

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **GENIE CIVIL**

Spécialité : **GEOTECHNIQUE**

Par : **KHELIFI Amira Ibitihel** **KOUIDRI Marwa**

Sujet

Analyse de la dispersion des sols argileux

Soutenu publiquement, le 18 / 06 / 2025 , devant le jury composé de :

M.CHEKROUN Abdennasser	MCA	Université de Tlemcen	Président
M. BENYELLES Zoheir	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. ZADJAOUI Abdeldjalil	PR	Université de Tlemcen	Encadreur
M. TROUZINE Habib	PR	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Louange à Allah, qui nous a donné la force et la patience d'achever notre parcours académique avec ce projet de fin d'études, donc toutes les louanges et les remerciements lui reviennent.

Nous tenons à remercier nos encadrants : **Pr. ZAJDAOUI Abdeldjalil** et **Pr. TROUZINE Habib** pour leurs conseils et leur assistance tout au long de cette période de réalisation de ce projet de fin d'études. Que Dieu leur accorde la meilleure des récompenses.

Nous tenons également à remercier **Dr. DOUNANE Nawal** enseignante de l'université d'Ain Témouchent pour son aide et ses commentaires constructifs qui ont amélioré notre travail. Nous remercions ses orientations dans le dépouillement de notre BDD et son exploitation.

Nous tenons à remercier vivement **Dr. BOUROUIS Mohammed El Amin** enseignant à l'université d'Aghouat pour ses précieuses remarques et son aide dans la partie réseaux neurones.

Nous remercions également aux membres du jury en l'occurrence **Dr CHEKROUN Abdenasser** et **Dr BENYELLES Zoheir** d'avoir accepté l'évaluation de ce modeste travail de fin d'études et d'avoir participé à sa discussion lors de la soutenance.

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés et encouragés tout au long de notre parcours d'études en master génie civil, spécialité géotechnique.

Dédicace

C'est par la grâce d'Allah, le Tout-Puissant, le Clément et le Miséricordieux, que j'ai pu mener à bien ce travail, que je dédie :

A mon cher père,

Toi qui m'as toujours encouragé à garder la tête haute et à croire en mes rêves, Je t'offre ce travail en signe de reconnaissance infinie, de mon amour sincère et de ma passion, pour ta confiance et ton appui, moral et matériel.

À ma chère mère,

En témoignage de ma plus profonde gratitude et de ma reconnaissance sans bornes pour ton amour infini, tes sacrifices et toute la tendresse dont tu m'as toujours entouré.

À mon frère Yassine,

Mon premier ami et mon pilier, Ce travail est dédié à ta générosité de cœur, à ta force tranquille et à ta confiance en moi. Je t'en suis profondément reconnaissant.

A mes chères sœurs Safae, Doha, Amel.

A mes grands-parents et grands-mères.

A ma famille

A tous mes amis

À toutes celles et ceux qui m'ont soutenu et encouragé, qui ont été à mes côtés et m'ont accompagné tout au long de mon parcours en études supérieures.

Je vous dis merci

Marwa

Dédicace

Je dédie ma réussite à tous ceux qui, après Dieu, ont contribué à me faire atteindre ce moment :

A mon cher père,

Mon pilier et mon héros, source de ma force et de ma fierté.

À ma chère mère,

Ma Source d'amour, qui a été pour moi un refuge sûr et un soutien constant.

À mes chers sœurs

Lina et Nihel

À mon frère

Mohammed

À ma tante Sabra, ma précieuse grand-mère et ma tante Houria

Qui m'ont tendu la main pour poursuivre mon parcours malgré les difficultés et les épreuves.

À tous les membres de ma chère famille, à mes amis et camarades

Compagnons de route et de souvenirs.

Enfin...

Je dédie cette réussite à moi-même, qui n'ai jamais abandonné malgré les défis, et à celui qui m'a accompagné à chaque instant, en silence, avec amour et foi.

Amira

RESUME

Ce projet de fin d'études propose une démarche concise et performante pour estimer la dispersion des sols argileux. Après collecte, confection et analyse de données sur la base d'une recherche bibliographique profonde, un plan d'expériences orthogonal inspiré de la **méthode de Taguchi** a permis de réduire le nombre de tests. Des modèles de régression multiple ont ensuite été calibrés, puis enrichis par des réseaux de neurones artificiels. Cette combinaison a démontré la puissance et les limites de cette contribution. Les interactions non linéaires entre les propriétés physico-chimiques de l'argile dispersive et les paramètres clés de **la dispersion** ont été étudiées. Les résultats offrent aux géotechniciens un outil rapide, fiable, puissant et surtout économique pour optimiser les stratégies de stabilisation et de contrôle des ouvrages soumis à cet aléa. Enfin, ces résultats ouvrent la voie et la piste sur des conclusions pratiques pour les ingénieurs dans le cas de présence des sols argileux dispersives.

Mots-clés : Dispersion ; Mesure ; Prédiction ; Plan orthogonal ; Méthode de Taguchi ; Régression ; Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).

ABSTRACT

This final-year project proposes a concise, high-performance approach for estimating the dispersion of clayey soils. After collecting and analyzing data based on an extensive literature search, an orthogonal experimental design inspired by the Taguchi method was used to reduce the number of trials. Multiple regression models were then calibrated and completed using artificial neural networks. This combination demonstrated the power and limits of this contribution. Non-linear interactions between the physicochemical properties of dispersed clays and the main dispersion parameters. The results provide geotechnical engineers with a fast, reliable, robust and above all economical tool for optimizing stabilization and control strategies for vulnerable structures. Finally, these results open the way to practical conclusions for engineers in the case of dispersed clay soils.

Keywords: Dispersion; measurement; prediction; orthogonal plane; Taguchi method; regression; artificial neural networks (ANN).

ملخص

يقترح مشروع نهاية الدراسة هذا نهجًا موجزًا وعالي الأداء لتقدير تشتت التربة الطينية. بعد جمع البيانات وتحليلها استنادًا إلى بحث متعمق في المؤلفات، تم استخدام تصميم تجريبي متعامد مستوحى من طريقة تاغوتشي لتقليل عدد الاختبارات. ثم تمت معايرة نماذج الانحدار المتعدد واستكمالها باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية. أظهر هذا المزيج قوة هذه المساهمة وحدودها. التفاعلات غير الخطية بين الخواص الفيزيائية الكيميائية للطين المشتت ومعلمات التشتت الرئيسية. تزود النتائج المهندسين الجيوتقنيين بأداة سريعة وموثوقة وقوية وقبل كل شيء اقتصادية لتحسين استراتيجيات التثبيت والتحكم في الهياكل الضعيفة. أخيرًا، تفتح هذه النتائج الطريق إلى استنتاجات عملية للمهندسين في حالة التربة الطينية المشتتة.

الكلمات المفتاحية: التشتت؛ القياس؛ التنبؤ؛ المستوى المتعامد؛ طريقة تاغوتشي؛ الانحدار؛ الشبكات العصبية الاصطناعية. (ANN)

Notations

ANN : Réseau neuronal artificiel.

ANOVA : Analyse de la variance.

Ip : indice de plasticité (%)

Li : Conception de tableaux orthogonaux Taguchi Li.

R : Coefficient de corrélation (%).

VBS : Valeur du bleu de méthylène.

WI : Limite de liquidité (%).

S/N : Rapport signal/bruit.

D: Indice de dispersion (%).

SAR : Rapport d'absorption du sodium (%).

SP : Pourcentage de sodium (%).

TDS : Total des sels dissous (g/l).

Wp : Limite de plasticité (%).

A : Activité rapport entre Ip (%) d'Argile.

S.S.T : Surface spécifique totale (m²/g).

Introduction générale

L'objectif principal de cette recherche est d'enrichir la compréhension des phénomènes d'érosion et de dispersion auxquels sont inscrits les problèmes d'instabilité des ouvrages en terre. Les sols dispersifs sont des matériaux très sensibles à la présence de l'eau, leur contact avec l'eau change facilement leur comportement et les rendent incompatibles avec les conditions initiales désirées. Ainsi la dispersivité du sol est principalement due à la présence de sodium échangeable présent dans la structure des argiles d'où les forces attractives sont moins que les forces répulsives, et cela conduira la particule à se séparer et à se déplacer en suspension.

Le développement des méthodes statistiques dans le domaine de la géotechnique a marqué un tournant très important. Depuis le milieu du siècle dernier, la géotechnique est orientée vers ce domaine et avec les grands progrès des techniques qui déterminent la relation entre les propriétés mécaniques et physiques du sol et les méthodes statistiques nouvellement apparues, les chercheurs ont pu travailler sur la possibilité d'exploiter ces méthodes pour résoudre les problèmes auxquels sont confrontés les ingénieurs géotechniciens.

La méthode de Taguchi : Cette méthodologie combine des principes d'ingénierie et des méthodes statistiques précises de manière intelligente, ce qui contribue à l'obtention de résultats plus efficaces. Ses points forts sont sa capacité à améliorer la qualité de la production industrielle, la simplicité du travail et la recherche des meilleures solutions dans la recherche scientifique, tout en économisant de l'argent et du temps pour les chercheurs. Cette dernière a été utilisée dans le cadre de ce projet de fin d'études comme outil et matériel principal.

Cette méthodologie repose sur la conception minutieuse de tableaux permettant d'étudier avec précision les facteurs d'influence avec un nombre minimal d'expériences tout en garantissant la précision des résultats. Il s'agit de répondre à la problématique de prédiction de caractère dispersif des sols argileux.

Dans le domaine du génie civil, la méthode Taguchi a été appliquée avec succès, mais son utilisation en géotechnique reste limitée et n'a pas été pleinement exploitée.

Après cette introduction, le mémoire comporte les chapitres suivants :

Le premier chapitre à caractère bibliographique donne des généralités sur la structure de sol et leur comportement lorsqu'il est en contact avec l'eau (compactage, écoulement...), dont le quel les phénomènes de dispersion et de l'érosion s'inscrivent. Les méthodes de caractérisation de l'érosion et la dispersion font aussi l'objet de ce chapitre.

Dans le deuxième chapitre, le phénomène d'érosion interne est étudié au sein des ouvrages hydrauliques.

Le chapitre trois se focalise sur l'ensemble des classifications disponibles dans la littérature selon les normes et les codes en vigueur. Ce chapitre sera exploité dans le chapitre quatre qui présente en détail, la méthodologie, les outils et la démarche suivie dans ce projet de fin d'études pour une meilleure prédiction des paramètres de dispersion des argiles à savoir SAR, SP, TDS et D.

On achèvera par une conclusion générale et une liste des références bibliographiques.

Liste des figures

Figure 1.1 : Couche tétraédrique (siliceuse), Couche octaédrique (alumineuse) (Belarbi, 2015)	3
Figure 1.1.2 : (a) : Couche tétraédrique (siliceuse) ; (b) : Couche octaédrique (alumineuse) ; (c) : Les tétraèdres ; (d) : Feuillet chargé (Eslinger et Peaver, 1988)	4
Figure 1.3 : Structure de l'illite (Belarbi, 2015)	5
Figure 1.4 : Structure de la Kaolinite (Belarbi, 2015)	5
Figure 1.5 : Structure de la montmorillonite (Belarbi, 2015)	6
Figure 1.6 : Schéma de l'évolution d'étude de l'érosion des sols	7
Figure 2.1 : Phénomène de renard (Pham, 2008)	10
Figure 2.2 : Le phénomène de l'érosion régressive (Site web 01)	11
Figure 2.3 : Le phénomène de la désintégration des feuilles et des particules du sol argileux (Site web 02)	11
Figure 2.4 : Schéma simplifié des différents types de vagues générées par un navire (Pham, 2008)	12
Figure 2.5 : Schéma représente les deux types de marées (Site web 03)	12
Figure 2.6 : Les deux mécanismes de l'érosion pluviale (Pham, 2008)	13
Figure 2.7 : Effet du sodium sur la structure du sol (Site web 04)	13
Figure 2.8 : Appareillage complet pour essais de sedimentometrie (norme NF P94-057 15)	15
Figure 2.9 : Courbes granulométrique de l'essai de double sédimentation (Site web 05)	15
Figure 2.10 : Schéma de principe de Pinhole Test (d'après ASTM D4647-93)	16
Figure 2.11 : Essais typiques de « Crumb test », a- niveau 1 : non dispersif, b)-niveau 2 : intermédiaire, c)-niveau 3 : dispersif, d- niveau 4 : très dispersif (ASTM D6572-00)	16
Figure 3.1 : La classification des pourcentages d'argile des sols étudiés	22
Figure 3.2 : La classification des pourcentages des fines des sols étudiés	24
Figure 3.3 : Structure de notre réseau de neurones simple	26
Figure 4.1 : Graphe de régression (TDS)	29
Figure 4.2 : Graphe de régression (SAR)	30
Figure 4.3 : Graphe de régression (D)	31

Figure 4.4 : Graphe de régression (SP)	31
Figure 4.5 : Performance du Réseau de Neurones pour la Prédiction de (D %)	33
Figure 4.6 : Performance du Réseau de Neurones pour la Prédiction de SAR	34
Figure 4.7 : Performance du Réseau de Neurones pour la Prédiction de SP	34
Figure 4.8 : Performance du Réseau de Neurones pour la Prédiction de TDS	35
Figure 4.9 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi	36
Figure 4.10 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données	37
Figure 4.11 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi	38
Figure 4.12 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données	38
Figure 4.13 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi	39
Figure 4.14 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données	40
Figure 4.15 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi	41
Figure 4.16 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données	41
Figure 4.17 : Matrice de Corrélacion de Pearson	42
Figure 4.18 : TDS-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs TDS réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie	44
Figure 4.19 : TDS-Meilleur-Regr : Graphique de régression TDS réel vs. Prédit pour le meilleur modèle mono-sortie ($R^2 = 0.614$)	45
Figure 4.20 : D%-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs D (%) réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie	46
Figure 4.21 : D%-Meilleur-Regr : Graphique de régression D (%) réel vs. prédit pour le meilleur modèle mono-sortie ($R^2 = 0.350$)	46
Figure 4.22 : SP-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs SP réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie	47
Figure 4.23 : SP-Meilleur-Regr : Graphique de régression SP réel vs. Prédit pour le meilleur modèle mono-sortie ($R^2 = 0.954$)	47
Figure 4.24 : SAR-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs SAR réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie (Optimiseur RMSprop)	48
Figure 4.25 : SAR-Meilleur-Regr : Graphique de régression SAR réel vs. Prédit pour le meilleur modèle mono-sortie (Optimiseur RMSprop, $R^2 = 0.916$)	48
Figure 4.26 : MIMO-ActSigmoid-Regr-All : Graphiques de régression réel vs. Prédit pour chaque sortie (MIMO, Activation Sigmoid)	49

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les domaines d'étude des minéraux argileux	2
Tableau 1.2 : Structure du feuillet cristallin de la kaolinite	6
Tableau 1.3 : Risques des sols argileux	7
Tableau 1.4 : Les essais liées à l'érosion (Pham, 2008)	17
Tableau 3.1 : Relation et intervalles entre WI et TDS (FAO, 1985)	18
Tableau 3.2 : Relation et intervalles entre VBS et D (Santamarina, 2002)	19
Tableau 3.3 : Relation et intervalles entre SST et D (Mansir; Pisa., 2020)	19
Tableau 3.4 : Relation et intervalles entre Wp et SAR (FAO, 1985)	20
Tableau 3.5 : Relation et intervalles entre (A) et SAR (FAO, 1985)	20
Tableau 3.6 : Relation et intervalles entre Ip et SP (Dounane, 2021)	20
Tableau 3.7 : Intervalles de pourcentage des fines (GTR, 2000)	21
Tableau 3.8 : Intervalles de pourcentage des argiles (GTR, 2000)	21
Tableau 3.9 : base de données expérimentale	22
Tableau 4.1 : Analyse descriptive des données expérimentales	27
Tableau 4.2 : Relations empiriques pour la prévision de la dispersion	28
Tableau 4.3 : Résultats des Essais pour l'Indice de Dispersion (D)	34
Tableau 4.4 : Résultats des Essais pour SAR	36
Tableau 4.5 : Résultats des Essais pour TDS	38
Tableau 4.6 : Résultats des Essais pour SP	39

Table de matière

1. Chapitre I–Éléments de base sur la minéralogie des sols argileux

1.1 Introduction	1
1.2 Pourquoi s'intéresser aux argiles ?	1
1.2.1 Aspects liés au génie civil	1
1.3 Sol argileux et argile	2
1.3.1 Définition des sols argileux	2
1.3.2 Domaines d'étude des minéraux argileux	2
1.4 Structure des minéraux argileux	3
1.4.1 Principaux groupes des minéraux argileux	3
1.5 Pathologies des Sols Argileux	6
1.5.1 Caractérasation de l'érosion	6
1.5.2 Dispositifs expérimentaux	7
1.6 Conclusion	8

2. Chapitre II –Phénomène de la dispersion des sols argileux

2.1 Introduction	9
2.2 Origines du phénomène d'érosion	9
2.2.1 Les raisons de la faible résistance mécanique	9
2.2.2 Les raisons de l'augmentation de la perméabilité structurelle locale	9
2.3 Typologie de l'érosion et de la dispersion	10
2.3.1 La classification de l'érosion interne	10
2.3.1.1 Les phénomènes de transport	10
2.3.1.2 Les phénomènes de déracinement	10
2.3.2 La classification de l'érosion externe	11
2.3.2.1 L'érosion marine	11
2.3.2.2 L'érosion fluviale	11

2.3.2.3 Érosion due à la pluie	12
2.3.3 Classification du phénomène de dispersion	13
2.4 Définition et conception de la dispersion	13
2.4.1 Définition	13
2.4.2 Conception et applications	13
2.5 Mécanisme et facteur d'influence de la dispersion	14
2.5.1 Mécanisme de dispersion	14
2.5.2 Facteurs affectant la force répulsive	14
2.5.2.1 Valence calcique	14
2.5.2.2 La concentration élevée de cations	14
2.5.3 Facteurs affectant le phénomène de dispersion	14
2.5.3.1 Les facteurs liés aux eaux interstitielles	14
2.5.3.2 Les facteurs liés à la structure du sol	14
2.6.1 Méthodes d'évaluation de la dispersion du sol en laboratoire	15
2.6.1.1 Test du double densimètre	15
2.6.1.2 Essai à l'aiguille (Pinhole Test)	15
2.6.1.3 Essai d'émiettage (crumb test)	16
2.6.2 Essais et analyses complémentaires	16
2.6.2.1 Essai d'érosion et perméabilité	16
2.6.2.2 Analyse chimique	16
2.6.3 Evaluation sur le terrain	17
2.6.3.1 Inspection visuelle	17
2.6.3.2 Mesure de la résistance électrique	17
2.7 Conclusion	17
3. Chapitre III – Méthodologie et outils d'étude	
3.1 Introduction	18
3.2 Caractérisation de la dispersion et BDD	18
3.2.1 Relation entre WI (%) et TDS (g/l)	18
3.2.2 Relation entre VBS (cm ³) et D (%)	19

3.2.3 Relation entre SST (m ² /g) et D (%)	19
3.2.4 Relation entre W _p (%) et SAR (%)	19
3.2.5 Relation entre Activité et SAR (%)	20
3.2.6 Relation entre I _p (%) et SP (%)	20
3.2.7 Le pourcentage des fines	20
3.2.8 La teneur en argile	21
3.3 Objectif et méthodologie de travail	21
3.3.1 Le développement d'une analyse comparative de la capacité des sols argileux à se désintégrer, comprenant	26
3.3.2 L'application de la méthode de Taguchi	21
3.4 La base des données expérimentale	22
3.4.1 Classification des sols étudiés	22
3.4.1.1 Classification des pourcentages d'argile selon USCS	23
3.4.1.2 Classification des pourcentages des fines selon USCS	24
3.5 La méthode de Taguchi	24
3.5.1 Le rapport Signal/Bruit	25
3.6 Méthode d'ANN pour compléter le plan d'expérience de Taguchi	26
3.7 Conclusion	26
4. Chapitre IV – Résultats et interprétations	
4.1 Introduction	27
4.2 Analyse descriptive des données expérimentales	27
4.3 Analyse des corrélations	28
4.3.1 Méthodes indirectes de mesure de la dispersion (corrélations mathématiques)	28
4.4 Résultat et interprétation d'analyse de régression linéaire multiple	28
4.4.1 Analyse de régression : TDS (g/l) en fonction de fines, argile, wl, I _p , V _{bs} , S.S.T	29
4.4.2 Analyse de régression : SAR (%) en fonction de fines, argile, wl, I _p , V _{bs} , S.S.T	29
4.4.3 Analyse de régression : D (%) en fonction de fines, argile, wl, I _p , V _{bs} , S.S.T	30
4.4.4 Analyse de régression : SP (%) en fonction de fines, argile, wl, I _p , V _{bs} , S.S.T	31
4.5 Résultat et Interprétation de RNA	31

4.5.1 La prédiction de l'indice de dispersion D (%)	31
4.5.2 La prédiction de SAR (%)	32
4.5.3 La prédiction de SP (%)	33
4.5.4 La prédiction de TDS (g/l)	34
4.6 Résultat et Interprétation de Taguchi	34
4.6.1 Conception orthogonale de Taguchi L ₈ pour D (%)	34
4.6.1.1 Analyse de Taguchi L ₂₇ pour l'estimation du D (%)	35
4.6.2 Conception orthogonale de Taguchi L ₈ pour TDS (g/l)	37
4.6.2.1 Analyse de Taguchi L ₂₇ pour l'estimation des Solides Dissous Totaux	38
4.6.2 Conception orthogonale de Taguchi L ₂₇ pour Sp (%)	39
4.6.2.1 Analyse de Taguchi L ₂₇ pour l'estimation de pourcentage de sodium	39
4.7 Autres résultats	41
4.7.1. Analyse de Corrélation de Pearson	41
4.7.1.1 Fortes corrélations positives entre les limites d'Atterberg et la teneur en fines/argile	42
4.7.1.2 Corrélations des variables d'entrée avec les variables de sortie	42
4.7.2 Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du TDS (Modèles Mono-Sortie)	44
4.7.3 Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du Pourcentage de Dispersion (D (%)) (Modèles Mono-Sortie)	45
4.7.4. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du Pourcentage de Sodium Échangeable (SP) (Modèles Mono-Sortie).	46
4.7.5. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du Taux d'Adsorption du Sodium (SAR) (Modèles Mono-Sortie)	47
4.7.6. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour le Modèle Multi-Sortie (MIMO)	48
4.8 Conclusion	49
Conclusion générale	50
Références bibliographie	52

1. Chapitre I–ELEMENTS DE BASE SUR LA MINERALOGIE DES SOLS ARGILEUX

1.1 Introduction

Après un long processus de décomposition chimique et physique des roches. Nous obtenons le sol, qui est un élément très important dans les deux environnements (naturel ou construit). On en trouve donc différents types, dont la terre argileuse qui se distingue par la taille très réduite de ses particules (moins de 2 micromètres) et sa richesse en minéraux argileux tels que : Kaolinite, illite et smectite

Ces minéraux sont disposés en fines couches appelées phyllithes (phyllo silicates), ce qui explique leurs propriétés uniques qui résident dans : Plasticité et grande capacité à absorber l'eau en plus de leur comportement volumétrique complexe tel qu'il apparaît dans les phénomènes de retrait et de gonflement et de la dispersion. Si l'on considère le domaine de la géotechnique.

Dans ce chapitre de ce projet de fin d'études l'étude se concentre sur l'analyse des sols argileux d'un point de vue géotechnique. Elle permet d'expliquer le comportement du sol et la connaissance exacte de la composition minérale sous l'effet des changements de charges ou de l'environnement. Après une bonne compréhension de l'arrangement structural des minéraux argileux. Nous pouvons prévoir plusieurs phénomènes tels que le gonflement, le retrait et la rétention d'eau et la dispersion. Parce que c'est l'un des facteurs qui affectent directement la fondation et sa conception avec la gestion du risque structural.

L'objectif de ce chapitre est de relier la structure minéralogique des sols argileux et leur changement de comportement avec l'évolution des conditions environnementales et mécaniques afin de fournir une base scientifique solide pour aider à la fois les ingénieurs et les chercheurs, ce qui contribue à la conception de meilleures structures avec des mesures préventives efficaces pour réduire voir éviter le risque de la dispersion et de l'érosion interne autour des ouvrages hydrauliques.

1.2 Pourquoi s'intéresser aux argiles ?

La réponse à la question est simple, car les sols argileux sont abondants dans le sol avec différents types et caractéristiques, ce qui leur permet d'occuper une grande place dans la recherche scientifique dans plusieurs domaines tels que l'agriculture, l'industrie environnementale..... et en particulier le génie civil, qui occupent les premiers rangs en raison de leur lien avec le facteur humain.

Cette partie nous aide à comprendre les mécanismes et les propriétés des sols argileux afin de pouvoir contrôler leur comportement et leurs propriétés et par la suite leur incidences sur le comportement dispersif et le phénomène d'érosion sujet de ce projet de fin d'études.

1.2.1 Aspects liés au génie civil

La présence d'argile dans le sol ne peut avoir de conséquences favorables en raison de sa composition. Sa présence signifie qu'elle peut se rétracter ou se gonfler et/ou dispersé en fonction de son taux d'humidité, ce qui est à l'origine de conséquences néfastes auxquelles il faut remédier avant qu'une catastrophe ne se produise. (Velde, 1995)

1.3 Sol argileux et argile

1.3.1 Définition des sols argileux

L'argile est un type de roche composé de plusieurs minéraux qui se caractérise par sa précision et ses différentes formes, généralement plates. Les composants de l'argile sont nombreux : silice, des carbonatés, des hydroxydes cristallisés ou amorphes et des oxydes, dont les plus importants sont appelés minéraux argileux.

En termes simples, la structure cristalline joue un rôle très important dans la détermination des propriétés uniques de chaque minéral. En génie civil, nous utilisons le terme « argile » pour faire référence aux sols argileux qui contiennent des minéraux argileux et d'autres minéraux. Toutes les particules fines ne sont pas considérées comme de l'argile. Par exemple, le sable fin (limon) contenant des particules fines n'est pas considéré comme de l'argile cohésive, car il se comporte comme un sol granulaire. En raison de son état, l'argile a été utilisée dans des projets à grande échelle. (Rahal, 2020)

1.3.2 Domaines d'étude des minéraux argileux

Tableau 1.1 : Les domaines d'étude des minéraux argileux

Les géologues	les argiles apportent des informations sur les conditions environnementales	
Les ingénieurs pétroliers	déduisent les conditions thermiques des gisements	
Les ingénieurs civils	s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matériel industriel	

<p>Les agronomes</p>	<p>analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants</p>	
----------------------	---	--

1.4 Structure des minéraux argileux

Les matériaux argileux contiennent de petites molécules dont la partie perméable est entièrement ou partiellement occupée par une liaison chimique. Après l'union initiale des feuilles, ces particules se forment et sont caractérisées par leur capacité d'échange cationique, leur surface spécifique et leur densité de charge de surface.

L'aluminium (centre octaédrique) et le silicium (centre tétraédrique) sont deux éléments de base entourés d'oxygène et d'hydroxyles en plus du réseau cristallin de base. Combinés, ils forment une couche symétrique. (Figure 1.1).

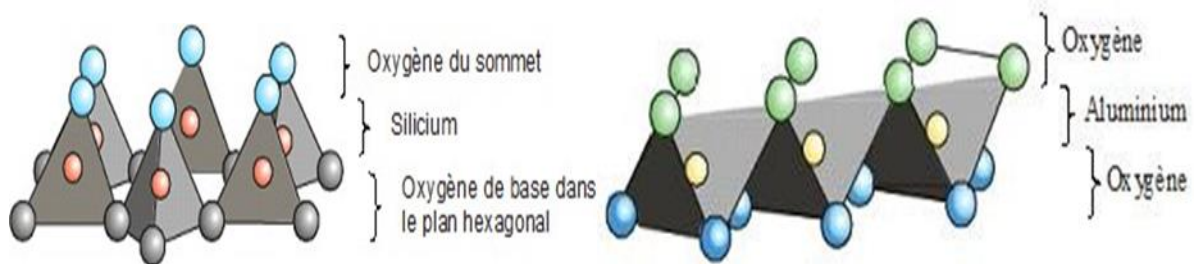


Figure 1.1 : Couche tétraédrique (siliceuse) Couche octaédrique (alumineuse)
(Belarbi, 2015)

1.4.1 Principaux groupes des minéraux argileux

L'argile est divisée en trois grandes familles, la kaolinite, l'illite et la smectite, en fonction de la composition chimique du matériau argileux. Cette structure est basée sur de petites particules d'argile qui contiennent des pores, soit complètement soit partiellement rempli d'une solution chimique, et ces particules contiennent des feuilles basiques caractérisées par la capacité d'échanger des cations et leur structure affecte l'apparition du phénomène de gonflement après rupture des liaisons entre les feuilles lors de l'absorption de l'eau. Cette étude vise à comprendre ces liaisons afin de pouvoir comprendre les comportements de l'argile lorsqu'elle est hydratée.

Tableau 1.2 : Structure du feuillet cristallin de la kaolinite.

Tétraédrique	Octaédrique
Constitué de quadrilatères reliés entre eux et formant une couche plane	Il est constitué d'octaèdres reliés entre eux et formant une couche plane.
Chaque tétraèdre a un atome de silicium en son centre	Le centre de chaque octaèdre est occupé par un atome d'aluminium
Les atomes d'oxygène occupent le	Les atomes d'oxygène ou les groupes

quadrilatère

hydroxyles occupent les huit coins.

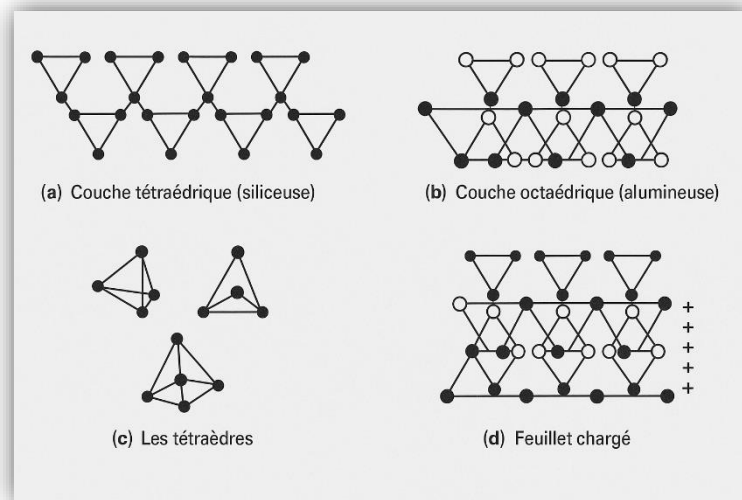


Figure 1.4.2 : (a) : Couche tétraédrique (siliceuse) ; (b) : Couche octaédrique (alumineuse) ; (c) : Les tétraèdres ; (d) : Feuillet chargé (Eslinger et Peaver, 1988)

○ **Illites**

Le terme « Elite » a été créé par Grim, Bray et Bradley en (1937) et tire son nom de l'État de l'Illinois aux États-Unis. L'illite est le minéral argileux naturel le plus courant. Pour quatre ions de silicium, moins d'un ion est remplacé par de l'aluminium Al, ce qui entraîne une diminution de la quantité d'alcali entre les feuilles. Les ions d'aluminium Al dans la structure octaédrique peuvent également être remplacés par des ions de magnésium Mg et des ions de fer (Fe^{2+} et Fe^{3+}).

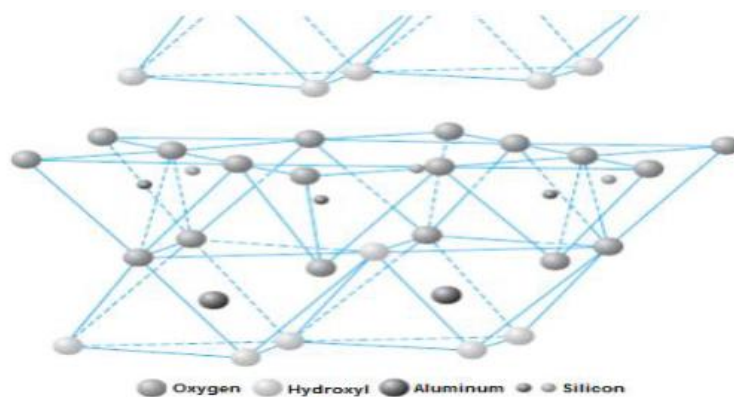


Figure 1.3 : Structure de l'illite (Belarbi, 2015).

○ **Kaolinite**

Le kaolin est un nom inspiré d'une colline chinoise où ce produit est extrait depuis des générations. Le terme « kaolinite » a été créé en 1867 par Johnson et Blake. Des années

plus tard, Grunow a défini sa structure en 1932, et en 1946, elle a été révisée par Brindley et Robinson. La feuille de kaolinite se compose de deux couches.

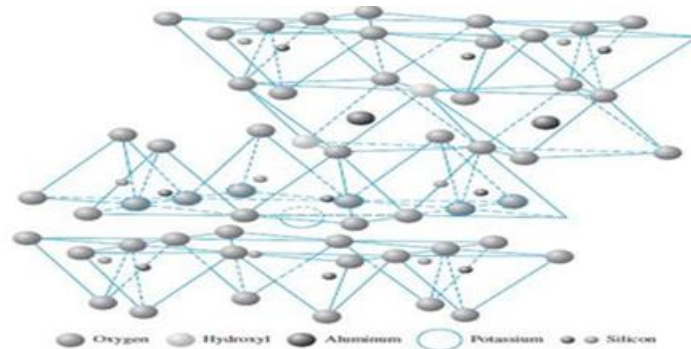


Figure 1.4: Structure de la Kaolinite (Belarbi, 2015).

- **Micas**

Mauguin (1928) et Pauling (1930) ont défini la structure du mica comme étant constituée d'une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques. Le mica varie en fonction des ions hexacoordinés qui composent la couche octaédrique. Dans la couche tétraédrique, il y a un déficit de charge à l'intérieur de la couche parce que dans chaque tétraèdre, le silicium Si occupe trois des quatre sites et l'aluminium Al le site 4. Pour compenser le déficit de charge, on utilise entre les feuilles des ions de grande taille, comme les ions potassium K qui se lient à elles et les empêchent de glisser l'une sur l'autre.

- **Montmorillonite**

C'est Damour et Salvétat qui ont proposé le terme « Montmorillonite », attribué à la ville de Montmorillon (Vienne, France), qui est similaire à des minéraux tels que le mica avec des liaisons différentes qui sont plus faibles entre leurs feuilles et leur faiblesse provoque l'entrée d'eau entre les feuilles, ce qui modifie à son tour l'ordre périodique, qui devient d'environ 14 angströms.

Dans les tétraèdres, le silicium n'est pas remplacé par l'aluminium, mais dans les octaèdres, l'aluminium est partiellement remplacé par le magnésium, ce qui entraîne un manque de charge. Pour compenser la charge, on utilise des ions sodium Na et calcium Ca, qui sont interchangeables et présents entre les feuilles. (Belarbi, 2015).

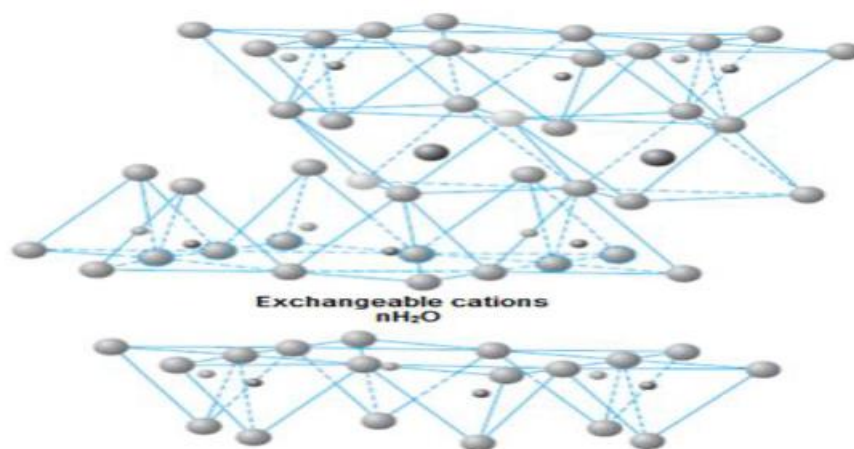


Figure 1.5: Structure de la montmorillonite (Belarbi, 2015).

1.5 Pathologies des Sols Argileux

Phénomènes dangereux L'ingénierie géotechnique est très présente car les sols argileux provoquent l'instabilité des structures. Des mesures de stabilisation doivent donc être prises en fonction de leur type afin de garantir la sécurité des projets de construction. Quant au phénomène d'érosion, la dégradation du sol sous l'effet de plusieurs facteurs tels que l'eau, le vent et la glace, il entraîne une diminution de la capacité portante du sol et son instabilité, ce qui constitue un risque pour l'instabilité des installations qui s'y trouvent. (Pham, 2008).

Tableau 1.2 : Risques des sols argileux

Phénomène	Cause	Effets sur les constructions
Gonflement et retrait	Variation de la teneur en eau	Fissures, tassement irrégulier
Glissement de terrain	Saturation en eau ou érosion	Dégâts aux infrastructures voisines
Tassement excessif	Surcharges ou changements environnementaux	Affaissement, fissuration des fondations

1.5.1 CARACTERISATION DE L'EROSION

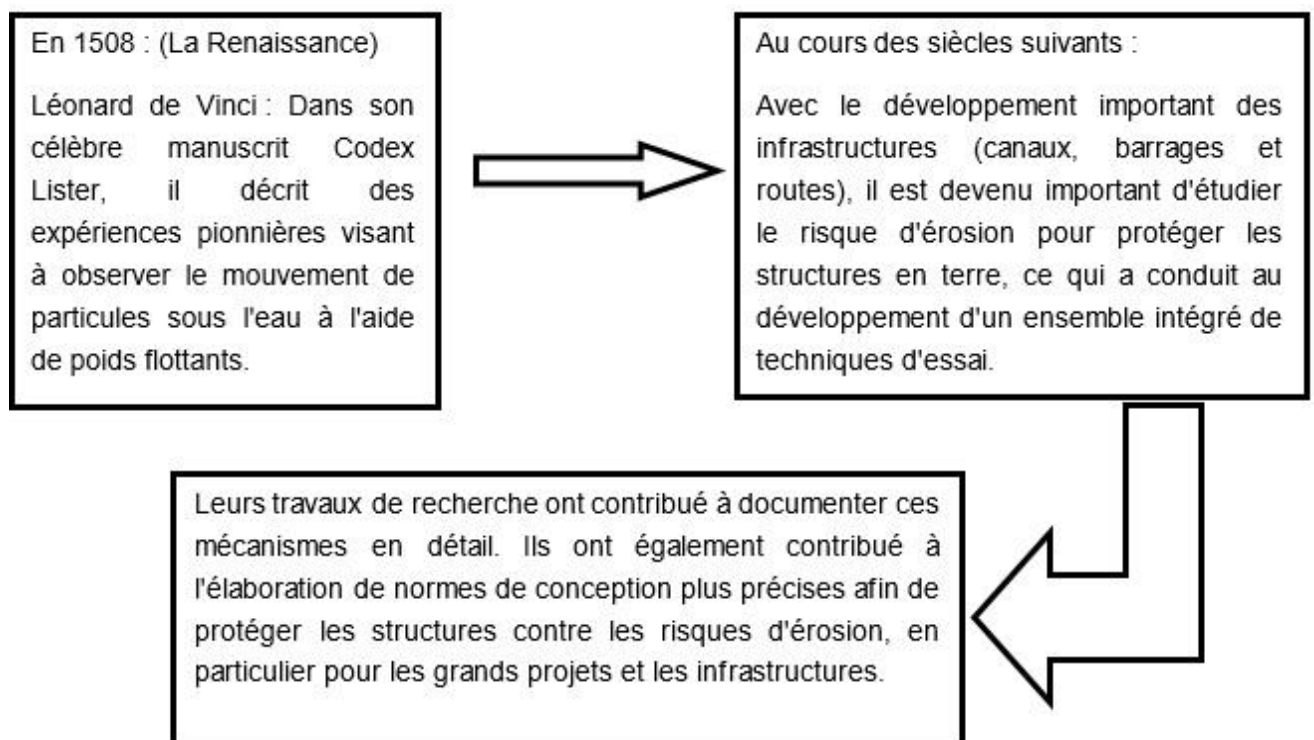


Figure 1.7 : Schéma de l'évolution d'étude de l'érosion des sols.

1.5.2 Dispositifs expérimentaux

Tableau 1.3 : Les essais liés à l'érosion (Pham ,2008).

Type d'essai	Description	Variabes clés	Résultats principaux	Applications	Limitations
Essai en canal hydraulique	Mesure de l'érosion de surface sous écoulement	Vitesse d'écoulement, type de sol, teneur en argile	- τ entre 0.7-3 Pa - Plasticité cruciale pour les sols fins	Évaluation des barrages et pentes	Ne simule pas parfaitement les conditions naturelles
Essai à cylindre rotatif	Mesure de l'érosion par rotation dans un fluide	Vitesse de rotation, viscosité du fluide	- τ similaire à l'essai en canal - Taux d'érosion plus faible qu'en canal	Comparaison sols remaniés/intacts	Difficulté à mesurer τ_s précisément
Jet Erosion Test (JET)	Érosion de surface par jet d'eau concentré	Pression du jet, distance de la buse	- Relation linéaire entre τ et vitesse - Indice de jet (J_i) pour classification	Évaluation des barrages et ouvrages hydrauliques	Limité pour mesurer τ_s de surface
Simulateur de pluie	Étude de l'érosion par pluie artificielle	Intensité pluviale, durée d'exposition	- Érosion accrue avec l'intensité - Impact de la structure naturelle	Évaluation du ruissellement agricole	Simplification excessive des vraies conditions pluviales
Hole Erosion Test (HET)	Mesure de l'érosion interne via un trou préformé	Gradient hydraulique, diamètre du trou	- Détection de deux seuils critiques (Suffusion/Re-nard) - Supériorité des argiles intactes	Analyse des noyaux de barrages	Complexité de modéliser l'évolution du trou
Essai triaxial d'érosion	Étude de l'érosion sous confinement	Pression de confinement, composition du fluide	- Limon plus sensible à l'eau que l'argile - Effet des ions sur le taux	Conception d'ouvrages sous pression	Difficulté à reproduire les conditions in situ

1.6 Conclusion

Ce chapitre comprend l'étude de la structure des sols argileux, comme leur comportement, leurs principaux problèmes et leur composition minérale, qui affecte grandement leurs propriétés mécaniques et physiques. Il explique également les maladies qui y sont liées, comme la fissuration, ce qui souligne l'importance de l'étude de sa composition minérale. Il montre l'influence de l'interaction entre l'eau et le minéral argileux sur le caractère dispersif de ces sols et l'intérêt de l'étude entamée dans ce projet de fin d'étude. Tout cela nous aide à mieux comprendre le phénomène en question afin de réduire les pathologies et la durabilité des installations nécessaires.

2. Chapitre II –PHENOMENE DE LA DISPERSION DES SOLS ARGILEUX

2.1 Introduction

Le sol argileux joue un rôle très important dans des domaines divers et variés, notamment dans le domaine de la construction en raison de ses propriétés uniques. Cependant, lorsqu'il est exposé à d'énormes quantités d'eau, son comportement devient problématique. Le phénomène de dispersion dans les sols argileux est un phénomène très complexe qui peut entraîner de graves conséquences néfastes telles que le compactage, l'érosion interne, la dégradation des terres et la déstabilisation structurelle. Dans la plupart des études, nous constatons que ce phénomène se retrouve en abondance dans les sols contenant des niveaux élevés de sodium dissipatif.

Comprendre le phénomène de dispersion dans les sols argileux est très important et nécessaire pour prévenir les risques d'érosion. Il est donc nécessaire d'étudier en profondeur ce sol en termes de propriétés chimiques et physiques et des méthodes les plus récentes pour le stabiliser ce qui donne par la suite à l'ingénieur un outil intéressant pour la prévision, le calcul, l'observation et surtout analyser le phénomène de dispersion.

2.2 Origines du phénomène d'érosion

Les facteurs qui provoquent l'érosion affectent la détérioration de l'isolation structurelle car il y a une augmentation de la perméabilité générale ou locale de l'installation, ou par l'affaiblissement de la résistance mécanique.

Deux fonctions fondamentales doivent donc être assurées une bonne résistance mécanique et une imperméabilité structurelle.

Nous pouvons donc classer les origines du phénomène de l'érosion en deux groupes fondamentaux :

- Le premier groupe comprend les éléments qui affectent et affaiblissent la résistance à la l'érosion.
- Le deuxième groupe est lié aux fuites excessives résultant de la détérioration de l'imperméabilité structurelle.

2.2.1 Les raisons de la faible résistance mécanique

- l'utilisation de matériaux dispersifs tels que le sable fin et le limon
- L'absence de filtre
- la faible pression et le placement d'un filtre inapproprié

2.2.2 Augmentation de la perméabilité structurelle locale

- les dommages à l'isolation, tels que la fissuration hydraulique
- L'isolation insuffisante en raison d'un faible contact avec l'environnement ou la sélection de matériaux médiocres
- La présence de défauts géologiques ou de fissures qui provoquent le cheminement de l'écoulement de l'eau. (Pham, 2008).

2.3 Typologie de l'érosion et de la dispersion

Afin de réaliser une étude détaillée pour comprendre les phénomènes qui conduisent à l'effondrement des structures et des installations, dans cette section nous nous limiterons à classer les types de l'érosion.

2.3.1 La classification de l'érosion interne

Les deux principaux facteurs de développement de l'érosion interne sont le transport et l'arrachage des particules.

2.3.1.1 Les phénomènes de transport

- ❖ **Les infiltrations** : entraînent une érosion structurelle locale et des effondrements dus au déplacement et à la migration de fines particules de sol.
- ❖ **Le creusement de tunnels hydrauliques** : est une érosion d'intensité croissante et d'effondrement due à l'écoulement massif d'eau à travers le chemin d'écoulement préféré. (Figure 2.1).

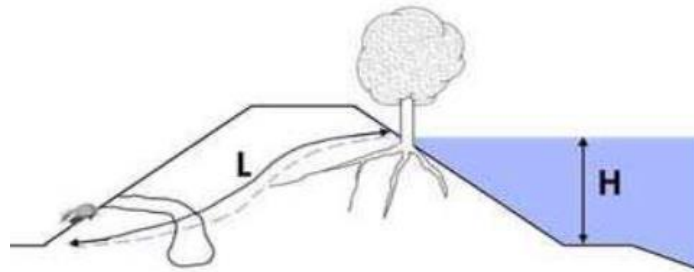


Figure 2.1: Phénomène de renard (Pham ,2008)

2.3.1.2 Les phénomènes de déracinement

Selon (Pham, 2008) des forces mécaniques ou autres peuvent affecter un groupe de particules du sol, conduisant au phénomène de conviction, où l'on retrouve six types principaux :

- **La traction** : se produit en raison de l'écoulement des fluides, ce qui conduit au déracinement des particules des canaux et des tunnels.
- **La décharge** : est le déracinement soudain d'une masse de sol menacée par la pression de l'eau.
- **La dissolution** : affaiblit les propriétés mécaniques du sol en raison de la décomposition thermique ou chimique de ses composants.
- **Gonflement** : Le sol ameubli perd son équilibre et sa cohésion, en devenant des réactions comme un liquide à cause du dépassement du gradient hydraulique de son poids
- **L'érosion régressive** : L'érosion régressive est le phénomène d'arrachement des particules de sol une à une. Sous l'effet de la pression du fluide qui percole à travers le remblai (Figure 2.2).



Figure 2.2 : Le phénomène de l'érosion régressive (Site web 01)

- **La désintégration des agglomérats** : la désintégration des feuilles et des particules du sol argileux à cause des interactions mécaniques et chimiques.

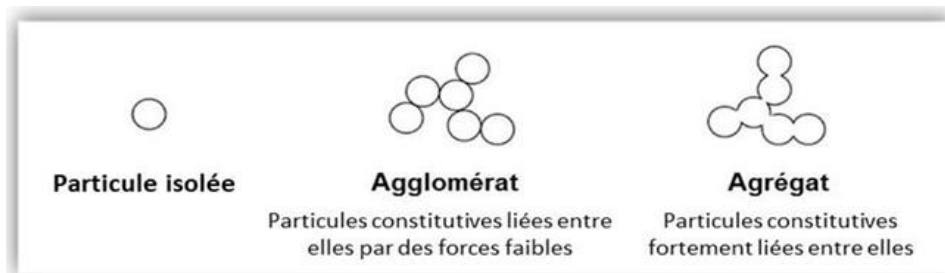


Figure 2.3 : Le phénomène de la désintégration des feuilles et des particules du sol argileux (Site web 02)

2.3.2 La classification de l'érosion externe

Ce phénomène se produit en raison de facteurs naturels externes tels que la sécheresse, l'eau, etc., qui conduisent à la désintégration de la surface en transportant et en déracinant des particules. Dans cette partie nous nous intéressons à la description de l'érosion résultant de l'eau, qui à son tour se divise en trois catégories :

2.3.2.1 L'érosion marine

Les vagues et les courants propagent les vagues : les vagues se propagent en différentes vagues selon le terrain sous-marin. Si la pente est raide, des ondes sont générées et se propagent dans la direction opposée, ce qui crée des contraintes, des compressions et une augmentation de la compressibilité de l'eau résultant du phénomène de cavitation, où l'on retrouve deux types de pressions

- La surpression interstitielle due à la collision des vagues
- La charge hydrostatique, qui est directement liée au niveau d'eau.

2.3.2.2 L'érosion fluviale

Les vagues résultant des mouvements des bateaux : Les petites vagues et les mouvements des bateaux sont parmi les raisons du rebond de l'eau sur les berges des rivières, ce qui entraîne une érosion accélérée et un glissement du fond dans l'eau avec l'aide de plusieurs facteurs, notamment la vitesse du véhicule nautique et la nature du sol sur la berge de la rivière.

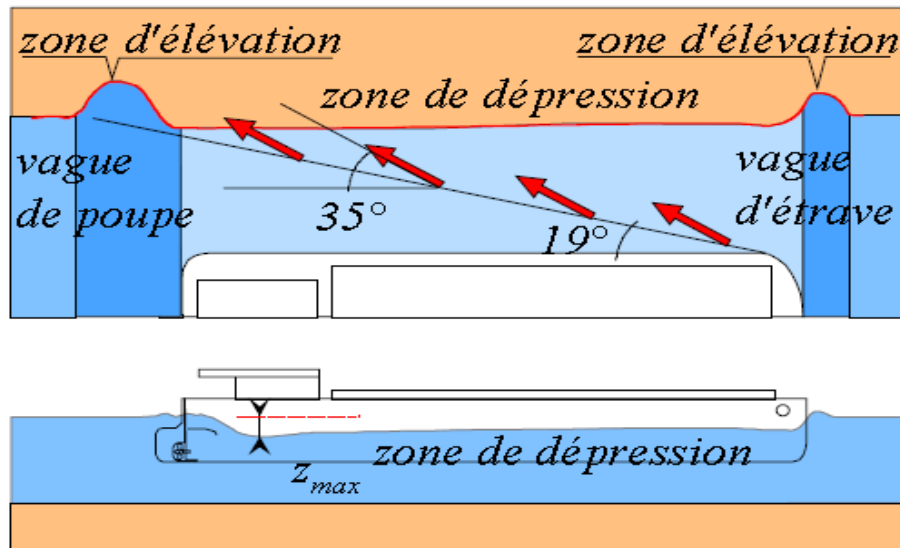


Figure 2.4 : Schéma simplifié des différents types de vagues générées par un navire (Pham, 2008).

- **Marées** : Les marées sont caractérisées par de longues périodes de temps par rapport au mouvement des bateaux, ce qui entraîne une cavitation ou une diminution de la pression, ce qui augmente la compressibilité de l'eau

MARÉES HAUTES ET MARÉES BASSES

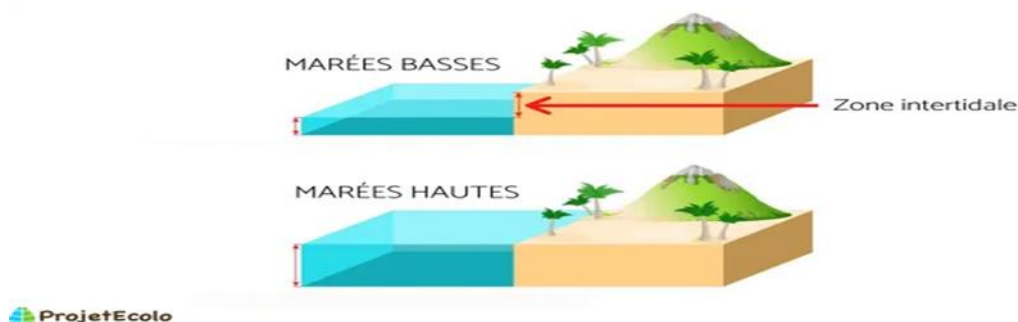


Figure 2.5 : Schéma représente les deux types de marées (Site web 03).

- **Érosion à proximité des ouvrages** : Les ouvrages rétrécissent le champ d'eau, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse du courant d'eau à l'entrée, provoquant des tourbillons et des perturbations qui déracinent les matériaux du fond.

2.3.2.3 Érosion due à la pluie

- **Le ruissellement de surface** : est l'écoulement de l'eau à la surface du sol, créant une force qui déracine les particules du sol.
- **Collision** : Les gouttes de pluie provoquent une force intentionnelle au niveau du sol, ce qui entraîne le transfert de particules de sol les unes aux autres de quelques centimètres (le phénomène de rebond) où les particules fines transportées se fixent aux particules un peu plus grosses et elles travaillent à bloquer les pores, ce qui fait que le sol perd sa capacité d'absorption.

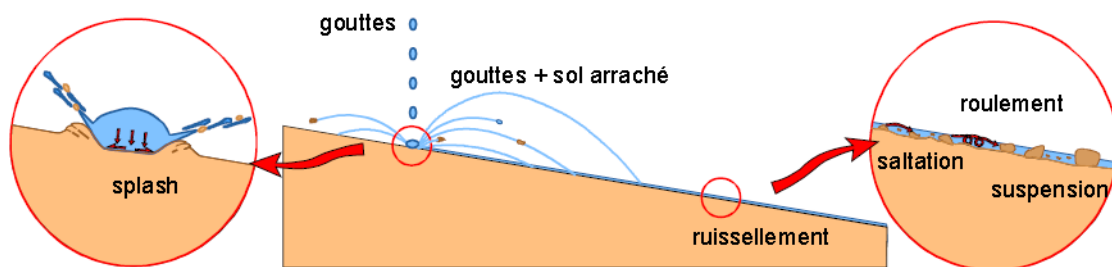


Figure 2.6 : Les deux mécanismes de l'érosion pluviale (Eslinger et Peaver, 1988).

2.3.3 Classification du phénomène de dispersion

La dispersion joue un rôle très essentiel dans l'érosion, car nous pouvons connaître la dispersion du sol en connaissant la capacité de ses particules à se désintégrer. Nous pouvons classer le phénomène de dispersion dans le sol à travers la minéralogie argileuse, où nous trouvons deux types de particules d'argile qui forment le sol argileux :

L'octhydro est un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène.

Il s'agit d'un atome d'aluminium ou de magnésium entouré de groupes hydroxyles.

Tous les principaux types d'argiles ont été mentionnés dans le premier chapitre de ce projet de fin d'études.

Enfin, cette classification contribue à comprendre et à connaître le mécanisme de dispersion et d'érosion dans le sol, ce qui nous aide à développer et à mettre au point des tests qui évaluent les risques d'effondrement des structures et installations. (Bouziane, 2014)

2.4 Définition et conception de la dispersion

2.4.1 Définition

La dispersion est un phénomène d'érosion interne qui se produit dans les sols argileux et les sols sensibles à l'eau, où les particules fines se séparent les unes des autres et sont séparées par l'eau.

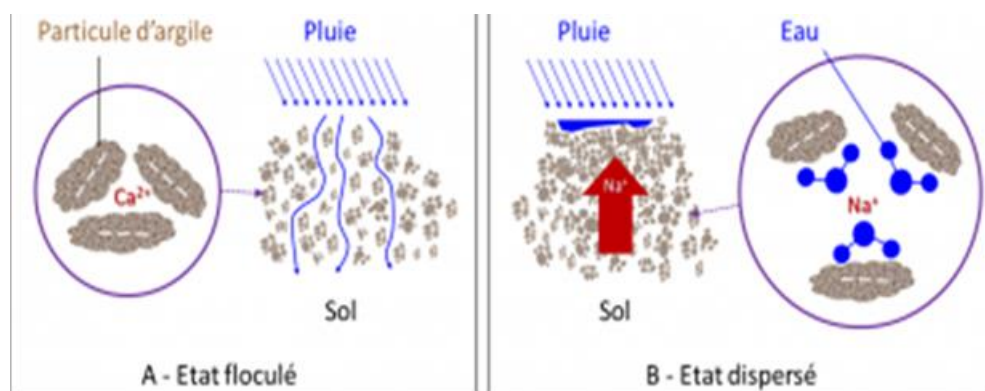


Figure 2.7 : Effet du sodium sur la structure du sol (Site web 04).

2.4.2 Conception et applications

- **Dispersion des contraintes** : la répartition des charges est très importante pour éviter la concentration des contraintes, comme dans les barrages et les ponts.

- **Les matériaux dispersés** : sont des combinaisons de particules solides et d'une phase liquide pour empêcher l'agglomération et le compactage.
- **Gestion des risques naturels** : Nous analysons les hydrocarbures émis, par exemple, lors de travaux de construction, pour éviter leur propagation dans le sol.
- **Outils statistiques** : Il faut s'assurer que les matériaux sont conformes aux spécifications, en tenant compte des indicateurs de dispersion. Ceux-ci sont similaires. (Bernard, 2003)

2.5 Mécanisme et facteur d'influence de la dispersion

2.5.1 Mécanisme de dispersion

Le phénomène de dispersion se produit dans un sol argileux lorsque deux particules d'argile se rapprochent et se collent ensemble. Si la proximité est suffisante, elle conduit à une force répulsive. Nous le mesurons par rapport à la force d'attraction, où plus la force de répulsion n'est grande que la force d'attraction, plus la dispersion se produit dans le sol.

2.5.2 Facteurs affectant la force répulsive

2.5.2.1 Valence calcique

Un processus d'échange a lieu entre les cations sodium et les cations potassium pour une double couche plus petite. Si la force répulsive est plus petite et la concentration électronique plus faible.

2.5.2.2 La concentration élevée de cations

Facilite le dépassement de la charge négative dans le sol argileux et de la concentration élevée de sels dissous dans l'eau du sol, ce qui conduit à une faible double couche donc la force de dispersion est faible.

2.5.3 Facteurs affectant le phénomène de dispersion

Dans la plupart des conditions naturelles, la présence de sodium dans le système pédologique provoque le phénomène de dispersion, mais il existe plusieurs autres facteurs qui jouent un rôle fondamental, tels que le degré d'acidité du sol, la concentration en sels et la teneur en eau. Il existe deux types ou catégories de facteurs que nous pouvons mentionner

2.5.3.1 Les facteurs liés aux eaux interstitielles

- Le degré d'acidité (pH) : Le PH de l'eau dépend à sa concentration en ion H⁺ il a aussi une influence sur la dispersion du sol par la modification de chargement électrique des feuillets d'argile.
- La concentration en sel : la composition chimique de l'eau poreuse joue un rôle dans la dispersion, car il affecte la géométrie de la double couche diffusée. Plus la concentration en sel est élevée, plus la double couche est fine donc dispersion est faible.

2.5.3.2 Les facteurs liés à la structure du sol

- **la disposition des feuilles d'argile** : peuvent-nous expliquer la disposition des feuilles différentes ou similaires, le phénomène de dispersion spontanée du sol argileux.
- **Le type et la nature des minéraux argileux** : la composition minérale à une relation directe avec la dispersion du sol, car le sol contenant de la montmorillonite est classé comme sol dispersé, tandis que le sol contenant des minéraux de kaolinite est classé comme non dispersé.
- **Le pourcentage de sodium** : Le sodium est considéré comme un facteur de durcissement et un catalyseur majeur car il contient une charge ionique positive, ce qui augmente la répulsion entre les particules du sol argileux. (Bouziane, 2014).

2.6 Evaluation et caractérisation de la dispersion

2.6.1 Méthodes d'évaluation de la dispersion du sol en laboratoire

2.6.1.1 Test du double densimètre

On ajoute un dispersant chimique, l'hexamétaphosphate et nous comparons la gradation granulaire avec et sans cette substance. Si la différence dans le pourcentage de particules fines est supérieure à 15 %, on conclut que le sol affecté est dispersé.



Figure 2.8 : Appareillage complet pour essais de sédimentométrie (norme NF-P94-057)

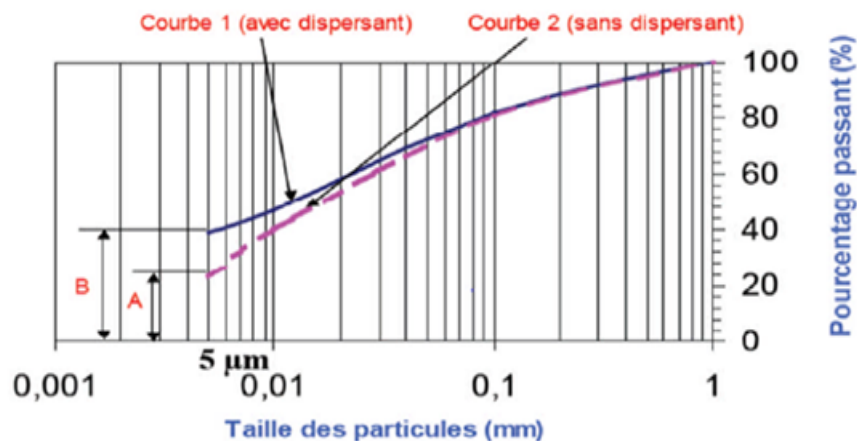


Figure 2.9 : Courbes granulométriques de l'essai de double sédimentation. (Bouziane, 2014)

2.6.1.2 Essai à l'aiguille (Pinhole Test)

Le « Pinhole Test » est une méthode qui permet d'obtenir des mesures qualitatives directes de l'érodabilité interne des sols argileux. Ces tests ne sont pas applicables aux sols qui ont moins de 12% de fines (< 5 µm) et dont la plasticité est inférieure ou égale à 4. Il s'agit de former un canal à l'aide d'une aiguille dans un échantillon d'argile, compacté à 95% de l'optimum Proctor, et d'exercer différentes pressions d'eau à l'intérieur du canal pour simuler des écoulements internes. A la sortie du dispositif, la teinte de l'eau prélevée, le débit de sortie et la taille du canal en fin de test sont analysées. Ces données permettront de déterminer la dispersion d'un sol selon la classification proposée dans la norme.

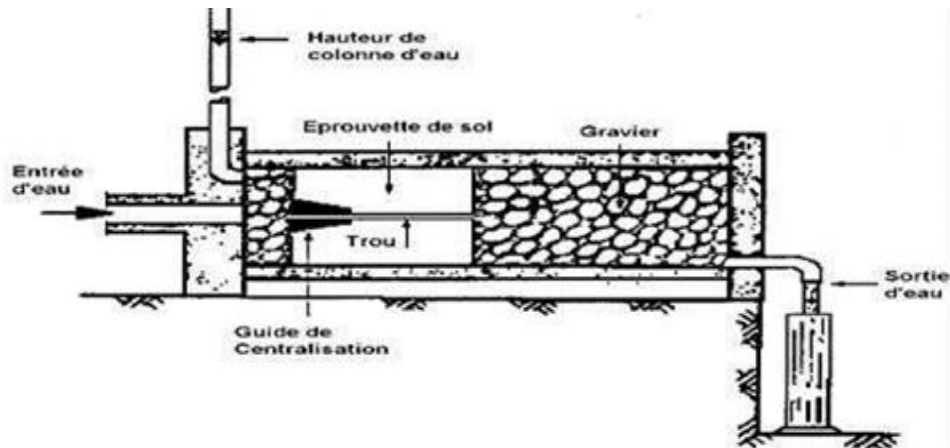


Figure 2.10 : Schéma de principe de Pinhole Test (ASTM D4647-93).

2.6.1.3 Essai d'émiettement (crumb test)

C'est un essai pour mesurer la dispersion du sol, Il a été développé à l'origine par Emerson en 1964. Ensuite l'essai est entré dans la norme ASTM D6572-00. Le Crumb test consiste à immerger un cube de sol remanié de petite taille (15 mm de côté) dans un volume d'eau distillée beaucoup plus important (250 ml). L'échantillon est posé sur le fond d'un récipient cylindrique, à côté du bord. La tendance des particules du sol à se disperser en suspension colloïdale est estimée par observation du nuage formé à 2 minutes, 1 heure et 6 heures. Selon le degré de turbidité du nuage.

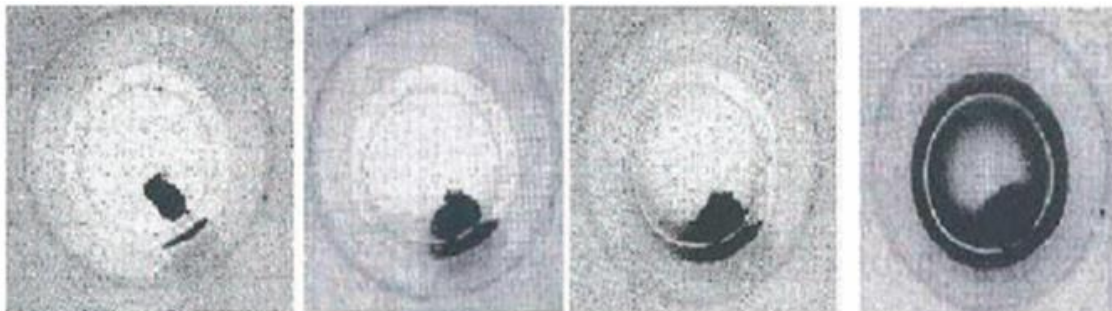


Figure 2.11 : Essais typiques de « Crumb test », a- niveau 1 : non dispersif, b)-niveau 2 : intermédiaire, c)-niveau 3 : dispersif, d- niveau 4 : très dispersif (ASTM D6572-00)

2.6.2 Essais et analyses complémentaires

2.6.2.1 Essai d'érosion et perméabilité

Nous mesurons la vitesse d'impact et évaluons la résistance à l'érosion interne.

2.6.2.2 Analyse chimique

Nous mesurons le pourcentage de sodium échangeable (ESP) si l'ESP > 15, on dit que le sol étudié est un sol dispersé. Pendant les années 1960, des chercheurs australiens ont reconnu la présence de sodium échangeable comme principal un facteur contributif chimique au comportement de l'argile dispersif

$$ESP = \frac{\text{Exchangeable sodium}}{CCE} \times 100 \quad (2.1)$$

CCE : Capacité d'échange cationique.

Tableau 2.1 : Classification de la dispersion des sols (Knodel, 1991)

ESP	Degré de dispersion
< 7	Non dispersif
7 à 10	Intermédiaire
> 10	Dispersif

2.6.3 Evaluation sur le terrain

2.6.3.1 Inspection visuelle

La présence d'effondrements locaux et La présence de fuites d'argile

2.6.3.2 Mesure de la résistance électrique

Si le sol étudié est dispersé, la résistance électrique sera faible.

(Bouziane, 2014 ; Belarbi, 2015 ; Pham, 2008 ; Knodel, 1991).

2.7 Conclusion :

Le phénomène de dispersion des sols argileux est un phénomène dangereux et destructeur malgré qu'il soit quelque peu silencieux, mais il nécessite une évaluation et une classification précise dans l'étude géologique et technique des sols et des structures terrestres pour prévenir les catastrophes.

Par conséquent, une étude minutieuse et un bon examen des méthodes et mécanismes de dispersion sont nécessaires afin de développer des techniques d'atténuation appropriées qui garantissent la sécurité des structures et des ouvrages en terre. Le contrôle du phénomène de dispersion des sols argileux dépend d'un ensemble de normes et de techniques préventives nécessaires en terre et les préviennent en connaissant les causes primaires.

La dispersion est caractérisée par les paramètres suivant : SAR (%) ; SP(%) ; TDS (g/l) et D(%). Ces paramètres font l'objet des chapitres suivants sur la base de quelques caractéristiques physique et chimiques facilement mesurable voir identification simple.

3. Chapitre III –METHODOLOGIE ET OUTILS D'ETUDE

3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'approfondir l'étude des mécanismes du phénomène de dispersion dans les sols argileux, car l'objectif principal est d'évaluer la dispersion du sol pour les échantillons étudiés en s'appuyant sur différentes méthodes et mécanismes, où nous pouvons diviser ce chapitre en plusieurs parties, à savoir la description détaillée de la dispersion des sols avec la création (collecte et recensement) d'une base de données. Une classification systématique des données du groupe de sol étudié en fonction de ses propriétés chimiques et physiques mention et classification des différentes méthodes dans l'optimisation des coefficients expérimentaux avec l'attribution d'une méthode. Ce chapitre nous aide à combiner l'expérience et l'analyse tout en apportant des solutions pratiques aux problèmes de stabilité des sols vis-à-vis de la dispersion.

3.2 Caractérisation de la dispersion et BDD

Nous allons aborder les fondements de notre étude : comment la dispersion des sols est définie et mesurée, et comment une base de données (BDD) a été structurée pour compiler les informations essentielles. Cette partie établit des relations empiriques et des corrélations clés entre les propriétés physico-chimiques des sols (comme le type d'argile) et des indicateurs environnementaux tels que (TDS) et (SAR). En se basant sur des références comme la FAO et Mansir & Pisa, elle éclaire l'impact de ces facteurs sur le comportement géotechnique et hydromécanique des sols. Ces informations sont cruciales pour caractériser les sols dans l'ingénierie, l'aménagement et la gestion des sols dispersifs.

3.2.1 Relation entre WI (%) et TDS (g/L) :

D'après les travaux de la FOA (1985), une relation empirique a été établie entre la limite de liquidité (WI) et le (TDS), formulée comme suit :

$$WI = 50 - 5 \ln(TDS) \quad \text{pour } TDS = 1-50 \text{ g/L}$$

Selon le tableau 3.1, un sol est considéré comme très salin lorsque l'indice de liquidité (WI) est faible.

Tableau 3 .1 : Relation et intervalles entre WI et TDS (FAO, 1985)

TDS (g/l)	WI (%)	Impact
0.1–1	50–70	Sol normal (faible salinité)
1–10	40–50	Sol modérément salin
10–50	30–40	Sol très salin (WI réduite)

3.2.2 Relation entre VBS (cm³) avec D (%) :

D'après les travaux de la Santamarina (2002), une relation empirique a été établie entre la valeur de bleu de méthylène (VBS) et le (D), formulée comme suit :

$$VBS=0.15 \times (D) \quad \text{pour } D = 5-90\%$$

Selon le tableau 3.2, un sol est considéré comme Kaolinite (peu active) lorsque la valeur de bleu de méthylène (VBS) est faible.

Tableau 3.2 : Relation et intervalles entre VBS et D (Santamarina, 2002)

D (%)	VBS (cm ³)	Type d'argile
10–30	1.5–4.5	Kaolinite (peu active)
30–60	4.5–9.0	Illite (modérément active)
60–90	9.0–13.5	Montmorillonite (très active)

3.2.3 Relation entre S.S.T (m²/g) et l'indice de dispersion D (%)

D'après les travaux de Mansir et Pisa. (2020), une relation empirique a été établie entre S.S.T et D, formulée comme suit :

$$S.S.T = 5 + 0.4 \times D \quad \text{pour } D = 10-90\%$$

Selon le tableau 3.3, un sol est considéré comme Montmorillonite lorsque S.S.T surface spécifique totale est élevée.

Tableau 3.3 : Relation et intervalles entre S.S.T et D (Mansir; Pisa., 2020)

D (%)	SST (m ² /g)	Type d'argile
10–30	10–20	Kaolinite (faible SST)
30–60	20–35	Illite (SST modérée)
60–90	35–50	Montmorillonite (élevée)

3.2.4 Relation entre Wp (%) et SAR (%)

D'après les travaux de la FAO (1985), une relation empirique a été établie entre Wp et le SAR, formulée comme suit :

$$Wp = c \cdot \log(SAR) + d \quad (c > 0)$$

Selon le tableau 3.4, un sol est considéré comme les sols très sodiques lorsque la limite de plasticité Wp est élevée.

Tableau 3.4 : Relation et intervalles entre W_p et SAR (FAO, 1985)

SAR (%)	W_p (%)	Classification
SAR < 3	$W_p = 15-25\%$	Sols calcaires/magnésiens
SAR = 3-15	$W_p = 25-40\%$	Sols sodiques modérés
SAR > 15	$W_p > 40\%$	Sols très sodiques

3.2.5 Relation entre Activité et SAR (%)

Le Tableau 3.5 révèle un lien crucial entre l'activité des argiles (A) et le taux de sodium échangeable (SAR) : à mesure que le SAR augmente, l'activité des argiles s'élève, rendant le sol plus sensible à la dispersion et à la dégradation structurale.

Tableau 3.5 : Relation et intervalles entre (A) et SAR (FAO, 1985)

SAR (%)	Intervalle d'activité (A)	Impact
< 3	0.2 – 0.5	Faible activité sodique
3-15	0.5 – 1.2	Activité modérée
> 15	1.2 – 3.0+	Activité élevée (dégradation)

3.2.6 Relation entre I_p (%) et SP (%)

Tableau 3.6 : Relation et intervalles entre I_p et SP (Dounane, 2021)

I_p (%)	SP
<18	Faible
18-22	moyen
22-30	Elevé

3.2.7 Le pourcentage des fines

Le Tableau 3.7 classe les sols en trois catégories selon leur teneur en fines (< 12 %, 12-35 %, > 35 %). Chaque catégorie a une influence distincte sur la perméabilité, la cohésion et la sensibilité hydrique du sol, ce qui aide à prédire précisément son comportement mécanique et hydraulique.

Tableau 3.7 : Intervalles de pourcentage des fines (GTR, 2000)

Fines (%)	
<12	Faible
12-35	moyen
35-100	Elevé

3.2.8 La teneur en argile

Le Tableau 3.8 classe les sols en trois catégories selon leur teneur en argile : faible (< 12 %), moyenne (12–25 %) et élevée (25–40 %). Plus la proportion d'argile augmente, plus le sol gagne en plasticité, en capacité de rétention d'eau et en cohésion.

Tableau 3.8 : Intervalles de pourcentage des argiles (GTR ,2000)

La quantité d'argile (%)	
<12	Faible
12-25	moyen
25-40	Elevé

3.3 Objectif et méthodologie de travail

Dans cette étude, nous développons et appliquons une nouvelle méthodologie pour évaluer le phénomène de dispersion des sols argileux.

L'objectif principal est d'utiliser des méthodes et des techniques plus efficaces que les méthodes conventionnelles précédentes pour identifier ce type de sol, tout en menant une série d'expériences interdépendantes avec un haut degré de précision.

Pour appliquer notre étude, les étapes suivantes ont été réalisées :

3.3.1 Le développement d'une analyse comparative de la capacité des sols argileux à se désintégrer, comprenant :

- L'utilisation de nouvelles équations et formules.
- Trouver une relation entre les éléments du sol étudiés.
- Le classement des sols étudiés en fonction de leurs propriétés et en sélectionnant les modèles les plus appropriés.

3.3.2 L'application de la méthode de Taguchi :

- Combiner les réseaux neuronaux artificiels avec la prédiction des limites de décomposition du sol. Nous voulons aussi intégrer la compréhension de l'impact des facteurs étudiés sur ces limites.
- Déterminer le nombre optimal de niveaux pour les facteurs d'influence.
- Développer un modèle prédictif de haute précision pour les données étudiées, grâce à l'intelligence artificielle.

- Comprendre les facteurs clés qui influencent significativement le phénomène étudié, afin de définir les conditions optimales pour les contrôler.

3.4 La base des données BDD:

Pour cette étude, nous avons constitué une base de données exhaustive regroupant les caractéristiques de 70 sols différents. Chaque échantillon a été méticuleusement caractérisé par six paramètres d'entrée : la teneur en fines, la teneur en argile, l'indice de plasticité (I_p), la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_p) et la surface spécifique totale (S.S.T). Ces propriétés physiques et minéralogiques sont cruciales pour comprendre le comportement des sols. En parallèle, nous avons mesuré quatre paramètres de sortie essentiels pour évaluer la dispersion : les Solides Dissous Totaux (TDS), l'indice de dispersion (D), le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et le pourcentage de sodium (SP). Cette base de données riche et variée a formé la pierre angulaire de nos analyses, nous permettant d'explorer les relations complexes entre les propriétés des sols et leur potentiel dispersif.

Tableau 3.9 : Base de données. (Juste une partie voir références à la fin de ce PFE)

Référence	Année	Le nombre de donnée
Belarbi A	2015	22
Boukhezna A	2018	2
BRGM RP-65432-FR	2020	1
LAB GEO-001	2021	1
Nombre totale des données		70

3.4.1 Classification des sols étudiés

Le choix d'appliquer le système USCS à deux sous-ensembles distincts – 50 % de particules fines et 50 % d'argiles. Assure une couverture équilibrée des textures et comportements géotechniques.

3.4.1.1 Classification des pourcentages d'argile selon USCS :

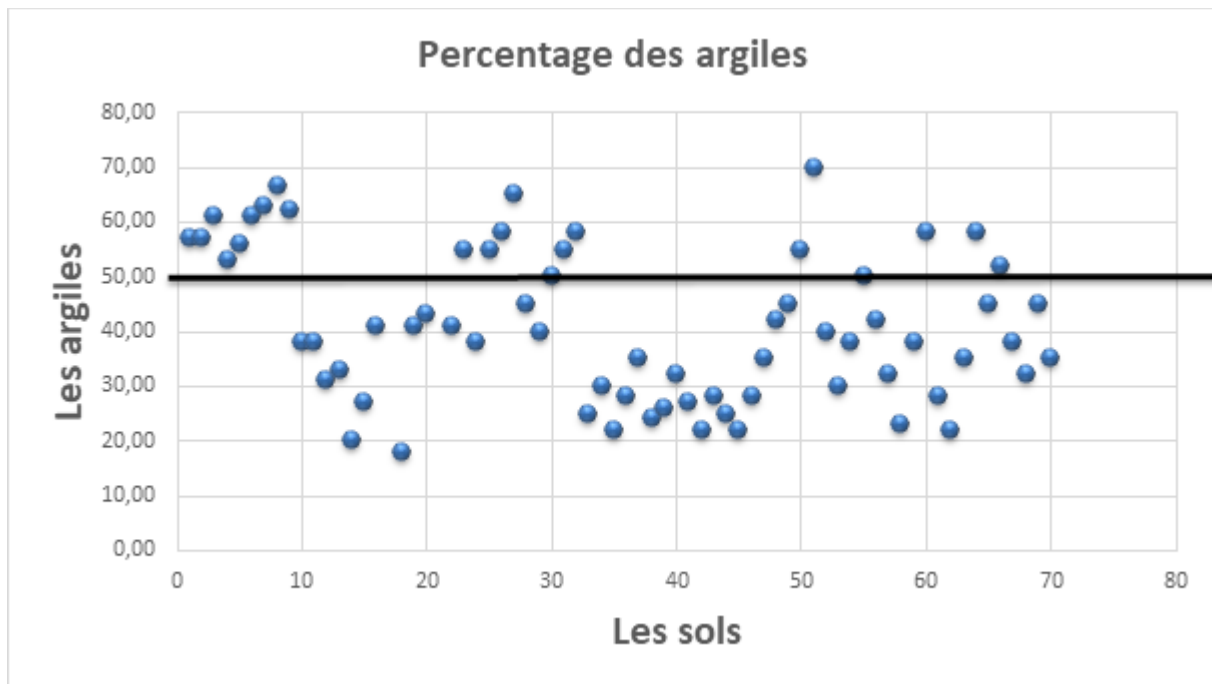


Figure 3.1 : La classification des pourcentages d'argile des sols étudiés

Le graphique montre le pourcentage de particules d'argile inférieures à 0,002 mm dans les différents types de sols étudiés, avec un seuil de 50 %.

Les sols contenant 50 % de particules d'argile : Peuvent être classés selon la classification USCS, qui les divise à son tour en trois zones avec des codes différents.

- Les sols argilo-graveleux (SG) sont composés de gravier et d'un pourcentage élevé d'argile allant de 12 à 50 %.
- Les sols argilo-sableux (SC) sont composés de sable et d'un pourcentage élevé d'argile allant de 12 à 50 %.
- Les sols compacts, que nous symbolisons par (SM) et (MG), sont des sols contenant moins de 12 % d'argile.

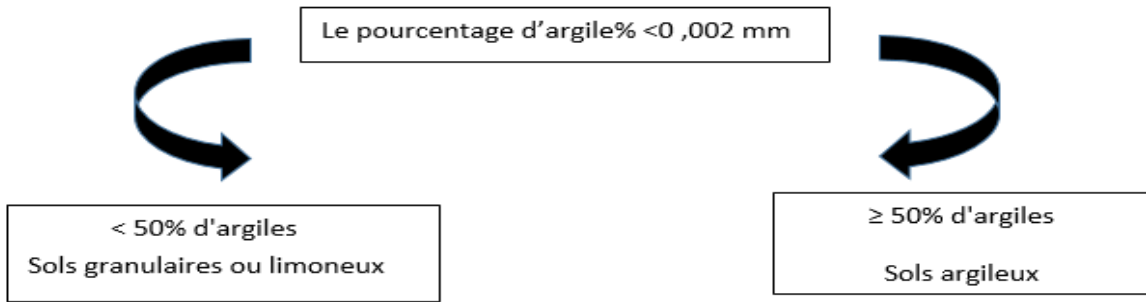
Se caractérisent par une cohésion moléculaire et une perméabilité moyenne.

Les sols contenant 50 % ou plus de particules d'argile : peuvent être classés selon le système de classification USCS, qui les divise à son tour en deux parties avec des codes différents

- l'argile à haute résistance (CH)
- l'argile à faible résistance (CL)

Leurs caractéristiques sont une très grande sensibilité à l'eau .

Ces sols sont cohésifs et se caractérisent par une compressibilité et un comportement plastique élevés. (ASTM D2487-17)



3.4.1.2 Classification des pourcentages des fines selon USCS :

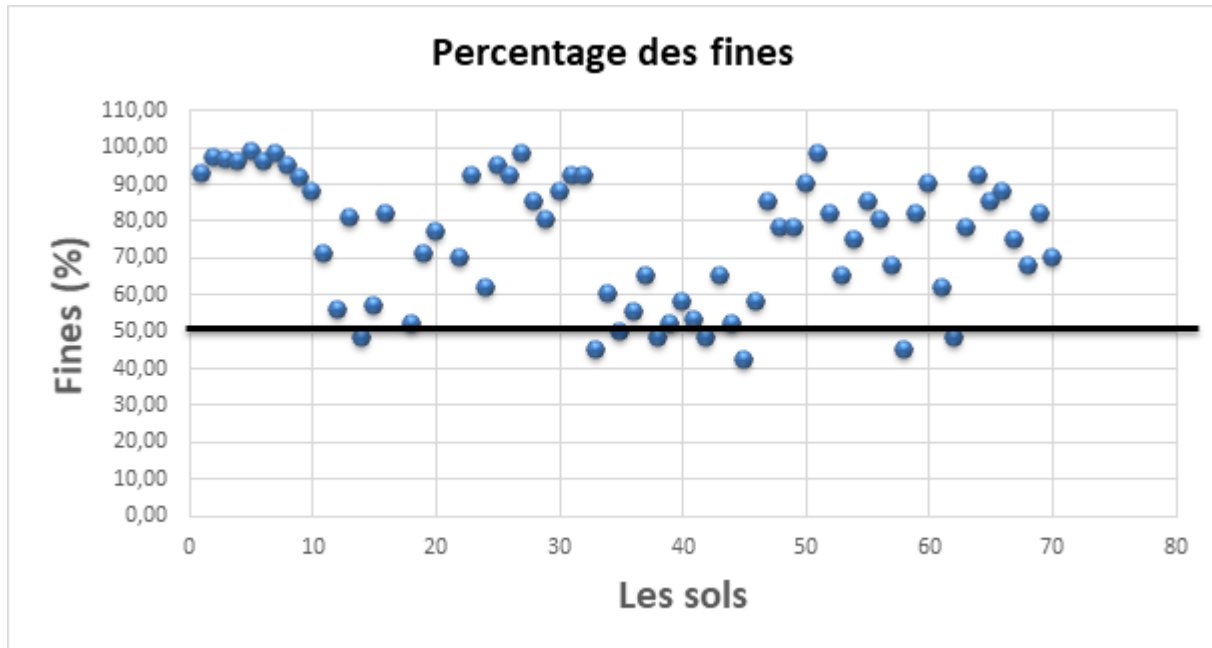


Figure 3.2 : Classification des pourcentages des fines des sols étudiés

Le graphique représente le pourcentage de matériaux fins contenant des particules inférieures à 0,08 mm avec un seuil de 50%.

Les caractéristiques des sols dont les particules contiennent moins de 50 % de fines

- Un sol très résistant
- Un sol qui n'a pas besoin d'être traité
- Un sol adapté à la couche de charge lourde.

Les caractéristiques des sols contenant 50 % ou plus de particules fines

- Un sol nécessite un traitement chimique
- Un sol requiert une étude et une évaluation spéciales (ASTM D2487-17)

3.5 La méthode de Taguchi

La méthode Taguchi est une méthodologie très efficace pour les expériences pratiques, car elle représente une approche statistique rentable et une partie rigoureuse de la conception classique des expériences pratiques. Les principaux avantages de la méthode sont qu'elle minimise le nombre d'essais requis et qu'elle se concentre uniquement sur les facteurs clés, tout en s'appuyant sur des matrices verticales conçues pour permettre l'évaluation simultanée d'un grand nombre de facteurs différents. La méthode Taguchi se déroule en trois

étapes clés : d'abord la planification, où l'on identifie les facteurs contrôlables et les sources de bruit, puis on élabore un protocole expérimental et détermine le nombre d'essais nécessaires. Vient ensuite la réalisation, qui consiste à mener ces expériences en utilisant des matrices orthogonales pour tester efficacement toutes les combinaisons de facteurs et scénarios de bruit, tout en minimisant le nombre d'essais et les erreurs. Enfin, la phase d'analyse permet d'exploiter les résultats, à l'aide d'outils comme Minitab, MATLAB ou Excel, pour évaluer l'influence des facteurs (via ANOVA et les rapports signal/bruit) et définir les paramètres de conception optimaux. (Dounane N, 2021)

3.5.1 Le rapport Signal/Bruit :

La méthode de Taguchi utilise le rapport signal-sur-bruit (S/N) pour mesurer la robustesse d'un processus face aux variations indésirables, et non pas seulement sa variance. Selon l'objectif visé, on distingue trois scénarios principaux.

Plus grand est le mieux :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Où de faibles valeurs de $1/y^2$ (donc des y_i élevés et peu variables) maximisent le S/N.

Plus petit est le mieux :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.2)$$

Ce qui pénalise fortement les écarts au-dessus de zéro.

Nominal est le mieux : cible y_0

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 \right) \quad (3.3)$$

Qui évalue la dispersion autour de la valeur cible.

Dans ces formules, n représente le nombre de répétitions et y_i les performances mesurées. Le "signal" correspond à l'effet moyen recherché (proche de l'objectif), tandis que le "bruit" désigne la variabilité. En maximisant ce rapport S/N, on obtient un produit ou un procédé qui est à la fois performant et stable, même en présence de facteurs perturbateurs.

3.6 Méthode d'ANN pour compléter le plan d'expérience de Taguchi :

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont des outils de modélisation intelligents, inspirés par le cerveau humain, capables d'apprendre des relations complexes à partir d'échantillons. Leurs avantages sont nombreux : ils peuvent approximer n'importe quelle fonction, traiter l'information en parallèle, sont robustes face au bruit, et réduisent significativement les coûts (temps et argent) comparés aux méthodes classiques.

Pour enrichir le plan d'expériences de Taguchi, nous créons un modèle de réseau de neurones artificiels (ANN). Ce modèle prend en entrée les facteurs contrôlés (comme la teneur en argile et l'indice de plasticité) et produit en sortie le potentiel ou la pression de gonflement. Après avoir collecté et normalisé les données expérimentales, le réseau est entraîné pour minimiser l'écart entre ses prédictions et les mesures réelles. L'objectif final est de développer une formulation ANN fiable qui pourra soit remplacer, soit affiner les combinaisons de niveaux de facteurs proposées par la méthode de Taguchi.

$$(input)_i = \sum_{k=0}^n w_{ij} + bias_j \tag{3.4}$$

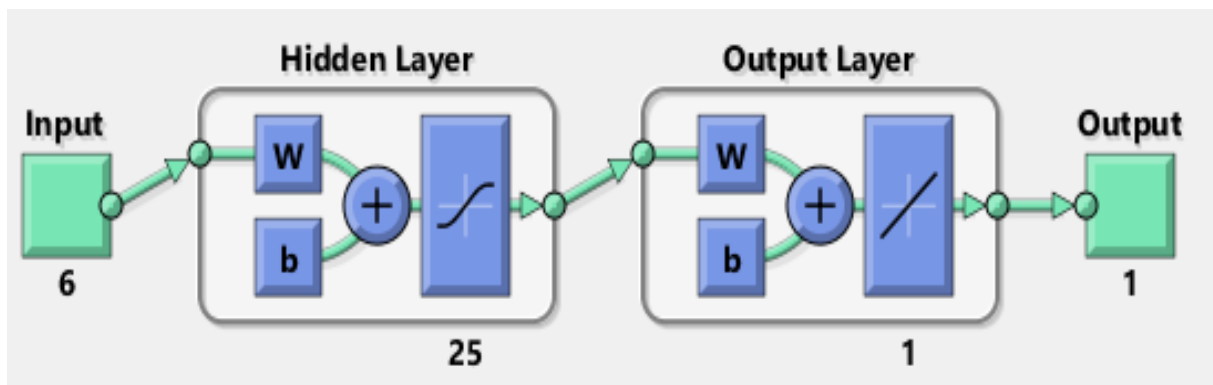


Figure 3.3 : Structure de notre réseau de neurones simple

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une méthode intégrée qui combine des approches empiriques et des technologies numériques émergentes. Elle est appliquée dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Nous avons combiné la méthode de Taguchi (ANOVA) et un traitement statistique utilisant des réseaux neuronaux récurrents (RNN), qui à leur tour combinent les comportements du sol tels que les contraintes et les phénomènes de désintégration. Cette hybridation permet de réduire les coûts d'un pourcentage très différent tout en fournissant des modèles et des résultats précis grâce à l'intelligence artificielle.

4. Chapitre IV – RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Introduction

Ce chapitre présente de manière détaillée l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de l'étude du comportement dispersif des sols, ainsi que leur interprétation à travers différentes approches d'analyse statistique, d'intelligence artificielle et d'optimisation expérimentale. Après avoir recueilli et préparé les données issues des essais géotechniques, nous avons eu recours à trois méthodes complémentaires pour évaluer l'influence de plusieurs paramètres physiques et chimiques sur la dispersion des sols : la régression multiple à l'aide du logiciel Minitab, la modélisation par réseau de neurones artificiels (RNA), et l'application de la méthode de Taguchi pour l'analyse des effets et l'optimisation des facteurs.

La problématique centrale de notre étude réside donc dans la difficulté à caractériser précisément ce potentiel dispersif et à prédire son comportement face à divers facteurs environnementaux et compositionnels, en particulier lorsque les essais traditionnels s'avèrent coûteux, chronophages ou insuffisants pour saisir la complexité des interactions. Comment pouvons-nous développer des outils plus fiables et efficaces pour évaluer le risque de dispersion des sols argileux et, par extension, mieux concevoir et stabiliser nos ouvrages géotechniques ? C'est à cette question fondamentale que ce Projet de Fin d'Études se propose de répondre, en explorant des méthodologies avancées combinant l'ingénierie classique et les techniques d'intelligence artificielle.

4.2 Analyse descriptive des données expérimentales :

Le tableau ci-dessous fournit une analyse descriptive des données expérimentales pour les diverses variables physiques et chimiques des sols étudiés. Grâce à des indicateurs comme la moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum, ces statistiques permettent de mieux comprendre la variabilité et les tendances générales de l'échantillon global.

Tableau 4.1 : Analyse descriptive des données expérimentales

Variable	N	N*	Moyenne	ErT moyenne	Ec Typ	Minimum	Maximum
Fines	70	0	74.82	2.07	17.36	42.00	98.80
Argile	70	0	41.02	1.71	14.27	15.00	70.00
wl (%)	70	0	54.28	2.15	17.98	23.00	110.00
Ip (%)	69	1	29.23	1.36	11.33	5.00	65.00
VBS (cm ³)	70	0	12.493	0.833	6.966	3.800	35.000
S.S.T (m ² /g)	70	0	135.15	8.45	70.70	65.00	556.50
D(%)	70	0	34.03	1.69	14.12	14.83	82.00
TDS (g/l)	70	0	17.68	2.04	17.04	3.09	73.16
SAR	70	0	5.981	0.825	6.899	1.012	48.780
SP(%)	70	0	49.14	1.95	16.35	27.00	98.33

L'analyse des données révèle une forte prédominance de particules fines dans les sols, avec une teneur moyenne de 74,82 %, et une teneur en argile de 41,02 %, suggérant une plasticité et une capacité de rétention d'eau élevées. La limite de liquidité (WI) varie considérablement (23 % à 110

%), indiquant une grande diversité de consistance, et l'indice de plasticité (I_p), avec une moyenne de 29,23 %, confirme un comportement plastiquement actif pour la majorité des sols.

D'autres paramètres comme la succion (VBS), la surface spécifique totale (S.S.T) et la salinité (TDS, SAR, SP) affichent également des variations notables. La surface spécifique, par exemple, s'étend de 65 à 556,5 m²/g, reflétant une importante diversité minéralogique. Bien que le SAR et la salinité électrique (SP) soient modérés en moyenne, leurs valeurs maximales indiquent la présence ponctuelle de sols potentiellement sodiques ou salins.

Globalement, ces résultats sont cruciaux pour mieux comprendre les propriétés géotechniques et physico-chimiques des sols analysés, informations essentielles pour leur classification et la prédiction de leurs comportements mécanique et hydraulique.

4.3 Analyse des corrélations

4.3.1 Méthodes indirectes : revue des travaux antérieurs.

Plusieurs corrélations empiriques ont été développées pour quantifier la dispersion des sols argileux à partir de paramètres physico-chimiques aisément mesurables en laboratoire. Ces modèles mettent en relation un indice ou un potentiel de dispersion avec des variables telles que le pourcentage de fines, la teneur en argile, la limite de liquidité (WL) et l'indice de plasticité (I_p), ainsi que la surface spécifique totale (S.S.T) et la valeur du bleu de méthylène (VBS). D'autres études incorporent également l'indice de la dispersion (D), la teneur en solides dissous totaux (TDS) et des critères salins — notamment le rapport de sodium (SAR) et le pourcentage de sodium échangeable (SP). Grâce à ces corrélations, il est possible d'estimer rapidement et à moindre coût le comportement dispersif des argiles, ce qui facilite la conception et la stabilisation des infrastructures édifiées sur ces sols.

Tableau 4.2 : Relations empiriques pour la prévision de la dispersion

Références	Relations Empiriques
Fitzpatrick (1995)	$D = 1.5 \times (I_p/Argile) \times Fine^{(0.3)}$
Ghari (2014)	$D = 0.18 \times (I_p/Argile) \times VBS + 0.05 \times Fine$
Umesh (2019)	$D = 0.08 \times I_p \times (1 + 0.5 \times (WL - Wp)/Argile)$
Corwin (2007)	$TDS = 0.4 \times (Fine + Argile) \times S.S.T^{0.3}$
USDA (2008)	$TDS = 0.1 \times S.S.T \times Argile$
Pham (2008)	$TDS = 0.01 \times Fine \times S.S.T$
Elsawy (2020)	$TDS = 0.25 \times Argile \times \sqrt{(S.S.T)}$
Ayers et Westcott (1985)	$SAR = 0.15 \times Activité \times Vbs$
Nelson et Miller (1992)	$SAR = 0.1 \times I_p + 0.05 \times Vbs$
Shah (2018)	$SAR = 0.15 \times (WL - Wp) \times \log(S.S.T)$
Rahardjo (2021)	$SAR = 0.08 \times VBS \times (WL/Wp)$
U.S. Salinity Lab (1954)	$SP = 1.3 \times Argile^{0.7} \times \log(S.S.T)$
Bolt et Bruggenwert (1978)	$SP = 0.4 \times ((WL - Wp)/Argile) \times VBS$
Rengasamy (1984)	$SP = 0.5 \times Argile \times \log(S.S.T)$
Zhang et Norton (2002)	$SP = 0.3 \times (I_p/Argile) \times VBS^{0.5}$

4.4 Résultat et interprétation d'analyse de régression linéaire multiple

Cette section détaille les résultats de notre analyse de régression linéaire multiple. Nous y identifions et quantifions les relations entre les variables indépendantes et la variable dépendante. L'interprétation de ces résultats nous permet de dégager les facteurs les plus influents et d'évaluer la qualité du modèle statistique développé.

4.4.1 Analyse de régression : TDS (g/l) en fonction de fines, argile, wl, lp, VBS, S.S.T (m²/g)

L'objectif de cette analyse de régression est de déterminer comment divers paramètres physico-chimiques du sol (tels que le pourcentage de fines, la teneur en argile, (WI), (lp), (VBS) et (S.S.T)) impactent la concentration en solides dissous totaux (TDS). Grâce à cette approche statistique, nous pouvons identifier les variables clés qui régissent la salinité du sol et construire un modèle prédictif précieux pour une meilleure compréhension du comportement hydrogéochimique des sols.

Equation de régression :

Une expression simple reliant le TDS avec le pourcentage de fines, % des argiles, la WI, la Wp, la VBS et la SST. Cette relation est obtenue pour un $R^2 = 0,5757$

$$\text{TDS} = 3,91 + 0,180 \text{ Fines} + 0,084 \text{ Argile} - 2,199 \text{ WI} + 2,483 \text{ lp} + 0,520 \text{ VBS} + 0,2833 \text{ S.S.T} \quad (4.1)$$

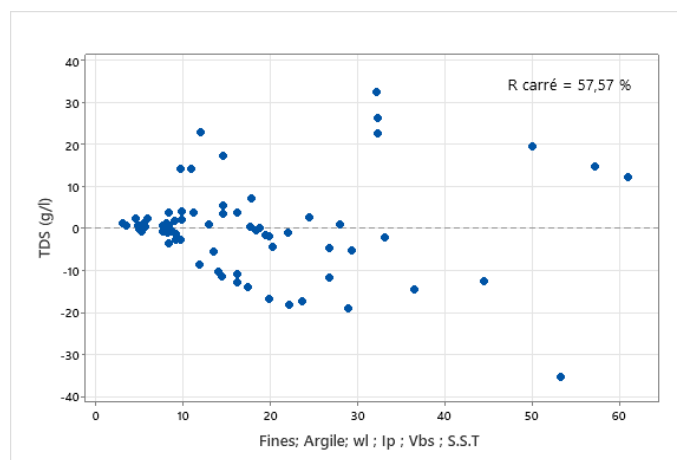


Figure 4.1 : Graphe de régression (TDS)

La figure 4.1 analyse la relation entre les propriétés des sols (fines, argile, WI, lp, VBS, S.S.T) et les TDS. Le coefficient R^2 de 57,57% révèle une corrélation modérée, indiquant que ces paramètres expliquent environ la moitié de la variation des TDS. Les sols argileux et riches en fines semblent particulièrement influencer les concentrations en solides dissous. Cependant, près de 48% des variations restent inexpliquées, suggérant l'intervention d'autres facteurs (composition minéralogique, sels solubles, conditions environnementales).

4.4.2 Analyse de régression : SAR en fonction de fines, argile, WI, lp, VBS, S.S.T

Cette analyse de régression vise à évaluer l'impact des caractéristiques du sol – pourcentage de fines, d'argile, (WI), limite de plasticité (Wp), volume de bleu de méthylène (VBS) et (S.S.T) – sur (SAR). Elle permet d'identifier les paramètres les plus influents sur la salinité et la dispersion chimique du sol, et d'établir des relations prédictives utiles pour comprendre le comportement sodique des sols étudiés.

Equation de régression : L'équation suivante est obtenue pour un $R^2 = 0,6176$.

$$\text{SAR} = -3,60 + 0,0560 \text{ Fines} - 0,3721 \text{ Argile} - 0,082 \text{ WI} + 0,601 \text{ lp} - 0,130 \text{ VBS} + 0,0658 \text{ SST} \quad (4.2)$$

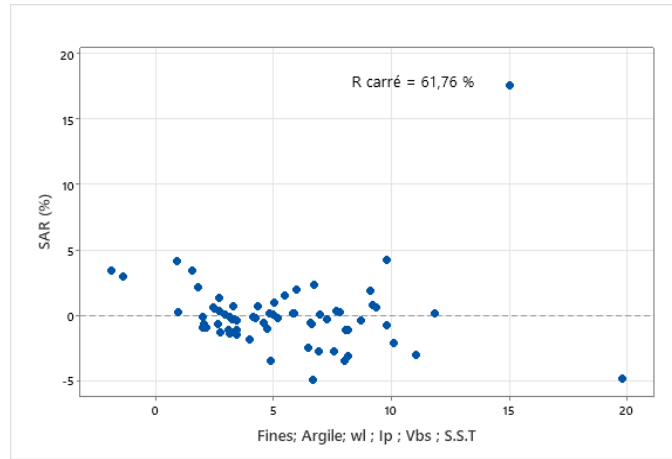


Figure 4.2 : Graphe de régression (SAR)

L'étude de la relation entre les propriétés du sol (fines, argile, teneur en argile, argile, pulpe, VBS et SST) et le SAR révèle une corrélation significative, avec un coefficient de détermination R^2 de 61,76% (figure 4.2). Cette valeur indique que plus de 60% de la variation du SAR peut être expliquée par ces propriétés du sol.

4.4.3 Analyse de régression : D (%) en fonction de fines, argile, WI, Ip, VBS, S.S.T.

Cette régression vise à quantifier l'influence des paramètres physico-chimiques (fines, argile, teneur en eau (wl), limite de plasticité (Wp), volume de bleu de méthylène (VBS) et (S.S.T)) sur D(%). L'objectif est de déterminer la contribution de chaque facteur à la variation de D(%) et d'identifier les paramètres les plus significatifs du comportement dispersif des sols.

Equation de régression :

La figure 4.3 montre la relation entre les caractéristiques des sols étudiés (Fines, Argile, WI, Ip, VBS, S.S.T) et D. La droite de régression obtenue présente un coefficient de détermination (R^2) de 62,05 %, ce qui indique une corrélation modérée entre les variables. Bien que le paramètre exact ne soit pas clairement identifié, la valeur de R^2 suggère que les variations des caractéristiques des sols expliquent environ 62 % de la variabilité observée. Les sols avec des propriétés spécifiques (comme une teneur élevée en fines ou en argile) pourraient influencer davantage le paramètre mesuré.

L'équation suivante a été obtenue :

$$D = 3,48 + 0,107 \text{ Fines} - 0,718 \text{ Argile} + 0,079 \text{ wl} + 0,791 \text{ Ip} - 0,060 \text{ VBS} + 0,1944 \text{ S.S.T} \quad (4.3)$$

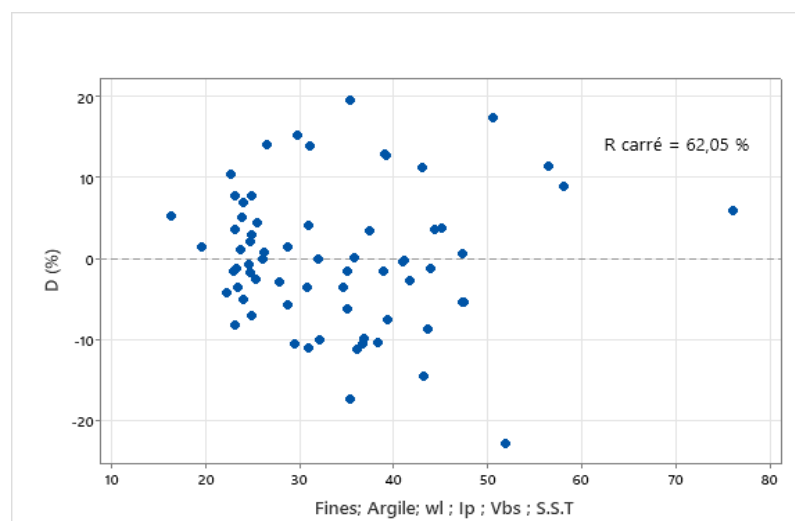


Figure 4.3 : Graphe de régression (D).

4.4.4 Analyse de régression : SP (%) en fonction de fines, argile, WI, Ip, VBS, S.S.T

L'objectif de cette analyse de régression est d'évaluer comment diverses caractéristiques du sol – le pourcentage de fines, la teneur en argile, (WI), (Ip), (VBS) (S.S.T) – influencent le pourcentage de sodium (SP %). Cette démarche permet d'approfondir notre compréhension de l'impact de ces propriétés physico-chimiques sur la teneur en sodium des sols, une connaissance essentielle pour évaluer leur stabilité.

Equation de régression :

$$SP = 9,92 + 0,2373 \text{ Fines} - 0,545 \text{ Argile} - 0,647 \text{ wl} + 1,264 \text{ Ip} + 0,108 \text{ VBS} + 0,3083 \text{ S.S.T} \quad (4.4)$$

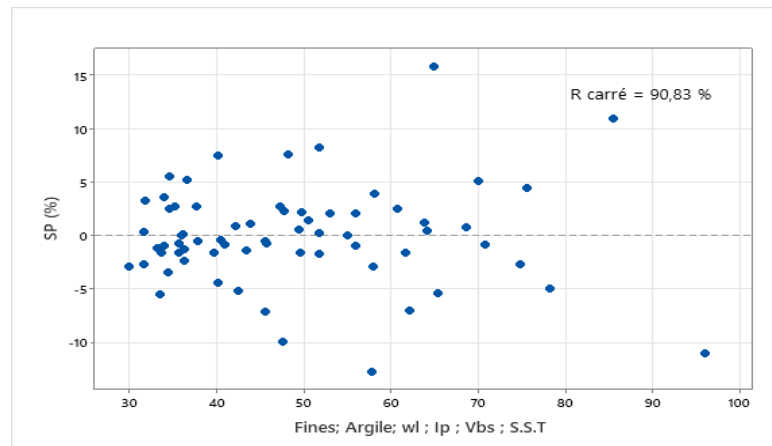


Figure 4.4 : Graphe de régression (SP)

L'analyse (figure 4.4) de la relation entre les propriétés des sols (Fines, Argile, WI, Ip, VBS, S.S.T) et le pourcentage de sodium (SP) révèle une corrélation remarquablement forte, avec un coefficient de détermination R^2 de 90,83%. Cette valeur exceptionnellement élevée indique que plus de 90% de la variation du SP peut être expliquée par ces caractéristiques physiques du sol, en particulier par la teneur en argile et en fines qui apparaissent comme les principaux facteurs influençant la rétention du sodium. La faible part inexpliquée (9,17%) suggère que d'autres paramètres jouent un rôle négligeable dans cette relation. Ces résultats démontrent clairement la forte sensibilité des sols argileux à l'accumulation de sodium.

- Dans Minitab, la régression linéaire applique un modèle global qui "lisse" la variabilité du sol hétérogène : malgré un R^2 allant parfois jusqu'à 90 %, vous observez de larges écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites, notamment dans les zones à fortes teneurs en argile ou en eau où la relation n'est clairement pas linéaire. Les résidus se trouvent systématiquement sous-estimés ou sur-estimés aux extrêmes, signe que le modèle n'intègre ni les effets seuil ni les interactions complexes. Donc on est obligé de passer de le RNA qui est plus précis pour vos sols hétérogènes, alors que la régression reste trop rigide pour en restituer fidèlement la complexité.

4.5 Résultat et Interprétation de RNA

4.5.1 La prédiction de l'indice de dispersion D(%)

Le modèle (figure 4.5) de réseau de neurones artificiels (RNA) a été conçu pour estimer l'indice de dispersion D(%), un indicateur du potentiel de dispersion des sols, à partir de plusieurs propriétés géotechniques du sol telles que la teneur en argiles, les fines, (IP), (WI), (VBS), (SST).

L'évaluation de notre modèle de réseau de neurones a été très encourageante. Durant la phase d'entraînement ($R=0.8853$), le modèle a montré une bonne capacité à établir une relation cohérente entre les propriétés physiques et l'indice de dispersion, même si une légère dispersion subsistait. La validation ($R=0.9975$) a été particulièrement impressionnante, prouvant que le modèle a parfaitement généralisé sans sur ajustement, les prédictions étant presque alignées avec les valeurs réelles. Sa robustesse a été confirmée lors du test ($R=0.9626$), démontrant son efficacité sur des données inédites. Globalement, avec un R de 0.9020 sur l'ensemble des données, le modèle s'avère très fiable pour prédire l'indice de dispersion, même face à des variables complexes et interdépendantes.

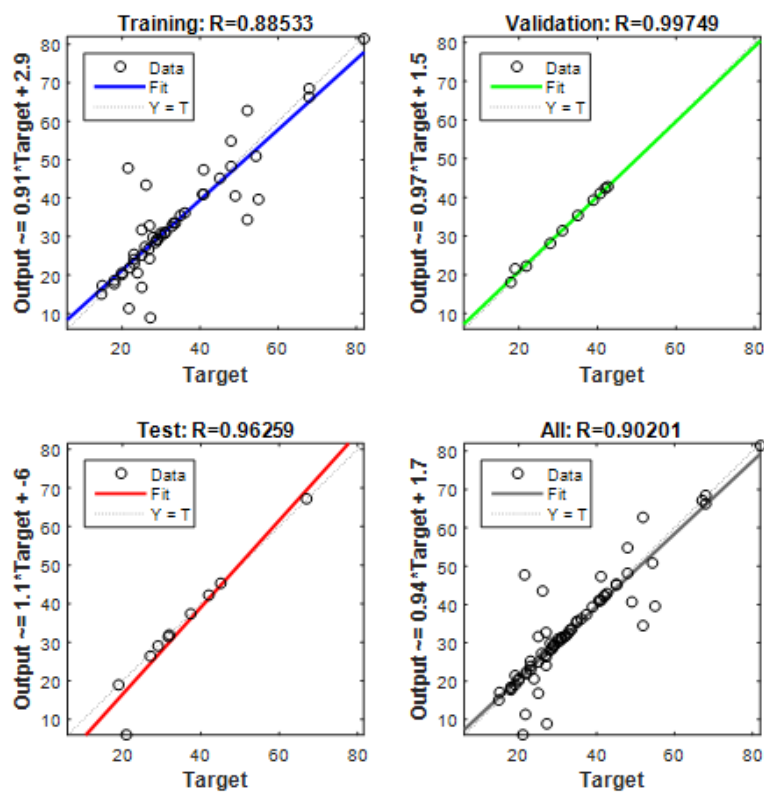
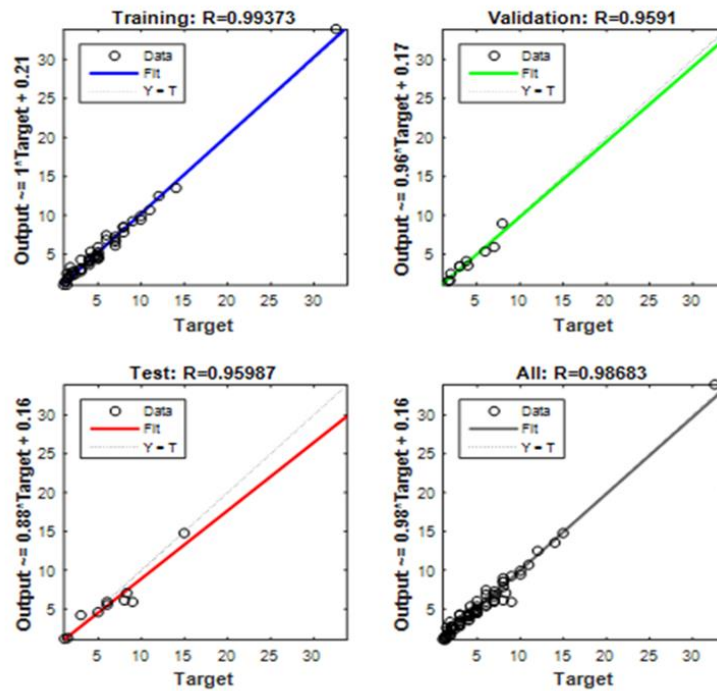


Figure 4.5 : Performance du Réseau de Neurones pour la Prédiction de (D %).

4.5.2 La prédiction de SAR

Cette section présente les résultats obtenus par notre modèle de Réseau de Neurones Artificiels (RNA) pour la prédiction du Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR). Les graphiques à suivre décomposent les performances du modèle à travers ses phases d'entraînement, de validation et de test, fournissant une vue d'ensemble de la relation entre les sorties du modèle et les valeurs cibles du SAR.



. Figure 4.6 : Performance du Réseau de Neurons pour la Prédiction de SAR

4.5.3 La prédiction de SP

Cette section (figure 4.7) présente les résultats obtenus par notre modèle de Réseau de Neurons Artificiels (RNA) pour la prédiction du Pourcentage de Sodium (SP). Les graphiques à suivre décomposent les performances du modèle à travers ses phases d'entraînement, de validation et de test, fournissant une vue d'ensemble de la relation entre les sorties du modèle et les valeurs cibles du SP.

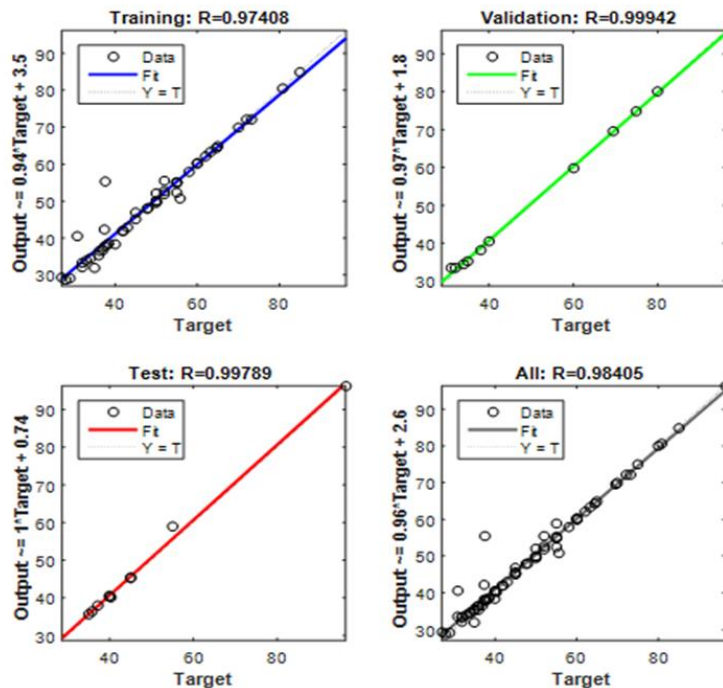


Figure 4.7 : Performance du Réseau de Neurons pour la Prédiction de SP.

4.5.4 La prédiction de TDS

Cette section (figure 4.8) présente les résultats obtenus par notre modèle de Réseau de Neurones Artificiels (RNA) pour la prédiction des Solides Dissous Totaux (TDS). Les graphiques à suivre décomposent les performances du modèle à travers ses phases d'entraînement, de validation et de test, fournissant une vue d'ensemble de la relation entre les sorties du modèle et les valeurs cibles des TDS.

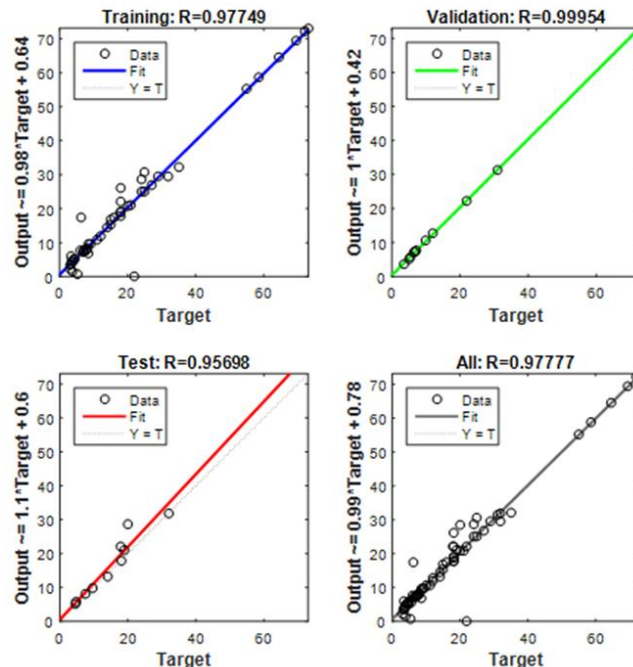


Figure 4.8 : Performance du Réseau de Neurones pour la Prédiction de TDS

Nos résultats confirment que les réseaux de neurones sont un outil extrêmement pertinent pour prédire des paramètres complexes et coûteux à mesurer, en se basant sur des données plus accessibles. Les fortes corrélations observées lors des phases de validation et de test prouvent l'influence significative de variables comme la teneur en argiles, la SST ou le VBS sur le comportement dispersif des sols. Ce modèle devient donc un précieux outil d'aide à la décision pour évaluer le potentiel dispersif, un aspect crucial pour garantir la stabilité des ouvrages.

4.6 Résultat et Interprétation de Taguchi

4.6.1 Conception orthogonale de Taguchi L_8 pour D

Dans cette section, nous allons employer le plan orthogonal L_8 de Taguchi. Ce plan expérimental compact nous permettra d'étudier l'influence des facteurs clés sur la variable de réponse 'D' de manière efficace.

Tableau 4.3 : Résultats des Essais pour l'Indice de Dispersion (D).

Entrée						Sortie
Fines (%)	Argile (%)	wl (%)	Ip	VBS (cm ³)	SST (m ² /g)	D
58.41	28.01	40	18	4.5	65	67.473
58.41	28.01	40	35	13.5	500	248.886
58.41	70.00	70	18	4.5	500	7.396
58.41	70.00	70	35	13.5	65	124.958
98.80	28.01	70	18	13.5	65	145.473
98.80	28.01	70	35	4.5	500	136.921
98.80	70.00	40	18	13.5	500	0.173

98.80	70.00	40	35	4.5	65	55.275
-------	-------	----	----	-----	----	--------

Ce tableau présente les résultats d'expériences évaluant l'influence de divers paramètres du sol (fines, argile, WI, Ip, VBS, SST) sur la teneur en dispersion (D). Il ressort que la dispersion varie fortement selon les combinaisons de ces facteurs. Par exemple, à 58,41 % de fines, une augmentation simultanée d'argile, de wl et de SST provoque une hausse significative de D, atteignant 248,886. Inversement, dans certaines configurations avec beaucoup d'argile (70 %) et une SST élevée, la dispersion chute à des niveaux très bas (jusqu'à 0,173), suggérant des interactions complexes. Ces résultats soulignent l'importance de l'équilibre entre la texture, la minéralogie et les caractéristiques physico-chimiques du sol dans le phénomène de dispersion.

L'équation utilisée pour calculer le rapport (S/N) pour la plus élevé est le meilleur est comme ci-dessous :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.5)$$

4.6.1.1 Analyse de Taguchi L₂₇ pour l'estimation du l'indice de la dispersion

Avant de plonger dans les graphiques des résultats, nous allons présenter ici l'approche que nous avons utilisée. Nous avons eu recours à la méthode de Taguchi, avec un plan orthogonal L₂₇, pour analyser en profondeur les facteurs qui influencent l'indice de dispersion des sols.

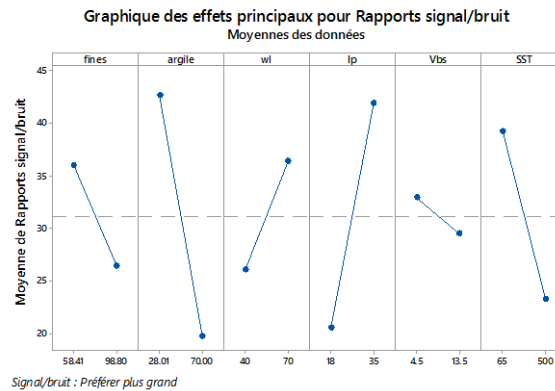


Figure 4.9 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi

Ce graphique (figure 4.9) est une clé de lecture pour comprendre comment optimiser notre système grâce à la méthode de Taguchi. Il illustre les effets principaux des divers facteurs sur le rapport signal/bruit. Notre objectif est clair : nous cherchons à maximiser ce rapport, car un rapport signal/bruit élevé est synonyme d'une performance plus stable et robuste, moins sensible aux variations indésirables – c'est le principe du "plus grand est meilleur". Concrètement, chaque colonne représente un facteur testé, et l'inclinaison des lignes nous indique son impact : une pente prononcée révèle une influence significative sur le rapport signal/bruit, tandis qu'une pente faible ou inexistante signifie que le facteur a peu d'incidence sur la robustesse du système.

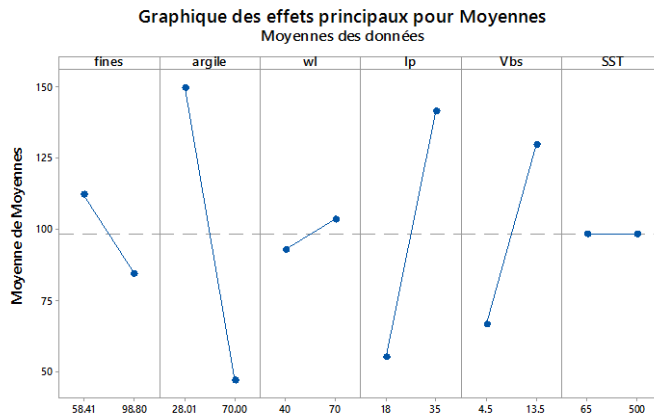


Figure 4.10 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données.

Ce deuxième graphique (figure 4.10) complète notre analyse en montrant les effets principaux des paramètres (fines, argile, WL, lp, VBS, SST) sur la réponse 'D', cette fois-ci via les moyennes des données. Une forte pente indique une influence significative du facteur. Il est notable que l'argile, lp et le VBS montrent des effets marqués à la fois sur les moyennes et sur le rapport signal/bruit, confirmant leur importance dans le système.

4.6.2 Conception orthogonale de Taguchi L₂₇ pour SAR

Nous allons utiliser la méthode de Taguchi avec un plan orthogonal L₂₇ pour évaluer l'impact de nos différents facteurs sur le Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR). Tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Résultats des Essais pour SAR.

Entrée						Sortie
Fines	Argile	wl	lp	VBS	SST	SAR
42.00	15.00	50	5	1.5	100	0.9519
42.00	15.00	50	5	4.5	200	0.9063
42.00	15.00	50	5	9.0	556	46.4161
42.00	28.01	40	18	1.5	100	0.8972
42.00	28.01	40	18	4.5	200	1.5090
42.00	28.01	40	18	9.0	556	46.4211
42.00	41.02	30	22	1.5	100	2.3718
42.00	41.02	30	22	4.5	200	2.8129
42.00	41.02	30	22	9.0	556	46.5524
58.41	15.00	40	22	1.5	200	3.0055
58.41	15.00	40	22	4.5	556	45.5907
58.41	15.00	40	22	9.0	100	5.9400
58.41	28.01	30	5	1.5	200	1.5719
58.41	28.01	30	5	4.5	556	46.4572
58.41	28.01	30	5	9.0	100	3.4441
58.41	41.02	50	18	1.5	200	2.4594
58.41	41.02	50	18	4.5	556	46.5449
58.41	41.02	50	18	9.0	100	3.0549
74.82	15.00	30	18	1.5	556	44.7989
74.82	15.00	30	18	4.5	100	3.0420
74.82	15.00	30	18	9.0	200	2.5695
74.82	28.01	50	22	1.5	556	44.6801
74.82	28.01	50	22	4.5	100	1.7178
74.82	28.01	50	22	9.0	200	2.1423
74.82	41.02	40	5	1.5	556	47.0976
74.82	41.02	40	5	4.5	100	3.0217

74.82	41.02	40	5	9.0	200	3.6813
-------	-------	----	---	-----	-----	--------

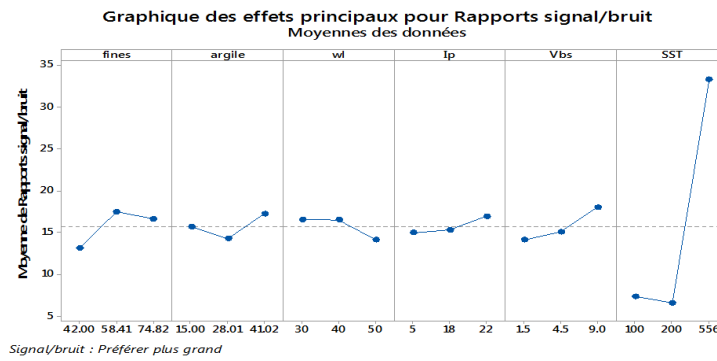


Figure 4.11 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi.

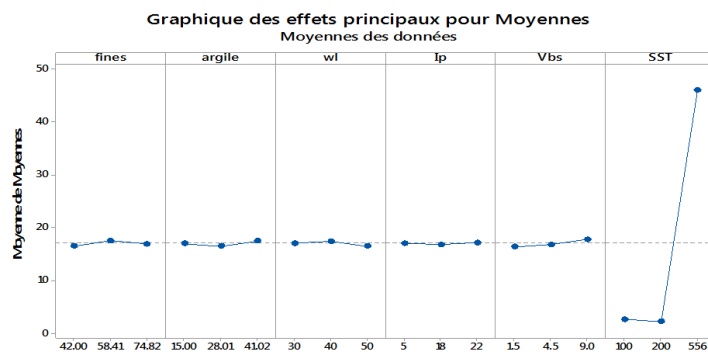


Figure 4.12 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données.

4.6.2.1 Analyse de Taguchi L₂₇ pour l'estimation du Rapport d'Adsorption du Sodium

Nous allons utiliser la méthode de Taguchi avec un plan orthogonal L₂₇ pour évaluer l'impact de nos différents facteurs sur le Rapport d'Adsorption du Sodium

Ces graphiques des effets principaux, issus de notre analyse Taguchi, sont éloquentes : ils montrent comment chaque paramètre (fines, argile, WL, lp, VBS, SST) influence le rapport signal/bruit. Notre but est de maximiser ce rapport pour garantir une performance stable et robuste. Il est frappant de constater que le SST (Surface Spécifique Totale) se détache nettement. Un niveau élevé de SST (autour de 556) augmente considérablement le rapport signal/bruit, ce qui en fait le facteur le plus influent pour améliorer la robustesse du système. Les autres paramètres, comme les fines ou l'argile, ont un impact bien plus marginal sur cet aspect. En clair, pour optimiser la robustesse, c'est sur le SST qu'il faut agir en priorité.

4.6.3 Conception orthogonale de Taguchi L₈ pour TDS

Nous allons mettre en œuvre un plan orthogonal L₈ de Taguchi. Ce plan plus compact sera utilisé pour analyser spécifiquement les facteurs influençant les Solides Dissous Totaux (TDS). (Tableau 4.5).

Tableau 4.5 : Résultats des Essais pour TDS

Entrée						Sortie
Fines	Argile	wl	Ip	VBS	SST	TDS
58.41	28.01	40	18	4.5	65	13.971
58.41	28.01	40	35	13.5	556	124.743
58.41	70.00	70	18	4.5	556	165.058
58.41	70.00	70	35	13.5	65	25.809
98.80	28.01	70	18	13.5	65	78.564
98.80	28.01	70	35	4.5	556	77.072
98.80	70.00	40	18	13.5	556	2.260
98.80	70.00	40	35	4.5	65	5.170

Ce tableau (tableau 4.5) révèle la relation entre les propriétés géotechniques et physico-chimiques des sols (fines, argile, WI, Ip, VBS, SST) et la concentration totale des solides dissous (TDS). La TDS varie fortement, influencée notamment par la SST et Ip. Par exemple, une SST élevée (556 m²/g) combinée à un Ip important (35) peut entraîner une TDS maximale (124,743 g/L), voire plus avec une argilosité accrue (70 %). Inversement, malgré une SST élevée, des valeurs de TDS peuvent chuter fortement si les autres paramètres sont moins extrêmes. Ces données suggèrent une interaction complexe entre la minéralogie, la structure du sol et ses propriétés hydriques, soulignant que la TDS dépend de la combinaison de la minéralogie (SST), de la teneur en argile et de la plasticité. Il est donc crucial d'évaluer ces propriétés conjointement pour estimer la salinité potentielle d'un sol.

4.6.3.1 Analyse de Taguchi L₂₇ pour l'estimation des Solides Dissous Totaux

Ici, nous utilisons la méthode de Taguchi (plan L₂₇) pour comprendre comment différents facteurs influencent l'estimation des Solides Dissous Totaux (TDS).

On a ici un graphique (figure 4.13) des rapports signal/bruit issus de l'analyse Taguchi. L'objectif est simple : identifier les paramètres offrant la meilleure performance avec un minimum de variabilité, et c'est précisément ce que le rapport signal/bruit nous révèle. Dans ce cas, la limite de liquidité (wl) se démarque de façon spectaculaire avec un rapport de 38, bien supérieur aux autres. Cela souligne son influence prépondérante sur la stabilité et la qualité du système étudié, en faisant le levier d'action le plus efficace.

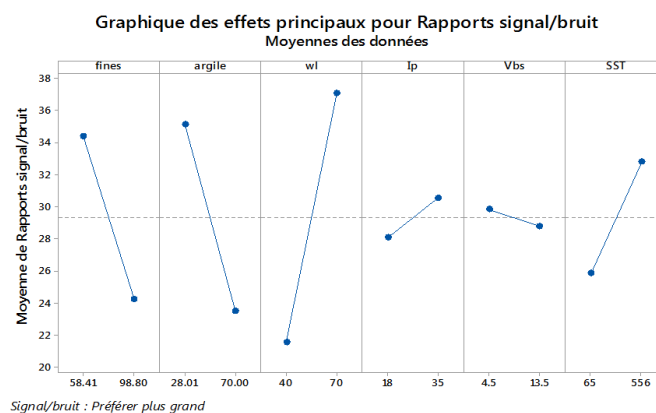


Figure 4.13 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi.

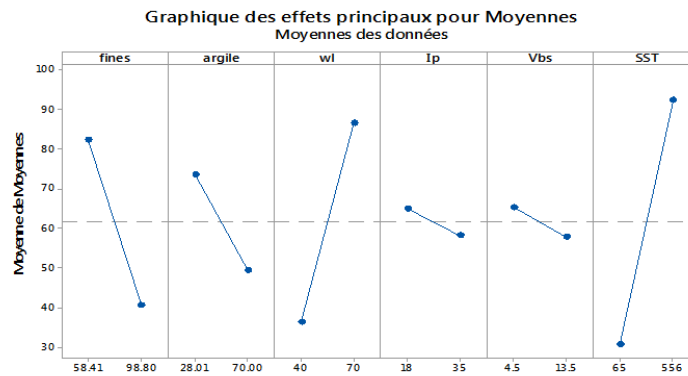


Figure 4.14 : Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données.

En observant ce graphique (figure 4.14), il est immédiatement évident que la Surface Spécifique Totale (SST) est de loin le paramètre le plus influent. Sa moyenne, qui atteint 98.80, se distingue nettement des autres facteurs. Cette valeur particulièrement élevée indique que la SST exerce un impact considérable sur le système que nous étudions, son effet étant bien plus marqué que celui de n'importe quel autre paramètre analysé.

4.6.3 Conception orthogonale de Taguchi L₂₇ pour SP

En utilisant le plan orthogonal L₂₇ de Taguchi, nous pouvons étudier l'impact de plusieurs facteurs sur l'indice de sodium (SP) de manière efficace, en réduisant le nombre d'essais tout en assurant une analyse fiable.

4.6.3.1 Analyse de Taguchi L₂₇ pour l'estimation de pourcentage de sodium

Nous allons utiliser la méthode de Taguchi (plan L₂₇) pour comprendre et quantifier l'influence de divers facteurs sur l'estimation du pourcentage de sodium. Cette approche nous permettra d'identifier les paramètres les plus critiques et de déterminer les combinaisons optimales qui minimisent ou contrôlent ce pourcentage.

Tableau 4.6 : Résultats des Essais pour SP.

Entrée						Sortie
Fines	Argile	wl	Ip	VBS	SST	SP
42.00	15.00	50	5	1.5	100	44.826
42.00	15.00	50	5	4.5	200	52.775
42.00	15.00	50	5	9.0	556	86.690
42.00	28.01	40	18	1.5	100	39.779
42.00	28.01	40	18	4.5	200	57.677
42.00	28.01	40	18	9.0	556	82.200
42.00	41.02	30	22	1.5	100	41.515
42.00	41.02	30	22	4.5	200	75.358

42.00	41.02	30	22	9.0	556	80.690
58.41	15.00	40	22	1.5	200	50.851
58.41	15.00	40	22	4.5	556	146.595
58.41	15.00	40	22	9.0	100	30.109
58.41	28.01	30	5	1.5	200	60.199
58.41	28.01	30	5	4.5	556	134.311
58.41	28.01	30	5	9.0	100	46.922
58.41	41.02	50	18	1.5	200	58.261
58.41	41.02	50	18	4.5	556	138.763
58.41	41.02	50	18	9.0	100	40.046
74.82	15.00	30	18	1.5	556	136.306
74.82	15.00	30	18	4.5	100	34.454
74.82	15.00	30	18	9.0	200	52.945
74.82	28.01	50	22	1.5	556	148.088
74.82	28.01	50	22	4.5	100	41.592
74.82	28.01	50	22	9.0	200	68.526
74.82	41.02	40	5	1.5	556	148.218
74.82	41.02	40	5	4.5	100	49.491
74.82	41.02	40	5	9.0	200	62.171

Le tableau 4.6 illustre l'influence de plusieurs paramètres du sol (fines, argile, WI, Ip, VBS, SST) sur le pourcentage de sodium (SP). On y observe une tendance générale à l'augmentation du SP avec la surface spécifique (SST) et le volume basique spécifique (VBS), particulièrement lorsque la teneur en fines est élevée. Cependant, la présence de comportements irréguliers dans certains cas souligne la complexité des interactions entre ces paramètres.

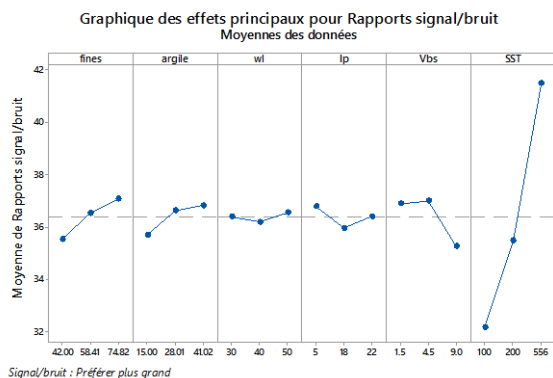


Figure 4.15 : Rapport Signal/Bruit pour l'Analyse Taguchi

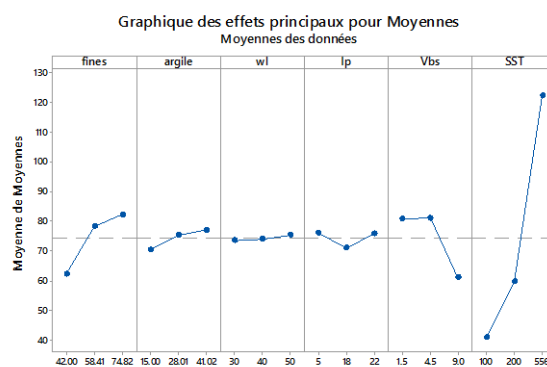


Figure 4.16: Graphique des Effets Principaux pour les Moyennes des Données.

On observe très clairement sur ce graphique (figure 4.16) que, parmi les six paramètres que nous avons étudiés (fines, argile, WI, lp, VBS, et SST), c'est le SST qui ressort comme le facteur le plus dominant. Son influence est significativement supérieure à celle de tous les autres. Les enseignements tirés de la méthode de Taguchi sont sans équivoque : si l'on souhaite optimiser le système et agir efficacement, il est primordial de cibler en priorité le contrôle du paramètre SST. C'est lui qui exerce l'impact le plus prononcé sur la performance globale que nous cherchons à améliorer.

4.7 Autres résultats

Dans cette section nous donnons uniquement les résultats qui ont conduit à de bonnes corrélations entre les paramètres étudiés selon la démarche suivante : Une étude paramétrique systématique, suivant une approche par étape, a été conduite pour identifier les hyper paramètres les plus influents et les architectures optimales. Cette méthode consistait à varier un type d'hyper paramètre à la fois – l'optimiseur (adam, rmsprop, sgd), la fonction d'activation des couches cachées (relu, sigmoid, tanh), le nombre de neurones par couche cachée (32, 128, 512), le nombre de couches cachées (2, 3, 4), et le taux d'apprentissage (0.01, 0.001, 0.0001) – tout en maintenant les autres hyper paramètres fixés à des valeurs par défaut jugées raisonnables (typiquement 2 couches cachées, 64 neurones, activation relu, optimiseur adam avec un taux d'apprentissage de 0.001, sauf pour le paramètre en cours de variation). Cette exploration a été menée distinctement pour les modèles mono-sortis, où un réseau distinct était entraîné pour chaque variable cible, et pour le modèle MIMO, capable de prédire l'ensemble des quatre sorties simultanément. En complément, une analyse de corrélation **de Pearson** a été effectuée sur l'ensemble des données pour mettre en évidence les relations linéaires existantes entre les différentes variables d'entrée et de sortie.

4.7.1. Analyse de Corrélation de Pearson

La matrice de corrélation de Pearson (Figure 4.17) a été calculée pour évaluer les relations linéaires entre les huit caractéristiques d'entrée du sol et les quatre paramètres de sortie (SAR(%), SP(%), TDS(%), D(%)), ainsi que les interrelations entre les variables d'entrée elles-mêmes. Les coefficients de corrélation varient de -1 (corrélation négative parfaite) à +1 (corrélation positive parfaite), un coefficient proche de 0 indiquant une faible ou une absence de corrélation linéaire. Les couleurs chaudes (rouges) indiquent des corrélations positives, tandis que les couleurs froides (bleues) indiquent des corrélations négatives.

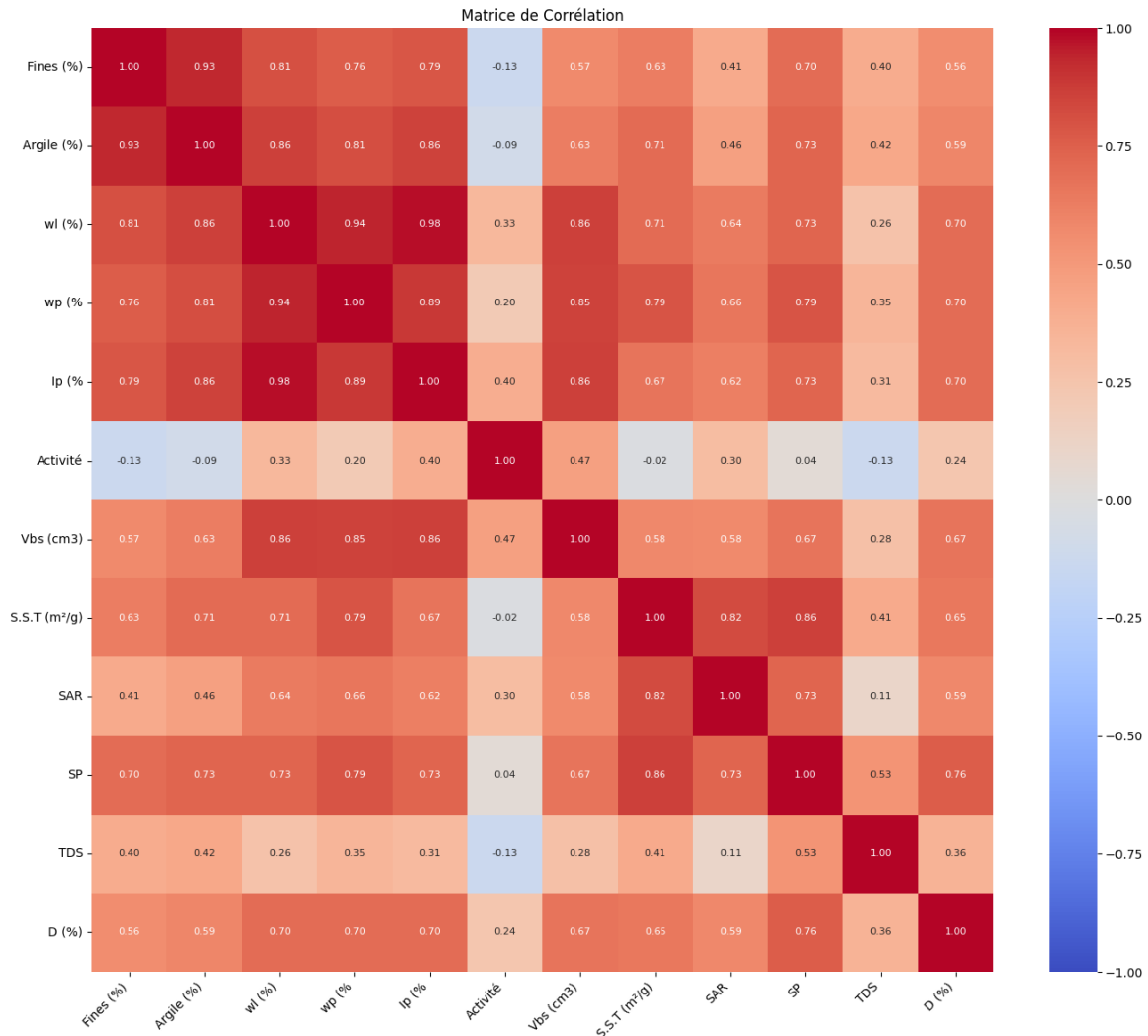


Figure 4.17 : Matrice de Corrélation de Pearson.

Observations Principales : A partir de cette analyse il ressort ce qui suit :

4.7.1.1 Fortes corrélations positives entre les limites d'Atterberg et la teneur en fines/argile :

- On observe des corrélations positives très élevées entre le pourcentage de Fines (%) et la teneur en Argile (%) (0.93), la Limite de Liquidité (wl %) (0.81), la Limite de Plasticité (Wp %) (0.76), et l'Indice de Plasticité (lp %) (0.79).
- De même, la teneur en Argile (%) est fortement corrélée positivement avec wl (%) (0.86), Wp (%) (0.81), et lp (%) (0.86).
- Les limites d'Atterberg (wl, Wp, lp) sont aussi très fortement corrélées entre elles (ex: wl et Wp à 0.94, wl et lp à 0.98, Wp et lp à 0.89).

Interprétation : Ces fortes corrélations sont attendues, car la plasticité et la sensibilité à l'eau des **soils** (représentées par les limites d'Atterberg) sont directement influencées par la quantité et le type de particules fines, en particulier **l'argile**. Cela suggère une certaine redondance d'information entre ces variables. Cette ambiguïté est prise en charge dans notre analyse.

4.7.1.2 Corrélations des variables d'entrée avec les variables de sortie :

2.1 Taux d'Adsorption du Sodium SAR (%):

- SAR montre des corrélations positives modérées avec Fines (%) (0.41), Argile (%) (0.46), wl (%) (0.64), Wp (%) (0.66), Ip (%) (0.62), et VBS (cm³) (0.58).
- Une corrélation positive plus faible est observée avec S.S.T (m²/g) (0.30).

Interprétation : Les sols plus fins, plus argileux, avec des limites d'Atterberg plus élevées et un volume de bleu de méthylène plus important tendent à avoir un SAR plus élevé. La surface spécifique semble avoir un impact moindre. Cette observation initiale sera justifiée par les travaux antérieurs.

2.2 Pourcentage de Sodium Échangeable SP(%) :

- SP présente des corrélations positives modérées à fortes avec Fines (%) (0.70), Argile (%) (0.73), wl (%) (0.73), Wp (%) (0.79), Ip (%) (0.73), VBS (cm³) (0.67), et S.S.T (m²/g) (0.86 - la plus forte corrélation avec SP) contrairement au cas de SAR

Interprétation : Le SP est fortement influencé par la finesse du sol, sa plasticité, et surtout sa surface spécifique. Cela suggère que les propriétés de surface des particules jouent un rôle crucial dans la rétention du sodium échangeable. Ce résultat trivial renforce l'étude envisagée dans ce projet de fin d'études.

2.3 Total des Solides Dissous TDS (%):

- TDS montre des corrélations positives plus faibles avec la plupart des entrées : Fines (%) (0.40), Argile (%) (0.42), wl (%) (0.26), Wp (%) (0.35), Ip (%) (0.31), et VBS (cm³) (0.28). même de point de vue géotechnique ces valeurs de R² restent non acceptables.
- Une corrélation positive modérée est notée avec S.S.T (m²/g) (0.41).
- Une corrélation négative faible est observée avec l'Activité (-0.13).

Interprétation : La relation linéaire entre les TDS et les caractéristiques d'entrée mesurées est globalement moins prononcée, bien que les sols avec une plus grande surface spécifique tendent à avoir des TDS plus élevés. La faible corrélation négative avec l'activité pourrait indiquer que les argiles moins actives (pour une même teneur en argile) pourraient libérer plus de sels. Vu le temps limité alloué à ce travail de fin d'études nous n'avons pas pu analyser en détail ces faibles valeurs de R².

2.4 Pourcentage de Dispersion D (%) :

- D (%) montre des corrélations positives modérées avec Fines (%) (0.56), Argile (%) (0.59), WI (%) (0.70), Wp (%) (0.70), Ip (%) (0.70), VBS (cm³) (0.67), et S.S.T (m²/g) (0.65). Ces valeurs par contre restent acceptables pour une première analyse.

Interprétation : Le pourcentage de dispersion est positivement influencé par la finesse du sol, sa plasticité, son volume de bleu et sa surface spécifique. Des valeurs plus élevées pour ces paramètres tendent à favoriser une plus grande dispersion.

2.5 Quelques observations et remarques pour une bonne simulation :

- Les variables montrant des corrélations plus fortes avec une sortie donnée (ex: S.S.T avec SP) sont susceptibles d'être des prédicteurs importants pour cette sortie dans les modèles RNA.
- Les faibles corrélations linéaires observées pour TDS avec la plupart des entrées suggèrent que les relations sous-jacentes pourraient être non linéaires, ce que les RNA sont capables de capturer, ou que d'autres facteurs non mesurés influencent fortement les TDS.

- La corrélation entre les variables de sortie justifie l'exploration de modèles MIMO, car la prédiction d'une variable pourrait bénéficier de l'information apprise pour prédire une autre variable corrélée.

Cette analyse de corrélation fournit un premier aperçu sur les relations au sein des données et aide à contextualiser les performances des modèles de réseaux de neurones qui seront développés pour capturer des relations potentiellement plus complexes et non linéaires.

4.7.2 Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du TDS (Modèles Mono-Sortie)

La meilleure configuration mono-sortie pour le TDS est le suivant: **Mono_LR_0.01_hl2_n64_relu_adam_lr0.01**, qui a obtenu un **R² de 0.614**.

L'histogramme de comparaison pour ce meilleur modèle est visible à la **Figure 4.18 TDS-Meilleur-Histo** (correspondant à l'image Histo_Mono_LR_0.01_hl2_n64_relu_adam_lr0.01).

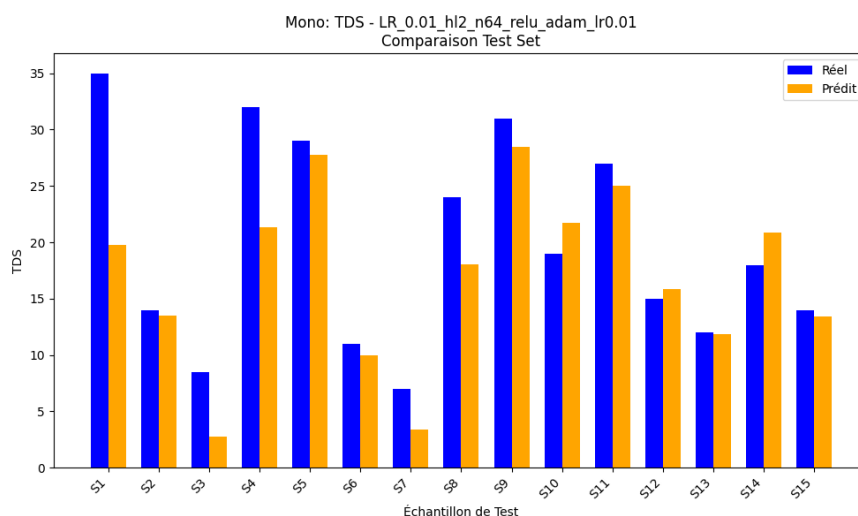


Figure 4.18 : TDS-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs TDS réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie.

La Figure 4.18 TDS-Meilleur-Histo montre une bonne adéquation entre les valeurs TDS réelles et prédites pour le meilleur modèle identifié. Les barres oranges (prédit) suivent de près les barres bleues (réel) pour la majorité des échantillons, notamment S1, S2, S4, S5, S8, S9, S10, S11, S12 et S15. Bien que des écarts subsistent (par exemple, S3 et S7 sont sous-estimés, S14 légèrement sur-estimé), la capacité du modèle à capturer les variations individuelles est la plus convaincante parmi les configurations testées.

Le graphique de régression pour ce meilleur modèle est montré à la **Figure 4.19 TDS-Meilleur-Regr** (correspondant à l'image PredReel_Mono_LR_0.01_hl2_n64_relu_adam_lr0.01).

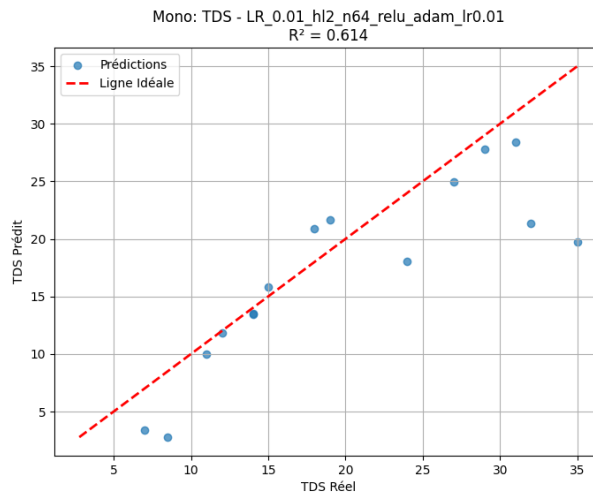


Figure 4.19 : TDS-Meilleur-Regr : Graphique de régression TDS réel vs. Prédit pour le meilleur modèle mono-sortie ($R^2 = 0.614$).

La Figure 4.19 TDS-Meilleur-Regr confirme la performance de cette configuration, avec un R^2 de 0.614. Les points sont bien regroupés autour de la ligne de prédiction idéale ($y=x$), indiquant une corrélation positive notable et une capacité du modèle à expliquer plus de 61% de la variance de la variable TDS. La dispersion des points est visiblement réduite par rapport aux configurations moins performantes, et il n'y a pas de biais systématique apparent de sous ou sur-estimation sur l'ensemble de la plage des valeurs. Ce résultat, bien que n'atteignant pas les niveaux de R^2 observés pour SAR ou SP, représente une avancée significative pour la modélisation du TDS.

Synthèse pour TDS (Mono-Sortie) :

L'étude paramétrique a mis en évidence la sensibilité de la prédiction du TDS au choix des hyperparamètres, en particulier le taux d'apprentissage. Un taux d'apprentissage plus élevé (0.01) s'est avéré bénéfique, permettant une convergence rapide vers une solution performante ($R^2 = 0.614$) avec une architecture relativement simple (2 couches, 64 neurones, relu, adam). La fonction d'activation sigmoïd a également démontré un potentiel intéressant. La complexité du modèle en termes de nombre de neurones et de couches doit être choisie judicieusement pour équilibrer la capacité d'apprentissage et la généralisation. La difficulté persistante à obtenir des R^2 excellents pour le TDS pourrait indiquer la nécessité d'explorer des caractéristiques d'entrée supplémentaires ou des architectures de modèles plus sophistiquées pour capturer pleinement sa dynamique.

4.7.3. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du Pourcentage de Dispersion (D (%)) (Modèles Mono-Sortie)

La prédiction du pourcentage de dispersion (D (%)) s'est révélée être la tâche la plus difficile, avec le meilleur modèle mono-sortie (Mono_Lay_3_hl3_n64_relu_adam_lr0.001) n'atteignant qu'un R^2 de 0.350. Ce modèle utilisait une architecture à 3 couches cachées, 64 neurones par couche, l'activation relu, l'optimiseur adam et un taux d'apprentissage de 0.001. L'activation sigmoïd a également montré un score R^2 similaire (0.347) avec 2 couches. Les résultats suggèrent que la relation entre les caractéristiques d'entrée et D (%) est particulièrement complexe ou est influencée par des facteurs non capturés par le modèle actuel. Les faibles R^2 et la difficulté à réduire substantiellement la perte de validation indiquent que des approches plus avancées, telles que l'ajout de caractéristiques plus pertinentes, l'exploration d'architectures de réseau plus spécifiques, ou l'utilisation de techniques de régularisation plus poussées, pourraient être nécessaires pour améliorer significativement la prédiction de ce paramètre.

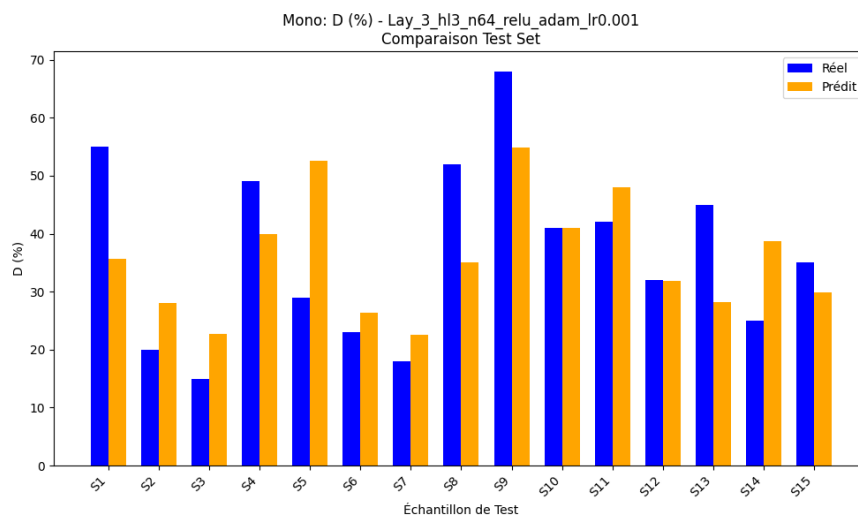


Figure 4.20 : D%-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs D (%) réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie.

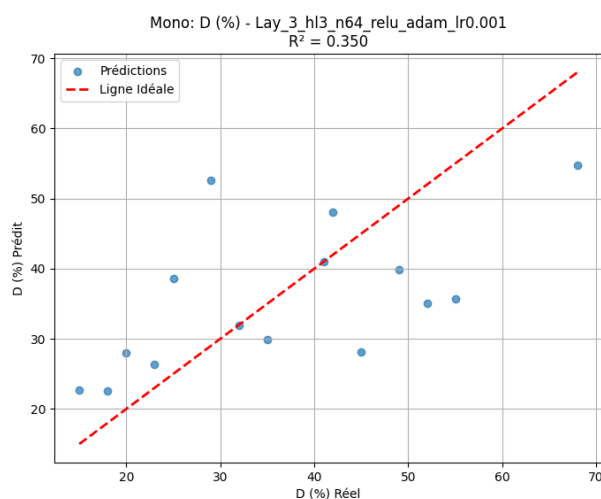


Figure 4.21 : D%-Meilleur-Regr : Graphique de régression D (%) réel vs. prédit pour le meilleur modèle mono-sortie ($R^2 = 0.350$).

4.7.4. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du Pourcentage de Sodium Échangeable (SP) (Modèles Mono-Sortie).

La prédiction du Pourcentage de Sodium Échangeable (SP) a été réalisée avec un grand succès par les modèles mono-sortie.

La configuration optimale, Mono_Act_sigmoid_hl2_n64_sigmoid_adam_lr0.001, a atteint un excellent R^2 de 0.954. Ce modèle se caractérise par l'utilisation de la fonction d'activation sigmoïde, deux couches cachées de 64 neurones, l'optimiseur adam et un taux d'apprentissage de 0.001. L'optimiseur adam a également montré de très bonnes performances avec l'activation relu ($R^2=0.942$). Les résultats suggèrent que SP est une variable relativement bien structurée et que ses relations avec les caractéristiques d'entrée peuvent être efficacement capturées par des réseaux de neurones d'une complexité modérée. La stabilité et le bas niveau de la perte de validation pour les meilleures configurations indiquent une bonne capacité de généralisation des modèles.

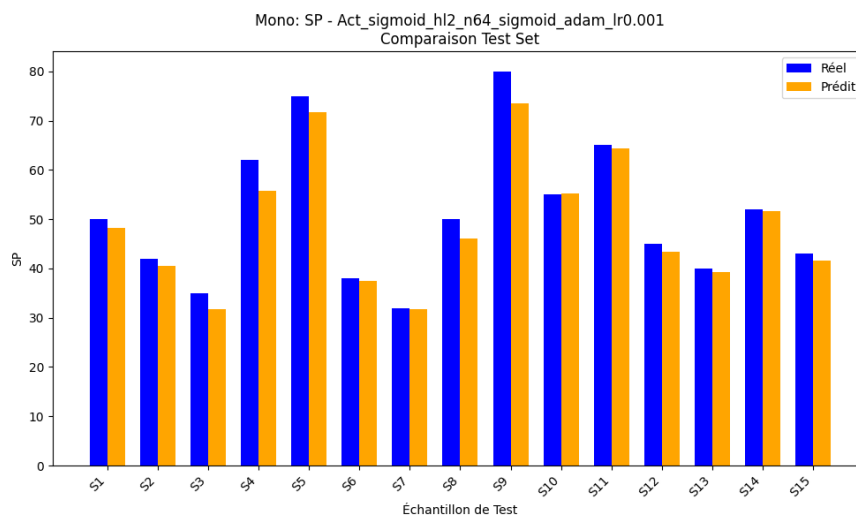


Figure 4.22 : SP-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs SP réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie.

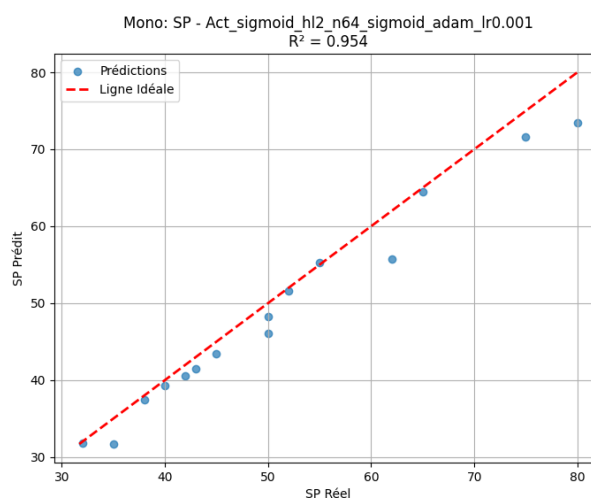


Figure4.23 : SP-Meilleur-Regr : Graphique de régression SP réel vs. Prédit pour le meilleur modèle mono-sortie ($R^2 = 0.954$).

4.7.5. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour la Prédiction du Taux d'Adsorption du Sodium (SAR) (Modèles Mono-Sortie)

La prédiction du Taux d'Adsorption du Sodium (SAR) par des modèles mono-sortie s'est avéré très efficace. La meilleure configuration identifiée, Mono_Opt_rmsprop_hl2_n64_relu_rmsprop_lr0.001, a atteint un R^2 élevé de 0.916. Ce modèle se caractérise par l'utilisation de l'optimiseur rmsprop, deux couches cachées de 64 neurones, l'activation relu et un taux d'apprentissage de 0.001. L'optimiseur adam a également donné de bons résultats, bien que légèrement inférieurs. Les fonctions d'activation relu, sigmoid, et tanh ont toutes montré une capacité à bien généraliser. Une complexité modérée en termes de nombre de neurones (32-64) et de couches (2-3) semble suffisante pour modéliser efficacement le SAR. Le taux d'apprentissage de 0.001 s'est avéré être un choix optimal. La haute performance obtenue suggère que les relations entre les caractéristiques d'entrée et le SAR sont bien capturées par les architectures de réseaux de neurones testées.

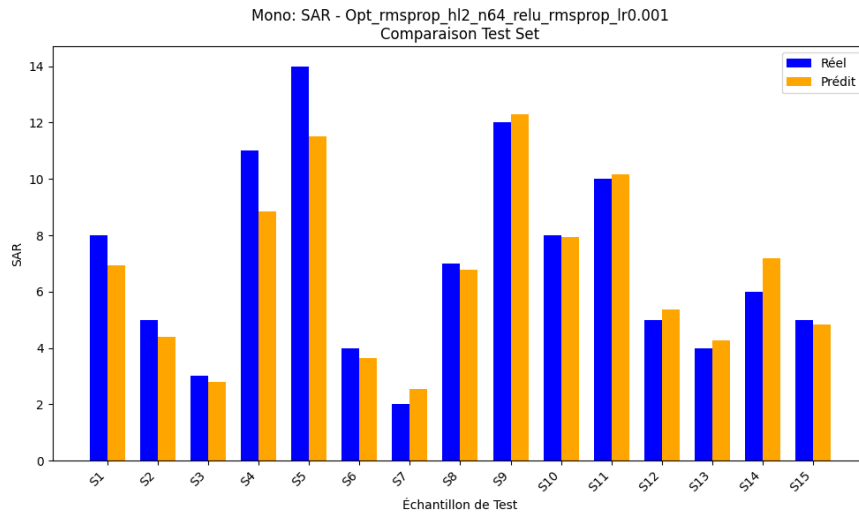


Figure 4.24 : SAR-Meilleur-Histo : Comparaison des valeurs SAR réelles et prédites pour le meilleur modèle mono-sortie (Optimiseur RMSprop).

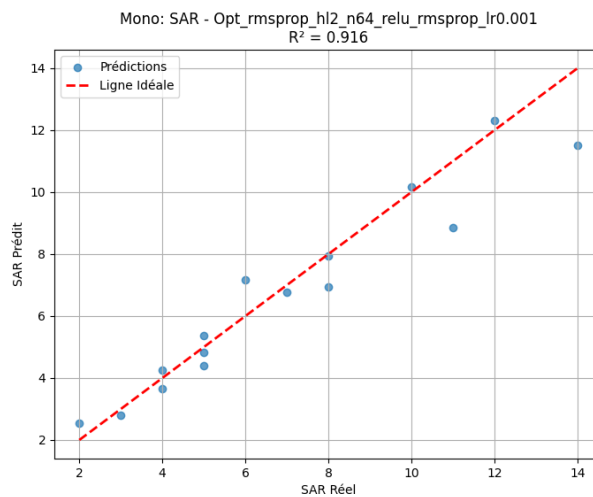
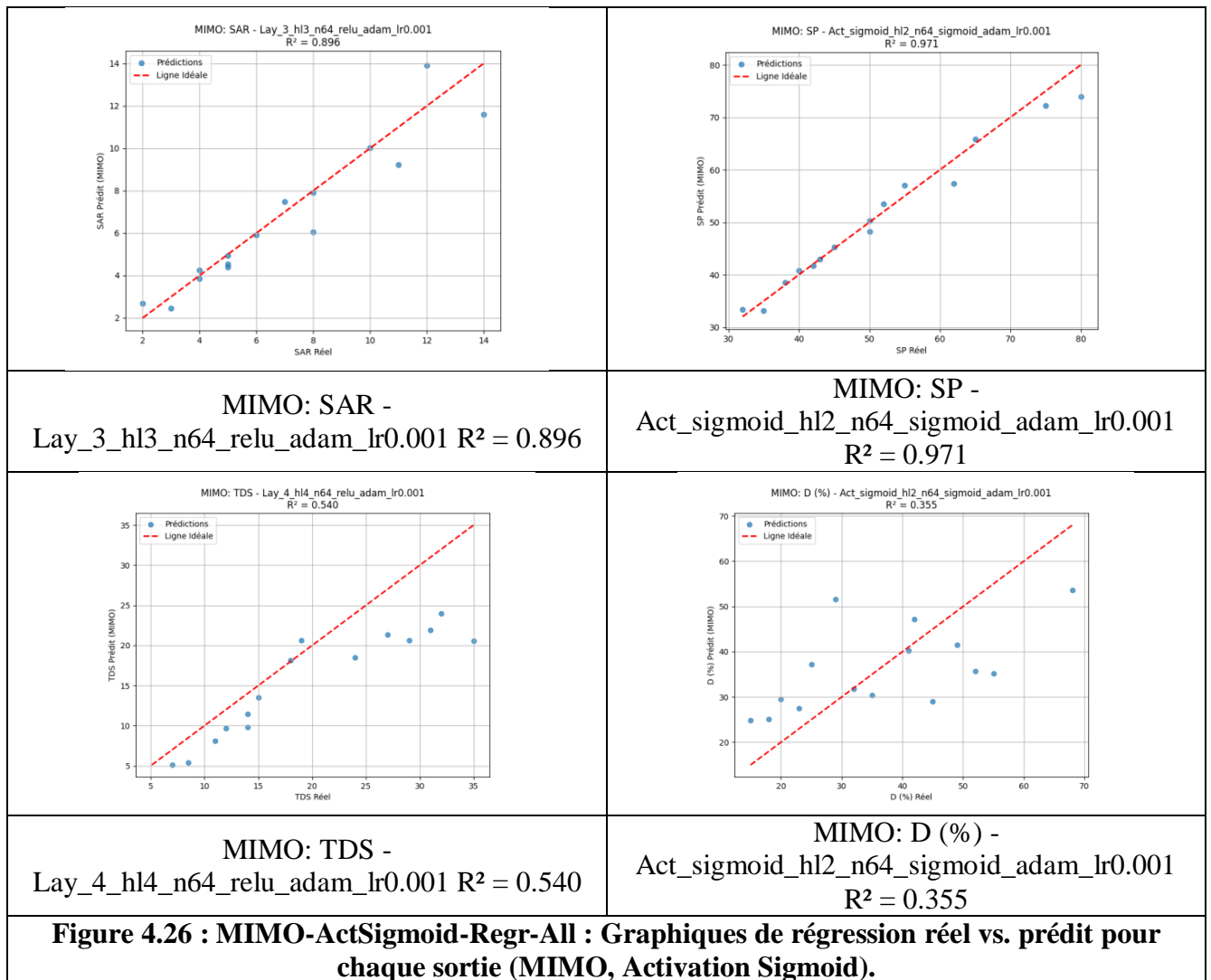


Figure 4.25 : SAR-Meilleur-Regr : Graphique de régression SAR réel vs. Prédit pour le meilleur modèle mono-sortie (Optimiseur RMSprop, $R^2 = 0.916$).

4.7.6. Analyse Détaillée des Résultats Graphiques pour le Modèle Multi-Sortie (MIMO)

L'activation sigmoïde (Figure 4.26 : MIMO-ActSigmoid-Histo-All et MIMO-ActSigmoid-Regr-All) donne une performance exceptionnelle pour **SP** ($R^2 = 0.971$), la meilleure observée pour cette variable y compris par rapport aux modèles mono-sortie. Elle est également correcte pour **TDS** ($R^2 = 0.397$) et **D (%)** ($R^2 = 0.355$). Cependant, la performance pour **SAR** ($R^2 = 0.609$) est notablement plus faible qu'avec relu ou tanh dans le contexte MIMO. Cela illustre comment une fonction d'activation peut favoriser certaines sorties au détriment d'autres dans un cadre multi-tâches.



4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré différentes approches pour analyser le comportement dispersif des sols. Nous avons commencé avec la régression multiple, utile pour identifier les paramètres influents, mais limitée face aux relations complexes. Pour surmonter cela, nous avons eu recours aux réseaux de neurones artificiels (RNA), qui ont montré une meilleure performance pour prédire l'indice de dispersion. Enfin, la méthode de Taguchi nous a permis de comprendre l'impact individuel des facteurs et de trouver les combinaisons optimales pour réduire le potentiel dispersif, tout en minimisant le nombre d'essais. Chaque méthode a ainsi apporté sa contribution pour affiner notre compréhension.

Conclusion générale

L'étude bibliographique nous a fourni des pistes pour une meilleure compréhension des caractéristiques du phénomène d'érosion externe et interne, de dispersion du sol et la relation qui existe entre ces phénomènes. Nous avons donné d'une façon sommaire les différentes méthodologies d'essai expérimentales pour la caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion. L'érosion interne peut être d'origine mécanique (détachement par forces d'entraînement), ou physico-chimique (dispersion). Elle englobe différents types d'actions : boulangage, débouillage, suffusion, érosion régressive,.... Elles peuvent avoir lieu au même endroit et en même temps, ce qui rend leur distinction difficile. D'autre part, les mécanismes mis en jeu lors du processus diffèrent selon le type de sol et de fluide d'érosion.

Cette étude a exploré l'application de réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de quatre paramètres physico-chimiques du sol (SAR, SP, TDS, et D (%)) à partir de huit caractéristiques d'entrée. Deux approches de modélisation, mono-sortie (un modèle par paramètre) et multi-sortie (MIMO, un modèle pour tous les paramètres), ont été systématiquement évaluées à travers une étude paramétrique par étape visant à identifier l'influence de divers hyperparamètres tels que l'optimiseur, la fonction d'activation, le nombre de neurones, le nombre de couches cachées et le taux d'apprentissage.

Les résultats indiquent que les réseaux de neurones sont capables de modéliser avec succès les relations pour le **Taux d'Adsorption du Sodium (SAR)** et le **Pourcentage de Sodium Échangeable (SP)**. Pour le SAR, le meilleur modèle mono-sortie (configuré avec l'optimiseur rmsprop, 2 couches cachées de 64 neurones, activation relu et un taux d'apprentissage de 0.001) a atteint un coefficient de détermination (R^2) de **0.916**. Pour le SP, une performance encore plus remarquable a été obtenue avec un modèle mono-sortie (activation sigmoïde, 2 couches de 64 neurones, optimiseur adam, LR 0.001) affichant un R^2 de **0.954**. Le modèle MIMO a également démontré une forte capacité à prédire ces deux variables, avec des configurations spécifiques atteignant des R^2 de 0.890 pour SAR et jusqu'à 0.971 pour SP (avec activation sigmoïde), surpassant même le meilleur modèle mono-sortie pour SP. Ces excellents scores suggèrent que les caractéristiques d'entrée fournies contiennent une information pertinente et suffisante pour que les réseaux de neurones apprennent et généralisent efficacement les dynamiques complexes régissant le SAR et le SP.

En revanche, la prédiction du **Total des Solides Dissous (TDS)** et du **Pourcentage de Dispersion (D (%))** s'est avérée significativement plus difficile. Le meilleur modèle mono-sortie pour le TDS a atteint un R^2 de **0.614** (avec un taux d'apprentissage élevé de 0.01), tandis que pour D (%), le meilleur R^2 obtenu était de **0.350** (avec une architecture à 3 couches cachées). Le modèle MIMO, bien qu'ayant atteint un R^2 de 0.540 pour le TDS avec une configuration spécifique (4 couches), a généralement peine à améliorer substantiellement la prédiction de D (%), avec des R^2 souvent inférieurs à 0.4.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer les performances plus faibles observées pour le TDS et, en particulier, pour le D (%) :

En conclusion, cette étude démontre le potentiel significatif des réseaux de neurones pour la modélisation des paramètres SAR et SP, atteignant des niveaux de précision élevés. Pour le TDS et D (%), les performances sont plus modestes, indiquant la nécessité d'investigations supplémentaires. Les perspectives futures devraient s'orienter vers l'enrichissement de l'ensemble de données, tant en quantité qu'en diversité des caractéristiques d'entrée (notamment celles spécifiquement liées à la minéralogie et à la composition ionique détaillée). L'exploration

d'architectures de réseau plus avancées, l'application systématique de techniques de régularisation pour les modèles plus complexes, et l'utilisation de méthodes de recherche d'hyperparamètres plus sophistiquées (comme l'optimisation bayésienne ou les algorithmes génétiques) pourraient également contribuer à améliorer la capacité prédictive pour les variables les plus récalcitrantes.

Références bibliographiques

- Pham T L.** (2008) « Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide » Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 232 p.
- Belarbi A.** (2015) « Erosion dans les ouvrages hydrauliques : de la dispersion à la détection en place » Thèse doctorat. Laboratoire Risk Assesment and Management RISAM, Tlemcen, 189 p.
- Dounane N.** (2021) « Application des plans d'expérience pour l'étude des sols gonflants» Thèse doctorat. Université Djillali Liabés de Sidi Bel Abbès, 100p.
- Rahal N.** (2020) « Identification, classification et caractérisation des sols fins» Mémoire master. Université Mohamed khider, Faculté des Sciences et de la Technologie, Biskra, 87 p.
- Rolland S.** (2002) « Transfert hydrique dans des sols argileux gonflants : influence du confinement » Institut National Polytechnique de Lorraine, 237 p.
- Bouziane Z.** (2014) « Etude expérimentale de la dispersion des argiles » Mémoire master. Université Abou Bekr Belkaid, Faculté de Technologie, Tlemcen, 65 p.
- Velde B.** (1995) « Minéralogie des argiles et propriétés des sols » Un livre classique sur la classification et la genèse des minéraux argileux.
- Eslinger E.et Pevear D R.** (1988) «Clay Minerals for Petroleum Geologists and Engineers» ,428 p.
- Bernard C.** (2003) « Dispersion formulation » Article | REF: J2185 V1, Paris.
- Knodel P.C.** (1991) « Characteristics of dispersive and problems clay Soils, United States Department of the Interior» Colorado
- Ayers R S et Westcot D W.** (1985) « Water Quality for Agriculture » FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome .174 p.
- Santamarina J C et Klein K A.et Fam M A.** (2001) « *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring* » Journal of Soils and Sediments, Vol. 1, No. 2, 137 p.
- Kumar R et Samui P.** (2020) « ANN-Taguchi for Slope Stability: A Hybrid Approach Combining Artificial Neural Networks and Taguchi Method » Geotechnical and Geological Engineering, 38 p.
- Sherard, J.L.** (1976) «Identification and nature of dispersive soils » J. Geotech. Eng., 102(GT4), 75 p.
- Rengasamy P.** (1984) «Clay dispersion in relation to sodicity. Soil Sci » 355 p.
- USDA.** (2008) «Soil Quality Indicators » NRCS Tech. Bull., 14 p.
- Ayers R S et Westcot D W.** (1985) « Water quality for agriculture » FAO Irrigation 72 p.

Mansir I et Pisa P T. (2020) «Water Conservation and Green Infrastructure Adaptations to Reduce Water Scarcity for Residential Areas with Semi-Arid Climate »Kairouan, Tunisia, 2169 p.

Rengasamy P. (1984) « Soil Salinity and Sodicyty » Un ouvrage de référence analysant en profondeur les mécanismes de salinité et de sodicité des sols

Nelson J D & Miller D J. (1992) « Expansive Soils: Problems and Practice» Wiley, 67 p.

Fitzpatrick R W (1995) « Environmental Soil Science» CRC Press, 118 p.

Bolt G H & Bruggenwert M G M. (1978) « Soil Chemistry: A. Basic Elements» Elsevier, 156 p.

LCPC et SETRA. (2000). «Guide des Terrassements Routiers (GTR 2000). Éditions du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)» France, 486 p.

Norme : NF-P49-057

Norme : ASTM D 4647-93

Norme : ASTM D 6572-00

Norme : ASTM D 2487-17

Sites d'internet

Site web01:

(https://www.researchgate.net/figure/Erosion-regressive-chronologie-desevenementsdesevenements-Charlot-96_fig2_43322392) [Accessed 29 Apr 2025]

Site web02:

(<https://www.lne.fr/sites/default/files/inline-images/particule-agglomerat-agregat.jpg>) [Accessed 29 Apr 2025]

Site web 03:

(https://cdn0.projetecolo.com/fr/posts/7/4/6/pourquoi_les_marees_se_produisent_elles_647_1_600.webp) [Accessed 29 Apr 2025]

Site web 04:

(https://www.encyclopedie-environnement.org/app/uploads/2020/09/Fig7_effet-sodium-structure-sol.png) [Accessed 29 Apr 2025]

Références bibliographiques des BDD

BOUKHEZNA A. (2018) « Caractérisation géotechnique des argiles résiduelles du Nord-Algérien » Thèse de doctorat, Université d'Alger, 215 p.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières RP-65432-FR. (2020) « Étude des argiles résiduelles du Massif Central : propriétés mécaniques et comportement au gonflement » 48 p.

Association Française de Normalisation NF P 94-051. (1995) « Sols : Reconnaissance et essais, Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau » 15 p.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (2005) « Classification et identification des sols plastiques - Méthode LPC » 32 p.

Anciennement American Society for Testing and Materials D5890-19. (2019) « Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners » 5 p.

Association Française de Normalisation NF EN ISO 17892-12. (2018) « Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité » 20 p.

Direction Interdépartementale des Routes Méditerranée. (2019) « Rapport géotechnique - Projet A54 : Caractérisation des argiles silteuses » Projet routier, France, 75 p.

Direction Générale de l'Aménagement du Territoire Tunisie. (2015) « Étude des argiles calcaires des bassins sédimentaires tunisiens » Tunisie, 62 p.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières ANT-456. (2017) « Propriétés mécaniques des argiles volcaniques guadeloupéennes » 55 p.

Lab geo-001. (2021) « Fiche technique des essais sur argiles » France, 18 p.

Projet Bâtiment et Travaux Publics ONTT. (2019) « Caractérisation des argiles sableuses pour le projet Tunis-Gabès » Rapport No. TUN/BTP/2019-03, Tunisie, 41 p.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (2008) « Catalogue des essais sur argiles limoneuses » 28 p.

American Society for Testing and Materials D4318-17. (2017) « Standard test methods for liquid limit, Plastic Limit, and Plasticity index of soils » 14p.

Institut de Recherche pour le Développement Éditions. (2016) « Manuel des sols tropicaux - Tome 3 : Argiles latéritiques » 184 p.

Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de Construction. (2020) « Fiche technique ARG-MAR-2020 : Carrières du Bassin Parisien » France, 12 p.

Voies Navigables de France. (2018) « Étude géotechnique des argiles alluviales du Rhône - Secteur Lyon » 63 p.

Acronyme de Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures. (2014) « Comportement des argiles éoliennes sahariennes en génie pétrolier » Sahara, 38 p.

Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les Constructions publiques. (2017) « Étude des argiles lacustres du Léman pour fondations profondes » 52 p.

Restauration des Terrains en Montagne Grenoble. (2019) « Cartographie des argiles glaciaires des Alpes françaises » 89 p.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. (2020) « Guide d'utilisation des argiles faiblement plastiques en BTP » 36 p.

Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. (2016) « Classification des sols limono-argileux pour infrastructures routières » 24 p.

Institut National de la Recherche Agronomique. (2015) « Mémento des argiles organiques à faible activité » 31 p.

American Society for Testing and Materials D2487-17. (2017) « Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) » 12 p.

Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols. (2017) « Fiche technique ARL-2017 : Argiles limoneuses pour remblais » 15 p.

Association Française de Normalisation NF P 94-056. (1992) « Sols : Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique par sédimentation » 23 p.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées RN-25. (2003) « Méthode d'identification des sols fins au laboratoire - Application aux argiles lacustres et silteuses » 42 p.

British Standard 1377-2:1990, BS 1377-2. (1990) « Methods of test for soils for civil engineering purposes - Part 2: Classification tests » 32 p.

American Society for Testing and Materials D5890-19. (2019) « Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners » 5 p.

Association Française de Normalisation NF P 94-051. (1995) « Sols Reconnaissance et essais, Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau » 15 p.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées RN-28. (2005) « Identification et comportement des argiles silteuses - Projet national Sols » 112 p.

EN Organisation internationale de normalisation 14688-1. (2018) « Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description » 38 p.

United States Geological Survey PP 1584. (2012) « Volcanic Clay Minerals of Hawaii - Geotechnical Properties » 47 p.

American Society for Testing and Materials D4546-14. (2014) « Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils » 8 p.

Organisation internationale de normalisation 14688-1. (2018) « Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description » 38 p.

Direction Générale des Équipements Maroc RT-45. (2020) « Caractérisation des argiles sableuses rouges - Projet BTP Marrakech » 27 p.

Association Française de Normalisation NF EN ISO 17892-12. (2018) « Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité » 20 p.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières. RP-68542-FR. (2021) « Traitement des argiles gonflantes par stabilisation chimique - Protocoles et résultats » 68 p.

Association Française de Normalisation NF P 94-051. (1995) « Sols : Reconnaissance et essais, Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau » 15 p.

American Society for Testing and Materials D2487-17. (2017) « Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) » 12 p.

Organisation internationale de normalisation 14688-2. (2017) « Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification » 34 p.

Association Française de Normalisation NF P 94-090-1. (2018) « Sols : Reconnaissance et essais - Essai de gonflement - Partie 1 : Méthode du chargement constant » 18 p.

American Society for Testing and Materials D422-63e2. (2007) « Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils » 9 p.

EN Organisation internationale de normalisation 14688-1. (2018) « Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description » 38 p.

American Society for Testing and Materials D2488-17a. (2017) « Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure) » 10 p.

Organisation internationale de normalisation 17892-5. (2017) « Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 5: Incremental loading oedometer test » 22 p.