d'entraînement, tandis que Les figures (4.5) et (4.6) font de même pour le jeu de données de test. Les résultats obtenus montrent une corrélation élevée entre les valeurs réelles et les valeurs prédites, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,96 pour le potentiel de gonflement et de 0,92 pour la pression de gonflement, indiquant la précision et l'efficacité des modèles GPR dans la prédiction des propriétés de gonflement des sols.

#### 4.6. Études paramétriques

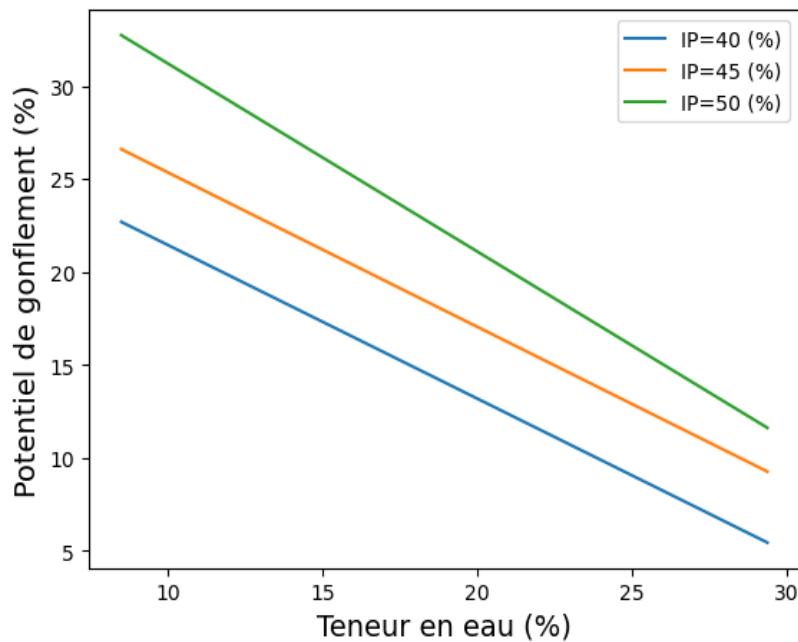
Des études paramétriques ont été réalisées pour analyser l'impact de différents paramètres géotechniques sur le potentiel et la pression de gonflement des sols. Par exemple, il a été observé que l'augmentation de l'indice de plasticité et la diminution de la teneur en eau influencent le potentiel de gonflement de manière significative. Ces analyses aident à comprendre les relations complexes entre les paramètres du sol et le comportement de gonflement, fournissant des insights précieux pour des applications pratiques en géotechnique (Eyo et Onyekpe 2021 ; Zhang et al 2023).



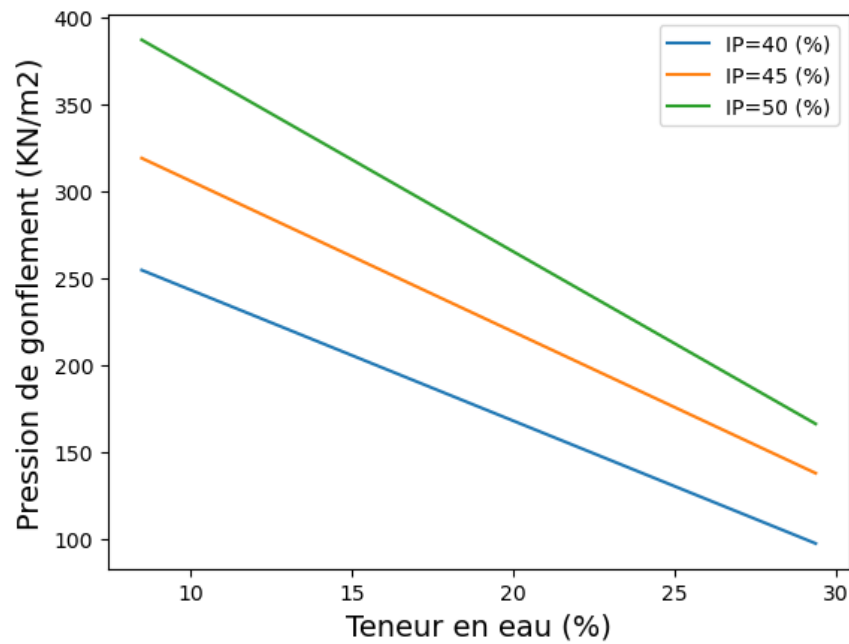
**Figure 4.7** Relation entre l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement pour différentes teneurs en eau



**Figure 4.8** Relation entre l'indice de plasticité et pression de gonflement pour différentes teneurs en eau



**Figure 4.9** Relation entre la teneur en eau et le potentiel de gonflement pour différents indices de plasticité



**Figure 4.10** Relation entre la teneur en eau et la pression de gonflement pour différents indices de plasticité

La figure 4.7 présente un graphique illustrant la relation entre l'Indice de plasticité (%) et le Potentiel de gonflement (%) pour différentes teneurs en eau (WC %). On y observe une corrélation positive : lorsque l'Indice de plasticité augmente, le Potentiel de gonflement augmente également. Toutefois, une teneur en eau plus élevée (WC = 25%) est associée à un Potentiel de gonflement plus faible par rapport à des teneurs en eau plus faibles (WC = 10% et 15%). Ainsi, le Potentiel de gonflement est influencé par l'Indice de plasticité et la teneur en eau, avec des tendances linéaires suggérant des relations modélisables.

Le graphique de la figure 4.8 montre la relation entre l'Indice de plasticité (%) et la Pression de gonflement (kN/m²) pour différentes teneurs en eau (WC %). Les lignes révèlent une tendance linéaire ascendante, indiquant que la Pression de gonflement augmente avec l'Indice de plasticité. Pour une teneur en eau de 10% (ligne bleue), la Pression de gonflement est la plus élevée, suivie par 15% (ligne orange) et 25% (ligne verte). Cela suggère qu'une teneur en eau plus faible entraîne une pression de gonflement plus élevée. Ce comportement souligne l'importance de la teneur en eau dans l'évaluation de la pression de gonflement des matériaux plastiques.

La figure 4.9 présente la relation entre le Potentiel de gonflement (%) et la Teneur en eau (%) pour différents Indices de plasticité (IP %). Le graphique montre que le Potentiel de gonflement (%) diminue à mesure que la Teneur en eau (%) augmente, indiquant une relation inverse. Les courbes pour IP = 40% (bleue), IP = 45% (orange) et IP = 50% (verte) démontrent que, pour un même niveau de Teneur en eau, un Indice de plasticité plus élevé correspond à un Potentiel de gonflement plus élevé. Ainsi, bien que le Potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation de la Teneur en eau, il reste plus élevé pour les sols ayant des indices de plasticité plus élevés. Cela souligne l'importance de la gestion de la teneur en eau pour réduire les risques de gonflement des sols, en particulier ceux à haute plasticité.

La figure 4.10 illustre que la Pression de gonflement (kN/m<sup>2</sup>) diminue avec l'augmentation de la Teneur en eau (%) pour différents Indices de plasticité (IP %), montrant une relation inverse. Les courbes pour IP = 40% (bleue), IP = 45% (orange) et IP = 50% (verte) révèlent que, pour une même Teneur en eau, une Pression de gonflement plus élevée est associée à un Indice de plasticité plus élevé. Ainsi, en augmentant la Teneur en eau, la Pression de gonflement diminue, mais reste proportionnellement plus élevée pour les sols à forte plasticité.

#### 4.7. Discussion des résultats

Les tendances observées dans les figures 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10 montrent des relations complexes entre l'indice de plasticité, la teneur en eau, le potentiel de gonflement et la pression de gonflement. Globalement, ces tendances peuvent être expliquées par les propriétés physiques et chimiques des sols argileux, qui sont fortement influencées par leur teneur en eau et leur indice de plasticité.

Tout d'abord, il est essentiel de comprendre que les sols avec un indice de plasticité élevé contiennent une plus grande proportion de particules d'argile. Ces particules ont une capacité élevée à absorber et retenir l'eau, ce qui entraîne un gonflement du sol. Cette capacité d'absorption et de rétention d'eau est directement liée à la pression et au potentiel de gonflement du sol.

Lorsque la teneur en eau augmente, les particules d'argile deviennent plus espacées et les forces capillaires et de cohésion entre elles diminuent. Cela se traduit par une diminution de la pression et du potentiel de gonflement avec l'augmentation de la teneur en eau. Ainsi, bien

que les sols à indice de plasticité plus élevé montrent une plus grande tendance à gonfler, cette tendance est modulée par la teneur en eau.

En effet, pour des teneurs en eau plus faibles, les forces capillaires sont plus fortes, ce qui entraîne une pression de gonflement plus élevée. À mesure que la teneur en eau augmente, ces forces capillaires diminuent, réduisant ainsi la pression de gonflement. Cependant, même avec une teneur en eau croissante, les sols avec un indice de plasticité plus élevé conservent un potentiel de gonflement plus élevé en raison de leur capacité intrinsèque à retenir l'eau.

En résumé, les interactions entre l'indice de plasticité et la teneur en eau déterminent le comportement de gonflement des sols. Un indice de plasticité élevé est associé à un potentiel de gonflement et à une pression de gonflement plus élevés, mais ces effets sont atténués par une augmentation de la teneur en eau. Ces observations soulignent l'importance de la gestion de la teneur en eau pour contrôler les risques de gonflement des sols, en particulier dans les sols à haute plasticité.

#### **4.8. Conclusion**

Le chapitre sur l'application de l'intelligence artificielle (IA), en mettant particulièrement l'accent sur la machine Learning (ML), pour la prédiction le potentiel et la pression de gonflement des sols a mis en lumière l'efficacité de la régression par processus gaussien (GPR) dans la modélisation des relations complexes entre les variables géotechniques et ces potentiel et pression. En utilisant des données limitées, le GPR a démontré une performance exceptionnelle avec des coefficients de détermination  $R^2$  élevés.

En utilisant des métriques statistiques telles que le MAE, le MSE et le RMSE, le modèle développé à montrer une forte corrélation entre les valeurs prédites et réelles, avec un faible taux d'erreur. Les études paramétriques ont révélé l'impact crucial de paramètres géotechniques tels que l'indice de plasticité et la teneur en eau sur le potentiel de gonflement.

En conclusion, l'intégration du Machine Learning, en particulier la GPR, offre des outils précieux pour améliorer la précision des prédictions géotechniques, offrant ainsi une valeur ajoutée significative aux chercheurs et praticiens de l'ingénierie géotechnique.

---

# Conclusions Générales

## Conclusions Générales

Dans ce mémoire de master, nous avons entrepris une analyse approfondie des performances de divers modèles de prédiction des caractéristiques de gonflement des sols routiers. Ce travail s'est appuyé sur une vaste recherche bibliographique portant sur la caractérisation des sols argileux gonflants et sur l'évaluation de modèles empiriques et d'intelligence artificielle proposés par différents chercheurs.

En collectant une base de données exhaustive de 161 échantillons de sol issue de la littérature, nous avons pu ajuster et évaluer statistiquement six modèles de prévision du potentiel et de la pression de gonflement, trois pour chaque type. L'évaluation de ces modèles a été réalisée en utilisant des indicateurs statistiques tels que le coefficient de détermination, le t-test de Student et le F-test de Fisher. Les résultats ont démontré que les modèles intégrant plusieurs propriétés en tant que variables d'entrée fournissent des performances statistiques supérieures à ceux utilisant une ou deux propriétés seulement.

L'analyse statistique a également révélé que certaines constantes empiriques utilisées dans les modèles évalués n'étaient pas significatives, suggérant leur inutilité pour la précision des prédictions. Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont souligné l'importance de la teneur en eau comme indicateur clé du gonflement des sols. Toutefois, les limitations des approches empiriques ont été mises en évidence par nos analyses statistiques, montrant la nécessité de méthodes plus robustes.

Face à ces limitations, nous avons proposé une approche de prévision basée sur l'intelligence artificielle. En particulier, l'application de la régression par processus gaussien (GPR) a démontré une grande efficacité dans la modélisation des relations complexes entre les variables géotechniques et le gonflement des sols. En utilisant des métriques telles que le MAE, le MSE et le RMSE, notre modèle AI a montré une forte corrélation entre les valeurs prédites et réelles, avec un faible taux d'erreur.

Enfin, les études paramétriques menées ont révélé l'impact crucial de certains paramètres géotechniques, tels que l'indice de plasticité et la teneur en eau, sur le gonflement des sols. Ces résultats soulignent l'importance de ces variables dans la prédiction précise des comportements des sols argileux gonflants.

En conclusion, ce mémoire a non seulement évalué la performance de modèles empiriques existants mais a également démontré l'efficacité des approches basées sur l'intelligence artificielle pour la prédiction du gonflement des sols. Ces nouvelles perspectives offrent des outils potentiellement plus précis et fiables pour les ingénieurs géotechniques, permettant ainsi de mieux anticiper et gérer les risques liés aux sols gonflants dans les projets routiers.

## **Perspectives et Recommandations**

En vue de renforcer et d'étendre les travaux présentés dans ce mémoire, nous proposons les perspectives et recommandations suivantes :

### **Perspectives**

- Intégration de techniques empiriques avec des méthodes d'intelligence artificielle pour créer des modèles hybrides plus robustes et précis.
- Exploration des réseaux de neurones profonds et des techniques d'apprentissage profond pour améliorer la précision des prédictions.
- Collecte de nouvelles données géotechniques provenant de différentes régions et conditions climatiques pour enrichir la base de données existante.
- Collaboration avec des laboratoires et des institutions pour obtenir des données plus variées et représentatives.
- Mise au point d'algorithmes d'apprentissage automatique plus sophistiqués, tels que les forêts aléatoires et les machines à vecteurs de support, pour une meilleure performance prédictive.

### **Recommandations**

- Encouragement de l'utilisation des modèles prédictifs dans les projets routiers réels pour valider leur efficacité sur le terrain.
- Formation des ingénieurs géotechniques à l'utilisation des outils d'intelligence artificielle pour la prédiction des comportements des sols.
- Développement de normes et de protocoles pour l'utilisation des modèles de prédiction des sols dans l'industrie de la construction routière.

- Organisation de séminaires et d'ateliers pour sensibiliser les professionnels de l'ingénierie géotechnique aux avantages des approches basées sur l'intelligence artificielle.
- Inclusion de modules sur l'intelligence artificielle et les modèles de prédiction dans les programmes de formation universitaire en géotechnique.

En adoptant ces perspectives et recommandations, la communauté scientifique et les praticiens de l'ingénierie géotechnique pourront non seulement améliorer la précision et la fiabilité des prédictions de gonflement des sols, mais aussi anticiper et gérer plus efficacement les défis posés par les sols argileux gonflants dans les projets de construction routière.

---

# Liste Des Références

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abd Ellatief, M., Mahmoud, M., & Abdo, H. (2017, July). Geotechnical Properties of Expansive Clay Shale in El-Mahrowsa, Qena, Egypt. In International Congress and
- Abduljawad S.N. & Al-Sulaimani G. (1993). Determination of swell potential of Al-Qatifclay. *Geot Test J* 16: 469-484.
- Abu Seif, E. S. S. (2015). Efficiency of quicklime in reducing the swelling potential of pulverized expansive shale, Northern Jeddah, Saudi Arabia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 637-650.
- Agellon, L. B., Emery, C. J., Jones, J. M., Davies, S. L., Dingle, A. D., & Chen, T. T. (1988). Promotion of rapid growth of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) by a recombinant fish growth hormone. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45(1), 146-151.
- Aissiou, F. Z. (2010). Etude du phénomène de gonflement d'un sol argileux (Doctoral dissertation, Alger).
- Ajani, J. A., D'Amico, T. A., Bentrem, D. J., Cooke, D., Corvera, C., Das, P. & Pluchino, L. A. (2023). Esophageal and esophagogastric junction cancers, version 2.2023, NCCN clinical practice guidelines in oncology. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network*, 21(4), 393-422.
- Alan, H., Yolcu, Ü., Koparal, M., Özgür, C., Öztürk, S. A., & Malkoç, S. (2016). Evaluation of the effects of the low-level laser therapy on swelling, pain, and trismus after removal of impacted lower third molar. *Head & face medicine*, 12, 1-6.
- Al-Homoud, A. S., Basma, A. A., Husein Malkawi, A. I., & Al Bashabsheh, M. A. (1995). Cyclic swelling behavior of clays. *Journal of geotechnical engineering*, 121(7), 562-565.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in limetreated expansive soil at 20 C. *Applied clay science*, 50(2), 191-198.

- Alonso, A., & Garcia-Austt, E. (1987). Neuronal sources of theta rhythm in the entorhinal cortex of the rat: II. Phase relations between unit discharges and theta field potentials. *Experimental brain research*, 67, 502-509.
- Al-Zoubi, M. S. (2008). Swell characteristics of natural and treated compacted clays. *EJGE*, 13, 1-18.
- Attwell, D., Wilson, M., & Wu, S. M. (1984). A quantitative analysis of interactions between photoreceptors in the salamander (*Ambystoma*) retina. *The Journal of physiology*, 352(1), 703-737.
- Bardhan, A., & Samui, P. (2022). Application of artificial intelligence techniques in slope stability analysis: a short review and future prospects. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering (IJGEE)*, 13(1), 1-22.
- Barshad, I. (1965). Thermal analysis techniques for mineral identification and mineralogical composition. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 699-742.
- Basma, A. A., Al-Rawas, A. A., Al-Saadi, S. N., & Al-Zadjali, T. F. (1998). Stabilization of expansive clays in Oman. *Environmental & Engineering Geoscience*, 4(4), 503-510.
- Basma, A. A., BARAKAT, S. A., & Omar, M. (2003). Modeling time dependent swell of clays using sequential artificial neural networks. *Environmental & Engineering Geoscience*, 9(3), 279-288.
- Bekkouche A., Djedid A, Aissa Mamoune S.M. (2001). Identification des sols expansifs. Séminaire national de génie civil, Sidi Bel-Abbes, Algérie.
- Beltas, S., Medjider, R., & Kherrouba, H. E. (2021). Instabilités de terrain dans la commune de Djimla (Nord–Est Algérien): Causes et conséquences, une étape vers l'évaluation et la gestion du risque (Doctoral dissertation, Université-Jijel-).
- Benaissa, A. (2011). Etude de la qualité microbiologique des viandes cameline et ovine conservées selon différents modes (Doctoral dissertation).
- Benbekhma, S., Cheriguene, A., & Baghdad, A. E. (2019). Diagnostic des dégradations sur la RN 43 du PK 11+ 500 au PK 28+ 000 entre Ziama Mansouria et les Aftis (Wilaya de Jijel) et proposition des solutions (Doctoral dissertation, Université de Jijel).

- Bordeau, M., Dédier, J., Frainnet, E., & Bothorel, P. (1973). Étude structurale d'hexaalkyldisiloxanes et de trialkylalcoxysilanes: III. Détermination par diffusion rayleigh depolarisée des anisotropies optiques des groupes t-Bu-O et R<sub>3</sub>Si-O (R= Me, Et, Pr). *Journal of Organometallic Chemistry*, 61, 103-112.
- Brasher, D. M., De, C. P., & Mercer, A. D. (1966). Film growth on mild steel in inhibitive solutions. *British Corrosion Journal*, 1(5), 188-191.
- Bugeja, F. (2011). Les inégalités d'accès à la propriété et leurs déterminants institutionnels: Étude comparative entre la France et le Royaume-Uni (1980-2005). *Revue française de sociologie*, 52(1), 37-69.
- Casagrande A. (1948). Classification and identification of soils. *Transaction, ASCE*, vol 113, 901-991.
- Cefor Lyss (2016). Centre pour le génie forestier Argiles, limons et stabilisation des sols.
- Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, 891-901.
- Chen, W. F., Snitbhan, N., & Fang, H. Y. (1975). Stability of slopes in anisotropic, nonhomogeneous soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 12(1), 146-152.
- Choma-Moryl, K. (2007). Expansiveness of selected basaltoid weathering products in Lower Silesia, Poland. *Geologia Sudetica*, 39(1-106), 1-9.
- Cimen, H., Han, M. J., Yang, Y., Tong, Q., Koc, H., & Koc, E. C. (2010). Regulation of succinate dehydrogenase activity by SIRT3 in mammalian mitochondria. *Biochemistry*, 49(2), 304-311.
- Çokça, E. (2002). Closure to "Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil" by Erdal Çokça. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(11), 966-966.
- Darcourt, J. G., Aparicio, K., Dorsey, P. M., Ensor, J. E., Zsigmond, E. M., Wong, S. T., ... & Chang, J. C. (2021). Analysis of the implementation of telehealth visits for care of patients with cancer in Houston during the COVID-19 pandemic. *JCO oncology practice*, 17(1), e36-e43.

- De Moel, H., Asselman, N. E. M., & Aerts, J. C. J. H. (2012). Uncertainty and sensitivity analysis of coastal flood damage estimates in the west of the Netherlands. *Natural Hazards and Earth system sciences*, 12(4), 1045-1058.
- Debelo, N., Afework, M., Debella, A., Makonnen, E., Ergete, W., & Geleta, B. (2015). Histopathological and biochemical assessment of chronic oral administration of aqueous leaf extract of *Thymus serrulatus* in mice. *J Clin Exp Pathol*, 5(258), 2161-0681.
- Didier G., Lareal P., & Gielly J. (1973). Prévision du potentiel et de la pression de gonflement des sols. *Comptes rendus du congr es de mécanique des sols et des travaux de fondations*, 2-3, 67-72.
- Djedid, A., & Bekkouche, A. (2001). Identification and prediction of the swelling behaviour of some soils from Tlemcen region of Algeria. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 4375, 69-77.
- Dysli M. (2001). Recherche bibliographique et synthèse des corrélations entre les caractéristiques des sols. Rapport final, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-Laboratoire de mécanique des sols (LMS).
- Dysli, M., & Steiner, W. (2011). Correlations in soil mechanics. PPUR Presses polytechniques.
- Edil, T. B., & Alanazy, A. S. (1992). Lateral swelling pressures. In *International conference on expansive soils*. 227-232.
- Ejjaaouani, H. (2008). Interactions des fondations et des sols gonflants: Pathologie, calculs et études expérimentales. Doctoral dissertation, l' ecole nationale des ponts et chaussées.
- Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2003). A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) Clay. *Engineering Geology*, 67(3-4), 331-352.
- Erol O., Dhowian A., Yousseff A. (1987) Assessment of oedometer methods for heave prediction. *Proceedings of the 6th International conference on expansive soils*, New Delhi.
- Erzin, Y., & Erol, O. (2004). Correlations for quick prediction of swell pressures. *Electronic journal of geotechnical engineering*, 9, 1.

- Etim, R. K., Ekpo, D. U., Attah, I. C., & Onyelowe, K. C. (2021). Effect of micro sized quarry dust particle on the compaction and strength properties of cement stabilized lateritic soil. *Cleaner Materials*, 2, 100023.
- Fauchard, C., Aillaud, L., Legrand, A., Guilbert, V., Ledun, C., Antoine, R., & Beaucamp, B. (2021). Nouveaux aspects architecturaux de la chapelle Notre-Dame-du-Val de Sotteville-sur-Mer (76) révélés par photogrammétrie et géophysique de subsurface (Doctoral dissertation, Cerema).
- Gibbs, H. J. (1973). Use of a consolidometer for measuring expansion potential of soils. *Proceedings Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction*. University Wyoming, Laramie, 206-213.
- Guiras-Skandaji, H. (1996). Déformabilité des sols argileux non saturés: étude expérimentale et application à la modélisation, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine,
- École Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, France. Gueddouda, M. K., Goual, I., Lamara, M., Smaida, A., & Mekarta, B. (2011). Chemical stabilization of expansive clays from Algeria. *Global Journal of researches in engineering*, 11(5), 1-7.
- Hachichi, A., & Fleureau, J. M. (1999). Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. *Revue française de géotechnique*, (86), 37-51.
- Hachichi, A., Bourokba, S. A., Benaïssa, A., Fleureau, J. M., Hattab, M., & Taïbi, S. (2009). Etude des phénomènes retrait-gonflement et stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran, Congrès Français de Mécanique. In *Etude des phénomènes retrait-gonflement et stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran, Congrès Français de Mécanique*.
- Hakami, B. A., & Seif, E. S. S. A. (2019). Expansive potentiality of sabkha soils of Rabigh Lagoon, Saudi Arabia: a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-14.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Presses inter Polytechnique.
- Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 641-663.

- Hosseini, M., & Horbach, S. P. (2023). Fighting reviewer fatigue or amplifying bias? Considerations and recommendations for use of ChatGPT and other large language models in scholarly peer review. *Research integrity and peer review*, 8(1), 4.
- James, C. (2018). Measures for rehabilitation of distressed structures founded on expansive soils. *American Journal of Engineering Research (AJER)*.7(11), 68-73.
- Johansson, U., Boström, H., Löfström, T., & Linusson, H. (2014). Regression conformal prediction with random forests. *Machine learning*, 97, 155-176.
- Jones Jr, D. E., & Holtz, W. G. (1973). Expansive soils-the hidden disaster. *Civil engineering*, 43(8).
- Jones, L. D., & Hobbs, P. R. N. (2004). The shrinkage and swelling behaviour of UK soils: the clays of the Lambeth Group. Research Report RR/04/001, British Geological Survey.
- Kamel, G. M., Idriss, G., & Benchaa, B. (2013). Effet de chaux, ciment et sel sur le potentiel de gonflement des argiles gonflantes des régions arides en Algérie. *European journal of environmental and civil engineering*, 17(5), 315-328.
- Kayabalı, K., & Yıldız, Ö. (2023). Estimation of swelling pressure using simple soil indices. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 149(149), 175-188.
- Kelleher, J. D. (2019). *Deep learning*. MIT press.
- Keprate, A., & Ratnayake, R. C. (2017, December). Using gradient boosting regressor to predict stress intensity factor of a crack propagating in small bore piping. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1331-1336). IEEE.
- Khatti, J., & Grover, K. S. (2023). Prediction of UCS of fine-grained soil based on machine learning part 1: multivariable regression analysis, gaussian process regression, and gene expression programming. *Multiscale and multidisciplinary modeling, experiments and design*, 6(2), 199-222.
- Khatti, J., Samadi, H., & Grover, K. S. (2024). Estimation of settlement of pile group in clay using soft computing techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(3), 1729-1760.

- Kim, H., & Buttlar, W. G. (2009). Finite element cohesive fracture modeling of airport pavements at low temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 57(2-3), 123-130.
- Komornik, A., & David, D. (1969). Prediction of swelling pressure of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95(1), 209-226.
- Kuss, M., & Rasmussen, C. (2003). Gaussian processes in reinforcement learning. *Advances in neural information processing systems*, 16.
- Lambe, T. W., & MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE. (1960). *The Character and Identification of Expansion Soils*. MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE 1960.
- Lei, Q. Y., Zhang, H., Zhao, B., Zha, Z. Y., Bai, F., Pei, X. H., ... & Guan, K. L. (2008). TAZ promotes cell proliferation and epithelial-mesenchymal transition and is inhibited by the hippo pathway. *Molecular and cellular biology*, 28(7), 2426-2436.
- Lew, B. (2010). Structure damage due to expansive soils: A case study. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1317-1324.
- Li, J.J., Jutzeler, A., Faltings, B., Winter, S. and Rizos, C., (2014). Estimating urban ultrafine particle distributions with gaussian process models. *Research@ Locate14*, pp.145-153.
- Liong, S. Y., Lim, W. H., & Paudyal, G. N. (2000). River stage forecasting in Bangladesh: neural network approach. *Journal of computing in civil engineering*, 14(1), 1-8.
- Lubbe, F., Maritz, J., & Harms, T. (2020). Evaluating the potential of Gaussian process regression for solar radiation forecasting: A case study. *Energies*, 13(20), 5509.
- Mancia, G., Kreutz, R., Brunström, M., Burnier, M., Grassi, G., Januszewicz, A., & Kjeldsen, S. E. (2023). 2023 ESH Guidelines for the management of arterial hypertension The Task Force for the management of arterial hypertension of the European Society of Hypertension: Endorsed by the International Society of Hypertension (ISH) and the European Renal Association (ERA). *Journal of hypertension*, 41(12), 1874-2071.
- McCrone, W. C. (1988). The vinland map. *Analytical Chemistry*, 60(10), 1009-1018.

- Medjnoun, A., Khatine, M., & 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(4), 1259-1272.
- Mitchell, W. I. (1976). The Ordovician Brachiopoda from Pomeroy, Co. Tyrone. *Monographs of the Palaeontographical Society*, 130(545), 2-131.
- Momeni, E., Dowlatshahi, M. B., Omidinasab, F., Maizir, H., & Armaghani, D. J. (2020). Gaussian process regression technique to estimate the pile bearing capacity. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8255-8267. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04683-4>
- Morobé, C. (2020). A Comparative Study of Machine Learning Techniques To Predict The Speed Through Water And Speed Loss Due To Fouling Of Seagoing Vessels.
- Mouroux, P. (1969). Contribution à l'étude des problèmes de retrait et de gonflement des sols. Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.
- Mowafy, M. Y., & Bauer, G. E. (1985). Prediction of swelling pressure and factors affecting the swell behaviour of an expansive soils. *Transportation research record*, 1032, 23-28.
- Muntohar, A. S., & Hantoro, G. (2000). Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 5, 1-9
- Nayak, N. V., & Christensen, R. W. (1971). Swelling characteristics of compacted, expansive soils. *Clays and clay minerals*, 19, 251-261.
- Nowamooz, H. (2007). Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL).
- Nowamooz, H. (2007). Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL).
- Ogata, N., Komine, H., Nakashima, H., Nagasawa, T., & Ishii, T. (1994). Method of designing bentonite/sand mixture to achieve the target permeability. *Journal of the Clay Science Society of Japan (in Japanese)*, 34(2), 95-101.

- Öget, G. D. (2014). Estimating swelling characteristics of clays using methylene blue test-a machine learning approach (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Oner, A. F., Bay, A., Arslan, S., Akdeniz, H., Sahin, H. A., Cesur, Y., ... & Ceyhan, M. (2006). Avian influenza A (H5N1) infection in eastern Turkey in 2006. *New England Journal of Medicine*, 355(21), 2179-2185.
- Onyekpe, U., Lu, Y., Apostolopoulou, E., Palade, V., Eyo, E. U., & Kanarachos, S. (2022). Explainable machine learning for autonomous vehicle positioning using shap. In *Explainable AI: Foundations, Methodologies and Applications* (pp. 157-183). Cham: Springer International Publishing.
- Öztürk, Y. Z., Ünsal, N., & Akbaş, S. O. (2015). Gölbaşı (Ankara) yerleşim alanini killerinini şişme ve kireç ile iyileştirilme potansiyellerinin belirlenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 30(2).
- Pezowicz, P., & Choma-Moryl, K. (2015). Moisture content impact on mechanical properties of selected cohesive soils from the wielkopolskie voivodeship southern part. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(4), 37-46.
- Puppala, A. J., Manosuthkij, T., Nazarian, S., & Hoyos, L. R. (2011). Threshold moisture content and matric suction potentials in expansive clays prior to initiation of cracking in pavements. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(4), 519-531.
- Pruška, J., & Šedivý, M. (2015). Prediction of soil swelling parameters. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 219-224.
- Rabba, S. (1975). Factors affecting engineering properties of expansive soils (Doctoral dissertation, Al-Azhar University).
- Ramana, K. V. (1993). Humid tropical expansive soils of Trinidad: Their geotechnical properties and areal distribution. *Engineering Geology*, 34(1-2), 27-44.
- Ranganatham, B. V., & Satyanarayana, B. (1965, September). A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. In *Proceedings of the 6th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Montreal* (pp. 92-96). ISO 690.

- Rani, C. S., Reddy, P. V. S., & Rao, K. M. (2010). SIVACS: Knowledge Based System Developed for Soil Identification and Assessment of Volume Change Characteristics. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15.
- Rao, A. V. (2004). Processed tomato products as a source of dietary lycopene: bioavailability and antioxidant properties. *Canadian journal of dietetic practice and research*, 65(4), 161-165.
- Rodrigues, P. A. L. (2016). *Perspectiva político-pedagógica do CEFOR-RH/PB: implicações e desafios dentro da comunidade escolar* (Doctoral dissertation, EPSJV).
- Romera-Paredes, B., Barekatin, M., Novikov, A., Balog, M., Kumar, M. P., Dupont, E., ... & Fawzi, A. (2024). Mathematical discoveries from program search with large language models. *Nature*, 625(7995), 468-475.
- Sabtan, A. A. (2005). Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(5), 747-757.
- Samui, P. (2008). Support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils. *Computers and Geotechnics*, 35(3), 419-427.
- Samui, P., & Jagan, J. (2013). Determination of effective stress parameter of unsaturated soils: A Gaussian process regression approach. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 7, 133-136.
- Sari Ahmed, B. (2019). *Prévision des propriétés des sols argileux améliorés par ajouts cimentaires*. Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali Chlef.
- Schneider, G. L., & Poor, A. R. (1974). *The prediction of soil heave and swell pressures developed by an expansive clay*. University of Texas.
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. In *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Supplement University of Michigan, Ann Arbor.
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. In *International Conference on*

- the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement University of Michigan, Ann Arbor.
- Seif, E. S. S. A. (2017). Geotechnical hazardous effects of municipal wastewater on plasticity and swelling potentiality of clayey soils in Upper Egypt. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 1-21.
- Senis, Y. A., Tomlinson, M. G., García, A., Dumon, S., Heath, V. L., Herbert, J., ... & Watson, S. P. (2007). A comprehensive proteomics and genomics analysis reveals novel transmembrane proteins in human platelets and mouse megakaryocytes including G6b-B, a novel immunoreceptor tyrosine-based inhibitory motif protein. *Molecular & cellular proteomics*, 6(3), 548-564.
- Serratrice, J. F., & Soyeux, B. (1996). Les essais de gonflement. *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 65-86.
- Skempton, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. *Selected papers on soil mechanics*, 1, 57-61.
- Sochka, K., Palinchak, N., Bobryk, O., & Andriiv, B. (2022). LOCAL BUDGETS IN THE CONTEXT OF DECENTRALIZATION PROCESSES IN UKRAINE. *Scientific Collection «InterConf+»*, (24 (121)), 38-49.
- Souhila, A. K., & Farid, H. B. (2009). *Commande multiboucle d'une colonne de distillation* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- Sridharan, A., & Gurtug, Y. (2004). Swelling behaviour of compacted fine-grained soils. *Engineering geology*, 72(1-2), 9-18.
- Suratman, I. (1985). *Contribution à l'étude de la cinétique et de la stabilisation du gonflement des argiles* (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- Tirry, N., Kouchou, A., Laghmari, G., Lemjereb, M., Hnadi, H., Amrani, K., ... & El Ghachtouli, N. (2021). Improved salinity tolerance of *Medicago sativa* and soil enzyme activities by PGPR. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 31, 101914.
- Tiwari, N., Satyam, N., & Puppala, A. J. (2021). Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers. *Transportation Geotechnics*, 29, 100556.

- Tripathy, S. P., & Cavanagh, P. (2002). The extent of crowding in peripheral vision does not scale with target size. *Vision research*, 42(20), 2357-2369.
- Tripathy, S., & Subba Rao, K. S. (2009). Cyclic swell–shrink behaviour of a compacted expansive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27, 89-103.
- Vijayvergiya V.N & Ghazzaly O.I. (1973). Prediction of swelling potential for natural clays. In: Proc 3rd Int. Conf. Expansive soils, Haifa: 227-236.
- Warda, K., Markouk, M., Bekkouche, K., Larhsini, M., Abbad, A., Romane, A., & Bouskraoui, M. (2009). Antibacterial evaluation of selected Moroccan medicinal plants against *Streptococcus pneumoniae*. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 3(3), 101-104.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., & Cui, K. (2008). Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. *Natural hazards*, 47(3), 509-523.