

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Université Mohammed Seddik Benyahia- de Jijel
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences de la Terre et de l'Univers

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم علوم الأرض و الكون

Thèse

Présentée par

Inas BERDI

Pour l'obtention de

Doctorat en 3^{ème} cycle LMD

Filière : **Géologie**

Spécialité : **Géologie de l'ingénieur et Géotechnique**

Thème

**Stabilisation et renforcement des sols : Cas des matériaux
locaux**

Soutenu publiquement le 31 Janvier 2024, devant le jury composé de :

Président	: BOUZENOUNE Azzedine	Professeur	Université de Jijel
Rapporteur	: MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda
	BENZAID Riad	Professeur	Université de Jijel
Examineurs :			
	MESSIOUD Salah	Professeur	Université de Jijel
	LAOUAR M. Salah	Professeur	Université de Tébessa
	HADJI Rihab	Professeur	Université de Sétif

Remerciements

On remercie le bon Dieu qui nous a donné le pouvoir, la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce travail.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, Monsieur **MESSAST Salah**, professeur à l'Université de Skikda, et Monsieur **BENZAID Riad**, professeur à l'Université de Jijel, pour leur patience, leur expertise et leurs conseils avisés qui ont grandement enrichi ce travail. Leurs encouragements constants m'ont motivé à aller au-delà de mes limites académiques.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer cette thèse et pour leurs précieuses suggestions qui ont permis d'améliorer sa qualité.

Mes gratitudes les plus sincères pour mes **chers parents**, votre dévouement sans faille et votre soutien moral m'ont donné la force et la confiance nécessaire pour surmonter les défis rencontrés sur le chemin de la réussite. Vos valeurs, vos enseignements et votre exemple ont été une source d'inspiration et de motivation inestimable pour moi.

Je tiens à remercier mon cher mari **Aziz** pour sa compréhension et son aide durant ce parcours académique.

Mes vifs remerciements à ma chère tante **Saliha** et mes chères sœurs **Selma, Sara, Hadjer et Amel** pour leurs conseils et leurs encouragements.

Je remercie mes chers frères **Mohamed et Charaf** et mon beau frère **rida** pour leur aide.

Je souhaite exprimer ma gratitude au vice-doyen de la post-graduation, Monsieur **SIFOUR Mohamed**, pour son aide précieuse dans les tâches administratives.

Je souhaite également mettre en avant l'apport inestimable de mon amie de promotion, **Imane Idoui**, qui m'a offert un soutien indéfectible et des encouragements constants. Sa présence a été une source inépuisable de motivation et de réconfort tout au long de cette aventure académique.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers toute l'équipe du Laboratoire des Travaux Publics (**LTPE**) et l'équipe du laboratoire de Génie Civil à l'université de Jijel, pour leur disponibilité et leur soutien précieux tout au long de mes analyses.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Merci à tous

Dédicace

Je dédie cette thèse :

À la mémoire de mes *grands-parents*, dont l'amour, le soutien et les enseignements ont été une source d'inspiration constante tout au long de ma vie. Leur héritage continue de guider mes pas et d'illuminer mon chemin, même en leur absence. Que leur mémoire soit éternelle.

À *moi-même*, en reconnaissance de l'effort, du dévouement et de la persévérance que j'ai investie dans cette recherche. C'est le fruit de mon travail acharné, de ma passion et de ma détermination à atteindre mes objectifs académiques. Puissent les leçons apprises et les connaissances acquises au cours de ce parcours continuer à m'inspirer et à me guider vers de nouveaux horizons.

À *ma mère* et à *mon père*, mes guides et mes inspirations tout au long de ma vie. Leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices ont été les fondations sur lesquelles j'ai construit ma réussite académique. Leur dévouement et leurs valeurs m'ont façonné en tant que personne et ont nourri ma passion pour l'apprentissage.

À *mon mari*, compagnon de vie et source infinie de soutien et d'inspiration, sa patience et son encouragement ont été les piliers sur lesquels j'ai pu construire ce projet.

À *Imane Idoui*, cette agréable personne avec qui j'ai partagé de précieux moments d'échange et de collaboration. Son soutien, son encouragement et son engagement ont été d'une valeur inestimable pour la réalisation de ce travail. Puissent nos interactions avoir enrichi nos parcours respectifs, et que cette dédicace témoigne de ma sincère reconnaissance envers elle.

À mes amies de la promotion 2018, en particulier *Dounyazed* et *Amel*. Je leur souhaite une excellente continuation.

Résumé :

La croissance des activités humaines implique l'élargissement du foncier constructible et qui n'est pas toujours des sols de bonne portance surtout les sols argileux qui présentent des phénomènes très complexes qui affectent différents types d'ouvrages causant des désordres considérables qui imposent des reprises en sous-œuvre très coûteuses et dont la réalisation n'est pas souvent maîtrisée.

Pour remédier à ces problèmes, on fait le recours à l'amélioration des caractéristiques de ces sols par des techniques de stabilisation et/ou de renforcement, et cela demande de trouver des solutions rapides, efficaces et aussi moins coûteuses. Ces techniques innovantes visent à renforcer les propriétés géotechniques de différents types de sols même s'ils sont de mauvaise qualité, pour les traiter et les rendre propices à la construction.

Nous nous focalisons sur la valorisation des déchets agricoles, industriels et commerciaux via une approche expérimentale pour stabiliser les argiles en laboratoire. Notre étude vise à évaluer l'impact de ces déchets sur divers essais standardisés en laboratoire, à des concentrations de 2 %, 4 %, 6 % et 8 %. Les résultats démontrent que l'intégration de ces déchets améliore les propriétés géotechniques des sols en réduisant leur plasticité et leur potentiel de gonflement, tout en augmentant leur portance et leur résistance. À l'échelle microscopique, ils ont modifié la microstructure des sols par le changement de la morphologie de la surface et la création des liaisons entre les particules de sols et les ajouts.

Mots-clés : Valorisation, Stabilisation, Déchet agricole, Déchet industriel, Déchet commercial

Abstract:

The growth of human activities implies the enlargement of the building land and which is not always of good bearing capacity especially the clayey soils which present very complex phenomena which affect various types of works causing considerable disorders which impose very expensive resumptions under work and whose realization is not often controlled.

To remedy these problems, we resort to the improvement of the characteristics of these soils by stabilization and/or reinforcement techniques. These innovative techniques aim at reinforcing the geotechnical properties of different types of soils, even if they are of poor quality, in order to treat them and make them suitable for construction.

We are particularly interested in the valorisation of agricultural, industrial and commercial wastes by an experimental approach of clay stabilisation at laboratory scale. This research work aims to make a contribution to the study of the effect of waste on a set of tests standardized in the laboratory by the different percentages 2%, 4%, 6%, 8%. The results obtained show that the waste allows to improve the geotechnical properties of the soils by the decrease of the plasticity of the soil as well as the potential of swelling and also increase the bearing capacity and the resistance of the treated clayey soils. On a microscopic scale, they modified the microstructure of the soil by changing the surface morphology and creating links between the soil particles and the additions.

Keywords: Valorization, Stabilization, Agricultural waste, Industrial waste, Commercial waste

المخلص :

ينطوي نمو الأنشطة البشرية على التوسع في أراضي البناء والتي لا تكون دائماً تربة ذات قدرة تحمل جيدة ، وخاصة التربة الطينية التي تقدم ظواهر معقدة للغاية تؤثر على أنواع مختلفة من الأعمال مسببة اضطرابات كبيرة تفرض استثناءً في أسس مكلفة للغاية والتي يكون تنفيذها هو في كثير من الأحيان لا يتقن. ولمعالجة هذه المشاكل، يجب اللجوء إلى تحسين خصائص هذه التربة من خلال تقنيات التثبيت و / أو التعزيز. وهذا يتطلب إيجاد حلول سريعة وفعالة وأقل تكلفة ، وتهدف هذه التقنيات المبتكرة إلى تعزيز الخصائص الجيوتقنية لأنواع مختلفة من التربة حتى لو كانت ذات نوعية رديئة ، لمعالجتها وجعلها مناسبة للبناء

نهتم في هذه الدراسة بشكل خاص باستعادة النفايات الزراعية والصناعية والتجارية من خلال نهج تجريبي لتثبيت الطين في المختبر. يهدف هذا البحث إلى المساهمة في دراسة تأثير النفايات على مجموعة من الاختبارات المعملية المعيارية بنسب مختلفة 2% ، 4% ، 6% ، 8%. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن النفايات تجعل من الممكن تحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة عن طريق تقليل ليونة التربة وكذلك إمكانية الانتفاخ وكذلك زيادة قدرة التحمل ومقاومة التربة الطينية المعالجة. وعلى المستوى المجهرى، فقد عدلت البنية المجهرية للتربة عن طريق تغيير شكل السطح وخلق روابط بين جزيئات التربة والإضافات.

الكلمات المفتاحية : الاستقرار. التثمين. نفايات زراعية. نفايات صناعية . نفايات تجارية.

Sommaire

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
المخلص.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	ix
Introduction générale	1
Chapitre I : Revue de la littérature sur la stabilisation des sols par les déchets locaux	
Introduction.....	3
1. Stabilisation des sols à l'aide de déchets industriels.....	3
2. Stabilisation des sols à l'aide de déchets agricoles.....	7
3. Stabilisation des sols à l'aide de déchets commerciaux	12
Conclusion.....	15
Chapitre II: Matériaux et protocoles expérimentaux	
Introduction.....	16
1. Matériaux.....	16
2. Aperçu géologique des sols étudiés	17
3. Protocole expérimental au laboratoire.....	20
3.1. Analyses physico-mécaniques des sols utilisés.....	21
3.2. Analyses chimiques.....	26
3.3. Analyses minéralogiques.....	27
3.4. Analyses des microstructures.....	27
Chapitre III: Identifications et caractérisations des sols utilisés	
Introduction.....	28
1. Propriétés d'identifications des sols.....	28
2. Interprétations des essais physico-mécaniques.....	30
3. Propriétés chimiques des sols étudiés.....	38
4. Propriétés minéralogiques des sols étudiés.....	40
5. Analyses microstructurales des sols utilisés.....	42
Conclusion.....	43
Chapitre IV: Caractérisations des déchets	
Introduction.....	44
1. Définition de déchet.....	44
2. Types de déchets.....	44

2.1. Déchet industriel.....	44
2.1.1. Propriétés physiques de la cendre de papier.....	45
2.1.2. Propriétés chimiques de la cendre de papier.....	45
2.1.3. Propriété minéralogique de la cendre de papier.....	46
2.1.4. Propriété microstructurale de la cendre de papier.....	47
2.2. Déchets agricoles.....	47
2.2.1. Propriétés physiques, chimiques et microstructurale des grignons d'olives.....	48
2.2.2. Propriétés physiques et microstructurale de la rafle de maïs.....	50
2.3. Déchet commercial	51
2.3.1. Propriétés physiques et microstructurale de la fibre de jute.....	51
Conclusion.....	52

Chapitre V : Résultats et discussions

Introduction.....	53
1. Influence des grignons d'olives sur le comportement du sol argileux (Ouled Salah)	
1.1. Influence des grignons d'olives sur la gravité spécifique	53
1.2. Influence des grignons d'olives sur l'indice de gonflement libre.....	53
1.3. Influence des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg.....	54
1.4. Influence des grignons d'olives sur le compactage.....	55
1.5. Influence des grignons d'olives sur la résistance de cisaillement des sols.....	56
1.6. Influence des grignons d'olives sur la compressibilité du sol.....	58
2. Utilisation de la rafle de maïs pour le traitement du sol argileux (Ouled Salah)	
2.1. Comportement de la gravité spécifique du sol traité par la rafle de maïs	60
2.2. Comportement de l'indice de gonflement du sol traité par la rafle da maïs	60
2.3. Comportement des limites d'Atterberg du sol traité par la rafle de maïs.....	61
2.4. Comportement de la compacité du sol traité par la rafle de maïs	61
2.5. Comportement de la résistance de cisaillement du sol traité par la rafle de maïs.....	63
2.6. Comportement de la compressibilité du sol traité par la rafle de maïs.....	64
3. Effet de la cendre de papier sur les propriétés du sol reconstitué	
3.1. Effet de la cendre de papier sur le pH du sol	66
3.2. Effet de la cendre de papier sur l'indice de gonflement libre	66
3.3. Effet de la cendre de papier sur les limites d'Atterberg du sol.....	67
3.4. Effet de la cendre de papier sur le compactage du sol.....	67
3.5. Effet de la cendre de papier sur la résistance au cisaillement du sol.....	69
3.6. Effet de la cendre de papier sur la résistance à la compression du sol	70
3.7. Effet de la cendre de papier sur la compressibilité du sol.....	71
3.8. Effet de la cendre de papier sur la microstructure du sol argileux.....	72

4. Effet des grignons d'olives sur les propriétés du sol reconstitué

4.1. Evolution de la gravité spécifique en fonction du pourcentage des grignons d'olives.....	74
4.2. Evolution de l'indice de gonflement en fonction du pourcentage des grignons d'olives..	74
4.3. Evolution de la limite d'Atterberg en fonction du pourcentage des grignons d'olives.....	75
4.4. Evolution de la compacité de sol en fonction du pourcentage des grignons d'olives	76
4.5. Evolution de la résistance au cisaillement en fonction du pourcentage des grignons d'olives.	77
4.6. Evolution de la compressibilité de sol en fonction du pourcentage des grignons d'olives....	79
4.7. Effet des grignons d'olives sur la microstructure du sol	80
5. Effet de la fibre de jute sur le comportement mécanique du sol argileux (Sol El Harrouche)	
5.1. Effet de la fibre de jutes sur le compactage du sol	82
5.2. Effet de la fibre de jute sur la portance du sol	83
5.3. Effet de la fibre de jute sur les paramètres de cisaillement du sol.....	84
Conclusion.....	85

Conclusion générale et perspectives

Liste des figures

Fig. 1. Sol naturel (a : Ouled Salah, b : El-Harrouche).....	16
Fig.2. Composant du sol reconstitué.....	17
Fig. 3. Carte d'échantillonnages.....	17
Fig.4. Esquisse géologique de l'extrémité occidentale de la petite Kabylie	18
Fig.5. Carte géologique du gisement de Tamazert.....	19
Fig. 6. Méthodologie de travail.....	20
Fig. 7. Mesure de pH (pH-mètre).....	21
Fig.8. Essai du poids volumique des grains solides.....	21
Fig.9. Essai de gonflement libre.....	22
Fig.10. Appareillages et outils pour la mesure des limites d'Atterberg.....	23
Fig.11. Essai au bleu de méthylène.....	23
Fig.12. Essai de compactage.....	24
Fig.13. Appareillage de cisaillement	24
Fig.14. Essai de compressibilité a l'œdomètre	25
Fig.15. Appareil de CBR.....	25
Fig.16. Essai de la résistance à la compression.....	26
Fig.17. Spectrométrie de fluorescence par les rayons x.....	26
Fig.18. Diffractomètre.....	27
Fig.19. MEB du plateau technique d'analyse physico-chimique	27
Fig.20. Courbe granulométrique du sol d'Ouled Salah.....	31
Fig.21. Courbe granulométrique du sol reconstitué.....	31
Fig.22. Courbe granulométrique du sol d'El-Harrouche.....	32
Fig.23. Diagramme de plasticité de Casagrande	33
Fig.24. Courbe de l'essai de compactage du sol d'Ouled Salah.....	34
Fig. 25. Courbe de l'essai de compactage du sol reconstitué	35
Fig. 26. Courbe de l'essai de compactage du sol d'El Harrouche.....	35
Fig.27. Courbe de compressibilité du sol d'Ouled Salah.....	36
Fig. 28. Courbe de compressibilité du sol reconstitué.....	36
Fig. 29. Courbe de compressibilité du sol d'El –Harrouche.....	37
Fig.30. Analyse minéralogique du sol naturel.....	40
Fig.31. Analyse minéralogique de la bentonite de Mostaganem.....	40
Fig.32. Analyse minéralogique du kaolin traité 2.....	41

Fig.33. Analyse minéralogique du sol reconstitué.....	41
Fig.34. Analyse au MEB du sol naturel	42
Fig.35. Observations au MEB du sol reconstitué	42
Fig.36. Etapes de la préparation de la cendre de papier	45
Fig.37. DRX de la cendre de papier	46
Fig.38. Analyse de la microstructure de la cendre de papier.....	47
Fig.39. Schéma représentant le processus de production des déchets oléicoles.....	47
Fig. 40. Étapes de la préparation des grignons d’olives	48
Fig.41. Analyse par EDX (Energie de dispersion par rayons X) des grignons d’olives	49
Fig.42. Images au MEB des grignons d’olives.....	49
Fig.43. Etapes de la préparation de la rafle de maïs.....	50
Fig.44. Analyse au MEB de la rafle de maïs.....	50
Fig.45. Fibres de jutes.....	51
Fig.46. Observations au MEB de la fibre de jute	51
Fig.47. Influence des grignons d’olives sur la gravité spécifique.....	53
Fig.48. Influence des grignons d’olives sur l’indice de gonflement libre.	54
Fig.49. Influence des grignons d’olives sur les limites d’Atterberg.....	55
Fig.50. Influence des grignons d’olives sur la densité sèche maximale.....	56
Fig.51. Influence des grignons d’olives sur la teneur en eau.....	56
Fig.52. Influence des grignons d’olives sur l’angle de frottement.....	57
Fig.53. Influence des grignons d’olives sur la cohésion.....	57
Fig.54. Influence des grignons d’olives sur l’indice de gonflement du sol.....	58
Fig.55. Influence des grignons d’olives sur l’indice de compressibilité du sol.....	59
Fig.56. Effet de la rafle de maïs sur la gravité spécifique.....	60
Fig.57. Effet de la rafle de maïs sur l’indice de gonflement libre.....	60
Fig.58. Effet de la rafle de maïs sur les limites d’Atterberg.....	61
Fig.59. Effet de la rafle de maïs sur la densité sèche du sol.....	62
Fig.60. Effet de la rafle de maïs sur la teneur en eau du sol.....	62
Fig.61. Effet de la rafle de maïs sur la cohésion du sol.....	63
Fig.62. Effet de la rafle de maïs sur l’angle de frottement du sol.....	64
Fig.63. Effet de la rafle de maïs sur l’indice de compression du sol.....	65
Fig.64. Effet de la rafle de maïs sur l’indice de gonflement du sol.....	65
Fig.65. Effet de la cendre de papier sur le pH du sol reconstitué	66
Fig.66. Effet de la cendre de papier sur l’indice de gonflement libre du sol reconstitué	66
Fig.67. Effet de la cendre de papier sur les limites d’Atterberg du sol reconstitué	67

Fig.68. Effet de la cendre de papier sur la densité sèche du sol reconstitué	68
Fig.69. Effet de la cendre de papier sur la teneur en eau du sol reconstitué	69
Fig.70. Effet de la cendre de papier sur l'angle de frottement du sol reconstitué	69
Fig.71. Effet de la cendre de papier sur la cohésion du sol reconstitué	70
Fig.72. Effet de la cendre de papier sur la résistance à la compression reconstitué.....	71
Fig.73. Effet de la cendre de papier sur l'indice de gonflement du sol reconstitué	72
Fig.74. Effet de la cendre de papier sur l'indice de compression du sol reconstitué	72
Fig.75. Effet de la cendre de papier sur la microstructure du sol reconstitué.....	73
Fig.76. Evolution de la gravité spécifique en fonction des grignons d'olives.....	74
Fig.77. Evolution de l'indice de gonflement en fonction des grignons d'olives.....	75
Fig.78. Evolution de la limite d'Atterberg en fonction des grignons d'olives	76
Fig.79. Evolution de la teneur en eau en fonction des grignons d'olives	77
Fig.80. Evolution de la densité sèche en fonction des grignons d'olives.	77
Fig.81. Evolution de la cohésion en fonction des grignons d'olives.....	78
Fig.82. Evolution de l'angle de frottement en fonction des grignons d'olives.....	79
Fig.83. Evolution de l'indice de gonflement en fonction des grignons d'olives ...	80
Fig.84. Evolution de l'indice de compressibilité en fonction des grignons d'olives.....	80
Fig.85. Effet des grignons d'olives sur la microstructure du sol reconstitué.....	81
Fig.86. Variation de la densité sèche maximale en fonction de la fibre de jute.....	82
Fig.87. Variation de la teneur en eau en fonction de la fibre de jute.....	83
Fig.88. Variation de l'indice de portance en fonction de fibre de jute.....	84
Fig.89. Variation de gonflement en fonction de la fibre de jute.....	84
Fig.90. Variation de l'angle de frottement en fonction de la fibre de jute.....	85
Fig.91. Variation de la cohésion en fonction de la fibre de jute.....	85

Liste des tableaux

Tableau 1. Caracteristiques physico- mécanique du sol d'Ouled Salah.....	28
Tableau 2. Caractéristiques physiques et mécaniques du sol d'El Harrouche.....	29
Tableau 3. Propriétés des composants du sol reconstitué	29
Tableau 4. Propriétés physico-mécaniques du sol reconstitué.....	30
Tableau 5. Classification des sols basée sur l'indice de gonflement libre.....	32
Tableau 6. Résultats obtenus sur le potentiel de gonflement.....	32
Tableau 7. Classification des sols en fonction de la valeur VBS.....	33
Tableau 8. Classification des sols en fonction des résultats VBS.....	33
Tableau 9. Classification des sols selon (Magnan 2001)	37
Tableau 10. Classification des sols selon (Magnan 2001).....	37
Tableau 11. Le potentiel de gonflement en fonction du critère géotechnique	38
Tableau 12. Résultats de l'essai CBR.....	38
Tableau 13. Résultats des analyses par XRF des composants de sol reconstitué.....	39
Tableau 14. Résultats des analyses par XRF du sol reconstitué	39
Tableau 15. Résultats des analyses par XRF du sol d'Ouled Salah	39
Tableau 16. Propriétés de la cendre de papier.....	45
Tableau 17. Résultats des analyses par XRF de la cendre de papier.....	45
Tableau 18. Propriétés physiques des grignons d'olives.....	48
Tableau 19. Résultats des analyses par l'EDX sur les grignons d'olives.....	48
Tableau 20. Propriétés physiques de la rafle de maïs.....	50
Tableau 21. Propriétés physiques de la fibre de jute.	51
Tableau 22. Composition de la fibre de jute.....	51
Tableau 23. Limites d'Atterberg du sol naturel traité par les grignons d'olives.....	54
Tableau 24. Influence des grignons d'olives sur le compactage de sol.....	55
Tableau 25. Essai de résistance au cisaillement sur le sol traité par les grignons d'olives.....	56
Tableau 26. Essai de la compressibilité du sol naturel traité par les grignons d'olives.....	58
Tableau 27. Limites d'Atterberg du sol naturel traité par la rafle de maïs.	61
Tableau 28. Effet de la rafle de maïs sur le compactage du sol.....	61
Tableau 29. Paramètres de résistance de cisaillement du sol traité par la rafle de maïs.....	63
Tableau 30. Essai de compressibilité du sol traité par la rafle de maïs.....	64
Tableau 31. Limites d'Atterberg du sol traité par la cendre de papier.....	67

Tableau 32. Résultats de compacité du sol traité par la cendre de papier	67
Tableau 33. Effet de la cendre de papier sur la résistance au cisaillement.....	69
Tableau 34. Résultats de résistance à la compression du sol traité par la cendre de papier.....	70
Tableau 35. Résultats de compressibilité du sol traité par la cendre de papier.	71
Tableau 36. Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg.....	75
Tableau 37. Essai de compactage du sol traité par les grignons d'olives.....	76
Tableau 38. Paramètres de résistance au cisaillement du sol traité par les grignons d'olives.....	76
Tableau 39. Résultats des grignons d'olives sur la compressibilité.....	79
Tableau 40. Résultats des essais Proctor normal du sol traité par les fibres de jute.....	82
Tableau 41. Résultats de CBR du sol traité par les jutes de fibres.....	83
Tableau 42. Résultats de l'effet de fibre sur les paramètres de cisaillement.....	85

Introduction générale

L'identification du sol est essentielle dans toute étude de projet, car elle fournit des informations cruciales sur les caractéristiques géotechniques du site. Les sols fins, en particulier, jouent un rôle crucial dans la construction et le support des ouvrages.

Une étude géotechnique approfondie est nécessaire pour caractériser les propriétés du sol telles que la granulométrie, la plasticité, la compacité, la cohésion, l'angle de frottement interne, la perméabilité, etc. Cette reconnaissance permet de comprendre le comportement du sol sous les charges appliquées et de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction des ouvrages.

Certains sols, tels que les argiles gonflantes, les limons, ou les sols organiques, sont sensibles à l'eau et peuvent subir des variations de volume importantes en fonction de leur teneur en eau. Une mauvaise gestion de ces sols peut entraîner des problèmes tels que le retrait, le gonflement, la fissuration des structures, etc. Une bonne reconnaissance du sol permet de mettre en place des mesures de prévention et de traitement appropriées pour éviter de tels problèmes.

Des nouvelles approches sont développées pour valoriser les déchets locaux disponibles dans la nature afin de les réutiliser pour les applications en génie civil surtout dans le domaine des travaux de terrassement.

L'avantage financier du recyclage et la réutilisation des matériaux est de réaliser des économies significatives car il minimise leurs coûts de transport associés et le coût des méthodes de construction traditionnelles. Tous les processus conduisent à des économies importantes de matières premières en plus d'un fort impact socio-économique. Pour cette raison, Nous avons proposé d'utiliser des déchets locaux disponibles dans la région de Jijel, pour améliorer les caractéristiques physico-mécaniques des sols argileux et le choix des déchets dépendent de leur efficacité et de leur gratuité et disponibilité dans la nature.

Cette thèse est composée de cinq chapitres qui sont ordonnés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique et à l'état de l'art sur les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols et les problèmes rencontrés lors du traitement. L'efficacité de chaque méthode est examinée en termes de ses effets sur les propriétés géotechniques des sols. Cette analyse permet de poser les bases conceptuelles pour la recherche menée dans les chapitres suivants.

Le deuxième chapitre est basé sur la présentation des sites et la description de l'ensemble des essais effectués au laboratoire avec le protocole de chaque essai. Il comprend le protocole pour chaque

essai, couvrant les aspects techniques et méthodologiques. De plus, il offre une analyse des différentes formations géologiques présentes dans les zones d'étude, ce qui aide à comprendre le contexte géotechnique dans lequel les essais ont été menés.

Le troisième chapitre est réservé à l'identification et à la caractérisation des sols utilisés pour cette recherche. Il présente une étude détaillée des propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques des sols, en utilisant une gamme d'analyses approfondies. L'identification des sols est effectuée en utilisant des classifications normalisées, ce qui permet une comparaison avec d'autres études géotechniques.

Le quatrième chapitre est basé sur la description des déchets choisis pour le traitement des sols à savoir la cendre de papier, les grignons d'olives, la rafle de maïs et la fibre de Jute. Il fournit une description approfondie des propriétés physiques, chimiques et minéralogiques de chaque type de déchet, ce qui est essentiel pour évaluer leur potentiel en tant qu'additifs de stabilisation des sols.

Le cinquième chapitre analyse l'impact des différents pourcentages des déchets (grignons d'olives, cendre de papier, rafle de maïs) sur diverses propriétés physiques et mécaniques des sols. Les paramètres tels que le pH, la gravité spécifique, la limite d'Atterberg, la résistance au cisaillement, et la compressibilité sont étudiés. De plus, l'influence de ces déchets sur la microstructure des sols est examinée à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB). Les résultats obtenus sont interprétés pour évaluer l'efficacité des déchets dans le traitement des sols.

Enfin, on termine par une conclusion générale et expertises. Cette section fournit une perspective globale sur l'ensemble de la recherche et met en lumière ses contributions à la science géotechnique.

Chapitre I :

Revue de la littérature sur la stabilisation des sols par les déchets locaux

Introduction :

La stabilisation des sols a pour but de modifier les propriétés d'un sol de mauvaises caractérisations géotechniques en vue d'améliorer les performances techniques. Elle consiste à améliorer les propriétés physiques (texture, granulométrie), et mécanique par l'augmentation de la résistance du sol et réduire la compressibilité et la sensibilité à l'eau. Améliorer les liaisons existantes entre les particules du sol (amélioration de la cohésion) et enfin réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité). La stabilisation crée donc un matériau de sol amélioré présentant les propriétés techniques souhaitées. Elle doit être compatible avec la conception de l'ouvrage concerné, la qualité du matériau, le coût du projet et la durabilité.

Plus récemment, la stabilisation des sols est devenue une tendance populaire grâce aux nouvelles méthodes adoptées par le recyclage de différents déchets que ce soit agricole, industriel, commerciale

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique présente les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols argileux.

1. Stabilisation des sols par les différents déchets locaux disponibles dans la nature :

1.1 Stabilisation des sols à l'aide de déchets industriels :

1.1.1 .Plastiques

L'accumulation croissante de déchets plastiques dans la nature nécessite une action rapide afin de trouver des solutions pour les recycler. Plusieurs chercheurs ont utilisé ces déchets disponibles dans la nature pour améliorer les propriétés géotechniques des sols faibles ou mous.

J. Kalliyath et al. (2016) ont fait un traitement de sol par les fibres de plastiques de 2 mm d'épaisseur avec les différents pourcentages (0,5%, 1%, 1, 5%). Ils ont trouvé que la stabilisation des sols limoneux par les fibres de plastiques est assurée par le pourcentage de 0,5%, c'est la valeur optimale.

Y. Mallikayuna et T. Bindumani (2016) ont cherché à stabiliser le sol de Coton Noir dans la région de la capitale de l'Andhra Pradesh en Inde. Ce sol est caractérisé par une faible capacité portante à cause du retrait-gonflement et une faible résistance au cisaillement. La stabilisation adoptée par les auteurs était des bandes plastiques introduites avec des quantités différentes (2%, 4%, 6% et 8%). En se basant sur les tests Proctor et CBR, ils ont montré que les valeurs augmentent jusqu'à 4% et ensuite diminuent. Dans ce travail la valeur de 4% représente un seuil de saturation.

A.Fauzi et al. (2016) ont stabilisé deux sols argileux de propriétés géotechniques différentes par le mélange de la fibre de plastique et la poudre de verre. Ils ont constaté une augmentation de la résistance de sol marqué par l'augmentation la valeur de CBR, cohésion et l'angle de frottement.

T. Kumar et al. (2018) ont utilisé des bandes plastiques pour renforcer un sol faiblement compressible

avec différentes tailles de coupe (1 cm, 2 cm, 3 cm) et différentes quantités (0,2%, 0,5%, 0,8% et 1%). Les auteurs ont constaté que l'augmentation de la taille et le pourcentage des bandes plastiques donnent une diminution de la densité sèche, une augmentation de la teneur en eau et de la valeur CBR. Le pourcentage de 0,8% de bandes plastiques d'une longueur de 2 cm a été considéré comme un seuil de saturation.

M. Kumar et al. (2022) ont montré la faisabilité d'utiliser des bandes de déchets de sacs en plastique comme matériau de renforcement dans le sol expansif pour améliorer ses propriétés techniques et mécaniques telles que la valeur de CBR et la résistance au cisaillement.

1.1.2. Laitier granulé

Le laitier granulé est utilisé comme adjuvant de traitement des sols faibles ou mous. Plusieurs chercheurs ont utilisé ce déchet industriel pour améliorer les propriétés géotechniques de différents types de sols:

E. Cokca et al. (2009) ont stabilisé le sol par le mélange de laitier et de ciment. Les résultats ont démontré l'efficacité des ajouts en modifiant la distribution des grains et en augmentant la densité. Ils ont également montré que ces ajouts diminuent la plasticité et le potentiel de gonflement du sol traité.

G. Sridevi et R. Sreerama (2014) ont remédié à un problème de sol gonflant par le mélange de chaux et de laitier granulé. Ils ont trouvé que la résistance à la compression augmente avec le temps de maturation de 28 jours.

M. Santosh et C.S. Vishwanath (2015) ont montré que les meilleurs résultats ont été obtenus pour un mélange de 9% de laitier de haut fourneau granulé et de cendre de balle de blé. Une réduction de la teneur en eau optimale, une augmentation de la densité sèche et la résistance à la compression simple du sol traité ont été constatées.

K. Sharma et P.V. Sivapullaiah (2016) ont amélioré les caractéristiques géotechniques d'un mélange du sol et de bentonite en y ajoutant des cendres volantes et du laitier granulé. Les chercheurs ont observé une réduction de la teneur en eau et une augmentation de la densité sèche. De plus, ils ont noté une amélioration significative de la résistance à la compression lors de l'incorporation de 1% de chaux, avec des périodes de durcissement de 7, 14 et 28 jours. Cependant, au-delà de 20%, l'efficacité du mélange utilisé dans leur traitement diminue.

S. Zemouli et N. Chelghoum (2018) ont traité un sol reconstitué (85% kaolin + 15% bentonite) avec différents pourcentages de 5 % à 25 % de laitier granulé et le laitier active (laitier granulé + chaux). Les résultats ont montré l'effet positif du laitier sur les paramètres géotechniques. Les auteurs ont mentionné que le laitier active donne des valeurs plus souhaitables pour la stabilisation des sols fins. Il augmente la résistance à la compression de 600 KN/m² à 1000 KN/m² et la densité sèche de 1,38 (t/m³) à 1,54

(t/m^3). L'indice de plasticité diminue de 38% à 25%.

G. Kumar et R.V. Singh (2022) ont approuvé que le mélange (3%, 5%, 7%, 9%) de laitier granulé et le pourcentage stable de 7% de la chaux donne de meilleurs résultats sur la valeur de CBR, la résistance à la compression et aussi la maniabilité de sol.

1.1.3. Poudre de céramique

A. K. Sabat (2012) a étudié l'effet de la poudre de céramique sur le gonflement d'un sol argilo-marneux de la région de Bhubaneswar en Inde. L'auteur a traité le sol étudié avec différentes quantités de poudre de céramique allant de 0 à 30%. Les résultats de cette étude ont montré que l'ajout diminue l'indice de plasticité, la teneur en eau optimale et la pression de gonflement, augmente la densité sèche et améliore la résistance à la compression du sol traité.

Les résultats sont similaires pour A.A. Al-Saeedi et A.J. Al-Janabi (2019) qui confirment que la poudre de céramique est un bon matériau pour améliorer les propriétés géotechniques des sols argileux.

Aussi S.A. Saber et A. Iravanian (2022) ont prouvé que le pourcentage de 10% de la poudre de céramiques joue un rôle stabilisant dans les paramètres géotechniques des sols médiocres.

1.1.4. Déchets de briques

T.G. Rani et al. (2014) ont évalué l'effet des déchets de tuiles sur les résultats de certains tests géotechniques. Les résultats ont montré une augmentation proportionnelle des déchets de briques et la capacité portante du sol, ils ont remarqué une réduction considérable de la plasticité et du gonflement du sol traité.

C. Neeladharan et al. (2017) ont stabilisé un sol argileux avec différentes quantités de déchets de briques allant de 5% à 40% (avec un incrément de 5%) et d'hydroxyde de sodium de 2.5% à 20% (avec un incrément de 2.5%). Ils ont constaté que l'augmentation de la résistance du sol était proportionnelle à l'augmentation des quantités d'ajouts. Le mélange de 35% de déchets de tuiles avec 17,5% d'hydroxyde de sodium a été recommandé par les auteurs pour améliorer les propriétés géotechniques d'un sol argileux.

1.1.5. Poudre de verre

A. Tiwari et H.K. Mahiyar (2014) ont mené un programme expérimental pour améliorer les propriétés géotechniques d'un sol gonflant en combinant des cendres volantes, des fibres de coco et du verre concassé. Les pourcentages pour chaque ajout étaient les suivants : pour les cendres volantes 10% à 25%, pour la fibre de coco 0.25% à 1% et pour le verre concassé 3%, à 7%. Les meilleurs résultats obtenus pour la combinaison optimale sont 20 % de la cendre volante + 5 % du verre broyé + 1 % de la fibre de coco. Ce mélange réduit la pression de gonflement du sol argileux étudié.

J. Olufowobi et al. (2014) ont stabilisé un sol argileux par des mélanges composés de différents

pourcentages de poudre de verre (1, 2, 5, 10 et 15%) avec 15% de ciment. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de ces déchets industriels pour améliorer les propriétés géotechniques des sols argileux.

J.R. Benny et al. (2017) ont traité un sol argileux avec différents pourcentages de poudre de verre (2% à 10%). Les résultats obtenus ont montré une augmentation de la cohésion, de l'angle de frottement interne, de la densité sèche, la résistance à la compression et l'indice de portance du sol traité. Pour cette étude, le seuil de saturation au-delà duquel le traitement à la poudre de verre n'est plus efficace est de 8%.

G. M. Ayinuola et L. O. Balogun (2018) ont stabilisé un sol argileux par des fibres de verre en utilisant des pourcentages allant entre 0,4% à 3% avec un incrément de 0,4%. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de cet ajout sur la stabilisation à travers l'augmentation de la valeur CBR et la diminution de la densité sèche du sol traité. Par contre ils ont observé une augmentation de la teneur en eau optimale. La valeur de 1,6 % représente le seuil de saturation pour ce type d'ajout.

K. Subash et al. (2016) et S. Gowtham et al. (2018) ont trouvé des résultats satisfaisants pour la stabilisation de sol par le mélange de verre et le plastique, ils ont réussi à trouver les meilleures performances de sol.

1.1.6. Fibre de Canette d'aluminium :

H. Canakci et al. (2016) ont considéré les fibres de canettes d'aluminium comme un matériau de stabilisation mécanique vu sa rigidité et sa résistance. Ils ont proposé des différents pourcentages de 2% à 8%. Son efficacité est démontrée par l'augmentation de la valeur de CBR et la diminution de l'indice de gonflement libre. Le pourcentage de 6% considéré comme le pourcentage efficace de la fibre d'aluminium pourrait être utilisé pour obtenir les meilleures performances mécaniques.

S. Issac (2021) a tenté de remédier à la fragilité du sol de Coton Noir en incorporant des fibres issues de canettes d'aluminium. Il a utilisé des fibres coupées en 3 mm d'épaisseur, en proportions allant de 2% à 8% du poids total du mélange. Les résultats de l'expérimentation montrent une amélioration significative de la compacité du sol, se traduisant par une augmentation de la densité sèche, une hausse de la valeur de CBR, ainsi qu'une amélioration de la résistance à la compression, accompagnée d'une réduction de l'indice de gonflement libre. Pour obtenir les résultats optimaux, il est recommandé d'opter pour une concentration de 6%. Au-delà de ce seuil, l'efficacité de l'additif diminue.

1.1.7. Cendre de papier

Les cendres de papier sont des déchets inorganiques issus de la combustion du papier et présentent un aspect cimentaire et pouzzolanique en raison de la présence de chaux (CaO). L'utilisation de déchets de papier comme additif dans la stabilisation des sols argileux a montré des valeurs satisfaisantes.

N. Khalid et al. (2012) ont déterminé le pourcentage optimal de concentration de la cendre de la boue de papier en tant qu'additif pour une meilleure performance du sol argileux avec des variantes de 2% à 14% du poids total avec un temps de durcissement de 14 à 28 jours. Une augmentation proportionnelle entre l'addition et la résistance à la compression et la valeur CBR jusqu'à 12% et ensuite elle commence à diminuer. La durabilité de l'addition est assurée par un temps de durcissement de 28 jours.

A. Lisbona et al. (2012) ont fait deux investigations pour stabiliser le sol. La première au laboratoire par l'essai de la compression et la deuxième in situ par essai par le compactage en utilisant des pourcentages allant de 3% à 6% de poids total. Le mélange de la boue de papier calciné et le ciment favorisent une amélioration de la capacité portante du sol.

N. Khalid et al. (2015) ont répété l'expérience sur un sol argilo-sableux mou pour montrer l'effet des cendres de boues de papier usagé sur le comportement mécanique et les microstructures du sol avec un mélange de sol et la cendre de 2% à 16% en poids. Les meilleures valeurs de résistance au cisaillement, compression sont obtenues à 10% de l'addition avec un changement dans la microstructure lors de l'apparition de nouveaux agents cimentaires.

A. Kumar et S. S. Gupta (2016) ont traité un sol argileux par les boues de la cendre de papier avec un pourcentage de 2% à 10% de poids sur un ensemble des essais géotechniques. Les résultats montrent une diminution de la densité sèche maximale de $16.71 \text{ (KN/m}^3\text{)}$ à $14.97 \text{ (KN/m}^3\text{)}$ et une augmentation de la teneur en eau de 18.2% à 24.2 % et une augmentation de la résistance à la compression jusqu'à un optimum de mélange. Le seuil de saturation est trouvé à 6% de l'ajout.

M. Mavroulidou et al. (2017) ont utilisé la cendre de papier comme un stabilisant alternatif de la chaux. L'étude expérimentale a montré l'efficacité de l'ajout sur le comportement de sol et cela est prouvé par l'amélioration de la maniabilité du sol et l'augmentation de la résistance à la compression avec les périodes de durcissement de 7-14 jours.

K. C. Onyelowe (2017) a utilisé la cendre de papier pour traiter les sols avec des différents pourcentages de 3% à 15% avec un incrément de 3%. Il a utilisé des cendres de papier usagées nanostructurées comme adjuvant pour améliorer les propriétés géotechniques d'un sol latéritique avec différents pourcentages de 3% à 15% en poids sur une série de tests standardisés. Les meilleurs résultats sont obtenus à 12%. Une diminution de l'indice de plasticité, une bonne compacité, une augmentation de l'indice CBR ont été constatées. La résistance à la compression augmente avec le temps de cure de 28 jours. Il a conclu que le papier est un bon améliorateur de la résistance du sol surtout pour les matériaux de sous- base nécessaire pour la construction de chaussée

M. Mavroulidou (2018) a constaté aussi que la boue de la cendre est un bon additif et modifie les

propriétés géotechniques des sols mieux que la chaux et le ciment.

1.2 Stabilisation des sols à l'aide de déchets agricoles :

Les déchets agricoles sont les déchets générés par les différentes transformations résultant des produits et activités agricoles. Quelques travaux de recherche sur la stabilisation des sols expansifs à l'aide de déchets agricoles sont présentés ci-dessous.

1.2.1. Cendre de balle de riz.

Les sols tourbeux sont caractérisés par une faible portance et une très forte compressibilité. C'est pourquoi E. A. Basha et al (2005) ont utilisé le ciment et la cendre de la balle de riz pour stabiliser trois sols qui n'ont pas les mêmes propriétés physico-mécaniques. Les indications de l'amélioration sont montrées par la diminution de la plasticité, la densité sèche et augmentation de la teneur en eau, et aussi une augmentation de la résistance à la compression et le CBR.

F. E. Yulianto et N.E. Mochtar (2010) ont essayé d'améliorer les caractéristiques géotechniques du sol tourbeux avec l'ajout de 10% d'un mélange stabilisant (30% de chaux + 70% de balle de riz). L'étude a été faite pour différents temps de durcissement des échantillons de sol traités qui sont 1, 10, 20 et 30 jours. Les auteurs ont trouvé que la résistance au cisaillement du sol traité a augmenté d'environ 25% par rapport à son état initial, tandis que la résistance à la compression a diminué d'environ 10%.

S. R. Soni et al. (2011) ont traité avec succès le sol de Coton Noir de l'Inde par l'application de déchets solides (cendres volantes, poudre de balle de riz et chaux). Ils ont constaté que ce mélange stabilisant est plus efficace que l'utilisation de chacun de ces composants seuls. Les auteurs ont montré que l'indice de plasticité diminue alors que la résistance à la compression augmente. Les meilleurs résultats de cette étude ont été obtenus avec la combinaison de cendres volantes et de poudre de balle de riz avec de la chaux à 10%.

A.K. Sabat et al. (2012) ont observé des effets positifs sur le comportement d'un sol expansif traité avec des concentrations de balles de riz allant de 5% à 30%. L'efficacité de cette utilisation de déchets a été confirmée par l'amélioration de plusieurs caractéristiques géotechniques, telles que la résistance à la compression, les propriétés de compactage, l'élévation des valeurs de CBR et une réduction du potentiel de gonflement.

R. Gobinath et al. (2016) ont utilisé la précipitation de la silice par calcination de la balle de riz pour traiter le sol. Ils ont examiné différents pourcentages, allant de 10% à 70%, avec un intervalle de 10%. Les résultats des essais de CBR ont démontré une amélioration du sol, caractérisée par une réduction de la plasticité, une augmentation de la valeur de CBR et une amélioration de la perméabilité, ainsi que du compactage.

J. Jayashree et S.Roja Yamini (2019) ont entrepris une étude expérimentale pour évaluer l'utilisation

potentielle de la balle de riz et de la chaux en tant que matériaux stabilisants dans le sol expansif du Coton Noir. Ils ont ajouté de la cendre de balle de riz au sol et l'ont mélangée à différentes proportions, soit 10%, 15% et 20%, tout en maintenant la concentration de chaux constante à 5% du poids sec du sol. Les résultats ont indiqué que la meilleure combinaison, avec 5% de chaux et 15% de cendres de balle de riz, a produit la résistance maximale et a amélioré les propriétés du sol traité.

1.2.2. Cendre de maïs

Y. A. Jimoh et O. A. Apampa (2014) ont utilisé des cendres de la rafle de maïs comme pouzzolane et agent stabilisateur pour les sols latéritiques dans la construction de chaussées. Ils ont mélangé le sol avec de la cendre de maïs, le mélange latérite-cendre de maïs-ciment et le mélange latérite-ciment respectivement. Les résultats ont montré que la cendre de maïs améliore le CBR et les valeurs de la résistance à la compression non confinée du sol traité. Il a été démontré l'activation de la réaction pouzzolanique lors du mélange de ciment Portland ordinaire avec de la cendre de maïs.

Aussi I. I. Akinwumi et O. I. Aidomojie (2015) ont constaté des résultats similaires à ceux des auteurs précédents. Leurs conclusions ont démontré que l'addition réduit la plasticité du sol, ainsi que son potentiel de gonflement et sa perméabilité, tout en augmentant sa résistance.

A. T. Al-Janabi et A. A. Abdulabbas (2018) ont utilisé des déchets de cendres de maïs pour améliorer le comportement du sol gonflant de la ville de Hilla en Irak. Dans cette étude, les échantillons de sol étudié ont été traités avec des déchets de cendres de maïs à raison de 5 à 20% du poids sec. Les résultats ont montré une diminution des limites d'Atterberg, une réduction significative du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement à partir du seuil de 10% de déchets de cendres de maïs mélangés au sol traité.

F. S. Nnochiri et O. A. Adetayo (2019) ont utilisé de la cendre de maïs en différentes quantités (2% à 8%) afin d'améliorer le comportement géotechnique des sols latéritiques. Ce déchet agricole a permis d'améliorer la plasticité des sols traités (d'un sol plastique à un sol moins plastique) avec une augmentation de la résistance à la compression et à la traction. Ainsi qu'une amélioration de la sensibilité de la courbe Proctor. Les auteurs ont montré que le seuil de saturation pour ce type de traitement est de 8%.

1.2.3. Fibres de bagasse

La fibre de bagasse est un déchet ou précisément un sous-produit laissé après le broyage de la canne à sucre pour l'extraction du jus. Ce déchet a été utilisé de manière intéressante par plusieurs chercheurs comme ajout pour la stabilisation des sols expansifs.

K. S. Gandhi (2012) a étudié l'effet des fibres de bagasse sur un sol expansif avec l'ajout de différents pourcentages de cendres de bagasse (0%, 3%, 5%, 7%, et 10%). Les résultats montrent que la cendre de bagasse diminue le potentiel de gonflement des sols expansifs en remplaçant une partie du volume précédemment détenu par les minéraux argileux expansifs et en cimentant les particules du sol ensemble.

H. Danso (2015) a étudié l'effet des fibres de bagasse dans l'amélioration des propriétés géotechniques des sols argileux avec des proportions allant de 0,25 à 1 % de la masse du sol traité. L'auteur a proposé l'utilisation de 0,5 % de fibres de bagasse pour une meilleure performance de stabilisation des sols argileux.

L.C. Dang et al. (2017) ont évalué l'efficacité des fibres de bagasse et de l'ajout de chaux hydratée sur les propriétés géotechniques et le comportement de gonflement des sols expansifs stabilisés. Ils ont ajouté des proportions variables de fibres de bagasse (0.5%, 1.0% et 2.0%) distribuées aléatoirement dans un sol expansif et également dans un sol expansif déjà traité à la chaux. Les résultats de cette étude expérimentale ont indiqué que le traitement d'un sol expansif, avec des fibres de bagasse et de la chaux conduit à une augmentation significative de la résistance à la compression et de la capacité portante. D'autre part, le potentiel de gonflement et la compressibilité des sols expansifs stabilisés ont été réduits avec l'augmentation des teneurs en chaux et en fibres de bagasse.

M.Singh et R.Sharma (2017) ont mené une étude pour améliorer le comportement de la fameuse terre de Coton Noir en Inde avec des cendres de blé et des fibres de bagasse selon différents pourcentages (3% à 11%). Le mélange avec le sol montre une amélioration de la densité maximale pour 5% et 7% d'ajout. Les mêmes tendances ont été observées pour le CBR et la résistance à la compression confinée, où les valeurs maximales ont été observées à 7% d'addition.

1.2.4. Coquille de noix de coco

T. Athira et al. (2017) ont traité le sol gonflant avec différents pourcentages de poudre de coquille de noix de coco (0%, 3%, 6%, 9% et 12%) et de chaux (3%, 6% et 9%). Les tests ont été effectués après des périodes de maturation de 0, 7 et 28 jours afin d'étudier les propriétés de séchage et de mouillage. Les résultats de cette étude ont montré que la poudre de coquille de noix de coco et la chaux sont efficaces pour améliorer les propriétés géotechniques des sols expansifs. Une augmentation de la densité sèche maximale et la résistance optimale à la compression a été obtenue après 28 jours de durcissement pour 9 % de poudre de coquille de noix de coco et 6 % de chaux.

I.T.Yusuf et A.E.Zava (2018) ont utilisé la cendre de noix de coco comme stabilisateur de sol avec les différents pourcentages de 0 à 20%. Les résultats montrent qu'une amélioration n'est pas vraiment suffisante ce qui nécessite de chercher des ajouts très efficaces pour donner les meilleures performances de sol.

D. Jagwania et A. Jaiswal (2019) ont effectué une série de tests en laboratoire sur un sol de Coton Noir mélangé avec différentes proportions de cendres de coques de noix de coco (4%, 8%, 12%, 16% et 20%). Les résultats obtenus ont montré que le mélange de cendres de coques de noix de coco avec le sol de coton noir a réduit la plasticité. Ils ont également montré que la résistance à la compression non

confinée a été considérablement augmentée et la densité sèche maximale améliorée.

1.2.5. Déchets d'olives

Les grignons d'olive sont un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive, composé de peaux, de résidus de pulpe et de fragments de noyaux.

Z. Nalbantoglu et S. Tawfiq (2006) ont stabilisé un sol argileux inorganique de haute plasticité et au potentiel de gonflement assez important en utilisant différents pourcentages de grignons d'olive. Les résultats ont montré que 3 % de cendres de grignons d'olive étaient suffisants pour stabiliser un sol expansif. Il s'agit donc d'un seuil de saturation.

M.F. Attom et M.M. Al-Sharif (1998) ont utilisé des déchets d'olives brûlées comme stabilisateur de sols. Ils ont montré que l'ajout de 2,5 % en poids de déchets d'olive brûlés augmentait la résistance à la compression non confinée et la densité sèche maximale, tandis que l'ajout de 7,5 % en poids de cendres d'olive minimise la pression de gonflement du sol. Les auteurs ont également mentionné que l'ajout de plus de 2,5 % en poids diminuait à la fois la densité sèche maximale et la résistance à la compression non confinée.

U. Mutman (2013) a utilisé des cendres de déchets d'olive brûlés comme matériau pour stabiliser l'argile bentonitique avec une augmentation de 1 % en poids de 1 % à 10 %. Les résultats des tests ont montré que l'indice de plasticité et la gravité spécifique des sols traités diminuent avec l'augmentation du pourcentage de cendres de déchets d'olive. Aux temps de cure de 28 jours, l'échantillon de sol traité avec 10 % de cendres de déchets d'olive a montré une diminution significative de la résistance à la compression.

1.2.6. Cendre de balle de blé

M. Santosh et C.S. Vishwanath (2015) ont utilisé différents pourcentages de cendres de balle de blé et de laitier granulé de haut fourneau (3, 6, 9 et 12 %) pour améliorer les propriétés géotechniques d'un sol expansif. Les meilleurs résultats ont été enregistrés pour un mélange de 9 % de laitier de haut fourneau granulé et de cendre de balle de blé.

D'autres auteurs comme V. Sharma et al. (2018) ont utilisé les mêmes ajouts avec des pourcentages différents de ceux des auteurs précédents 0, 3, 5, 7 et 9 % et, les résultats ont montré que la cendre de balle de blé joue un rôle d'un matériau stabilisant. L'ajout de 7 % a donné des résultats satisfaisants montrés par l'augmentation de la résistance à la compression et la valeur de CBR.

1.2.7. Cendres de coques d'arachides

T.M. Krishna et S.S. Beebi (2015) ont étudié l'utilisation des cendres de coquilles d'arachide et des déchets de fibres de polypropylène dans des applications géotechniques. Ils ont évalué leurs effets sur la résistance au cisaillement des sols non saturés. La cendre de coquille d'arachide a été ajoutée à 3 %, 6 %, et 9 %, tandis que le pourcentage de renforcement de fibre de polypropylène était de 0.05, 0.1, et 0.15. Les

résultats des essais de cisaillement direct ont montré que l'utilisation de ces ajouts est très efficace pour l'amélioration de la cohésion et l'angle de frottement interne du sol traité.

F.S. Nnochiri et O.M. Ogundipe (2016) ont évalué les propriétés géotechniques d'un sol latéritique stabilisé avec des cendres de coques d'arachide dans des pourcentages de 2, 4, 6, 8 et 10% en poids du sol. Les résultats ont montré que l'ajout de cendres de coques d'arachide a amélioré la résistance de l'échantillon de sol. À 10 % de l'ajout par poids du sol, la densité sèche maximale a diminué de 1960 kg/m³ à 1760 kg/m³, le contenu optimal d'humidité a augmenté de 12.70 % à 14.95 %, les valeurs de CBR sont passées de 24.42 % à 72.88 % et la résistance à la compression non confinée est passée de 510,25 kN/m² à 1186,46 kN/m².

1.2.8. Fibres de bambou

T.K. Bramachary et M. Rokonuzzman (2018) ont utilisé les fibres de bambou avec des proportions différentes de 0,2 à 1,4%, les résultats montrent que le pourcentage de 1,2% donne la valeur optimale de l'amélioration significative des propriétés géotechniques.

1.3. Stabilisation du sol à l'aide de déchets commerciaux :

1.3.1. Sciure de bois

La poussière de matériaux sciés (en particulier le bois) est également utilisée pour stabiliser les sols.

W.A. Butt et al. (2016) ont réalisé une étude expérimentale sur un sol argileux traité par une cendre de sciure de bois avec les pourcentages 4, 8 et 12% en poids du sol. Les résultats des tests ont montré que la limite liquide, la limite plastique, l'indice de plasticité, la gravité spécifique, le CBR non imbibé et la résistance à la compression non confinée des sols stabilisés ont été améliorés de manière optimale par l'ajout de cendres de sciure de bois.

E.S. Nnochiri et al. (2017) ont amélioré les caractéristiques géotechniques du sol latéritique par la combinaison de la chaux et de la sciure de bois avec une variation de 2, 4, 6, 8 et 10% en poids du sol, Les résultats des tests ont montré que l'ajout de sciure de bois au mélange de chaux augmentait la teneur optimale en humidité du sol et a diminué la densité sèche maximale du sol, ce qui le rend bon pour l'ingénierie. La résistance à la compression non confinée du sol étudiée est améliorée de façon optimale par l'ajout de 6% de sciure de bois et de chaux.

1.3.2. Cendre de bois

C.O. Okagbue (2007) a évalué le potentiel de la cendre de bois pour stabiliser le sol argileux avec des proportions variables de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % en poids du sol. Les résultats ont montré que les paramètres géotechniques du sol argileux sont améliorés par l'ajout de 10% de cendre de bois. La plasticité a été réduite de 35% et le CBR et la résistance ont augmenté de 23-50 % et 49-67 %, respectivement. Les résultats ont également montré que le durcissement a amélioré la résistance de l'argile traitée à la cendre de bois.

K.D. Krishnan et al. (2020) ont étudié deux argileux de nature très expansive traités avec de la cendre de bois à des pourcentages variables de 3 %, 5 %, 7 %, 9 % et 11 % à différentes périodes de maturation. D'après les résultats expérimentaux, ils ont observé que l'augmentation du pourcentage de cendres de bois dans les sols argileux améliore la capacité de charge.

1.3.3. Coquille d'œuf

O.O. Amu et al. (2010) ont montré que les sels ajoutés à la coquille des œufs pour stabiliser 3 sols latéritiques donnent une meilleure amélioration que la coquille seule surtout la valeur CBR et la compacité.

G. Saji et N. Mathew (2016) ont stabilisé un sol argileux avec des œufs écrasés en ajoutant différentes quantités allant de 1 à 30%. Ils ont ensuite utilisé un mélange de 20 % de poudre de coquille d'œuf avec des pourcentages variables de poussière de céramique (10 %, 20 % et 30 %). Les résultats ont montré une très nette réduction de la plasticité, de la cohésion et de la compressibilité. En revanche, il a été constaté une augmentation de l'angle de frottement, de la perméabilité et de l'indice de consolidation. Les auteurs ont proposé de mélanger 20 % de coquille d'œuf avec 30 % de poussière de céramique comme la meilleure formulation pour ce type de stabilisation.

O.E. Oluwatuyi et al. (2018) ont traité la stabilisation de sol par trois additions de coquille d'œuf, de ciment et de mélange entre les deux avec une variation de 2 %, 4 %, 6 % et 8 %. La quantité optimale proposée est celle de 8 % du mélange coquille d'œuf-ciment. Les résultats ont montré que l'ajout de 8 % de ce mélange a considérablement réduit l'indice de plasticité et la densité sèche, mais a augmenté la teneur en eau et la résistance à la compression du sol traité.

1.3.4. Polymères

C. Galán-Marín et al. (2010) ont stabilisé un sol argileux avec des fibres animales (la laine de mouton a été utilisée comme renfort) et de l'alginate (un polymère naturel provenant des parois cellulaires d'algues brunes a été utilisé comme liant). Les résultats des tests ont montré que l'ajout d'alginate séparément augmente la résistance à la compression de 2,23 à 3,77 Mpa et que l'ajout de fibres de laine augmente la résistance à la compression de 37%. Les auteurs ont également constaté que l'utilisation combinée d'alginate et de fibre de laine double la résistance à la compression du sol traité.

A. Tomar et al. (2020) ont examiné l'effet de la fibre de polypropylène recyclé qui est générée pendant la fabrication des chaises en plastique, en plus de la nano-silice comme une nouvelle technique pour améliorer les propriétés mécaniques du sol argileux. Quatre combinaisons différentes de nano-silice à différents pourcentages 1 %, 3 %, 5 % et 7 % ont été utilisées en intégration avec la fibre de polypropylène selon différents pourcentages tels que 0,1 %, 0,4 %, 0,7 %, 1 % et 1,3 %. Les résultats des tests ont montré qu'avec l'augmentation de la teneur en fibres de polypropylène en plus de la nano-silice,

la résistance à la compression non confinée augmente et la valeur maximale a été obtenue à 7% de nano-silice avec 0,7 % de fibres de polypropylène.

1.3.5. Sels

A. Hachichi et al. (2007) ont fait une étude sur deux sites près de la ville d'Oran (nord-ouest de l'Algérie) qui ont un potentiel de gonflement élevé. Le traitement des sols argileux était basé sur des sels (KCl, CaCl₂, NaCl, Na₂SO₄, NH₄Cl) à différentes concentrations (0.05, 0.5, 1 et 2 moles/litre) et sur quatre types de polymères. Les résultats ont montré des diminutions significatives du gonflement jusqu'à 80 % avec certains sels. Un accord parfait a été observé entre l'effet des sels sur le gonflement et la diminution de la plasticité des argiles, les meilleurs résultats ont été obtenus avec le sel de chlorure de potassium (KCl).

F.Z. Azzouz (2015) a étudié la stabilisation des sols argileux avec différents types de sels à différentes concentrations afin d'en déduire une méthode pratique pour minimiser le phénomène de gonflement. Ses résultats ont montré que les sels ont un effet positif sur la réduction du gonflement de l'ordre de 50 à 80 %. De plus, les sels ont réduit l'amplitude de la pression de gonflement et les limites de consistance des argiles traitées.

1.3.6. Fibres

Fibres de cheveux

R. Pillai et A. Ramanathan (2012) ont pensé de valoriser les fibres de cheveux humains dans la stabilisation des sols et l'utiliser comme un matériau de renforcement. Le pourcentage choisi est de 0.5 % à 2.5 % avec un incrément de 0.5 %. L'effet des fibres est remarquable sur l'ensemble des essais effectués. Cette technique innovante améliore la plasticité du sol et donne de meilleurs résultats sur la compression et la cohésion et la compacité de sol à un pourcentage de 2 %.

Fibres de jute

H. Bairagi et al. (2014) ont fait un mélange de 5 % de la chaux et 1 % à 5 % de fibre de Jute pour stabiliser un sol de Coton Noir. Ils ont constaté que l'augmentation du pourcentage de l'ajout augmente les paramètres mécaniques tels que la résistance à la compression, l'indice de portance et la compacité de sol.

D. Kumar et al. (2015) ont traité le sol par la fibre de Jute naturelle de différentes longueurs (20 mm- 40 mm- 60 mm -80 mm -100 mm) et différents diamètres (1 mm -2 mm) avec un pourcentage de 1 à 5 % d'ajout sur l'essai de CBR. Les résultats montrent l'efficacité de la longueur et diamètre sur la portance de sol. L'indice de portance augmente avec l'augmentation de la longueur et du diamètre. Sachant que les meilleures performances sont obtenues de 60 mm à 80 mm.

A.K. Singh et R.K. Yadav (2016) ont renforcé le sol par les sacs de Jute déposés entre les différentes couches de l'essai Proctor avec une variation de deux à quatre. Les résultats montrent l'effet encourageant

de fibre de Jute sur l'amélioration mécanique.

S. Kumar et al. (2021) ont amélioré le comportement d'un sol gonflant par le géotextile et les fibres de jute coupées en différentes taille de 10mm à 60mm. Avec 0.4 % à 2.4 %. Ce mélange réussit à diminuer le potentiel et la pression de gonflement. Les meilleures valeurs sont trouvées à 40 mm de longueur.

Conclusion

La valorisation matière implique le recyclage des déchets pour en extraire les matériaux recyclables réutilisables dans les différents domaines. En géotechnique, de nombreux chercheurs ont exploité cette pratique pour améliorer les propriétés physico-chimiques des sols de qualité médiocre. Le choix des déchets est guidé par leur abondance et leur disponibilité. Une recherche bibliographique approfondie nous a permis de comprendre l'efficacité des différents ajouts sur les propriétés géotechniques des sols. C'est pourquoi nous avons entrepris d'améliorer les caractéristiques géotechniques d'un sol argileux en incorporant divers déchets locaux disponibles dans la nature, tels que les grignons d'olives, la rafle de maïs, la cendre de papier et la fibre de Jute. Notre objectif est d'étudier le comportement et la microstructure de ce mélange.

Chapitre II :

Matériaux et protocoles expérimentaux

Introduction :

Avant de débiter tout projet, il est essentiel de mener une étude préliminaire approfondie afin de comprendre la nature du sol. Dans un premier temps, nous présentons les matériaux appropriés répondant aux besoins de notre étude. Ensuite, nous fournissons une description géologique des différentes formations présentes dans les zones d'étude, accompagnée d'un bref aperçu des essais physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques, réalisés selon des normes conventionnelles.

1. Matériaux :**1.1. Sol naturel :**

A) Le premier sol a été prélevé du site d'Ouled Salah dans la commune de Taher située à 15Km à l'Est de la ville de Jijel. Les échantillons ont été prélevés par des sondages carottés en collaboration avec le Laboratoire des Travaux Publics (LTP Est) à Jijel.

B) Le deuxième sol argileux provient d'El Harrouche (Wilaya de Skikda). Les échantillons ont été prélevés par des sondages carottés en collaboration avec le Laboratoire National d'Habitat et de Construction (LNHC Est) à Skikda.



Fig. 1. Sol naturel (a: Ouled Salah, b: El Harrouche)

1.2. Sol reconstitué:

Le sol reconstitué est composé de 80 % de Kaolin KT2 et 20% de Bentonite de charge. Cette option d'utiliser un sol reconstitué nous permet sur le plan expérimental d'avoir un sol de référence gonflant avec les mêmes propriétés géotechniques pour les différentes prises d'essais.

A) Kaolin d'El Milia est une argile douce et plastique composée principalement de fines particules sous forme de plaquettes. Il est exploité par la société Soalka. Il est composé principalement de kaolinite, de minéraux de mica et de quartz. Il est issu de la décomposition du feldspath sur place.

B) Bentonite de Mostaganem est une argile broyée et tamisée à travers un tamis de 80 μm . C'est une argile du type Montmorillonite calcique active (CH). Le matériau utilisé est un matériau traité par la société Bental. C'est un matériau commercialisé.



Fig. 2. Composant du sol reconstitué.

La **Figure 3** représente la situation géographique des différents échantillons prélevés tel que le **D1** représente la cendre de papier, **D2** représente les grignons d'olives, **D3** représente la rafle de maïs, **S1** représente argile marneuse, **S2** représente le kaolin traité T2, **S3** représente la bentonite de Mostaganem.

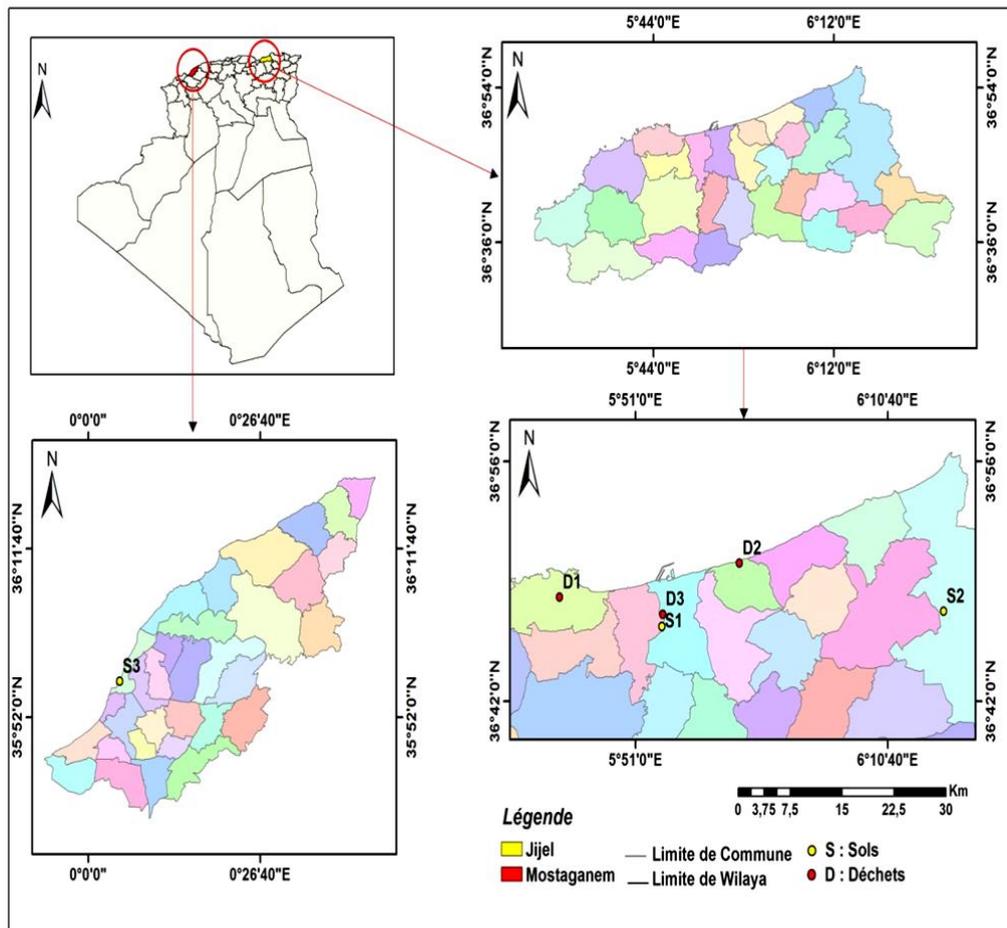


Fig.3. Carte d'échantillonnage

2. Aperçu géologique des sols étudiés:

- **Site d'Ouled Salah**

Le sol étudié a été prélevé du site d'Ouled Salah dans la commune de Taher. Cet échantillon de sol est principalement constitué par des marnes argileuses faisant partie d'une formation géologique

marno-argileuse de plus de 300 m d'épaisseur. Ces formations marno-argileuses datées du Miocène (Durand Delga 1955) sont localement surmontées par des sédiments détritiques argilo-grésos-conglomératiques du Pliocène dont l'épaisseur atteint rarement la centaine de mètres. Ces dernières formations détritiques n'affleurent pas dans le secteur d'Ouled Salah. L'ensemble de ces formations, dites post-nappes, se sont déposées en remplissage d'un bassin côtier dit bassin néogène de Jijel (Figure 4).

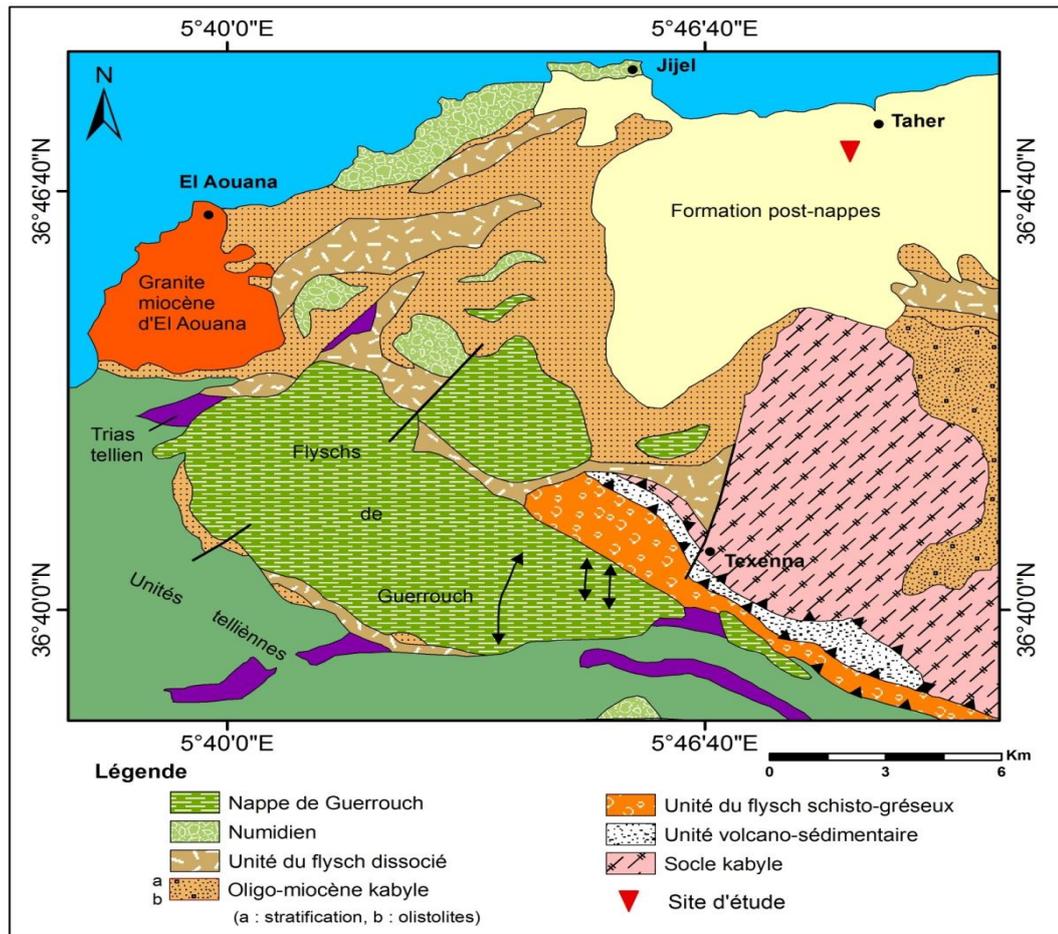


Fig.4. Esquisse géologique de l'extrémité occidentale de la petite Kabylie (Andrieux et Djellit 1989)

• **Kaolin (Gisement de Tamazert)**

Le gisement de Tamazert fait partie du socle kabyle qui se distingue par la variété des terrains métamorphiques : des gneiss, des marbres, des amphibolites, des micaschistes et des schistes (Vila 1980). La kaolinite représente le résultat direct de l'altération sans transport ultérieur. En témoigne la présence de quartz abondant, de muscovite et de reliques de feldspaths. La zone kaolinite correspond à l'altération de gneiss feldspathiques intercalés par de schistes micacés (Chouafa 2016).

La carte ci-dessous a été établie par la SONAREM, elle montre la répartition des différentes

formations qui affleurent dans le gisement de Tamazert.

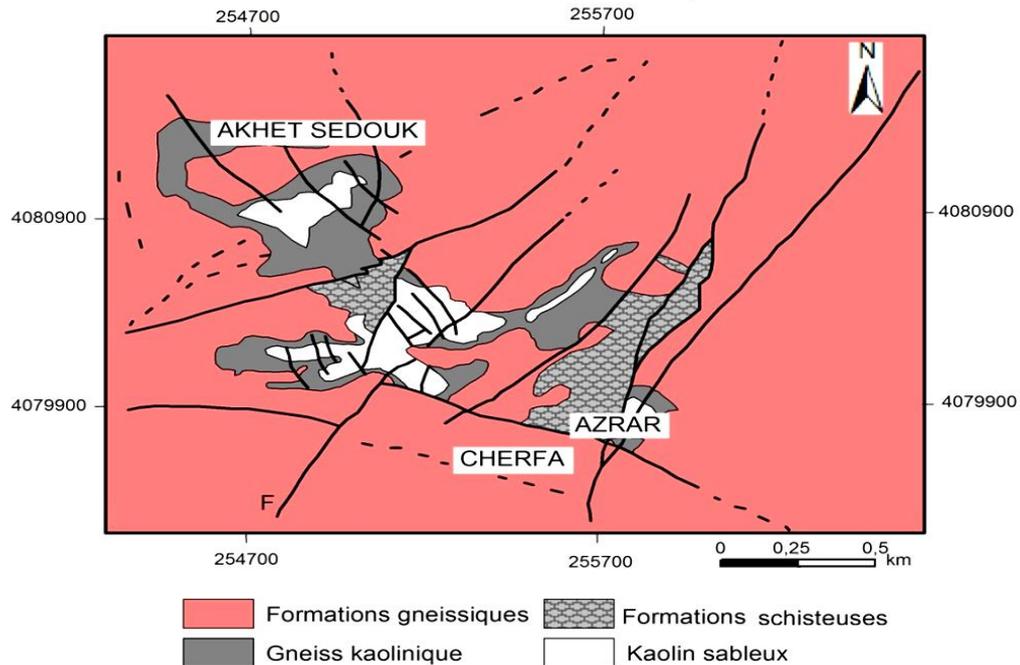


Fig.5. Carte géologique du gisement de Tamazert (SONAREM 1968)

- **La Bentonite de Mostaganem: Gisement de M'zila**

Les argiles exploitées dans le gisement de M'zila sont des bentonites qui font partie du groupe des montmorillonites. Le gisement est caractérisé par des dépôts sédimentaires du Miocène supérieur. La séquence débute par un banc épais de marne bleue compacte. Cette dernière est surmontée par les couches d'argiles bentonitiques, qui sont interstratifiées avec des grès biotitiques. Cette séquence est ensuite recouverte par une marne argileuse (Ouahab 2007).

3. Protocole expérimental au laboratoire :

Un programme expérimental dans cette étude est tracé comme suit :

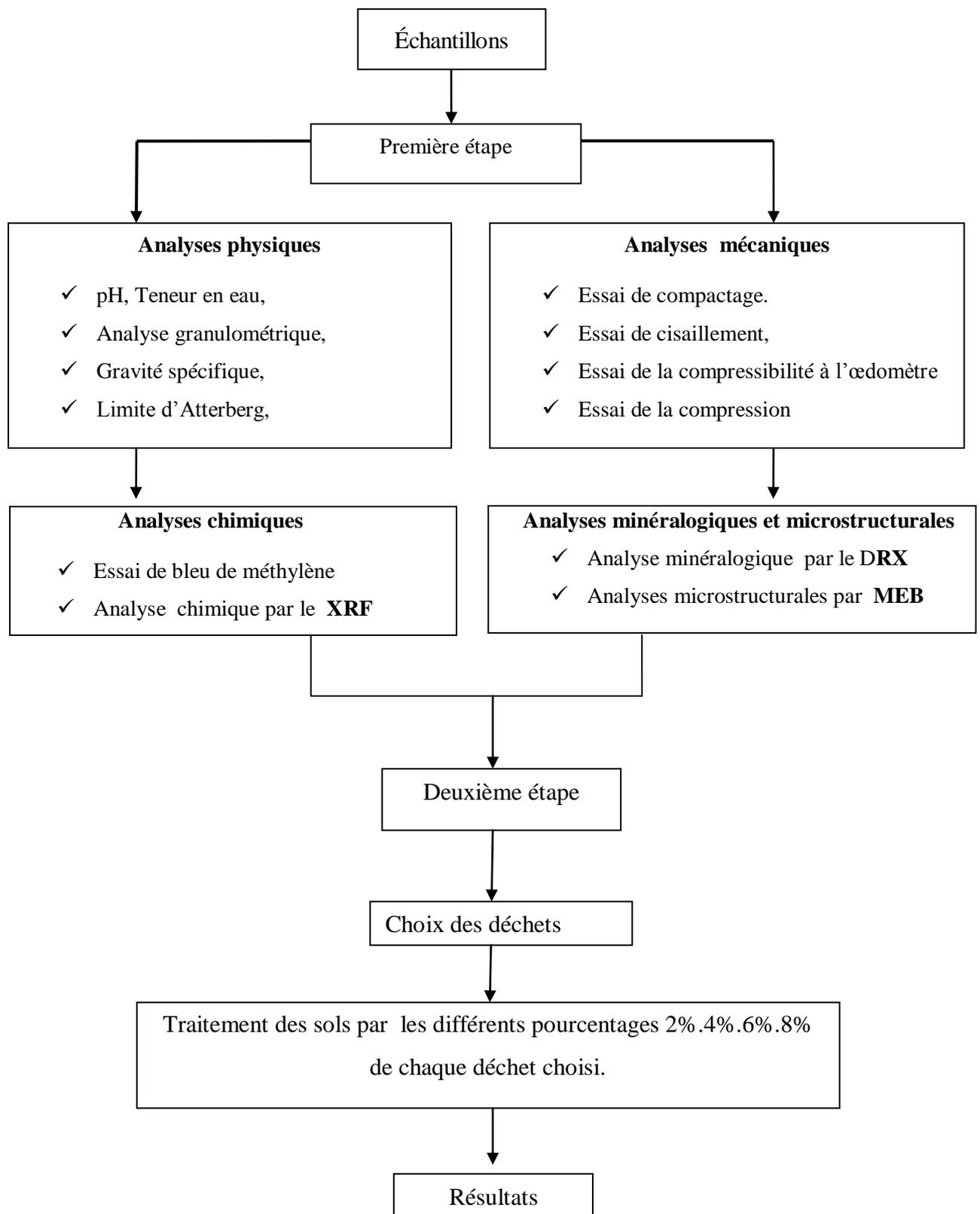


Fig. 6 .Méthodologie de travail

3.1. Analyses physico-mécaniques des sols utilisés :

1) pH selon la norme NF ISO10390 :1994.

La détermination du pH est nécessaire pour quantifier l'apport de l'acidité, l'alcalinité d'une solution peut s'exprimer par la concentration en H^+ . La lecture est faite directement sur un pH-mètre.



Fig. 7. Mesure de pH (pH-mètre)

2) Gravité spécifique selon la norme NF P 94-054.

La norme s'applique à tout échantillon de sol intact ou remanié dont la dimension des plus gros éléments est inférieure à 2 mm. L'essai a pour but de déterminer la masse volumique moyenne d'un échantillon composé de particules. La masse volumique des particules solides est déterminée à partir de la formule suivante : $\rho_s = \rho_w (m_2 - m_1) / (m_4 + m_2 - m_4 - m_3)$ Avec :

m_1 : masse du pycnomètre vide. m_2 : masse du pycnomètre contenant la prise d'essai.

m_3 : masse du pycnomètre, du sol et de l'eau. m_4 : masse du pycnomètre plein d'eau.

P_w : masse volumique de l'eau conventionnellement prise égale à 1 000 kg/m³.

La gravité spécifique est déterminée par le rapport de la masse volumiques des grains solides et la masse volumique d'eau.



Fig.8. Essai du poids volumique des grains solides

3) Analyse granulométrique

L'objectif de l'analyse granulométrique est d'évaluer la dimension et la distribution des particules dans un matériau. Les données obtenues permettent de construire des graphiques représentant la répartition granulométrique.

L'analyse granulométrique par tamisage conforme à la norme NF P 94-056, implique la séparation des composants d'un échantillon en fonction de leur taille en utilisant des tamis

L'analyse granulométrique par sédimentation conforme à la norme NF P 94-057, représente une étape supplémentaire de l'analyse granulométrique par tamisage. Elle est indispensable pour la description et la classification du sol.

4) Indice de gonflement libre selon la norme IS-2720-PART-40-1970.

Le sol passant au tamis de 425 microns est utilisé dans cet essai. 10g sont imbibés dans deux éprouvettes pendant 24h (Une par l'eau distillée et l'autre par le kérosène).

$$\text{Pourcentage} = \frac{V_d - V_k}{V_k} \times 100$$

V_d = Le volume de l'échantillon de sol lu dans l'éprouvette graduée contenant de l'eau distillée.

V_k = Le volume de l'échantillon de sol lu dans l'éprouvette graduée contenant du kérosène.

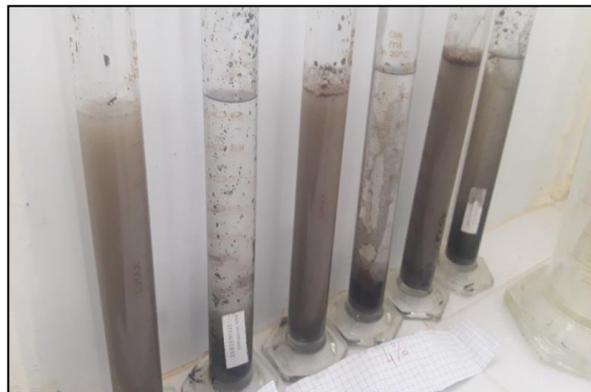


Fig. 9 .Essai de gonflement libre

5) Limites d'Atterberg Selon la norme NF P94-051.

La limite d'Atterberg est un concept utilisé en géotechnique pour déterminer les propriétés de plasticité des sols. Elle se compose de trois valeurs : la limite de liquidité (L_L), la limite de plasticité (L_P) et l'indice de plasticité (I_P). La connaissance de ces limites permet aux ingénieurs de comprendre le comportement des sols, notamment leur capacité à supporter des charges, leur

aptitude à être compactés et leur comportement face aux fluctuations de l'humidité.

La limite de liquidité (L_L) représente la teneur en eau à laquelle un sol devient suffisamment liquide pour s'écouler lorsqu'il est soumis à une légère contrainte. Elle est déterminée par un appareil appelé Casagrande.

La limite de plasticité (L_P) est la teneur en eau à partir de laquelle un sol devient suffisamment plastique pour être malléable.

L'indice de plasticité (I_P) se détermine en faisant la différence entre la limite de liquidité (L_L) et la limite de plasticité (L_P). Cet indice fournit une indication sur l'amplitude de la variation de teneur en eau dans laquelle le sol peut être travaillé en tant que matériau plastique.



Fig. 10. Appareillages et outils pour la mesure des limites d'Atterberg

6) Essai au bleu de méthylène selon la norme NF P 94-068 :

L'essai au bleu de méthylène dit à la tâche permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure qu'une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre.

$$\text{Valeur de Bleu est} = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{poids sec de la prise}}$$



Fig. 11. Essai au bleu de méthylène

7) Essai de compactage selon la norme NF P 94-093.

L'essai consiste à damer un échantillon de sol de manière définie et répétitive en faisant varier sa teneur en eau. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une masse volumique maximum.



Fig. 12. Essai de compactage

8) Essai de cisaillement direct selon la norme NF P 94-071-1.

Trois éprouvettes de même dimension sont soumises à un essai de cisaillement dans des conditions précises, avec une vitesse constante, mais à des forces verticales différentes. L'essai est réalisé selon la méthode non consolidée non drainée UU et utilise des contraintes de 1, 2 et 3 bars, avec une vitesse de cisaillement de 1,2 mm/min. Son objectif est de déterminer les caractéristiques intrinsèques du sol, notamment sa cohésion (C) et son angle de frottement (φ). Ces paramètres sont cruciaux pour la conception de fondations et d'ouvrages géotechniques, car ils permettent d'évaluer la résistance au cisaillement du sol.



Fig. 13. Essai de cisaillement

9) Essai de compressibilité à l'œdomètre selon la norme (XP P 94-090-1).

L'essai de compressibilité à l'œdomètre est une méthode utilisée en géotechnique pour évaluer le

comportement de consolidation des sols. Un échantillon de sol représentatif est prélevé sur le terrain et préparé selon la norme de l'essai. Il est ensuite placé dans une cellule spéciale de l'œdomètre. L'échantillon de sol est soigneusement disposé dans la cellule de l'œdomètre et saturé avec de l'eau. La saturation garantit que l'eau est présente dans tous les vides du sol. Pendant que la charge est appliquée, la déformation verticale du sol est mesurée à intervalles réguliers à l'aide d'un comparateur ou d'un transducteur de déplacement. Ces mesures permettent de tracer une courbe de consolidation. Cette courbe est caractérisée par plusieurs paramètres, dont le coefficient de gonflement, le coefficient de compressibilité et la contrainte de préconsolidation.



Fig.14. Essai de la compressibilité à l'œdomètre

10) Essai de CBR selon la norme NF P 94-078 :

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité. L'essai consiste généralement à enfoncer un poinçon standard dans un échantillon compacté de sol à une vitesse de déformation précise. La charge appliquée est progressivement augmentée jusqu'à ce que le sol se déforme à une valeur spécifique, généralement 2,5 mm ou 5 mm.



Fig. 15. Appareil de CBR

11) Essai de la résistance à la compression selon la norme NFP 94-07

L'essai de résistance à la compression est une méthode utilisée pour évaluer la capacité d'un matériau à résister à une force de compression axiale. L'échantillon est placé entre deux plaques de l'appareil de compression, équipées de plaques planes pour appliquer une charge uniforme sur l'échantillon. Une fois que l'échantillon a atteint sa capacité maximale de charge ou a échoué, les données enregistrées sont analysées pour déterminer la résistance à la compression du matériau. Cela peut inclure le calcul de la résistance maximale à la compression ainsi que la détermination de la déformation du matériau à la rupture.

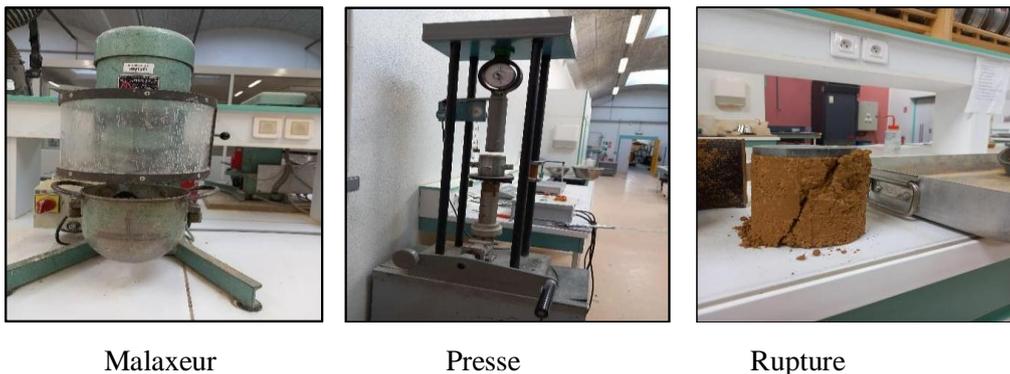


Fig. 16. Essai de la résistance à la compression

3.2. Analyses chimiques**Spectrométrie de fluorescence par les rayons X :**

Le XRF est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière. Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.



Fig. 17. Spectrométrie de fluorescence par les rayons X (Unité de recherche matériaux émergents, Sétif).

3.3. Analyses minéralogiques :

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse qualitative et quantitative. Cette technique permet de déterminer la nature de chaque phase cristalline au sein d'un échantillon. Elle est utile pour tous types de matériaux que ce soit minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés. Sous forme de poudre ou pastille. Les échantillons ont été préparés selon le protocole de chaque laboratoire.



Fig. 18. Diffractomètre (Unité de recherche matériaux émergents, Sétif).

3.4. Analyses des microstructures :

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil qui est capable de produire des images haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons- matière. Cette d'analyse pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet traité.



Fig. 19. MEB du plateau technique d'analyse physico-chimique (PTAPC, Ouargla)

Chapitre III :
Identifications et caractérisations des
sols utilisés

Introduction :

Les essais physico-mécaniques des sols constituent une étape essentielle dans l'analyse et la caractérisation des propriétés géotechniques d'un terrain. Ces essais permettent d'évaluer différentes caractéristiques du sol, telles que sa granulométrie, sa plasticité, sa compressibilité, sa résistance

L'analyse chimique, minéralogique et microstructurale sont des approches complémentaires utilisées dans la caractérisation approfondie des matériaux. Leur combinaison permet une compréhension de la composition, de la structure et des propriétés des échantillons analysés. Ce chapitre résume l'ensemble des essais effectués dans cette approche.

1. Propriétés d'identifications des sols :

Les essais d'identifications du sol reconstitué et du sol d'Ouled Salah ont été effectués au sein de laboratoire de génie civil à l'université de Jijel et au laboratoire des travaux publics (LTP Est) à Jijel. Alors que les essais du sol d'El -Harrouche ont été réalisés au Laboratoire National d'Habitat et Construction (LNHC Est).

Le sol d'Ouled Salah et le sol d'El -Harrouche ont été prélevés à 2,3 m profondeur. Après extraction, le sol a été placé dans des sacs, transporté au laboratoire et étuvé à 50 °C durant 24 h. Après séchage, les sols ont été ensuite concassés et broyés pour toutes les prises d'essais. Les résultats des trois sols sont résumés dans les Tableaux 1, 2 ,3 et 4.

Tableau 1 .Caractéristiques physico-mécaniques du sol d'Ouled Salah

Propriétés	Notations	Valeurs
Teneur en eau naturelle	Wn (%)	22,61
Gravité spécifique	Gs	2,47
Potentiel de l'hydrogène	Ph	7,55
Indice de gonflement libre	IG(%)	45
Pourcentage des Particules fines ($\leq 0,08$ mm)	AG(%)	95
Taux de carbonates	CaCo3(%)	6.89
Bleu de méthylène	VBS	6.1
Limite de liquidité	LL(%)	57
Limite de plasticité	LP(%)	30
Indice de plasticité	IP(%)	27
Teneur en eau optimale	Wopt (%)	18 ,2
Densité sèche maximale	γ_d (t /m ³)	1.59
Cohésion	C (kpa)	30
Angle de frottement	φ (°)	6
Contrainte de préconsolidation	Pc (Kg /m ²)	2.30
Indice de gonflement	Cg (%)	6 ,8
Indice de compressibilité	Cs (%)	20 ,4

Tableau 2 .Caractéristiques physiques et mécaniques du sol d'El Harrouche.

Propriétés	Valeurs
Teneur en eau (%)	24.56
Limite de liquidité (%)	57
Limite de plasticité (%)	28
Indice de plasticité (%)	29
Pourcentage des grains 0.080mm(%)	65
Bleu méthylène	3.33
Teneur en eau optimale (%)	14.92
Densité sèche maximale(t/m^3)	1.71
Indice de CBR	1.11
Angle de frottement ($^{\circ}$)	8°
Cohésion (Kpa)	22
Contrainte de préconsolidation (kg/m^2)	0.66
Indice de compressibilité (%)	27.98
Indice de gonflement (%)	6.19

Tableau 3. Propriétés des composants du sol reconstitué

Propriétés	Bentonite	Kaolin
pH	7.86	4.94
Teneur en eau naturelle (%)	9.20	20.00
Gravité spécifique	2.60	1.87
Indice de gonflement libre (%)	83.33	7
Pourcentages des particules fines ($\leq 0,08mm$)	73	80
Bleu Methylene	19	2.66
Surface spécifique (m^2/g)	399	55.86
Limite de liquidité (%)	123	37
Limite de plasticité (%)	40	15
Indice plasticité (%)	83	22

Tableau 4. Propriétés physico-mécaniques du sol reconstitué

Paramètres	Valeurs
pH	9,81
Gravité spécifique	1,78
Indice de gonflement libre (%)	61,5
Pourcentage des grains <0,08 mm	93
Limite de liquidité (%)	71
Limite de plasticité (%)	36
Indice de plasticité (%)	35
Teneur en eau optimale(%)	20,20
Densité sèche maximale(t/m^3)	1,55
Cohésion (kpa)	20
Angle de frottement($^{\circ}$)	4.5
Indice de compression(%)	31.5
Indice de gonflement (%)	11
Contrainte de préconsolidation	3.2

2. Interprétations des essais physico-mécaniques :

Le programme expérimental effectué a pour but d'identifier le type de sol et connaître les propriétés physiques et mécaniques de ce dernier et par la suite déterminer le potentiel de problème rencontré.

2.1. Analyses granulométriques :

La granulométrie des sols en question est caractérisée par une fraction fine prédominante.

Pour le sol d'Ouled Salah, Les passants à 0, 08 mm représentent plus de 90% du poids de l'échantillon alors que La fraction argileuse a un taux 38%.

Pour le sol reconstitué les particules $\leq 0.08\text{mm}$ représentent 98% des passants. La fraction argileuse présente un taux de 30%.

Pour le sol d'El Harrouche, on a trouvé une distribution de 2% de graviers, 2% de gros sable, 15 % de Sable fin, 14 % de Limon, 65% de l'argile.

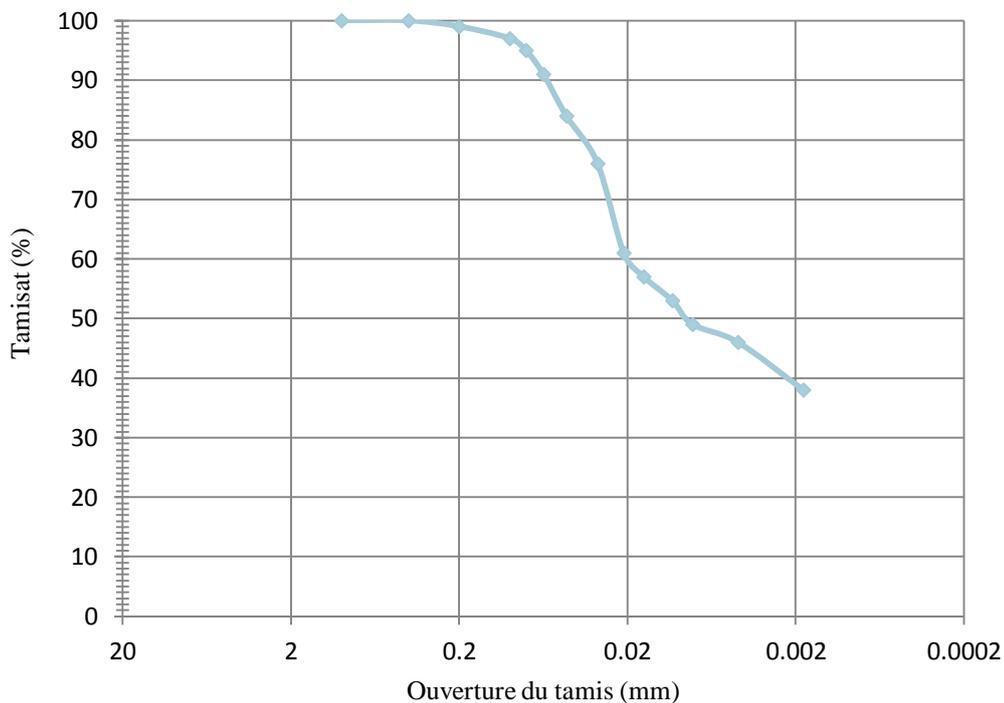


Fig.20. Courbe granulométrique du sol d'Ouled Salah

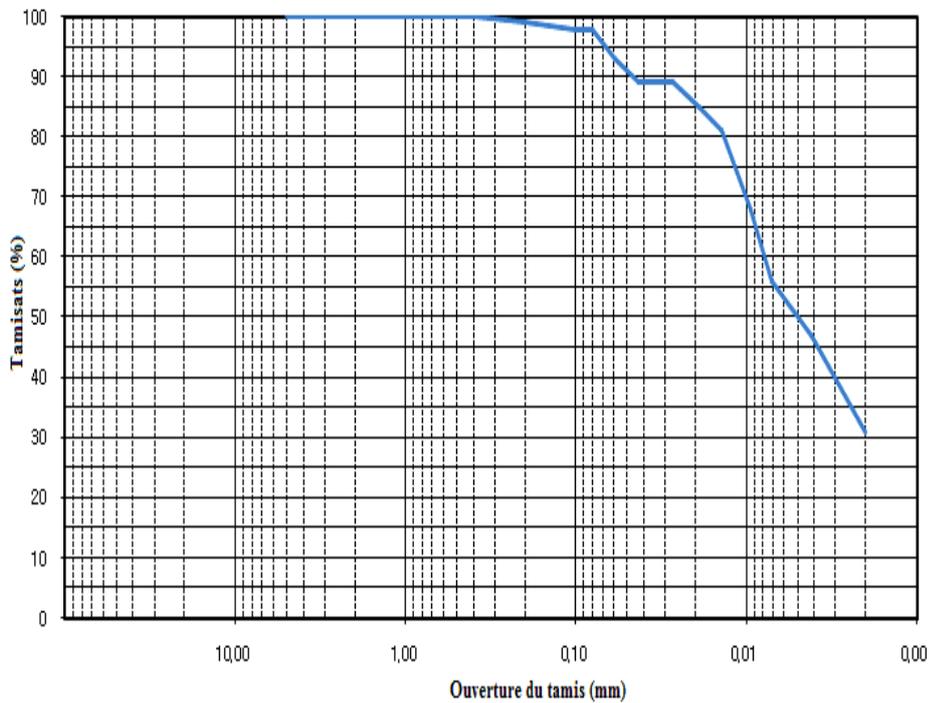


Fig.21. Courbe granulométrique du sol reconstitué

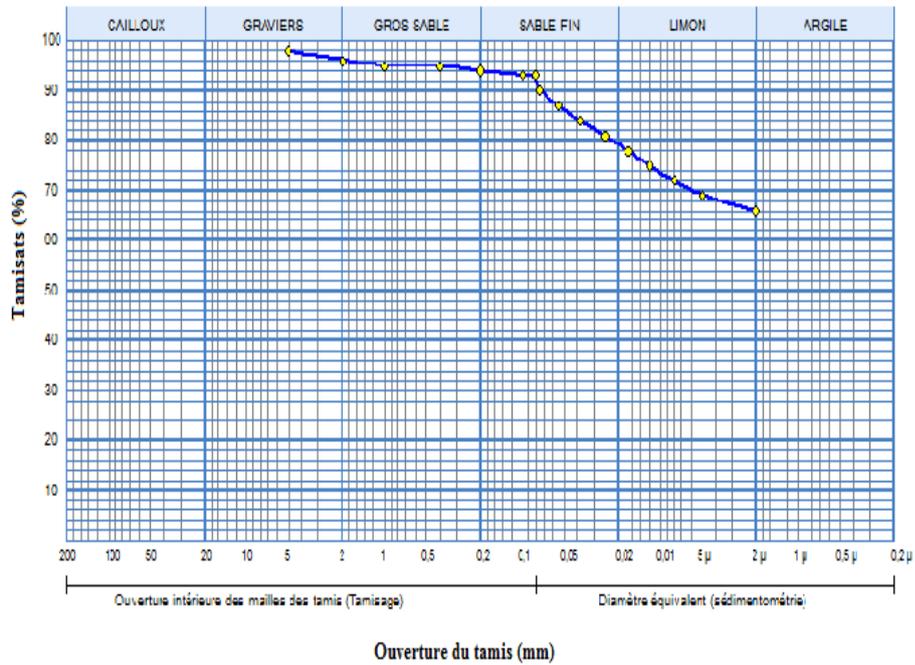


Fig.22. Courbe granulométrique du sol d’El Harrouche

2.2. Indice de gonflement libre :

D’après le tableau de classification (Nelson et al , 2015)

Tableau 5. Classification des sols basée sur l’indice de gonflement libre

Valeur Indice de gonflement libre	Potentiel de gonflement
<20	Leger
20-35	Moyen
35-50	Elevé
>50	Très élevé

Tableau 6. Résultats obtenus sur le potentiel de gonflement

	Sol d’Ouled Salah	Sol reconstitué
Valeur	45	61
Potentiel de gonflement	Elevé	Très élevé

Le test de gonflement libre montre clairement que le sol reconstitué et le sol d’Ouled Salah sont des sols gonflants.

2. 3. Limites d’Atterberg :

A partir de la valeur de l’indice de plasticité et la limite de liquidité la classification de Casagrande

montre que sol d'Ouled Salah, d'El-Harrouche et le sol reconstitué sont des argiles de hautes plasticité.

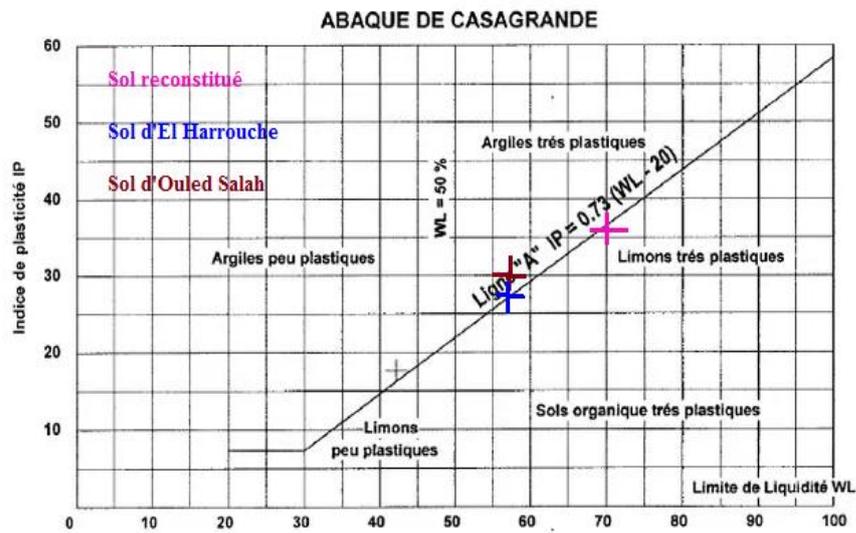


Fig. 23. Diagramme de plasticité de Casagrande (1948)

2.4. Essai de bleu de méthylène :

Tableau 7. Classification des sols en fonction de la valeur VBS (Philipponnat 2003)

VBS < 0.1	Sol insensible à l'eau
0.2 ≤ VBS < 1.5	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1.5 ≤ VBS < 2.5	Sol sablo argileux, peu plastique
2.5 ≤ VBS < 6	Sol limoneux de plasticité moyenne
6 ≤ VBS < 8	Sol argileux
VBS < 8	Sol très argileux

Tableau 8. Classification des sols en fonction des résultats VBS

	Sol d'Ouled Salah	Sol Reconstitué	Sol d'El -Harrouche
Valeur de VBs	6.1	6.66	3.33
Classification de sol	Sol argileux	Sol argileux	Sol limoneux

Les résultats obtenus de l'analyse granulométrique, bleu de méthylène et les limites d'Atterberg permettent de classer les sols. Selon la classification GTR, on peut conclure que :

- Le sol reconstitué et le sol d'Ouled Salah sont de classe A3 (Sol argile marneuse).
- Le sol d'El Harrouche est de classe A2 (le sol est argilo- limoneux peu graveleux).

2.5. Essai de compactage :

L'allure de la courbe de compactage dépend de la nature du sol. La densité sèche (γ_d) caractérise le poids d'un volume apparent et permet d'avoir une idée sur le degré de densification des éléments solides de la matrice. Les deux sols présentent une forme aiguë qui montre leur sensibilité à l'eau. Pour le sol d'Ouled Salah la valeur de la densité sèche $\gamma_d \text{ max} = 1.59 \text{ (t/m}^3\text{)}$, et la teneur en eau optimale correspondante égale à 18.2%.

Pour le sol reconstitué la valeur de la densité sèche égale $\gamma_d \text{ max} = 1.55 \text{ (t/m}^3\text{)}$ et la teneur en eau optimale correspondante égale 20.20%

Pour le sol d'El-Harrouche la valeur de la densité sèche égale $\gamma_d \text{ max} = 1.70 \text{ (t/m}^3\text{)}$ et la teneur en eau optimale correspondante égale 14%.

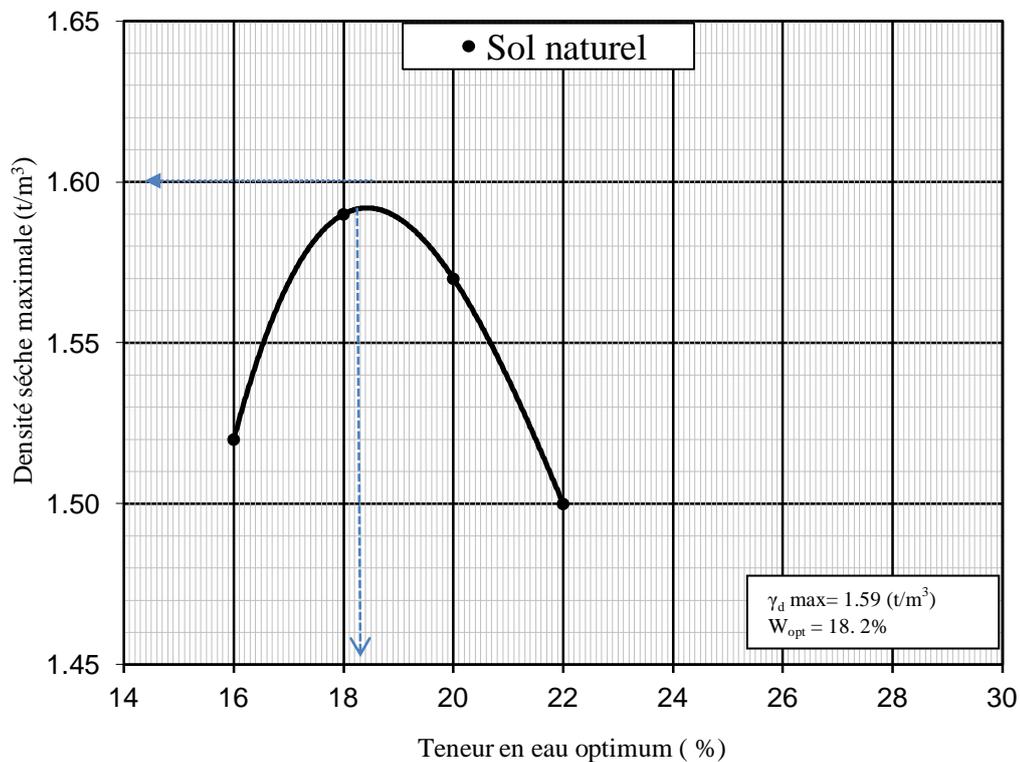


Fig. 24 .Courbe de l'essai de compactage du sol d'Ouled Salah

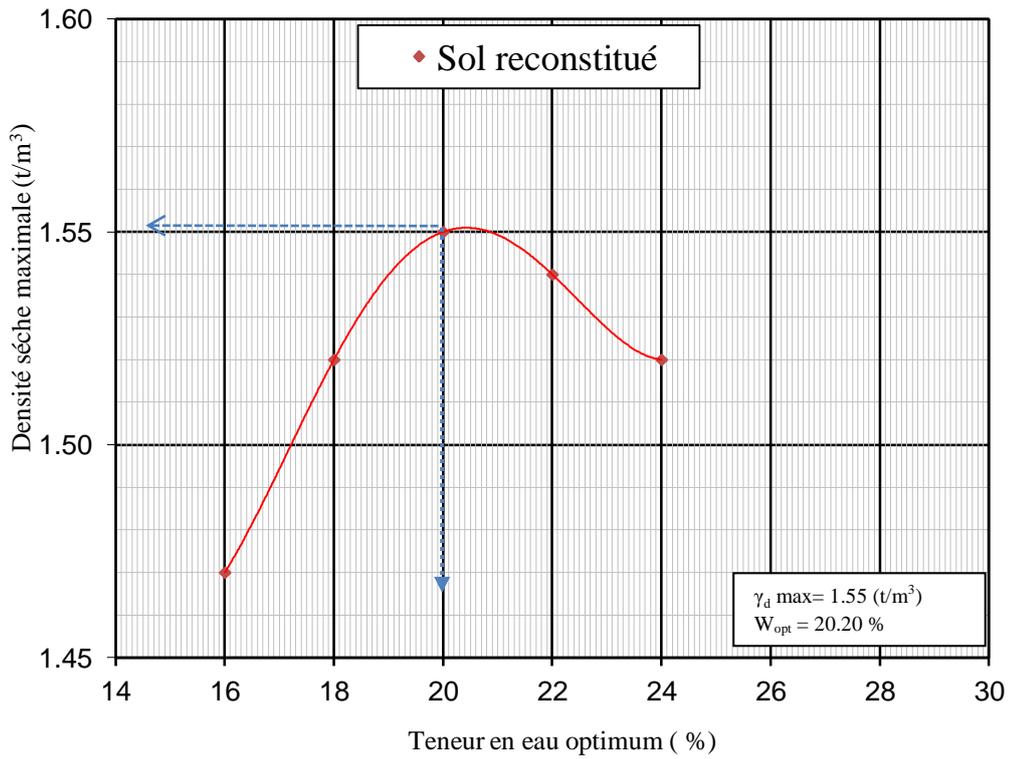


Fig. 25 .Courbe de l'essai de compactage du sol reconstitué

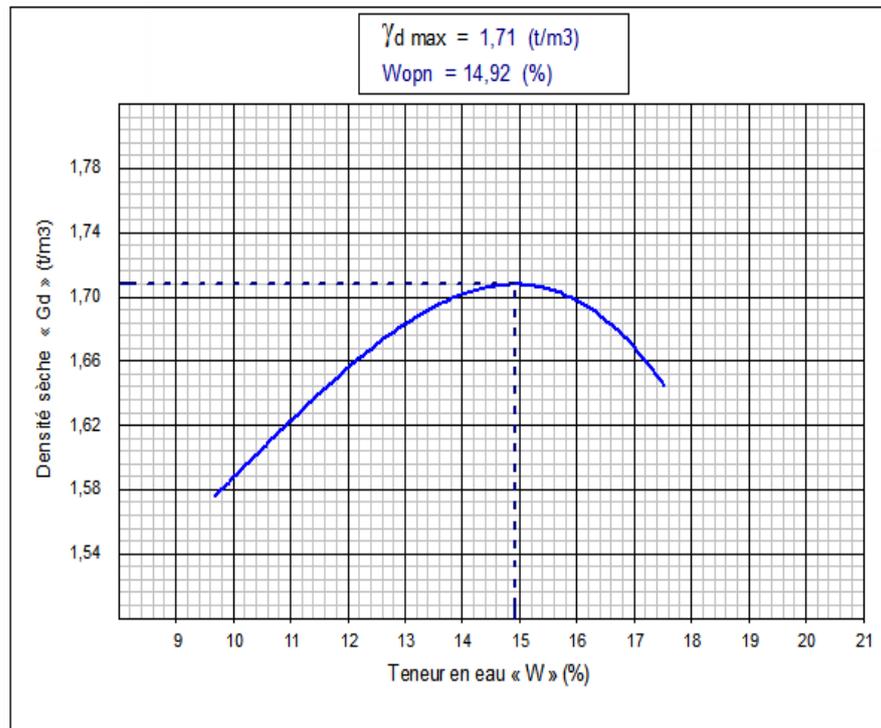


Fig. 26 .Courbe de l'essai de compactage du sol d'El Harrouche

2.6. Essai de la compressibilité à l'œdomètre :

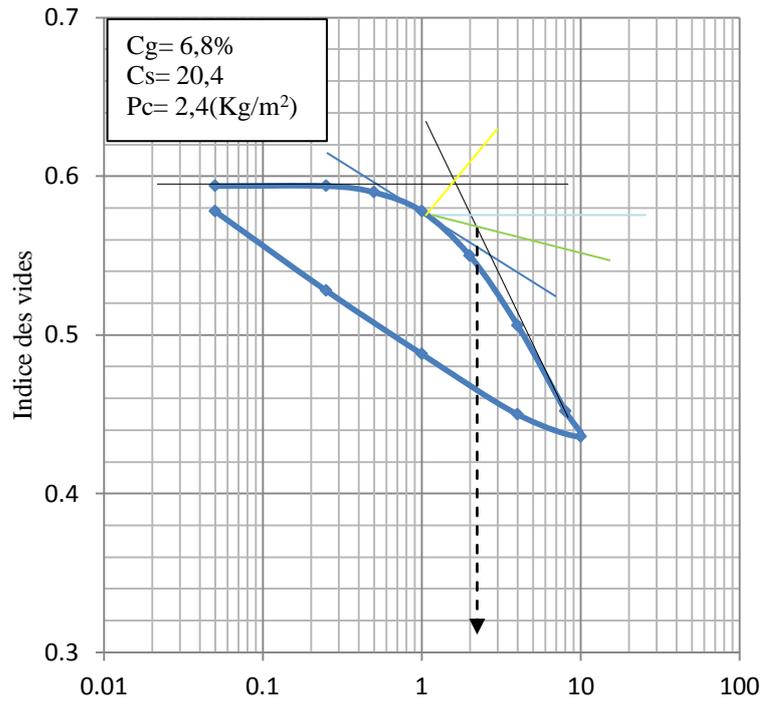


Fig. 27. Courbe de compressibilités du sol d'Ouled Salah

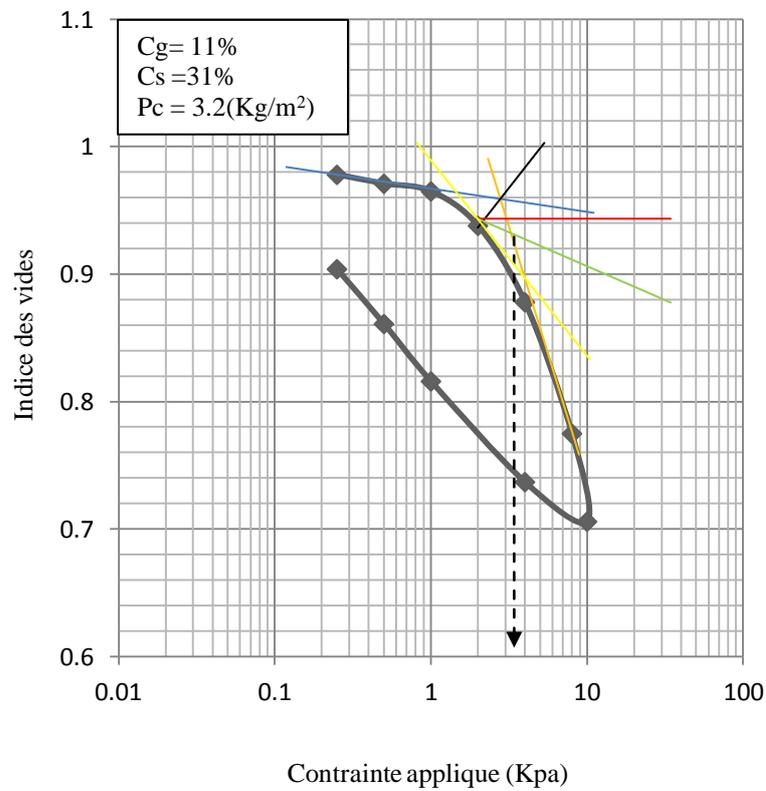


Fig. 28. Courbe de compressibilités du sol reconstitué

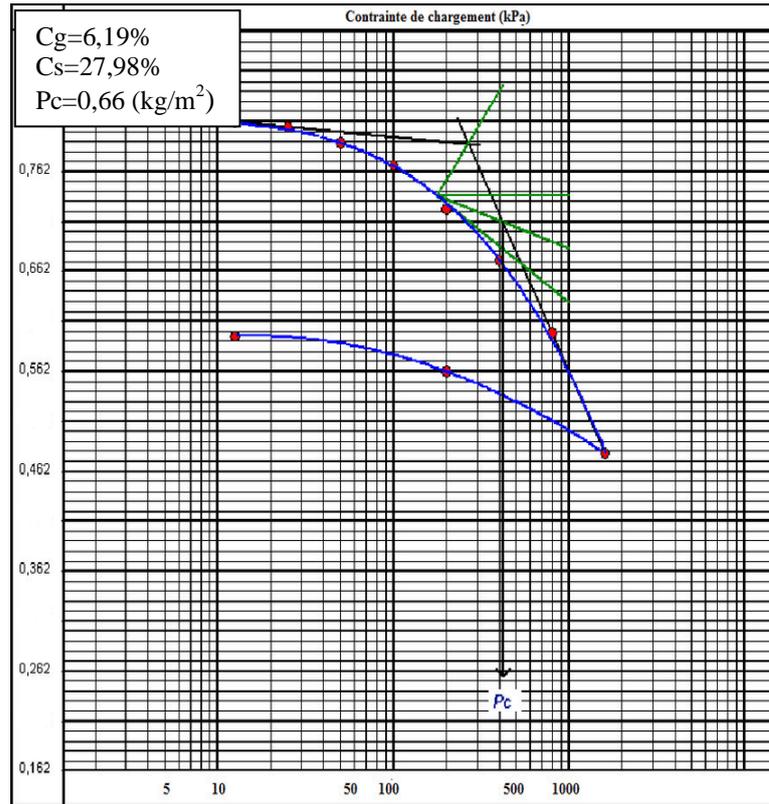


Fig. 29. Courbe de compressibilités du sol d'El –Harrouche

Tableau 9. Classification des sols selon (Magnan 2001)

Coefficient de gonflement	Etat de sol
$C_g < 5\%$	Non gonflant
$C_g > 5\%$	gonflant

Tableau 10. Classification des sols selon (Magnan 2001)

Coefficient de compression	Etat de sol
$C_c < 0.02$	Sol incompressible
$0.02 < C_c < 0.050$	Sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.100$	Peu compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c > 0.500$	Sol extrêmement compressible

D'après la classification de (Magnan 2001)

- Pour le sol naturel :

Indice de compression (Cs) est 0.204. La valeur est comprise entre $0.200 < Cc < 0.300$ donc c'est un sol assez fortement compressible.

Indice de gonflement (Cg) est de 6.8%. La valeur est supérieure à 5%. Donc un sol gonflant.

- Pour le sol reconstitué :

Indice de compression (Cs) est 31.5%. La valeur est comprise entre $0.300 < Cc < 0.500$ donc c'est un sol très compressible.

Indice de gonflement (Cg) est 11%. La valeur est supérieure à 5%. Donc c'est un sol gonflant.

Les essais physico-chimiques décrivent la nature des sols choisis pour cette étude.

Tableau 11 .Potentiel de gonflement en fonction du critère géotechnique

Valeur de bleu de méthylène	Coefficient de gonflement	Indice de plasticité	Potentiel du gonflement
< 2.5	0.025	<12	Faible
2.5 à 6	0.025 à 0.05	12 à 25	Moyen
6 à 8	0.05 à 0.09	25 à 40	Fort
≥ à 8	≥ 0.09	≥40	Très fort

D'après cette classification et à partir des résultats obtenus sur des différents essais, on peut déterminer que les deux sols sont fortement susceptibles au gonflement.

2.7. Essai de la portance (CBR)

Tableau 12. Résultats de l'essai CBR

	Immédiat		Imbibé
	Ouled Salah	Reconstitué	El-Harrouche
Indice de CBR	3.4%	7.3%	1.1%

3. Propriétés chimiques des sols étudiés :

Les analyses chimiques par la spectrométrie de fluorescence X effectuées à l'Unité de recherche sur les matériaux émergents (URME) de l'Université de Ferhat Abbas 1 alors que la spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDAX) a été effectuée au plateau technique des analyses physico-chimiques à Ouargla.

3.1. Spectrométrie de fluorescence X :

Les analyses chimiques quantitatives ont été effectuées par spectrométrie de fluorescence X. Les échantillons ont été séchés à l'air libre puis broyés à $< 80 \mu\text{m}$ (Précisément $63 \mu\text{m}$). La quantité nécessaire est de 7g sous forme de pastilles. Cette technique a pour but de déterminer les teneurs en éléments majeurs, exprimées en pourcentage d'oxydes dans les matériaux utilisés pour cette étude. L'appareil utilisé est de marque **Rigaku**. Les résultats obtenus sur cette analyse sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 13. Résultats de XRF des composants du sol reconstitué

Oxydes	Kaolin	Bentonite
SiO ₂	54.3	65.8
Al ₂ O ₃	29.2	14.5
CaO	0.863	6.39
Fe ₂ O ₃	7.83	3.50
K ₂ O	4.56	2.65
MgO	0.630	2.87
TiO ₂	0.294	0.349
Na ₂ O	0.156	3.04
SO ₃	0.356	0.479
P ₂ O ₅	0.421	0.0818

Tableau 14. Résultats de XRF de sol reconstitué (Fluorescence par les rayons x)

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
80%K+20%B	56.2	27.3	1.51	7.19	4.23	0.872	0.299	0.465	0.339	0.381

Tableau 15. Résultats de XRF de sol d'Ouled Salah (Fluorescence par les rayons x)

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
Marne argileuse	52,2	18,5	13,9	7,77	2,49	2,39	0,951	0,663	0,634	0,324

L'analyse au MEB par énergie de dispersion par les rayons x montre la présence de l'Oxygène (O), Silicium (Si), Aluminium (Al), Calcium (Ca), Fer (Fe), Magnésium (Mg) et du potassium (K) dans les deux sols utilisés. On remarque que la teneur en Ca dans le sol naturel est relativement plus élevée par rapport à celle du sol reconstitué. On a noté aussi des teneurs en carbone anormalement élevées dans les deux sols et cela est due à la quantité importante du carbone utilisée sur le porte échantillon. Ces résultats confirment bien ceux obtenus par l'analyse XRF.

Ils attestent que les principaux constituants du sol étudié sont SiO₂, Al₂O₃, CaO et Fe₂O₃, puis K₂O, MgO en deuxième position, puis des traces de TiO₂, Na₂O, SO₃, P₂O₅. Les résultats des analyses

chimiques attestent que les sols sont majoritairement riches en silice, aluminium et calcium. La présence de silice avec de l'aluminium favorise l'apparition de kaolinite, l'abondance de calcium assure la présence de calcite et de dolomite, la présence de potassium est attribuée à l'existence d'illite et de muscovite.

4. Propriétés minéralogiques des sols étudiés :

L'analyse minéralogique a été effectuée à l'Unité de recherche sur les matériaux émergents (URME) de l'université de Ferhat Abbas 1. La diffraction des rayons X (DRX) sur un échantillon (<63µm) nous a permis de déduire les principales phases minéralogiques.

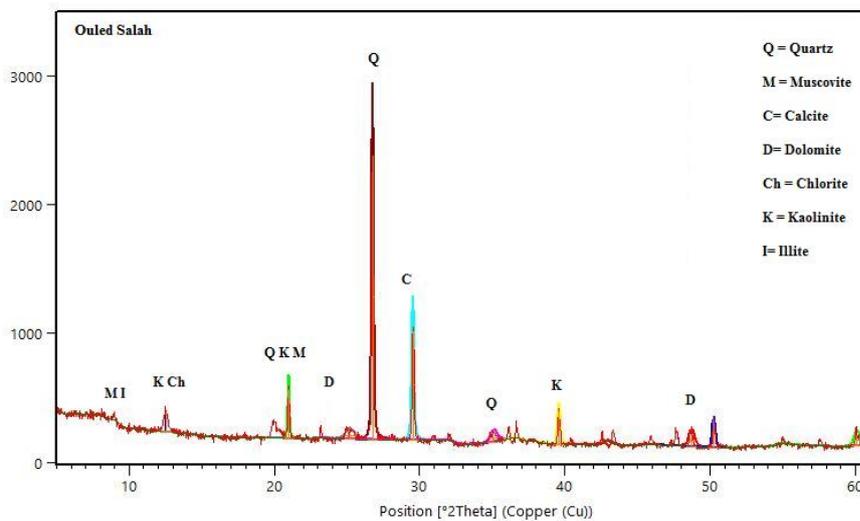


Fig. 30. Analyse minéralogique du sol d'Ouled Salah

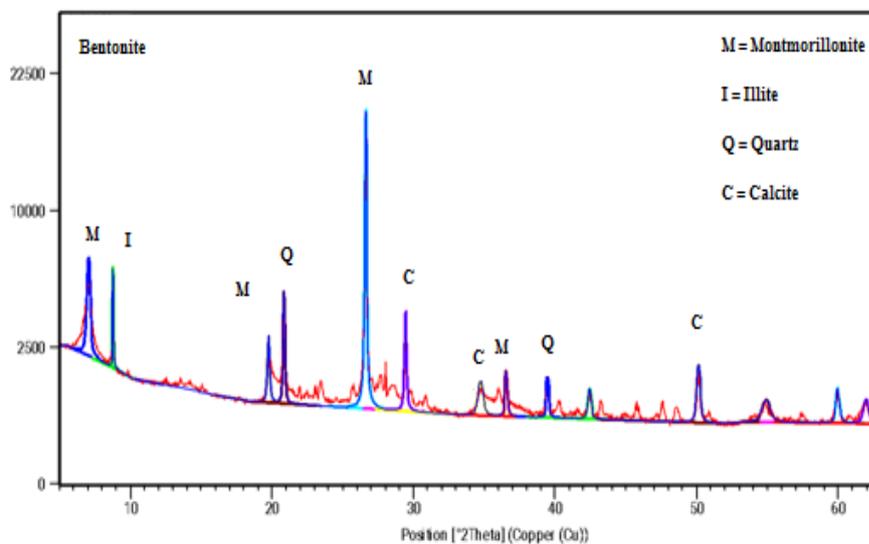


Fig. 31. Analyse minéralogique de la bentonite de Mostaganem

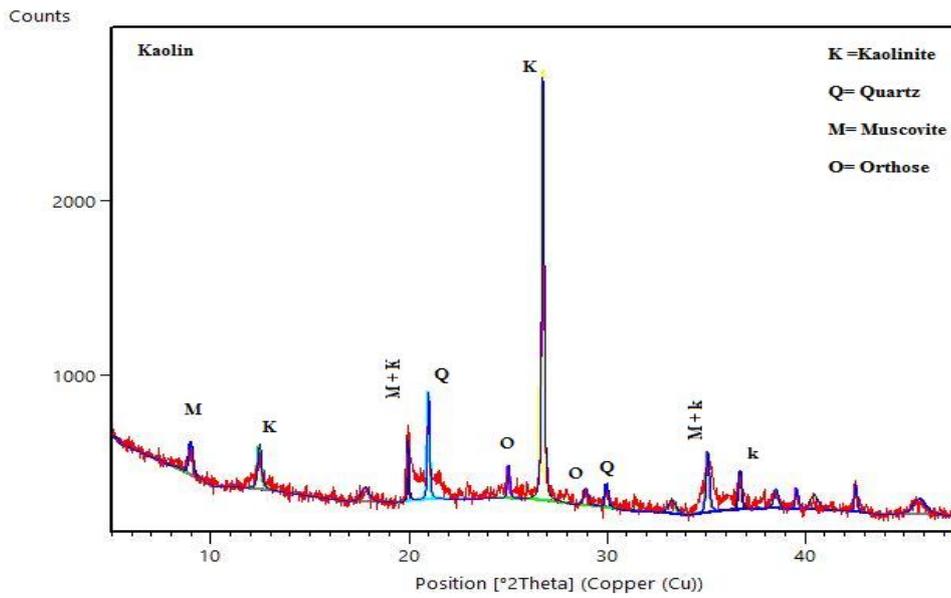


Fig. 32 .Analyse minéralogique du kaolin traité 2

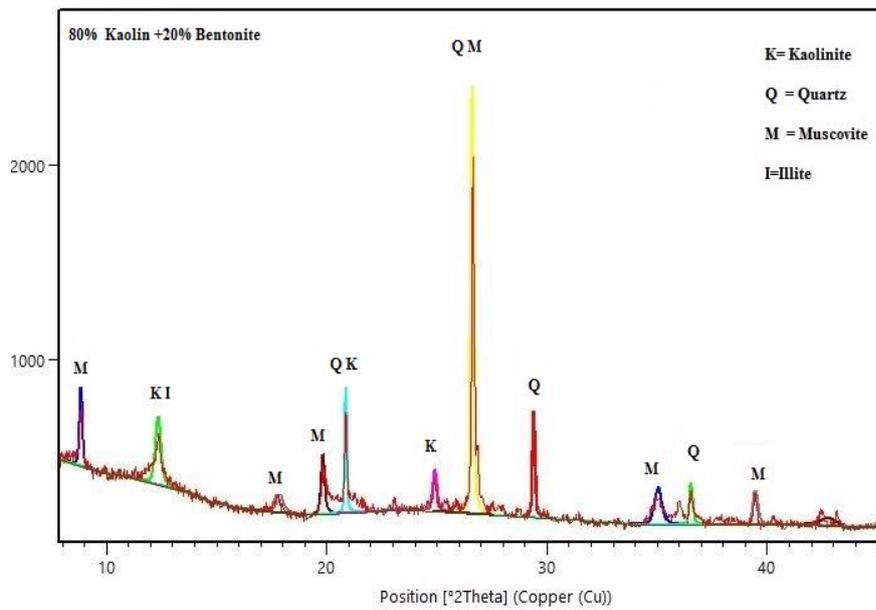


Fig.33. Analyse minéralogique du sol reconstitué

Pour le sol naturel (Ouled Salah) : Les phases cristallines les plus abondantes sont le quartz et la calcite puis la kaolinite et la dolomite et aussi la présence de chlorite, et l'illite, la muscovite. Nous pouvons dire comme étude primaire que les minéraux responsables du gonflement sont l'illite et la chlorite, aussi la muscovite peut influencer sur le comportement du sol.

Pour le kaolin d'après les résultats du DRX, les phases cristallines majeures contenues dans l'ensemble des échantillons sont : la kaolinite comme un pic abondant, le quartz et la muscovite. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par A. Bouzidi (2012) et M. Chouafa (2016).

Pour la bentonite de Mostaganem, les résultats du DRX montrent la présence de montmorillonite qui représente la phase cristalline la plus fréquente. On note aussi l'apparition de l'Illite, du Quartz et de la Calcite. M. Debieche et al. (2019) ont trouvé les mêmes résultats avec la présence de traces de Feldspath.

Pour le sol reconstitué, le DRX de ce sol montre l'apparition des différentes phases cristallines telles que l'apparition d'un pic intense correspondant au Quartz (SiO_2) ($2\theta = 26,26$, $d = 3,34$), de la Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ($2\theta = 12,3$, $d = 7,16$), à la Muscovite ($2\theta = 8,2$, $d = 9,9$), également l'apparition de l'Illite ($\text{K}(\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})$) ($2\theta = 26,26$, $d = 9,99$).

5. Analyses microstructurales des sols utilisés :

Le microscope électronique à balayage (MEB) a été utilisé pour réaliser des analyses permettant de fournir des informations sur la morphologie et la composition chimique du sol étudié. Le microscope électronique à balayage utilisé est de type ZEISS. L'analyse a été effectuée au plateau physico-chimique de l'université d'Ouargla. Les résultats sont montrés dans les figures suivantes :

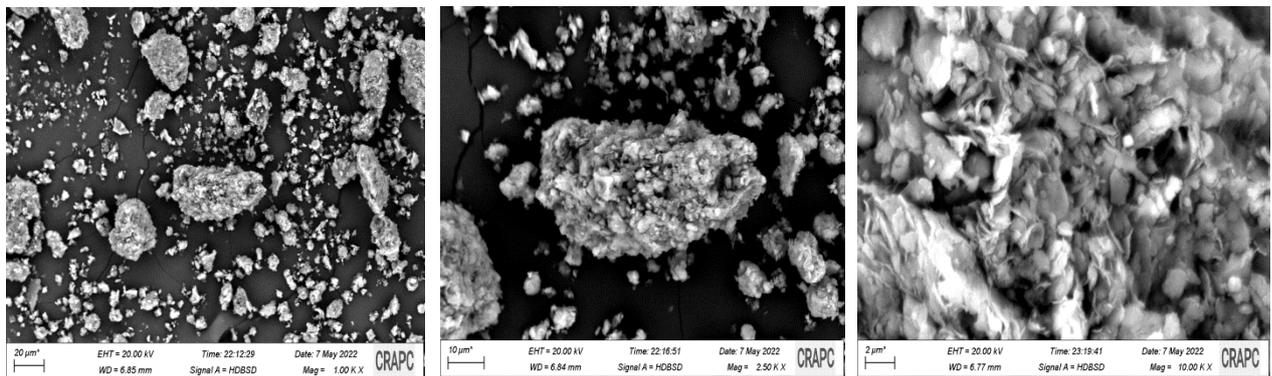


Fig. 34. Observations MEB du sol naturel (Ouled Salah) avec les différents agrandissements

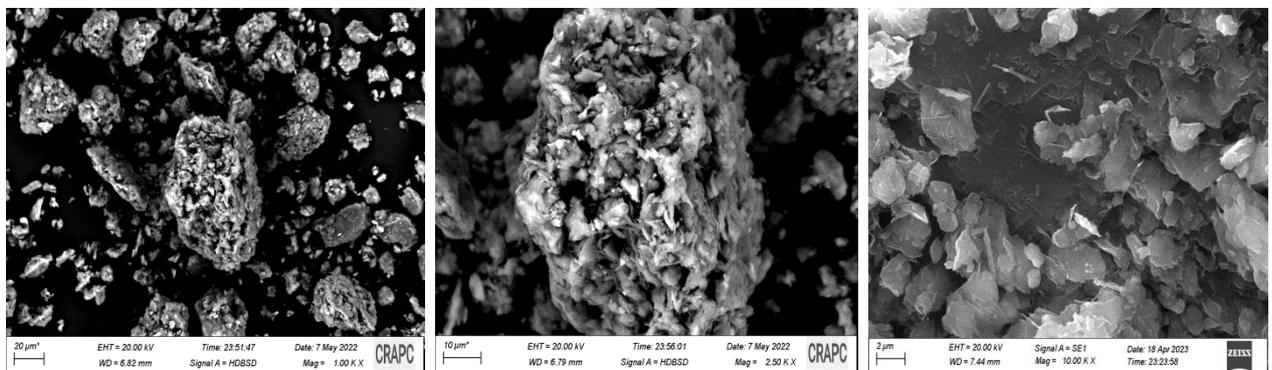


Fig. 35. Analyse au MEB du sol reconstitué avec les différents agrandissements.

Les images de microscopie électronique par balayage montrent la présence de feuillets d'argiles aléatoirement dispersés soit sous forme allongés ou enroulés et sous forme de bâtonnets. Nous pouvons observer également quelques amas d'agrégats qui peuvent être dû à des impuretés au sein de l'argile.

Pour le sol reconstitué, On a une forme écaillée est cela due à l'abondance de la kaolinite.

Conclusion

Les résultats des essais physico-mécaniques, minéralogiques et microstructuraux fournissent des informations essentielles concernant l'identification, le comportement, la composition et la structure intime des sols étudiés. La première étude indique que ces sols présentent des caractéristiques de gonflement, de compressibilité et de plasticité. Elle permet également d'obtenir des informations plus précises sur les minéraux présents dans le sol, ainsi que sur leur composition chimique et leur forme de surface. De plus, elle permet d'identifier les minéraux à l'origine du phénomène de gonflement.

Chapitre IV :

Caractérisations des déchets

Introduction

La valorisation des déchets en Algérie est un enjeu crucial pour plusieurs raisons, notamment la préservation de l'environnement, la gestion durable des ressources et la promotion d'une économie circulaire

La valorisation matière implique le recyclage des déchets pour en extraire les matériaux recyclables tels que le plastique, le verre et le papier. En Algérie, des initiatives de recyclage sont en cours, mais elles nécessitent un renforcement pour augmenter les taux de recyclage et réduire la dépendance à l'égard des matières premières vierges.

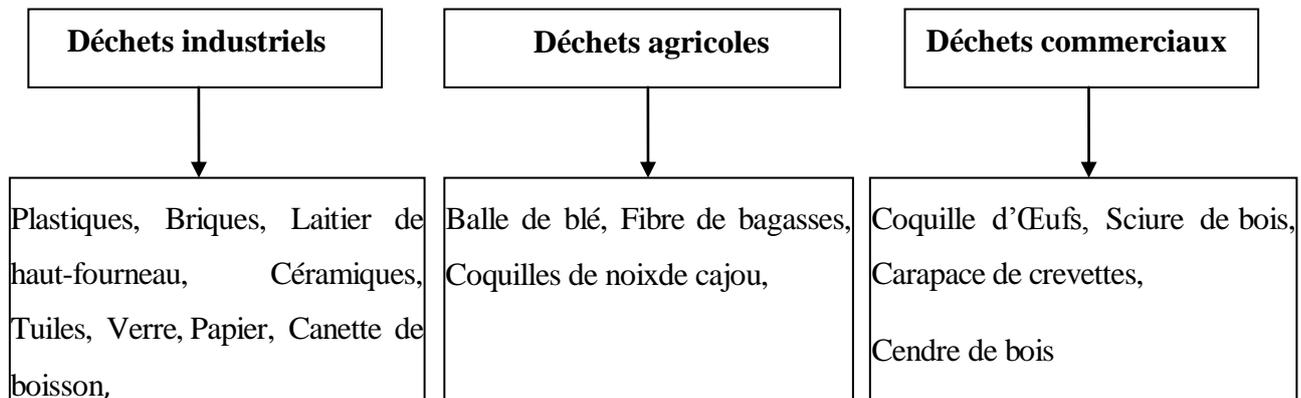
La particularité de notre travail réside dans la valorisation des matériaux locaux en utilisant une approche expérimentale de stabilisation. Nous avons choisi des déchets locaux plus ou moins adaptés en termes de respect de l'environnement et de rentabilité.

1. Définition de déchet :

Un déchet correspond à tout matériau, substance ou produit qui a été jeté ou abandonné car il n'a plus d'utilisation précise.

2. Les types de déchets :

Il existe 3 types de déchets :



2.1. Déchet industriel :

Le papier est un matériau en feuilles minces fabriqué à partir de fibres végétales. C'est un support d'écriture et dessin avec de nombreuses autres applications. Le papier utilisé dans cette recherche est un papier bureautique.

Le papier est considéré comme un déchet industriel disponible dans toutes les administrations

algériennes. La première phase est basée sur le ramassage de papier puis la combustion pour obtenir une cendre préparée pour l'utiliser comme ajout stabilisateur.



Fig. 36. Étapes de la préparation de la Cendre de papier

2.1.1. Propriétés physiques de la cendre de papier :

Les propriétés physiques de la cendre sont résumées dans le **Tableau 16**:

Tableau 16. Propriétés de la cendre de papier

Propriétés	Cendre de papier
pH	12,33
Gravité spécifique	3,42
Indice de gonflement libre (%)	-25%
Granulométrie	94% \geq 2mm

2.1.2. Propriétés chimiques de la cendre de papier :

Les Propriétés chimiques de la cendre de papier sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 17. Résultats de XRF de la cendre de papier

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	Cl
Pourcentages	4.58	1.74	86.3	2.07	0.25	0.977	0.16	1,14	4.58	0.59

Les données rapportées dans le **Tableau 17** montrent que la cendre de papier contient une teneur très importante de la chaux vive CaO (86%). Le tableau triangulaire SiO₂-CaO-Al₂O₃ nous a permis de classer ce déchet dans la classe C selon les normes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Les composants chimiques qui existent dans le sol sont la silice, et l'aluminium. La présence de ces composants avec le calcium de la cendre favorise la formation des agents cimentaires à long terme (réaction pouzzolanique).

2.1.3. Propriétés minéralogiques de la cendre de papier :

L'analyse de DRX sur la poudre de la cendre de papier nous a permis de déterminer les différentes phases cristallines. La Chaux représente la phase majeure de la cendre puis la Géhlenite, la Mayenite et la calcite avec des traces de Portlandite et l'Hatruite. Les résultats de cette analyse DRX corroborent ceux obtenus dans une étude antérieure menée par (Mavroulidou 2018), il a rapporté l'apparition de la Belite et du Quartz, suggérant une variation possible dans la composition minéralogique en fonction des conditions de combustion ou des sources de papier.

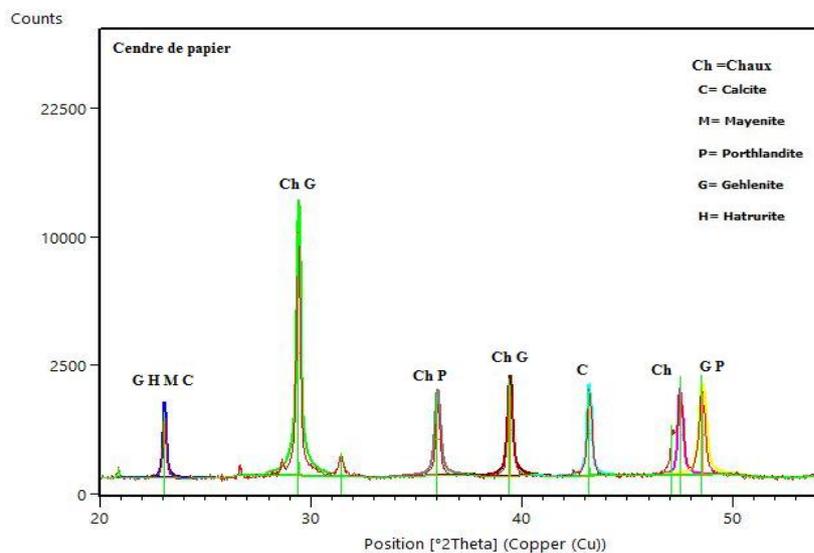


Fig. 37. DRX de la cendre de papier

2.1.4. Propriété microstructurale de la cendre de papier :

La microscopie électronique par balayage MEB montre une structure fibreuse, ce qui suggère que la cendre de papier est constituée principalement de fibres. Ces fibres peuvent provenir de la cellulose présente dans le papier. De plus, la présence de particules entre les fibres suggère qu'il y a des éléments autres que les fibres elles-mêmes dans la composition de la cendre. Ces particules pourraient être des additifs présents dans le papier ou des éléments provenant de la combustion du papier.

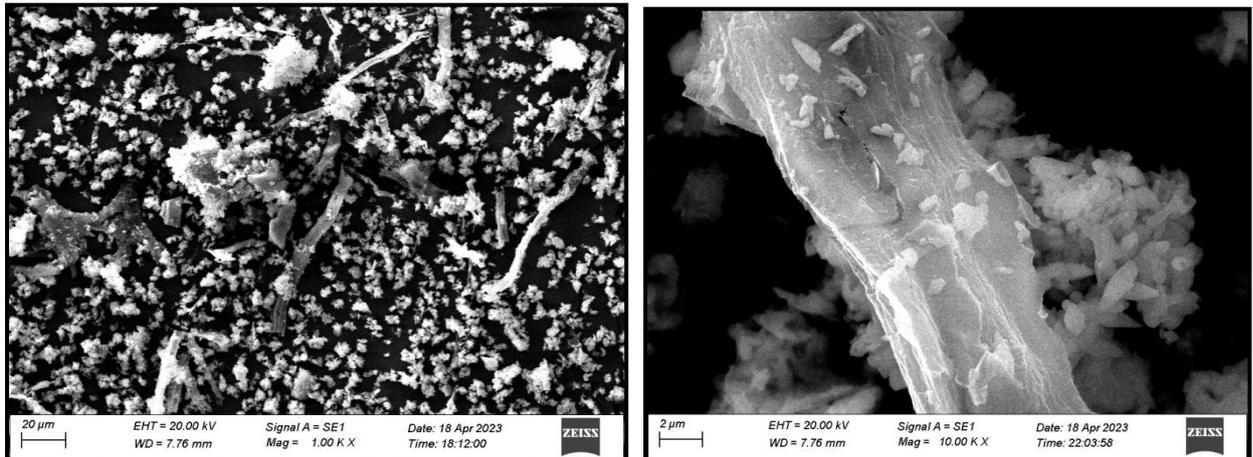


Fig. 38. Analyse de la microstructure de la cendre de papier avec les différents agrandissements

2.2. Déchets agricoles

Grignons d'olive :

La wilaya de Jijel est une région productrice d'huile d'olive, une fois l'huile extraite, les résidus solides des olives sont stockés dans la nature créant un impact environnemental négatif. Afin de minimiser cet impact nous avons essayé de les récupérer et de les réutiliser dans le domaine de la stabilisation des sols et connaître leur efficacité dans ce domaine.

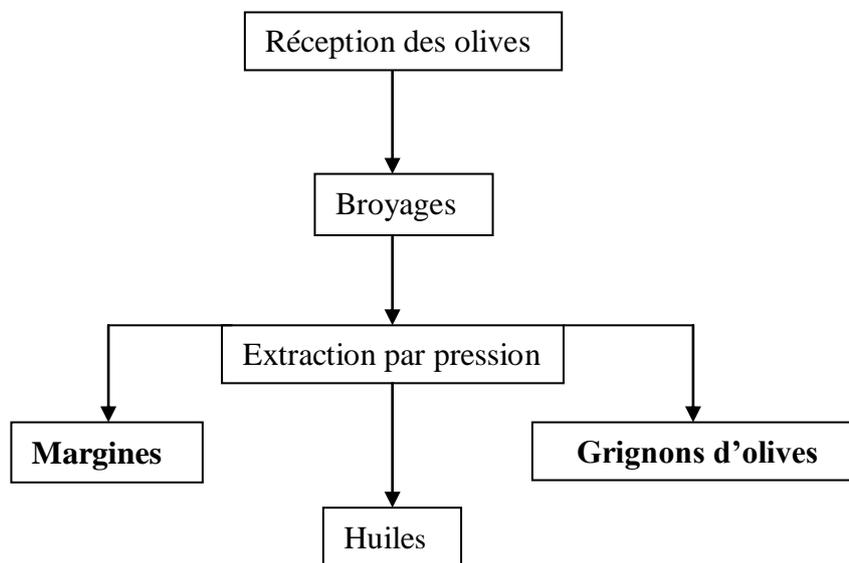


Fig. 39. Schéma représentant le processus de production des déchets oléicoles

Les margines sont des effluents issus de l'extraction de l'huile d'olives. Elles sont des résidus liquides. Les grignons d'olives sont un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive composé des peaux, des résidus de la pulpe et des fragments des noyaux et ces grignons d'olives sont utilisés comme

stabilisant pour traiter les sols à problème. Les grignons d'olive proviennent des huileries de la commune de Sidi Abdelaziz (Wilaya de Jijel). Leur préparation commence par un séchage à l'air pendant un mois.



Oliviers

Grignons d'olives

Fig. 40. Étapes de la préparation des grignons d'olives

2.2.1. Les propriétés physiques, chimiques et microstructurales des grignons d'olives :

Les propriétés des grignons sont résumées dans le **Tableau 18** :

Tableau 18. Propriétés physiques des grignons d'olives

Propriétés	Grignon d'olive
Granulométrie	94% \geq 2 mm
Absorption d'eau	48%
Gravité spécifique	1,32
pH	5.85
Indice de gonflement libre (%)	22%

Tableau 19. Résultats d'EDX sur les grignons d'olives

Éléments chimiques	Si	Al	Ca	Fe	K	Mg	O	C	Cu
% en masse	7.48	5.21	2.88	2.26	1.05	0.51	40.04	39.69	0.87

Les résultats EDX ont montré les éléments chimiques massiques les plus importants qui sont carbone (C) et l'oxygène (O). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par (Toumi 2021) qui a montré l'apparition de deux pics **Figure 41**.

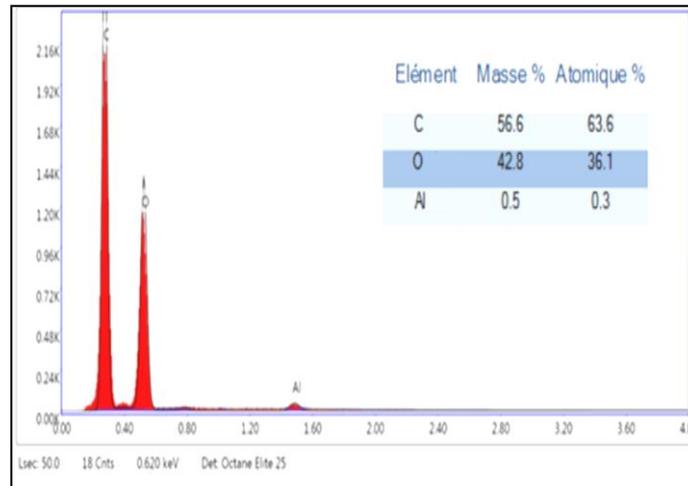


Fig. 41. Énergie de dispersion par les rayons x des grignons d'olives (Toumi 2021)

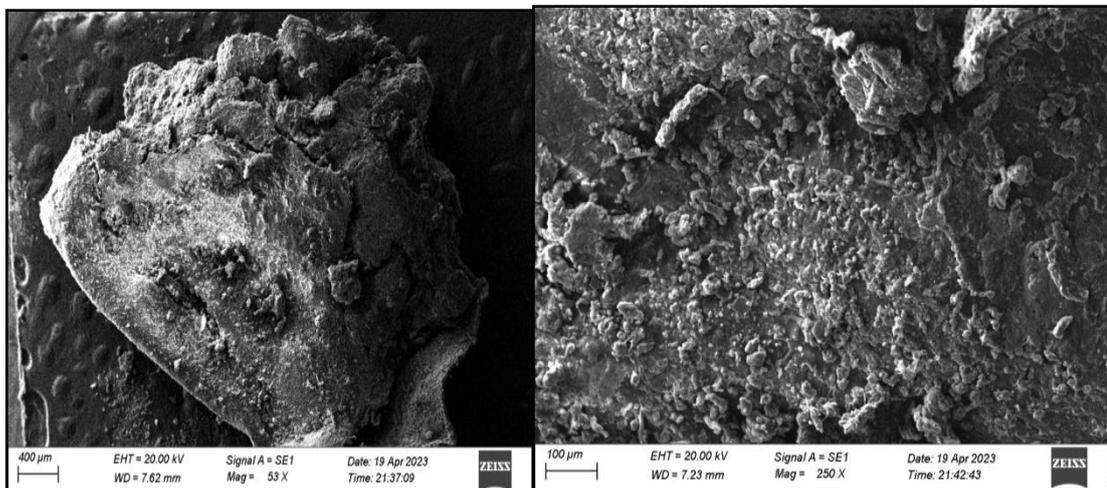


Fig. 42. Images au MEB des grignons d'olives

L'analyse microstructurale des grignons d'olives a montré une morphologie hétérogène indiquant que les grignons présentent une variété de structures et de compositions à différentes échelles. Suivie par des cavités creuses et une rugosité élevée en raison de la présence de fibres végétale.

La rafle de maïs :

La wilaya de Jijel connaît pendant la saison estivale un intérêt pour la culture des champs de maïs qui est considéré comme un commerce saisonnier rentable. La rafle de maïs est un déchet issu de l'éco-agriculture. Sa préparation commence par la collecte de ce déchet puis un broyage manuel aléatoire puis un séchage à l'étuve à une température de 60°C pendant au moins 24 heures.



Champ de maïs

Rafle de maïs

Fragments de la rafle

Fig. 43. Étapes de la préparation des rafles de maïs

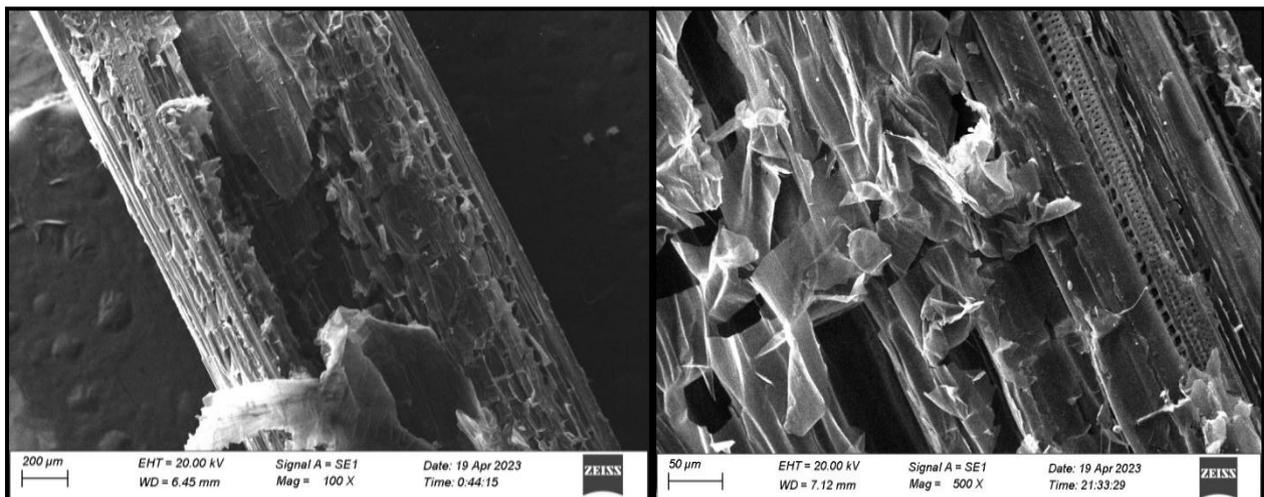
2.2.2. Propriétés physiques et microstructurales de la rafle de maïs

La recherche sur la rafle de maïs a démontré une consistance tendre et une faible densité. La capacité d'absorption est très importante. Les résultats physiques réalisés au laboratoire sont résumés dans le **Tableau 20** :

Tableau 20. Propriétés physiques de la rafle de maïs

Propriétés	Rafle de maïs	Observations
Granulométrie	92% \geq 2mm	granulaire
Absorption de l'eau	59%	Très bonne absorption
Gravité Spécifique	1,77	Légère

Les résultats de MEB sur la rafle de maïs est montrée dans la **Figure 44** .On a remarqué une surface rugueuse bien claire après l'agrandissement de 50Um .Cette structure favorise le collage avec le sol ce qui est considéré comme essentiel pour créer des liaisons entre la rafle et le sol.

**Fig.44.**Images au MEB de la rafle de maïs

2.3. Déchet commercial

Les fibres de jute : Les fibres sont extraites des sacs de jute qui sont disponibles au marché. Ils ont été desserrés et coupés en longueurs d'environ 50 mm. La fibre de jute est assez résistante et cela est due à la présence des lignines qui jouent le rôle d'une matrice enrobant la cellulose, qui est une structure très rigide.



Fig. 45. Fibres de jutes

2.3.1. Propriétés physiques et microstructurales de la fibre de jute

Tableau 21 .Propriétés physiques de la fibre de jute

Propriétés	Valeurs
Longueur	5 Cm
Absorption d'eau	32
Gravités spécifiques	1.3

Tableau 22. Composition de la fibre de jutes

	Cellulose(%)	Lignine(%)	Hémicellulose(%)
Fibres de jutes	41-48	21-24	18-22

L'analyse microstructurale de la fibre de jute a été effectuée sur un plan longitudinale .On a montré la présence des résidus de la lamelle moyenne à la surface de la fibre.

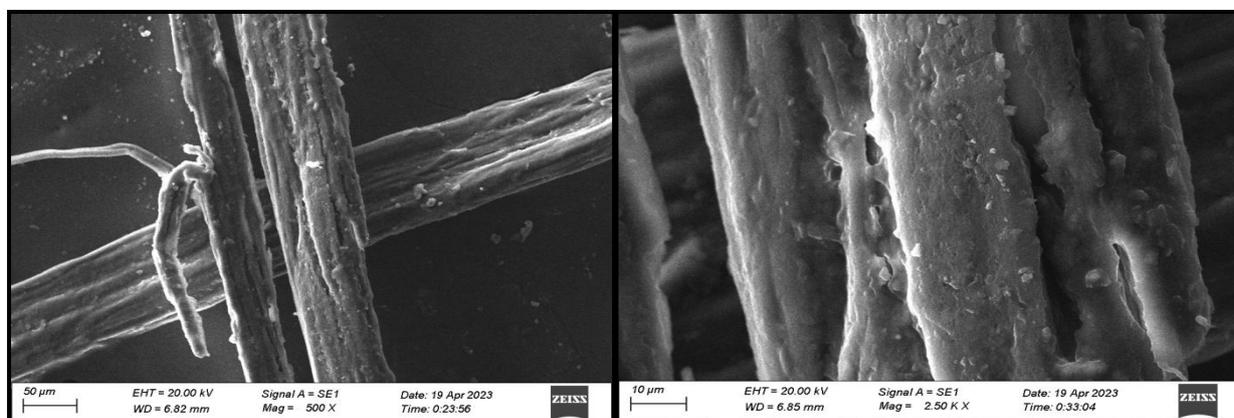


Fig.46. Observations au MEB de la fibre de jute avec les différents agrandissements

Conclusion :

Notre travail consiste à sélectionner plusieurs types de déchets sous différentes formes (fibres, poudres, grains) afin de déterminer quelle forme offre les meilleures performances. Le choix des déchets est basé sur plusieurs critères : leur disponibilité, leur gratuité et leur abondance. Les analyses chimiques et minéralogiques encouragent l'utilisation de ces déchets dans le domaine de la stabilisation en raison des raisons suivantes : la rigidité fournie par la fibre de jute, la rafle et les grignons d'olives, ainsi que la teneur élevée en calcium dans la cendre de papier qui favorise la création de liaisons entre l'ajout et les composants du sol. Les pourcentages choisis ont été déterminés suite à des tests en laboratoire et des travaux préexistants. Après avoir identifié les sols et les ajouts, nous allons passer à l'étape de la stabilisation des sols en utilisant la cendre de papier, la rafle de maïs, les grignons d'olives et les fibres de jute afin d'étudier leurs comportements et leurs efficacités.

Chapitre V :

Résultats et discussions

Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinons les résultats de l'incorporation de différents ajouts, tels que les grignons d'olives, la rafle de maïs, la cendre de papier, et la fibre de jute, sur le comportement des sols. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de ces ajouts sur les propriétés physiques, mécaniques et microstructurales des sols. Les résultats présentés dans ce chapitre fourniront des informations précieuses pour les ingénieurs du génie civil qui cherchent à optimiser les performances des sols dans leurs projets de terrassement.

1. Influence des grignons d'olives sur le comportement du sol argileux (Ouled Salah)

L'addition des grignons d'olives contribue à l'amélioration des propriétés géotechniques des sols argileux :

1.1. Influence des grignons d'olives sur la gravité spécifique :

L'influence de l'ajout des grignons d'olive sur la gravité spécifique du sol argilo-marneux est représentée graphiquement dans la **Figure 47**. L'augmentation du pourcentage de grignon d'olive diminue la gravité spécifique du sol traité. Cette réduction est justifiée par la légèreté de la densité du grignon d'olive (1,32) par rapport à celle du sol naturel (2,47).

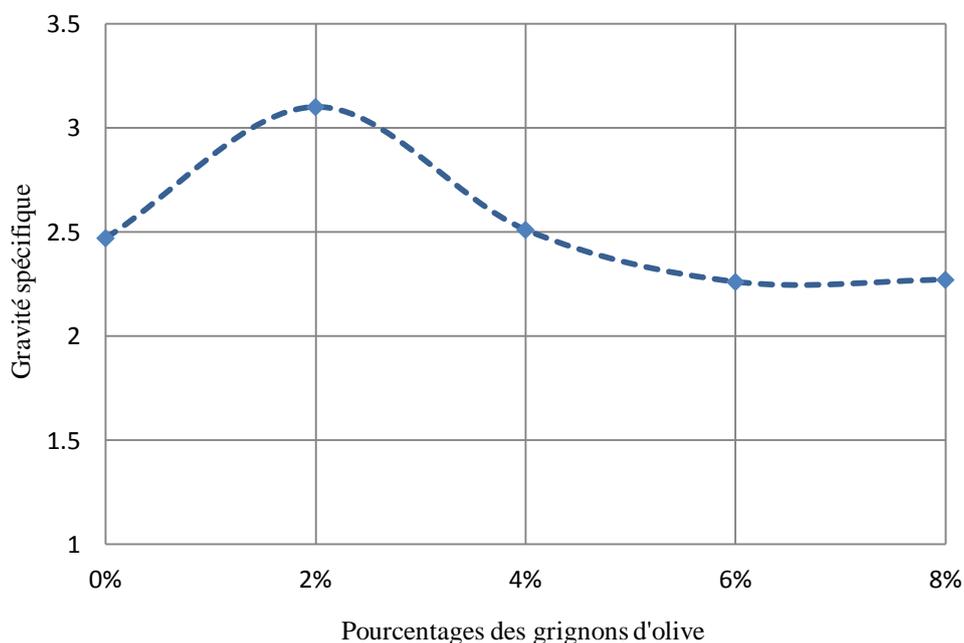


Fig. 47. Influence des grignons d'olives sur la gravité spécifique

1.2. Influence des grignons d'olives sur l'indice de gonflement libre :

La diminution de l'indice de gonflement libre avec l'augmentation du pourcentage de grignons d'olive est tout à fait remarquable dans la **Figure 48**. L'indice de gonflement passe de 45 à 8,33 avec un ajout de 8%, ce qui représente une amélioration significative d'environ 81%. Donc l'ajout

de grignons d'olive diminue le gonflement du sol argilo-marneux.

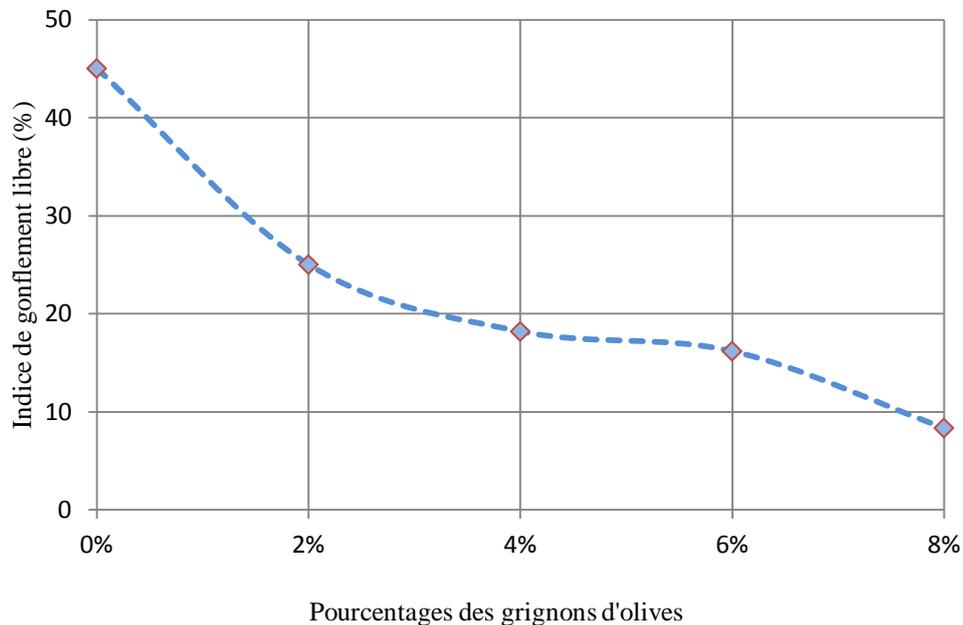


Fig. 48. Influence des grignons d'olives sur l'indice de gonflement libre

1.3. Influence des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg:

Le **Tableau 23** résume l'effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg.

Tableau 23. Limites d'Atterberg du sol naturel traité par les grignons d'olives

	L_L (%)	L_P (%)	I_P (%)
0%	57	30	27
2%	47	23	24
4%	51,5	30	21,5
6%	52	33	19
8%	57	36	21

L'incorporation des grignons d'olives dans le sol argilo-marneux entraîne des variations légères des limites d'Atterberg. Selon la **Figure 49**, une augmentation du pourcentage de grignons d'olives conduit à une diminution de la limite de liquidité (LL) du sol traité, tandis que la limite plastique (LP) diminue jusqu'à un ajout de 2 %, puis augmente à nouveau. Néanmoins, l'indice de plasticité (IP) du sol traité diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de grignons d'olives. Il passe de 27 % à 21 %, ce qui indique une réduction de la plasticité du sol traité.

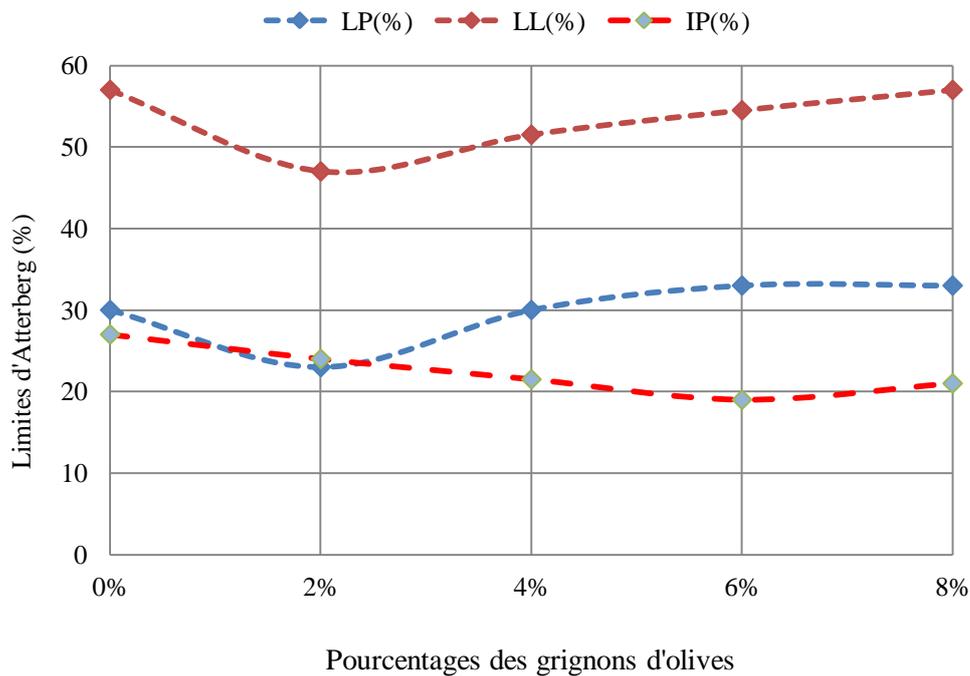


Fig. 49. Influence des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg

1.4. Influence des grignons d'olives sur le compactage :

L'effet des grignons d'olives sur les caractéristiques de compactation du sol argileux marneux est montré dans la **Figure 50** et la **Figure 51**. On a une augmentation substantielle de la teneur en eau de 18 % pour 0 % de l'addition à 24 % pour 8 % de l'addition. Cette augmentation est due à l'addition qui a modifié la distribution granulométrique du sol, en réduisant la quantité de particules fines et en rendant le sol plus grenu. Ces modifications ont nécessité de l'eau supplémentaire et un mélange de réaction après les mélanges sol-grignon d'olive.

On note également, une baisse de la densité sèche de (1.59 t/m^3) pour le sol non traité à (1.34 t/m^3) pour 8 % d'addition. Cette baisse est due au fait que le grignon d'olive a des particules plus légères que le sol.

Tableau 24. Influence des grignons d'olives sur le compactage

Grignons d'olives	0%	2%	4%	6%	8%
Teneur en eau optimale (%)	18	22	26	26	24
Densité sèche maximale (t/m^3)	1.59	1.58	1.51	1.46	1.34

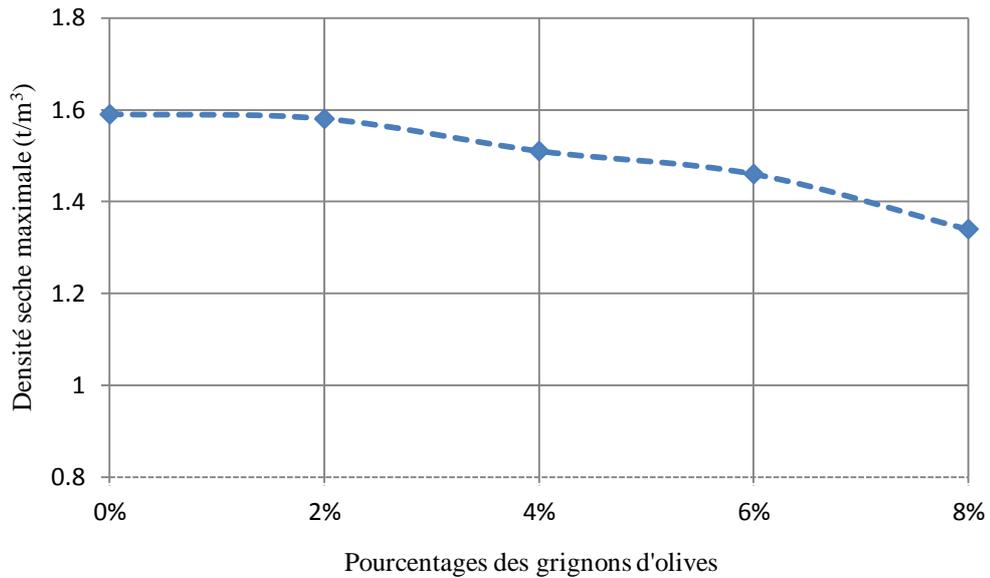


Fig. 50. Influence des grignons d'olives sur la densité sèche maximale

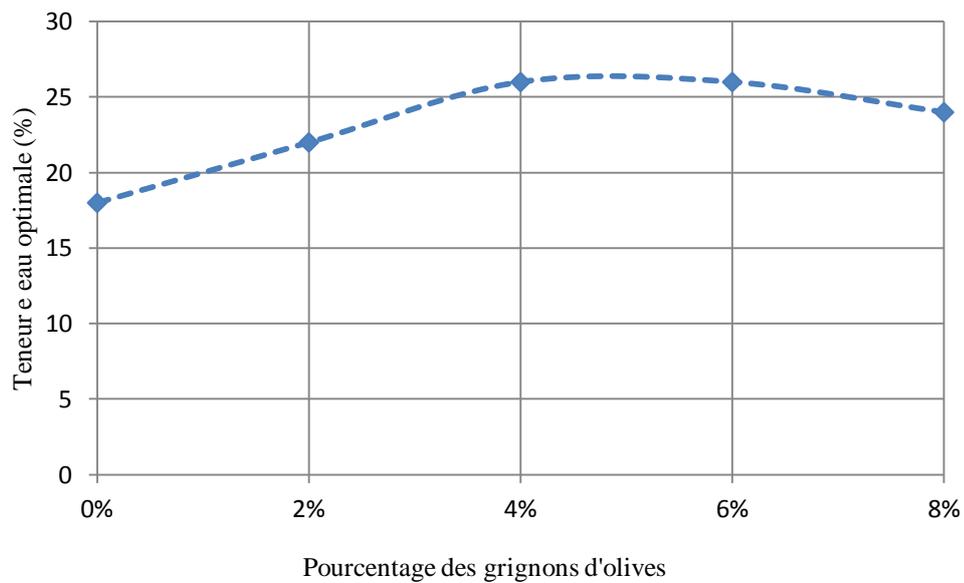


Fig. 51. Influence des grignons d'olives sur la teneur en eau optimale

1.5. Influence des grignons d'olives sur la résistance du cisaillement du sol :

Le **Tableau 25** résume les résultats des grignons d'olives sur les paramètres de la résistance du cisaillement:

Tableau 25. Essais de résistance au cisaillement sur le sol traité par les grignons d'olives

Grignon d'olives	0%	2%	4%	6%	8%
Cohésion (kpa)	30	41	40	49	70
Angle de frottement (°)	6	11	24	25	14

L'augmentation de l'angle de frottement(ϕ) et la cohésion est proportionnelle avec l'augmentation

du pourcentage des grignons d'olives. La cohésion passe de 30Kpa à 70 Kpa et l'angle de frottement augmente de 6° à 25°. Puis diminue jusqu'à 14°.

Cette amélioration est due à la substitution d'une partie des particules fines du sol argilo-marneux par des grignons d'olives qui contiennent des fragments de plus grands diamètres. L'amélioration de la résistance au cisaillement est donc assurée par l'augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement. Aussi la diminution est due à la répartition aléatoire de l'ajout dans le sol.

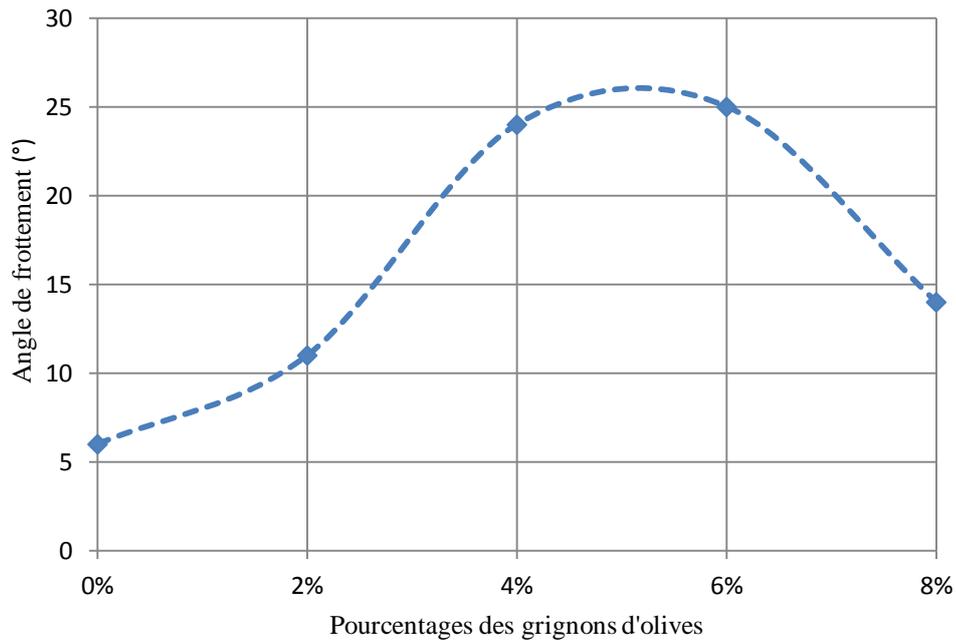


Fig. 52. Influence des grignons d'olives sur l'angle de frottement

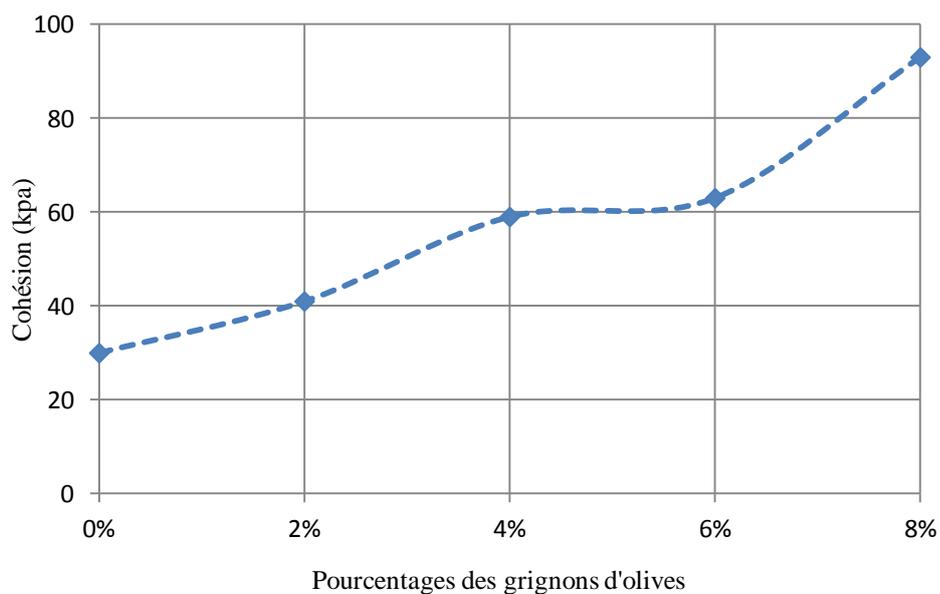


Fig.53. Influence des grignons d'olives sur la cohésion

1.6. Influence des grignons d'olives sur la compressibilité du sol :

Le comportement des grignons d'olives sur la compressibilité des sols est synthétisé dans le **Tableau 26** :

Tableau 26. Essai de la compressibilité du sol traité par les grignons d'olives

Pourcentages des grignons d'olives	0%	2%	4%	6%	8%
Indice de gonflement (%)	6.8	5.4	5	3.7	1.1
Indice de compressibilité (%)	20.4	16	15.1	2.6	2.4
Contrainte de préconsolidation (Kg/m ²)	2.3	2.5	3	3.5	3.5

L'effet des grignons d'olive sur les propriétés mécaniques du sol est montré dans la **Figure 54** et la **Figure 55**. On note une amélioration remarquable dans les caractéristiques de compressibilité du sol traité, une diminution remarquable dans l'indice de gonflement et de l'indice de compressibilité respectivement avec l'augmentation des pourcentages de grignons. L'indice de gonflement du sol non traité est 6,8% (sol gonflable), il diminue jusqu'à 1.1% avec un ajout de 8% (sol non gonflable). L'indice de compressibilité du sol non traité diminue de 20,4% jusqu'à 2,4 %. Ces diminutions peuvent être dues à l'augmentation de la porosité avec l'ajout d'un additif et, par conséquent, à la perméabilité et donc à un changement de structure. Ainsi, on remarque l'effet des déchets qui diminue la sensibilité du sol au gonflement. Une réduction très efficace du potentiel de gonflement, la réduction dépasse presque 80% du sol naturel.

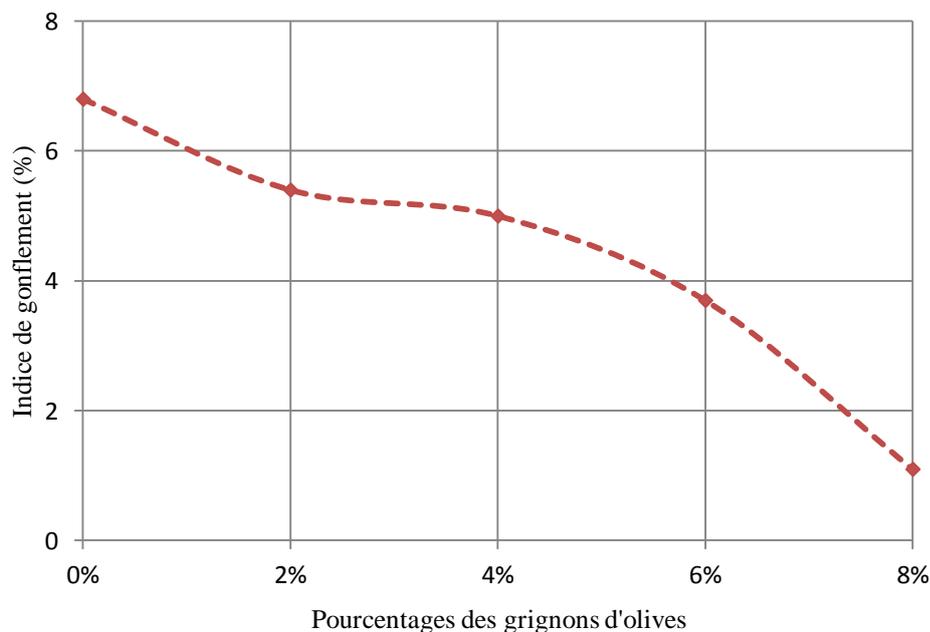


Fig.54. Influence des grignons d'olives sur l'indice gonflement de sol

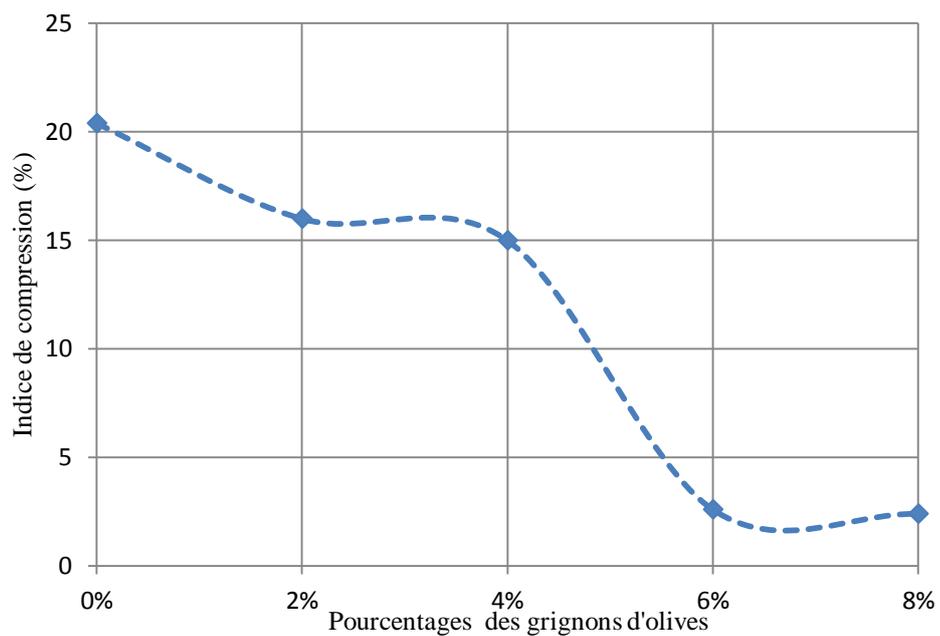


Fig. 55. Influence des grignons d'olives sur l'indice de compressibilité de sol.

2. Utilisation de la rafle de maïs pour le traitement du sol argileux (Ouled Salah)

2.1. Comportement de la gravité spécifique du sol traité par la rafle de maïs :

La **Figure 56** présente les résultats de l'évolution de la gravité spécifique en fonction du pourcentage de la rafle de maïs. La diminution de la densité avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout est due à la densité légère de la rafle de maïs par rapport à la densité de sol.

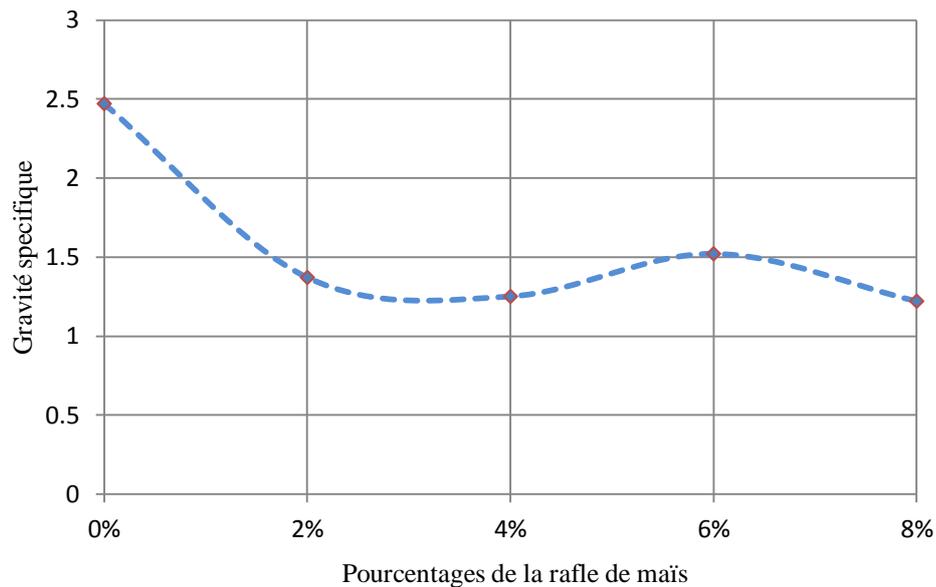


Fig. .56. Effets de la rafle de maïs sur la gravité spécifique

2.2. Comportement de l'indice de gonflement du sol traité par la rafle da maïs :

L'effet de la rafle de maïs est très clair dans la **Figure 57**. Les résultats montrent une diminution remarquable du potentiel par l'augmentation de la rafle de maïs. Une diminution commence de 45% pour un sol non traité jusqu'à 7.69% pour un sol traité à 6%. Puis elle augmente jusqu'à 14.28%, L'efficacité de cet ajout ne dépasse pas 6% au-delà l'ajout utilisé est inefficace.

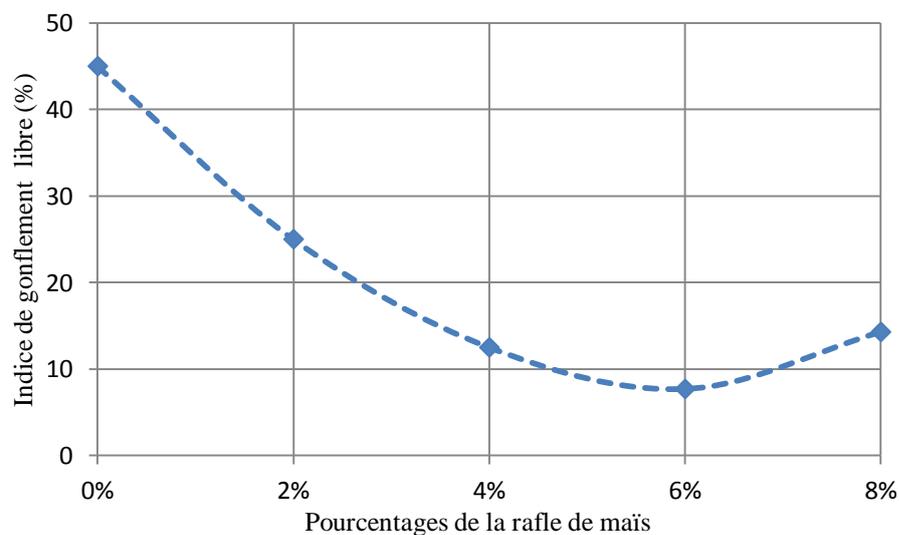


Fig.57. Effet de la rafle de maïs sur l'indice de gonflement libre

2.3. Comportement des limites d’Atterberg du sol traité par la rafle de maïs:

L’influence de la rafle sur la maniabilité du sol est résumée dans le **Tableau 27**:

Tableau 27. Limites d’Atterberg du sol naturel traité par la rafle de maïs

	L_L	L_P	I_P
0%	57	30	27
2%	62.5	37	25.5
4%	64.5	40.75	25
6%	66	43	23
8%	66	44	22

L’influence de la rafle de maïs sur les limites d’Atterberg des échantillons traités a montré une augmentation de la limite de liquidité (LL) et de la limite de plasticité (PL) Ce qui réduit l’indice de plasticité de 27% pour un sol non traité à 22% pour 8% d’addition, Ce résultat reflète clairement sur l’amélioration de la plasticité et le sol est devenu bon pour l’usage en Génie civile **Figure 58**

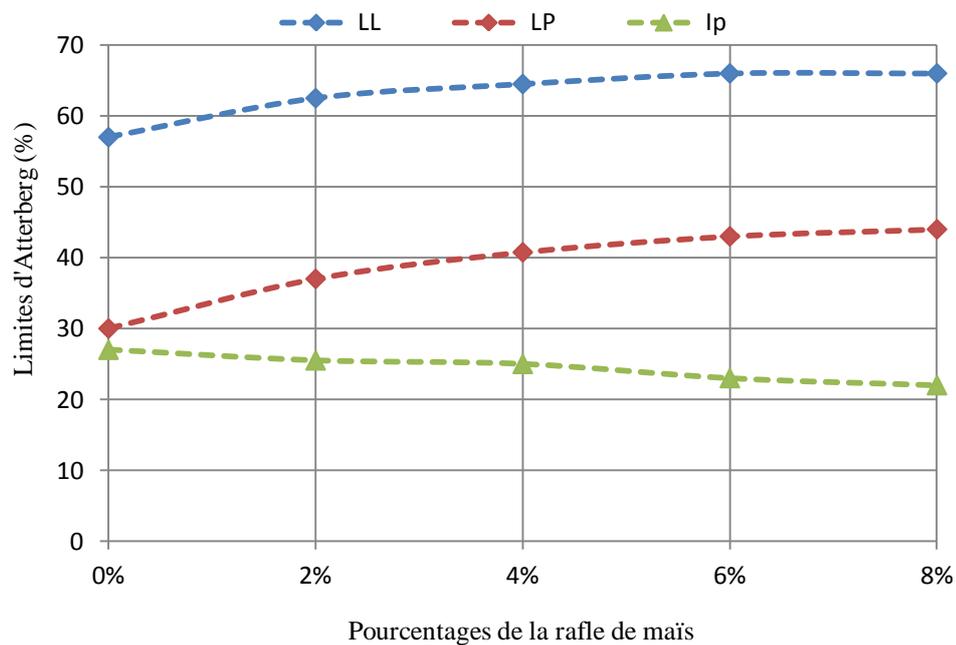


Fig.58. Effet de la rafle de maïs sur les limites d’Atterberg

2.4. Comportement de la compacité du sol traité par la rafle de maïs :

Tableau 28. Effet de la rafle de maïs sur le compactage de sol

Rafle de maïs	0%	2%	4%	6%	8%
Teneur en eau optimale (%)	18	22	26	28	28
Densité sèche maximale (t/m ³)	1.59	1.57	1.48	1.38	1.32

La **Figure 59** et la **Figure 60** nous permettent de montrer qu'il y a une augmentation substantielle de la teneur en eau de 18 % pour 0 % de l'addition à 28 % pour 8 % de l'addition. Cette augmentation est due à l'ajout qui a modifié la distribution granulométrique du sol, réduit la quantité de particules fines et il rend le sol plus grenu. Cette modification a nécessité un apport d'eau supplémentaire et un mélange de réaction après les mélanges sol-épi de maïs.

L'augmentation du pourcentage de la rafle a marqué une baisse de la densité sèche de (1.59 t/m^3) pour le sol non traité à (1.32 t/m^3) pour 8 % d'addition. Cette diminution est due au remplacement du sol par la rafle de maïs qui a une densité réelle très faible (la rafle de maïs est très léger = 1,77) par rapport au sol qui est de 2,47. L'ajout donc remplit les vides les plus importantes du sol.

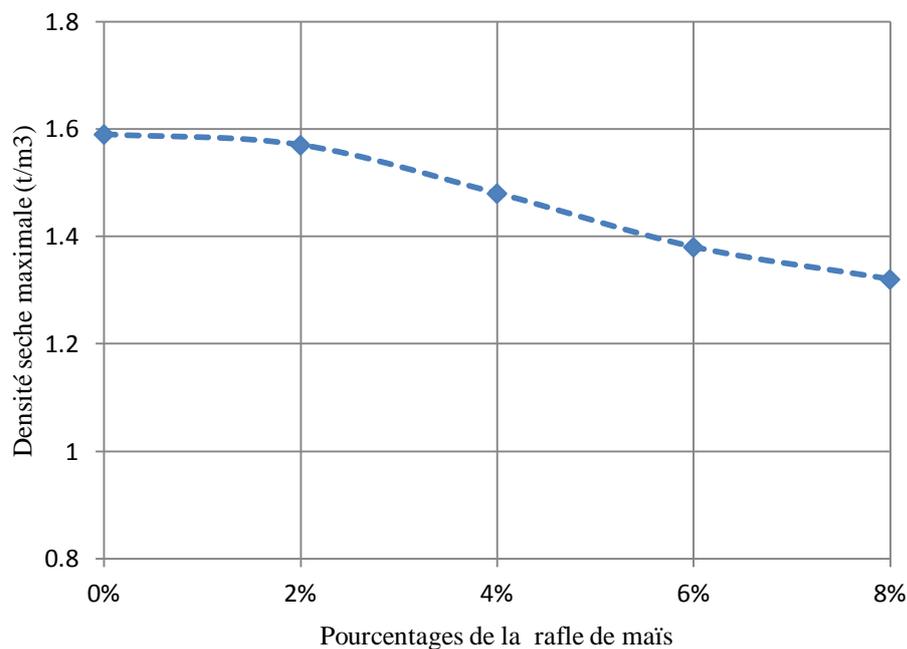


Fig. 59. Effet de la rafle de maïs sur la densité sèche maximale

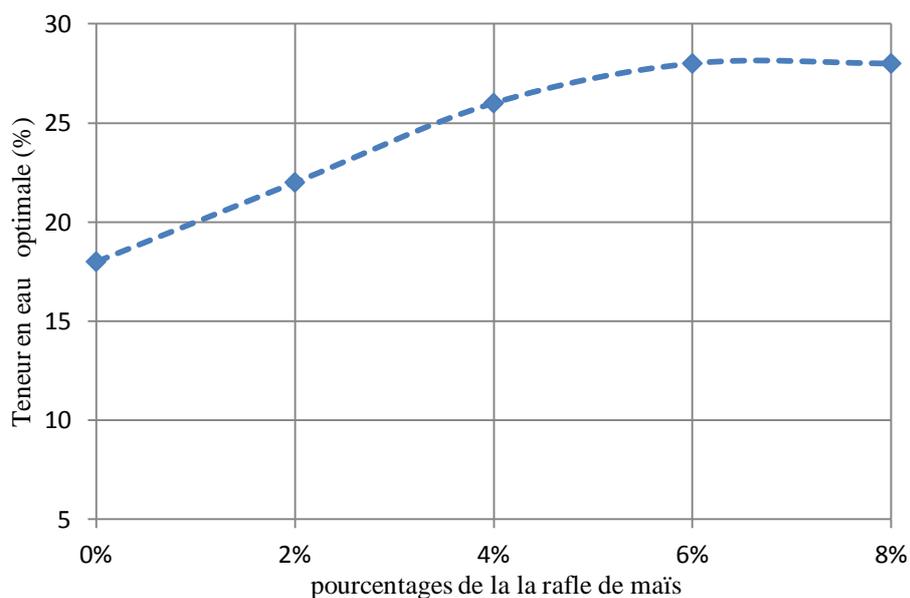


Fig.60. Effet de la rafle de maïs sur la teneur en eau optimale

2.5. Comportement de la résistance au cisaillement du sol traité par la rafle de maïs:

Le **Tableau 29** synthétise l'effet de la rafle de maïs sur les paramètres de cisaillement

Tableau 29. Paramètres de résistance au cisaillement du sol traité par la rafle de maïs

Rafle de maïs	0%	2%	4%	6%	8%
Cohésion (kpa)	30	46	59	63	93
Angle de frottement (°)	6	10	11.85	11	22

Les paramètres de cohésion et l'angle de frottement se sont améliorés par rapport au sol non traité, ce qui suggère un changement de comportement mécanique. D'après la **Figure 61** et la **Figure 62**, On peut déduire une augmentation considérable de l'angle de frottement avec les différents pourcentages 2% à 8%, de 6° pour le sol non traité à 22° pour 8% d'addition, Cette amélioration significative qui dépasse presque 60% est due aux déchets qui rendent le sol plus ou moins grossier. L'augmentation de la cohésion est proportionnelle avec l'augmentation du pourcentage de la rafle de maïs. Elle passe de 30 kpa pour un sol non traité à 93 kpa pour 8% d'ajout.

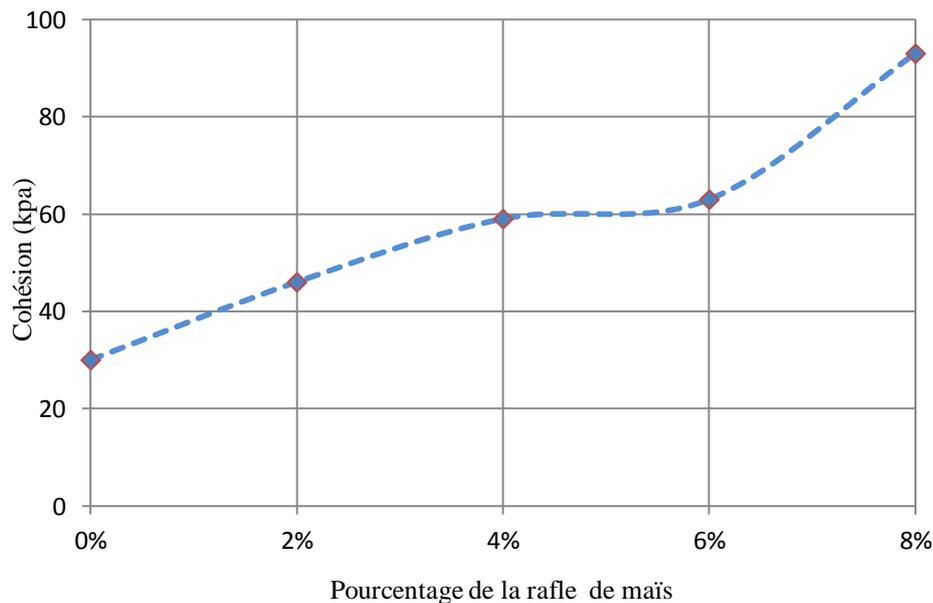


Fig.61. Effet de la rafle de maïs sur la cohésion du sol

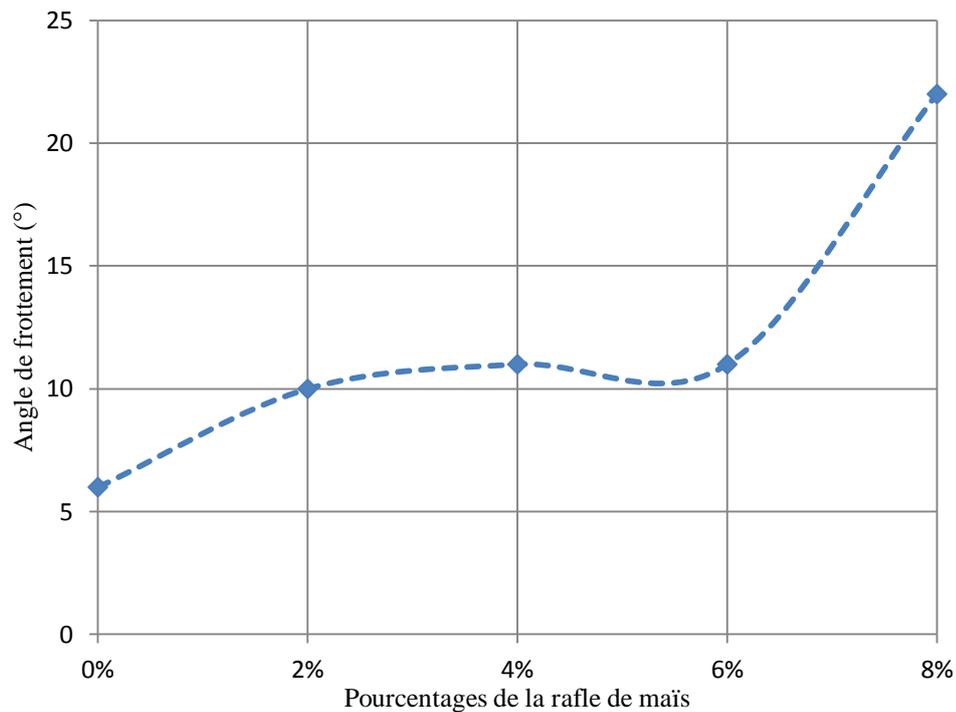


Fig. 62. Effet de la raflé de maïs sur l'angle de frottement du sol

2.6. Comportement de la compressibilité du sol traité par la raflé de maïs :

L'évolution de la raflé de maïs sur la compressibilité de sol est résumée dans le **Tableau 30** :

Tableau30 .Essai de compressibilité traité par la raflé de maïs

	0%	2%	4%	6%	8%
Indice de compressibilité (%)	20.4	21.5	15.9	21.7	15.9
Indice de gonflement (%)	6.8	6.1	5	4.9	4.6

Les résultats de l'effet de la raflé de maïs sur les propriétés du sol sont présentés séparément dans la **Figure 63** et la **Figure 64**. On a constaté qu'il y a une amélioration significative dans les caractéristiques de compressibilité du sol traité, une diminution remarquable dans l'indice de gonflement et l'indice de compressibilité respectivement avec l'augmentation des pourcentages de la raflé, l'indice de gonflement du sol non traité est 6,8 (sol gonflable), il diminue jusqu'à 8% est 4,6 tandis que l'indice de compressibilité du sol non traité est 20,4 et il diminue jusqu'à 15,9.

Cela peut être dû à l'augmentation de la porosité avec l'ajout d'additif et ensuite à la perméabilité et donc à un changement de structure. L'effet des déchets diminue donc la sensibilité du sol au gonflement.

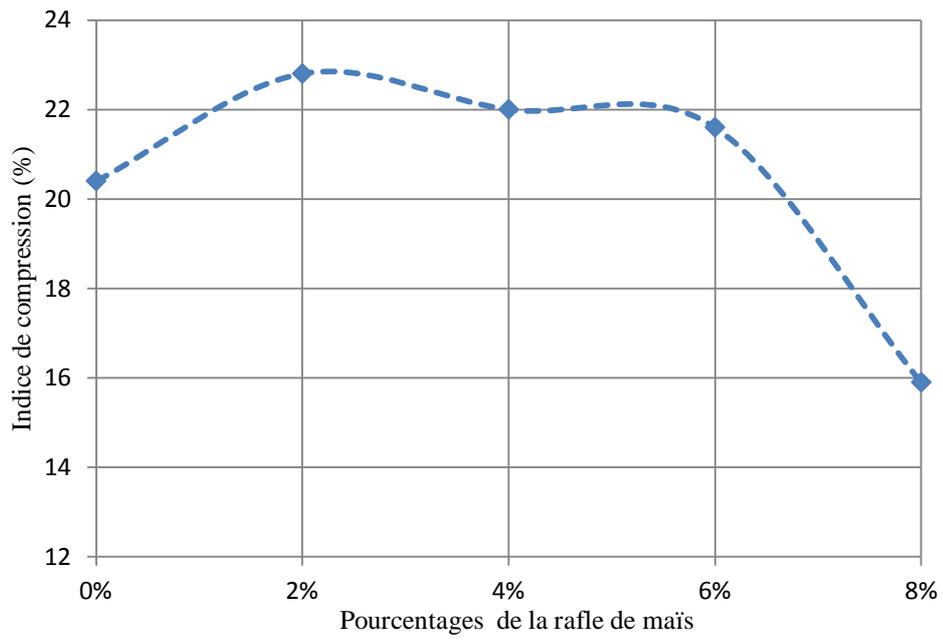


Fig. 63. Effet de la rafle de maïs sur l'indice de compression du sol

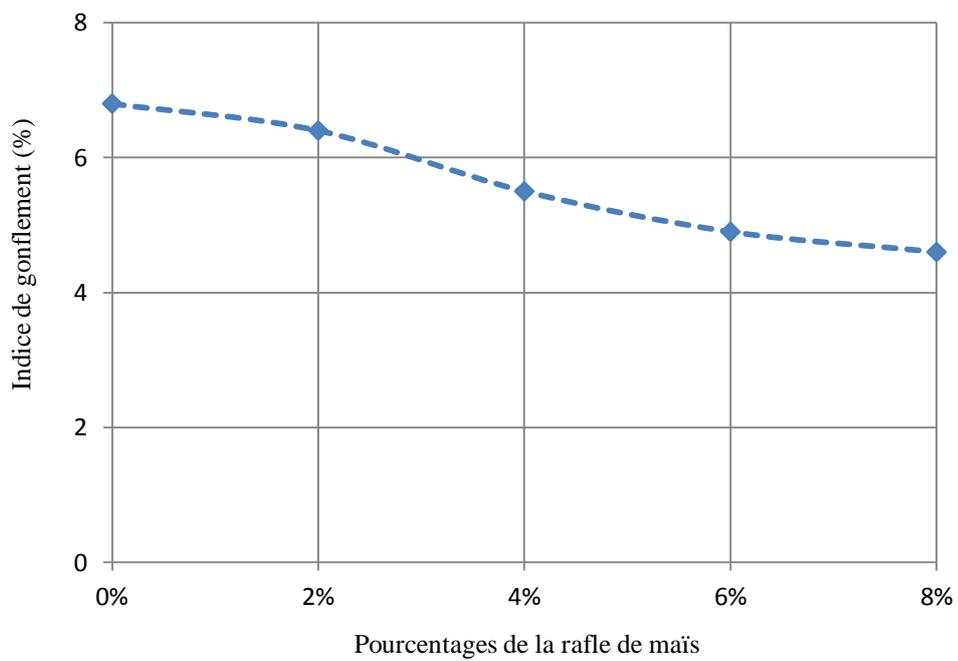


Fig. 64. Effet de la rafle de maïs sur l'indice de gonflement du sol

3. Effet de la cendre de papier sur les propriétés du sol reconstitué

3.1. Effet de la cendre de papier sur le pH du sol

La **Figure 65** montre que le sol traité a un pH plus élevé que celui non traité et cela pour toutes les proportions d'ajout utilisées. C'est un milieu basique. Ce qui se traduit par une meilleure dissolution des silicates et des aluminates de la proportion argileuse du sol stabilisé par la cendre de papier et meilleure mobilité des ions lors des réactions ioniques et montrent aussi une teneur élevée en CaCO_3 .

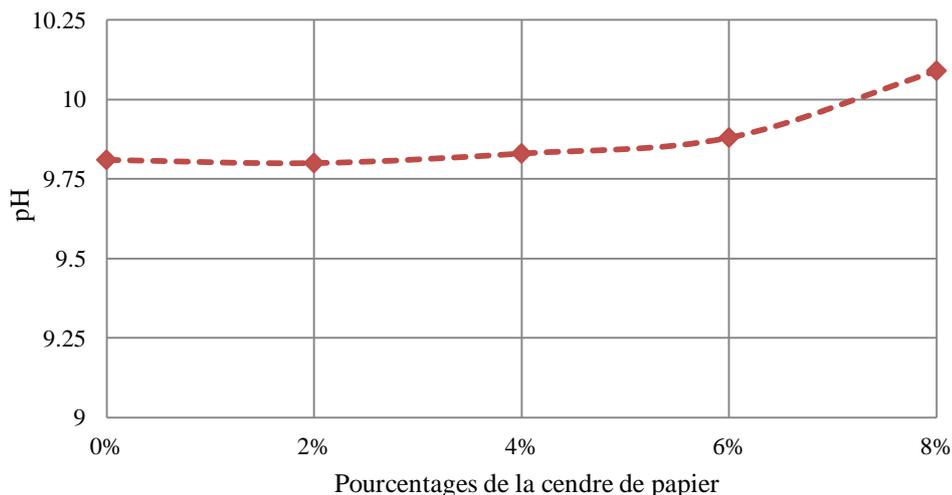


Fig. 65. Effet de la cendre de papier sur le pH du sol reconstitué

3.2. Effet de la cendre de papier sur l'indice de gonflement libre du sol

La **Figure 66** représente l'influence de la cendre sur l'indice de gonflement libre. Une diminution du pourcentage de gonflement est déjà remarquable avec le pourcentage 2% de la cendre de papier. L'indice de gonflement augmente à 4% puis il diminue progressivement jusqu'à 11%. Il dépasse presque 80% celui du sol de référence.

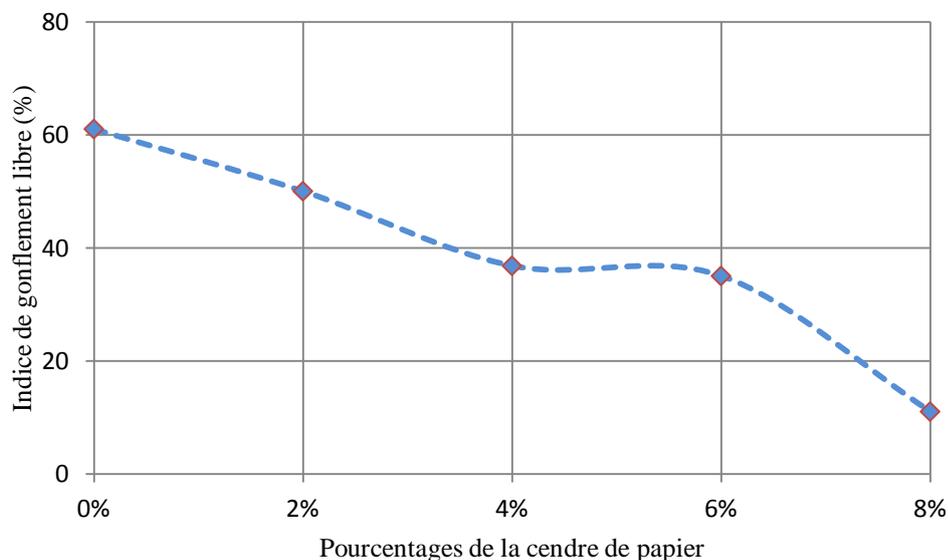


Fig. 66. Effet de la cendre de papier sur l'indice de gonflement libre du sol reconstitué

3. 3 Effet de la cendre de papier sur les limites d’Atterberg du sol

L'influence de la cendre de papier sur la plasticité les échantillons traités est très appréciable dans le **Tableau 31** .On remarque une élévation importante de la limite de plasticité, elle passe 35% à 42% sans modification significative de la limite de liquidité, donc une réduction de l’indice de plasticité de 35% à 28%. Ce phénomène se traduit géotechniquement par le mécanisme de floculation. Sa consistance évolue vers une faible plasticité. Donc il minimise la sensibilité du sol fin aux variations de la teneur en eau. Donc on obtient un sol apte à l’usage (**Figure 67**).

Tableau31. Limites d’Atterberg du sol traité par la cendre de papier

	L _L (%)	L _P (%)	I _P (%)
0%	70	35	35
2%	70	39	31
4%	67.29	38.41	28.88
6%	70.5	42	28.5
8%	70	40	28

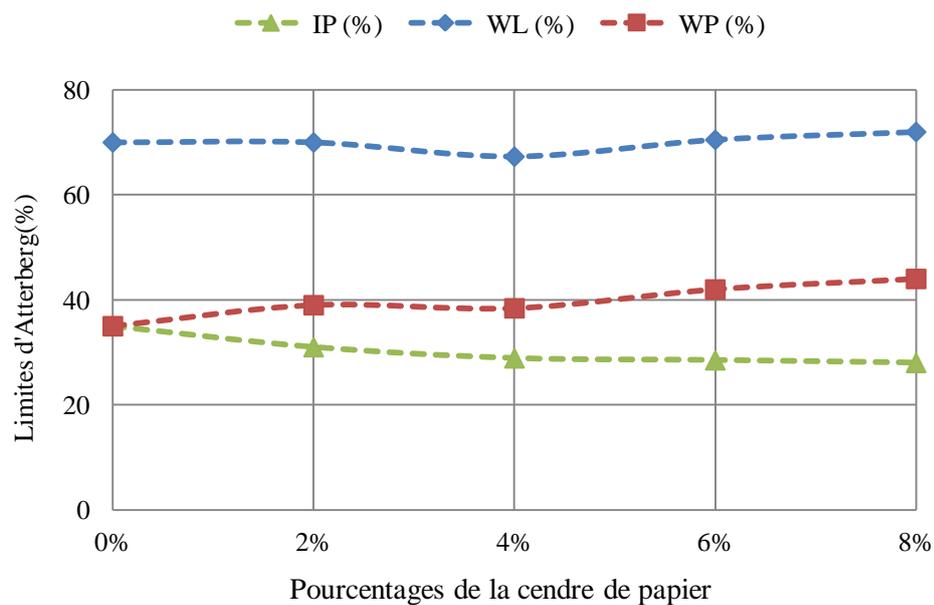


Fig. 67. Effet de la cendre de papier sur les limites d’Atterberg du sol reconstitué

3.4. Effet de la cendre de papier sur le compactage du sol:

Les résultats du **Tableau 32** représentent l’évolution de la densité sèche optimale ainsi que la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de la cendre de papier.

Tableau 32. Résultats de compacité du sol traité par la cendre de papier

Cendre de papier	0%	2%	4%	6%	8%
Teneur en eau (%)	22.7	22	18	14	18
Densité sèche maximale (t/m ³)	1.54	1.42	1.41	1.40	1.39

La **Figure 68** montre l'effet de la cendre de papier sur le compactage du sol. On note une diminution remarquable de la densité sèche par rapport au sol de référence. Après le pourcentage de 2% la densité reste d'une façon presque constante (1,42- 1,40-1,39). Ce comportement est justifié par le besoin d'une faible énergie de compactage,

La **Figure 69** montre que la teneur en eau optimale diminue linéairement avec l'augmentation du pourcentage de la cendre de papier jusqu'à 6 % d'ajout puis elle augmente à nouveau. La cendre absorbe l'eau à travers la réaction exothermique qui réduit significativement l'humidité de sol par l'hydratation et l'évaporation.

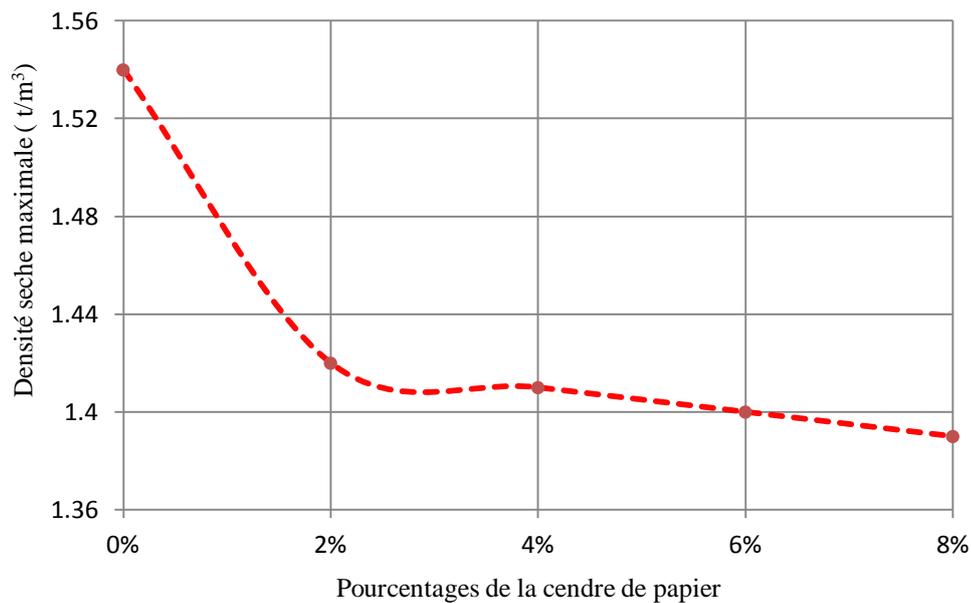


Fig. 68. Effet de la cendre de papier sur la densité sèche du sol reconstitué

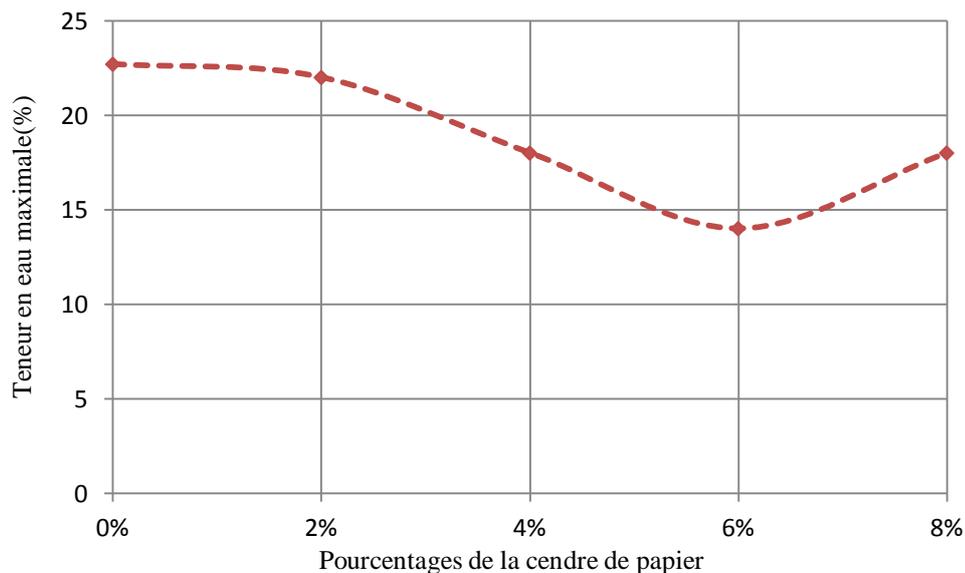


Fig. 69. Effet de la cendre de papier sur la Teneur en eau du sol reconstitué

3.5. Effet de la cendre de papier sur la résistance au cisaillement du sol

La résistance au cisaillement est l'une des propriétés les plus importantes du sol. Le **Tableau 33** montre l'évolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de la cendre de papier.

Tableau 33. Effet de la cendre de papier sur les paramètres de la résistance au cisaillement

Cendre de papier	0%	2%	4%	6%	8%
Cohésion (kpa)	20	8	64	39	50
Angle de frottement (°)	4.57	7	13	11	15

La cohésion augmente avec l'augmentation du pourcentage de la cendre de papier. Elle augmente de 20 kpa à 64 kpa pour 4% d'ajout, après ce pourcentage elle diminue à 39 kpa puis elle augmente de 54 kpa. L'angle de frottement augmente progressivement de 4.5° à 11°. L'amélioration des caractéristiques mécaniques est due au remplissage des pores par la cendre de papier.

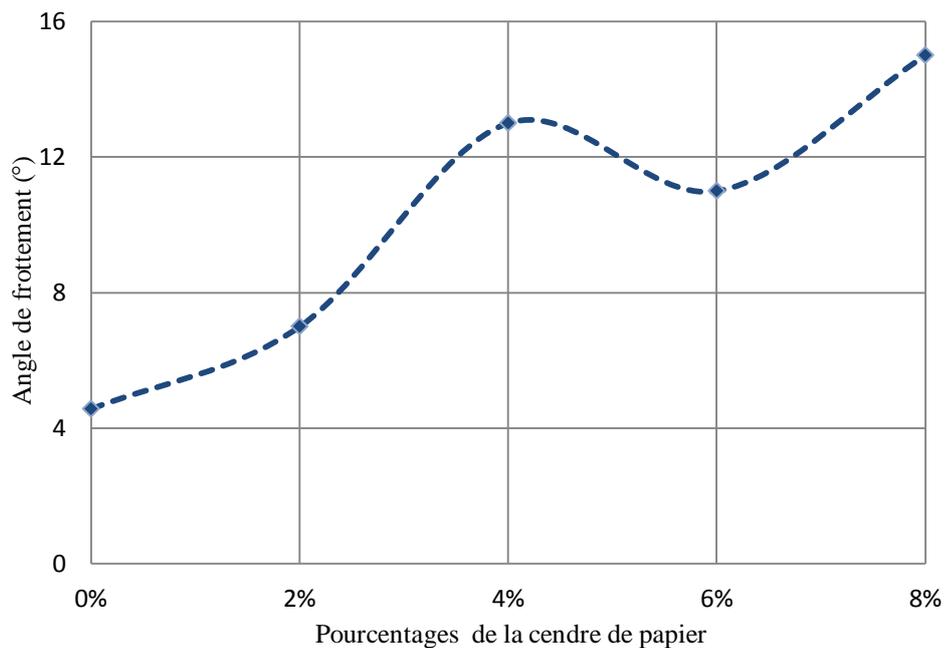


Fig.70. Effet de la cendre de papier sur l'angle de frottement du sol reconstitué

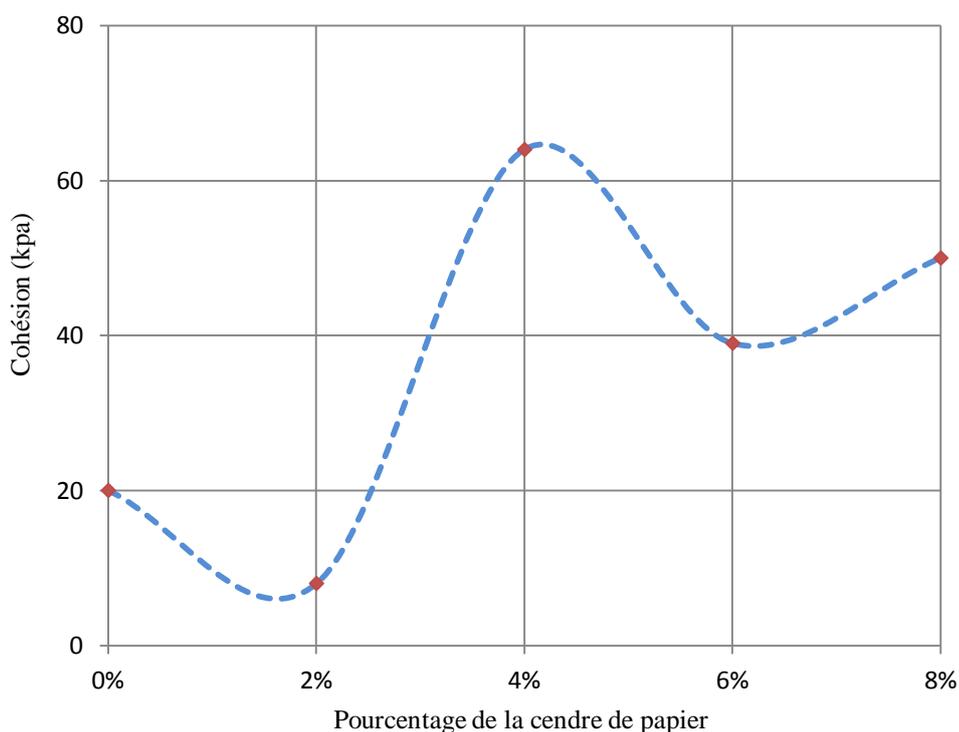


Fig. 71. Effet de la cendre de papier sur la cohésion du sol reconstitué

3.6. Effet de la cendre de papier sur la résistance à la compression du sol

Le **Tableau 34** résume le développement de la résistance à la compression en fonction de la cendre de papier.

Tableau 34. Effet de la cendre de papier sur la résistance à la compression

Pourcentages	Résistance à la compression (0 jours de cures)	
0%	Rc= 0.259Mpa	259Kpa
2%	Rc=0,279Mpa	279Kpa
4%	Rc=0,300Mpa	300Kpa
6%	Rc=0,363Mpa	363Kpa
8%	Rc=0,376Mpa	376Kpa

La résistance à la compression du sol naturel est initialement mesurée à environ 0.259 Mpa. Cependant, après traitement, une augmentation significative de la résistance à la compression est observée. En effet, la résistance à la compression du sol traité augmente d'environ 40% par rapport au sol non traité, passant de 0.259 Mpa à 0.376 Mpa. Cette amélioration notable de la résistance à la compression témoigne de l'efficacité du traitement appliqué sur le sol, ce qui le rend plus apte à supporter des charges plus élevées et à résister à la déformation sous contrainte.

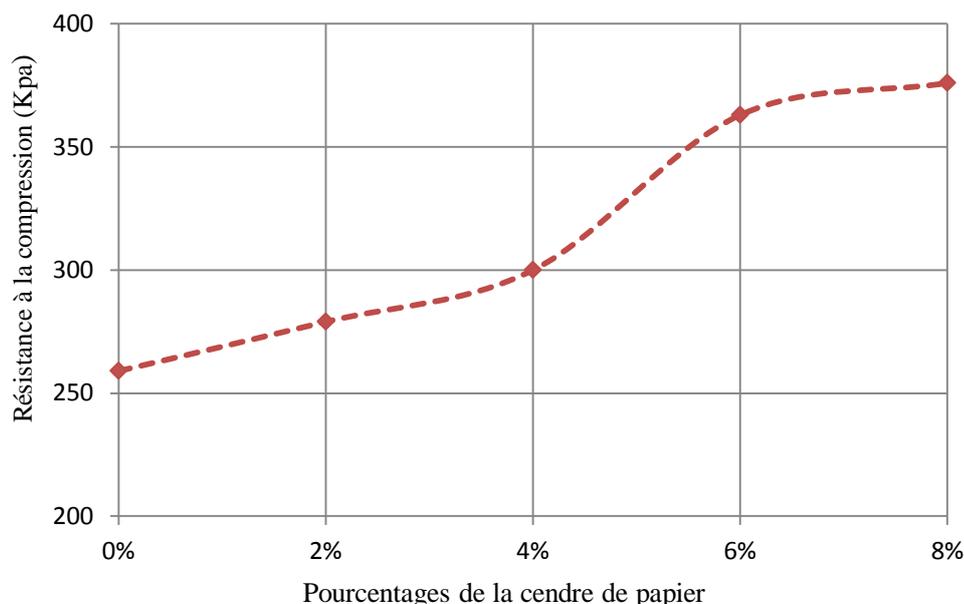


Fig.72. Effet de la cendre de papier sur la résistance à la compression du sol reconstitué

3.7. Effet de la cendre de papier sur la compressibilité du sol

Le **Tableau 35** résume l'effet de la cendre de papier sur les paramètres de la compressibilité.

Tableau 35. Résultats de compressibilité du sol traité par la cendre de papier

	0%	2%	4%	6%	8%
Indice de gonflement(%)	11	9.4	7.4	7	5.5
Indice de compressibilité(%)	31	30.2	21.2	19.8	19.9

L'effet des cendres de papier sur la compressibilité est examiné dans les **Figures 73** et **74**. Lorsque que le pourcentage de la cendre de papier augmente, les indices de gonflement et de compression du sol diminuent progressivement. L'augmentation de l'ajout de cendres de papier entraîne une diminution progressive de l'indice de gonflement, passant de 11% pour le sol de référence à seulement 5,5% pour un ajout de 8% de la cendre de papier. L'indice de compression diminue de 31% pour le sol non traité à seulement 19% pour un ajout de 8% de cendres de papier. Cette réduction indique une diminution de la susceptibilité du sol à se dilater en présence d'eau et signifie que le sol traité est moins susceptible de subir des tassements excessifs sous charge, ce qui peut contribuer à améliorer sa stabilité et sa capacité portante.

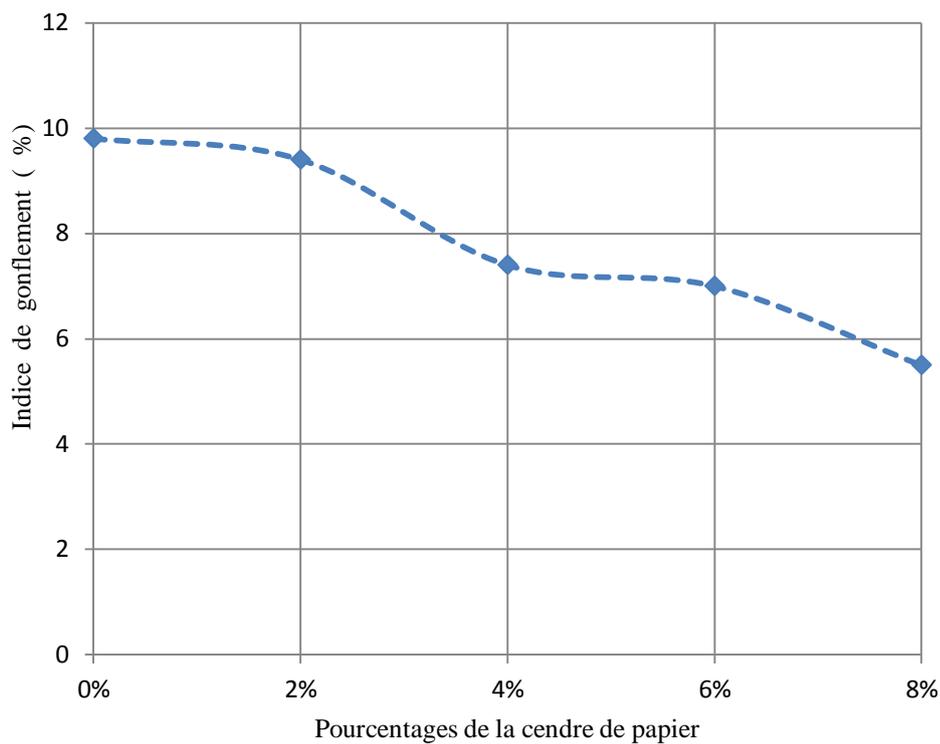


Fig. 73. Effet de la cendre de papier sur l'indice de gonflement du sol reconstitué

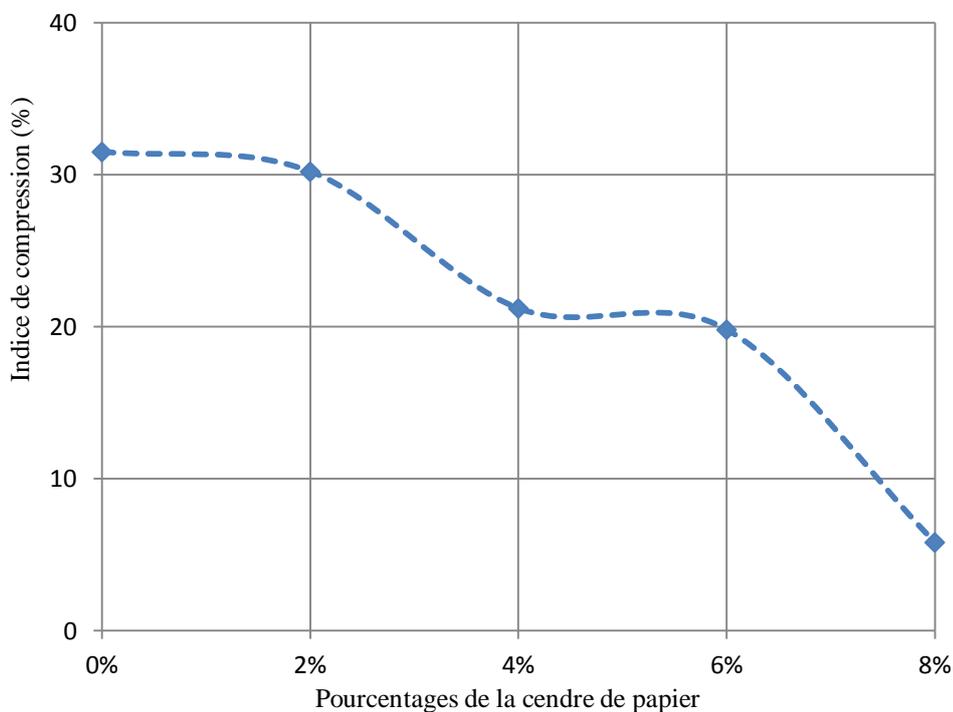


Fig.74. Effet de la cendre de papier sur l'indice de compression du sol reconstitué

3.8. Effet de la cendre de papier sur la microstructure du sol argileux.

Les observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) révèlent des changements significatifs dans la morphologie des particules du sol reconstitué traité par la cendre par rapport au sol de

référence. On observe un réarrangement notable des particules, indiquant une redistribution des constituants du sol. Plus précisément, la cendre pénètre à l'intérieur de la matrice du sol et remplit les pores, formant ainsi des liaisons entre les particules. Ce processus contribue à la diminution des pores et favorise une meilleure cohésion entre les grains du sol. En effet, la diminution des pores assure une meilleure interconnexion des particules, renforçant ainsi la cohésion du sol. L'effet positif de la cendre sur la microstructure du sol est clairement observable au microscope électronique à balayage. La cendre agit comme un liant cimentaire, favorisant la consolidation des particules du sol.

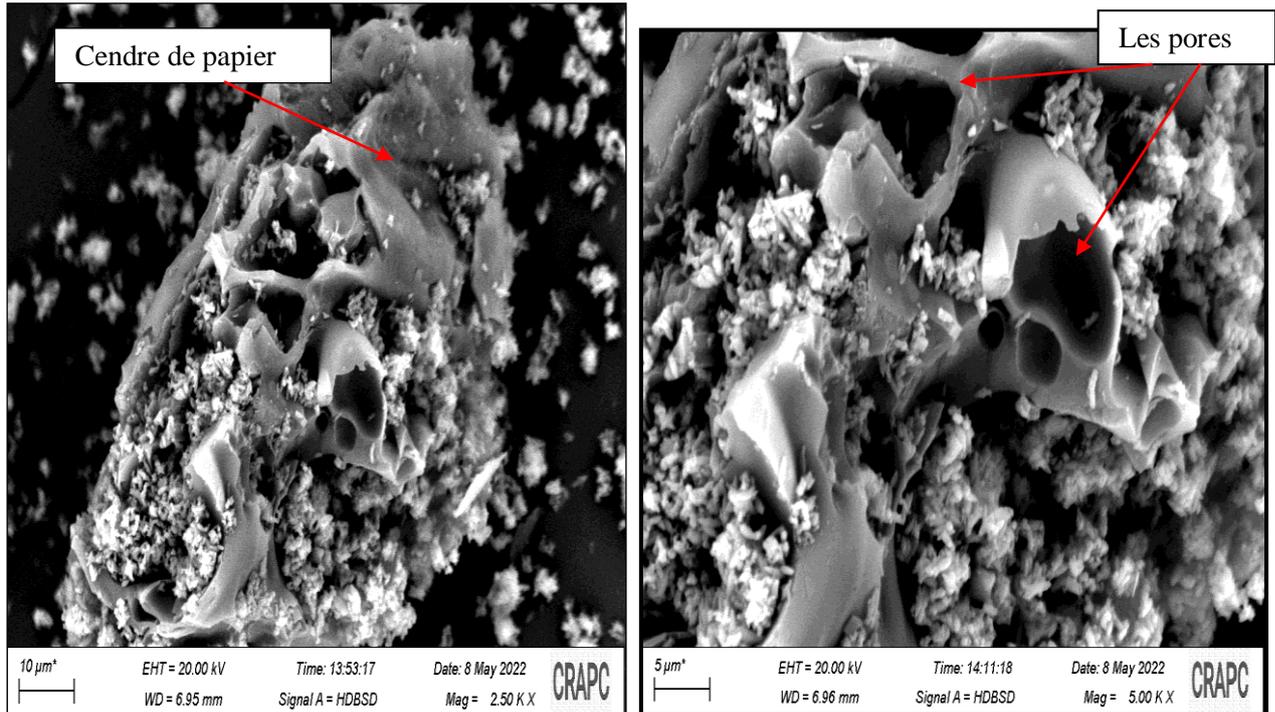


Fig. 75. Effet de la cendre de papier sur la microstructure du sol reconstitué

4. Effet des grignons d'olives sur les propriétés d'un sol reconstitué

4.1. Evolution de la gravité spécifique en fonction du pourcentage des grignons d'olives.

La **Figure 76** présente l'évolution de la gravité spécifique en fonction du pourcentage des grignons d'olives. Elle montre que la gravité spécifique diminue avec un ajout de 2% de grignons d'olives à diminuer à 2% puis elle augmente avec un ajout de 4% et reste constante à 6% d'ajout puis elle diminue jusqu'à 1.59 à 8% d'ajout. Les valeurs de la gravité spécifique varient avec l'ajout. Elle passe de 1.78 l'état initial à 1.59-2.05-2.07-1.59 à 2%, 4%,6% et 8% respectivement.

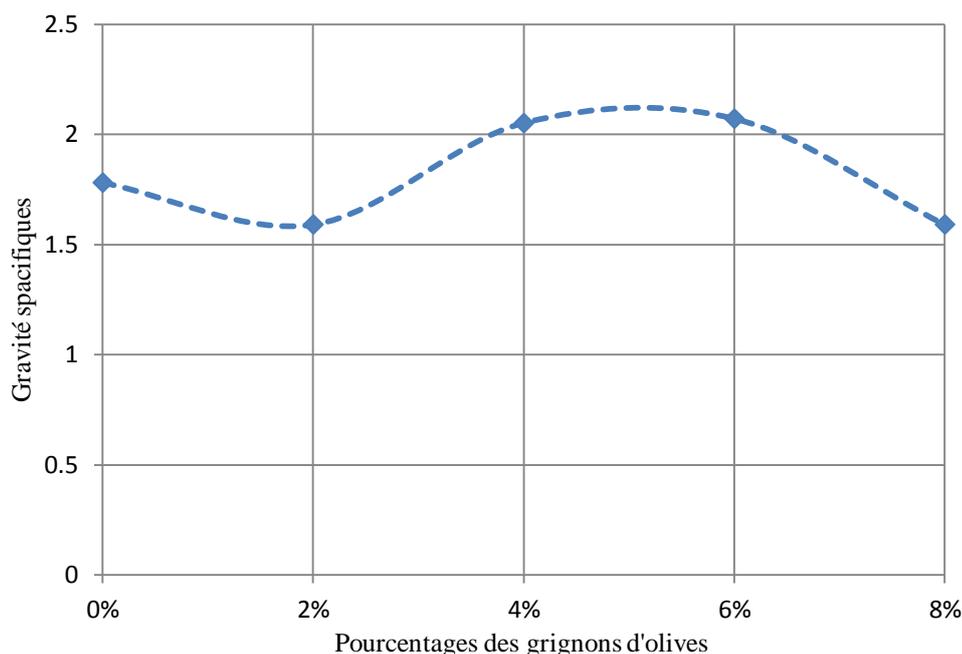


Fig. 76. Evolution de la gravité spécifique en fonction du pourcentage des grignons d'olives

4.2. Evolution de l'indice de gonflement libre en fonction du pourcentage des grignons d'olives:

La **Figure 77** montre les résultats de l'influence des grignons d'olives sur l'indice de gonflement libre. L'indice de gonflement diminue de 61 % pour les sols non traités à 27 % pour les sols traités après l'ajout de 8 %. La diminution de presque 50% de l'indice de gonflement libre indique une amélioration significative du potentiel de gonflement.

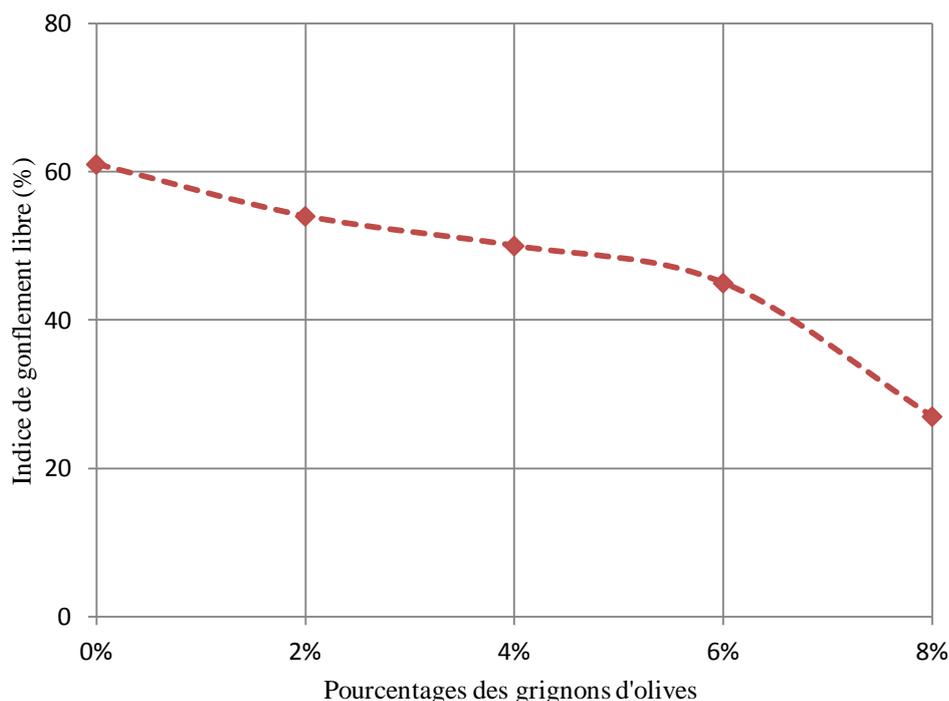


Fig.77. Evolution de l'indice de gonflement en fonction du pourcentage des grignons d'olives

4.3. Evolution des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage des grignons d'olives

L'influence des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg des échantillons traités et non traités a été étudiée et les résultats sont affichés dans le **Tableau 36**:

Tableau36 .Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg

	L_L (%)	L_p (%)	I_p (%)
0%	70	35	35
2%	78.14	45.13	33.01
4%	79.38	42.39	36
6%	80	47.5	32.5
8%	81	51	30

L'évolution des limites d'Atterberg d'un sol traité par des grignons d'olives à différents dosage de 2 % à 8 % est illustrée dans la **Figure 78**. On observe une augmentation significative de la limite de liquidité, passant de 70 % pour le sol de référence à 81 % pour le sol traité avec 8 % d'ajout. De même, la limite de plasticité montre une augmentation notable, passant de 35 % à 51 % pour le même dosage d'ajout. La réaction entre les particules de sol et les grignons d'olives explique le changement de comportement. La réduction de l'argilosité du sol traité par rapport au sol non traité est le résultat d'une baisse de l'indice de plasticité (I_p), passant de 35 % à 30 %.

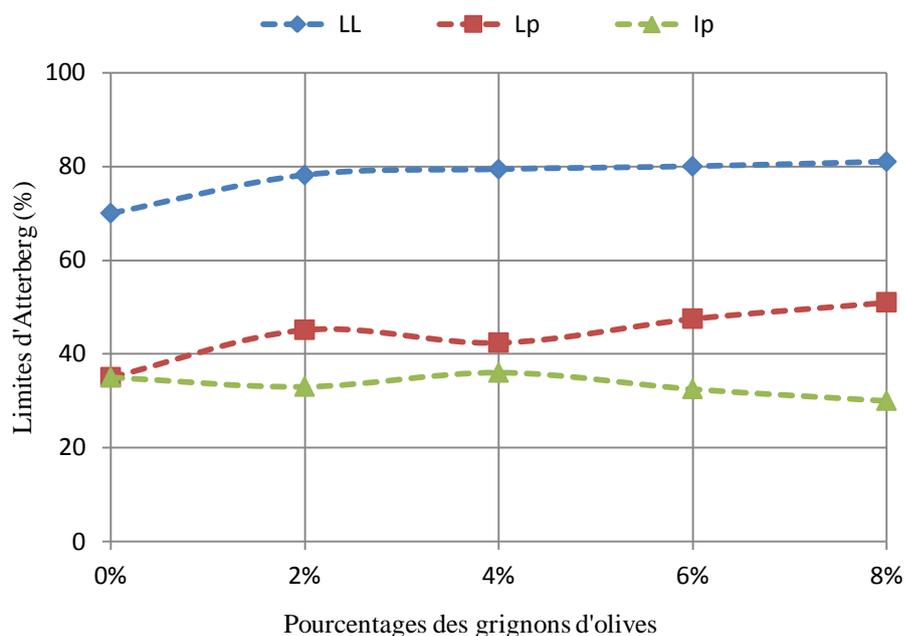


Fig.78. Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg du sol reconstitué.

4.4. Evolution de la compacité du sol en fonction du pourcentage des grignons d'olives

Le **Tableau 37** présente les résultats des paramètres de compactages de sol :

Tableau 37. Résultats de l'essai de compactage traité par les grignons d'olives

	0%	2%	4%	6%	8%
W_{Opt} (%)	22.7	20.5	21.2	21.5	23.4
γ_d (t/m^3)	1.54	1.47	1.47	1.46	1.45

On a remarqué une réduction de la densité sèche de $1.54(t/m^3)$ du sol non traité à $1.47(t/m^3)$ pour 2% d'ajout. A partir de ce pourcentage la densité est devenue constante. Ce comportement est justifié par le besoin d'une faible énergie de compactage.

La teneur en eau du sol initial est 22.7%. Elle diminue à 2% d'ajout jusqu'à 20.5%. Elle augmente progressivement jusqu'à 23.4%. Cette variation est expliquée par l'insuffisance de la quantité d'eau par rapport à la quantité de l'ajout surtout que ce dernier a une forte capacité d'absorption.

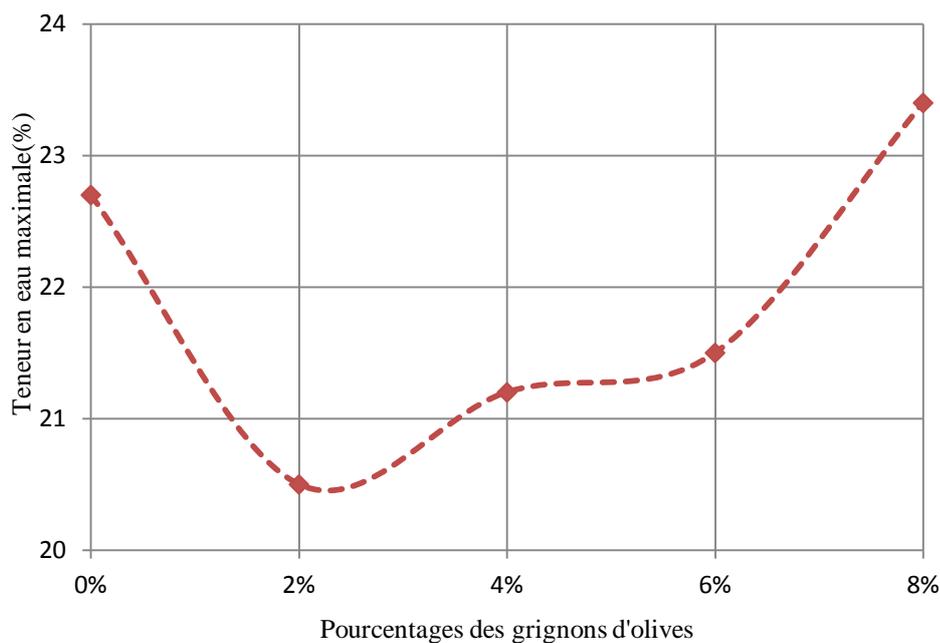


Fig.79. Evolution de la Teneur en eau en fonction du pourcentage des grignons d’olives

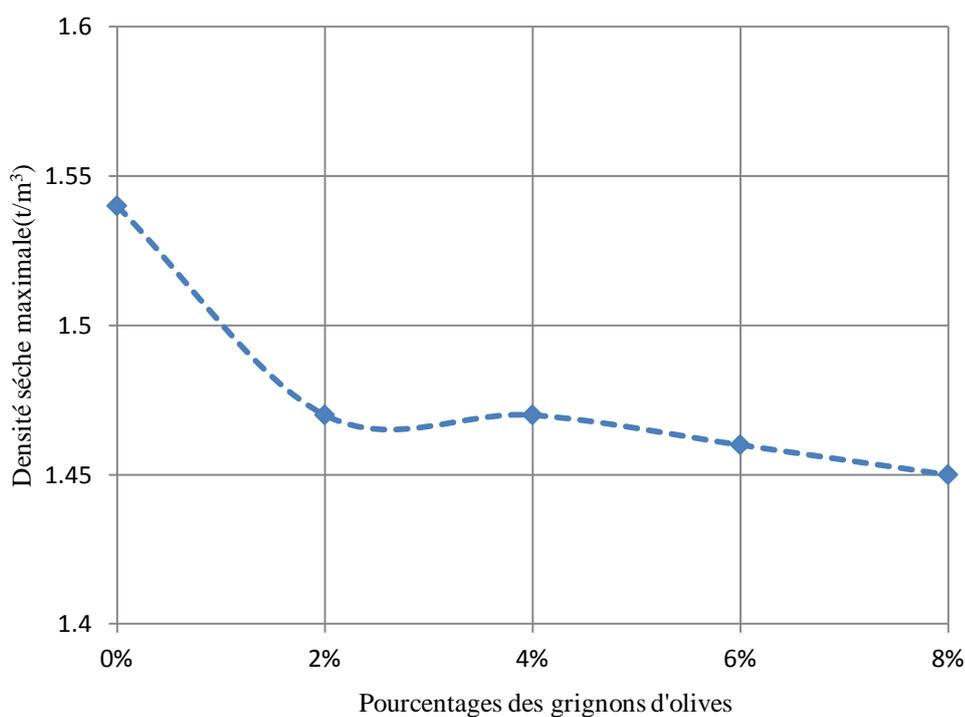


Fig.80. Evolution de la densité sèche en fonction du pourcentage des grignons d’olives

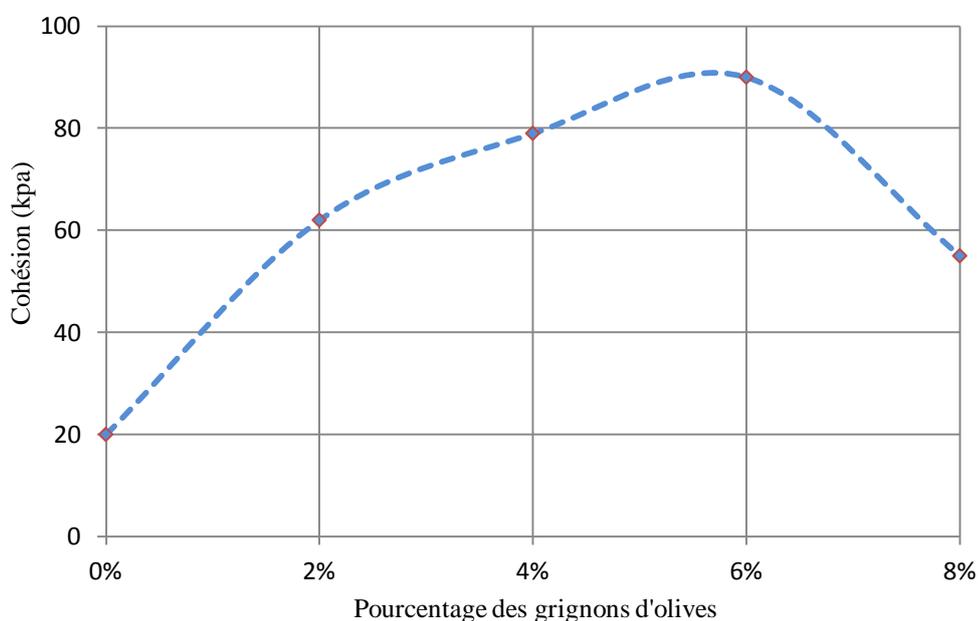
4.5. Evolution de la résistance au cisaillement en fonction du pourcentage des grignons d’olives :

Les résultats de l'influence des différents pourcentages des grignons d’olives sur les paramètres de cisaillement sont présentés dans le **Tableau 38**.

Tableau38. Paramètres de résistance au cisaillement du sol traité par les grignons d'olives

Grignons d'olives	0%	2%	4%	6%	8%
Cohésion (kpa)	20	62	79	90	55
Angle de frottement (°)	4.57	5.2	6.27	14	21

De manière générale, une tendance d'augmentation progressive et continue est observée pour l'angle de frottement, passant de 4.57° à 21° . En ce qui concerne la cohésion, elle présente une augmentation significative, allant de 20 kpa pour le sol non traité à 90 kpa pour le sol reconstitué et traité avec un ajout de 6 %. Par la suite, la cohésion diminue légèrement pour atteindre 55 kpa. Cette augmentation témoigne d'une amélioration notable de la capacité du sol à résister aux contraintes de cisaillement.

**Fig. 81.** Evolution de la cohésion en fonction du pourcentage des grignons d'olives

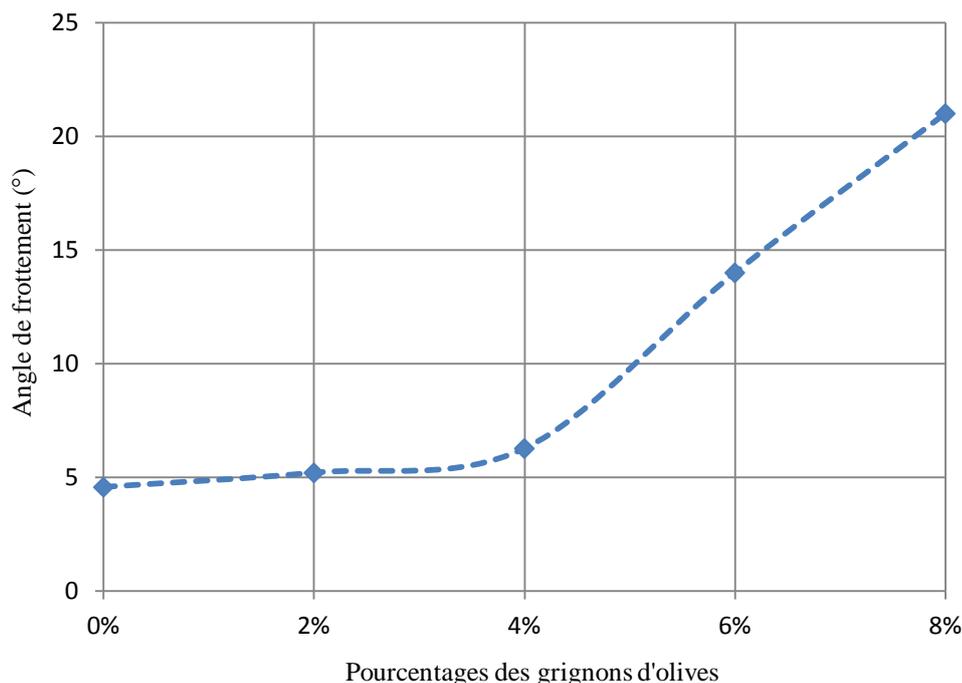


Fig. 82. Evolution de l'angle de frottement en fonction du pourcentage des grignons d'olives

4.6. Evolution de la compressibilité du sol en fonction du pourcentage des grignons d'olives :

Le **Tableau 39** montre l'amélioration des paramètres de compressibilité avec l'augmentation du pourcentage des grignons d'olives.

Tableau 39. Résultats des grignons d'olives sur la compressibilité

Grignons d'olive s	0%	2%	4%	6%	8%
Indice de gonflement (%)	11	11.9	10.5	8.1	5.1
Indice de compressibilité (%)	31	33	29.8	28.1	18.1

Lors de l'ajout initial de 2 % de grignons d'olives, une légère augmentation des indices de compression et de gonflement a été observée, mais ces valeurs ont ensuite diminué progressivement jusqu'à atteindre une réduction d'environ la moitié.

Les grignons d'olives ont entraîné une diminution significative de l'indice de gonflement, passant de 11 % à 5,5 %. De même, l'indice de compression a également diminué, passant de 31 % à 18 %. Ces résultats indiquent une amélioration notable des propriétés géotechniques du sol suite à l'ajout de grignons d'olives. Cette diminution des indices de compression et de gonflement suggère une réduction de la susceptibilité du sol à subir des déformations excessives sous charge ou en présence d'eau.

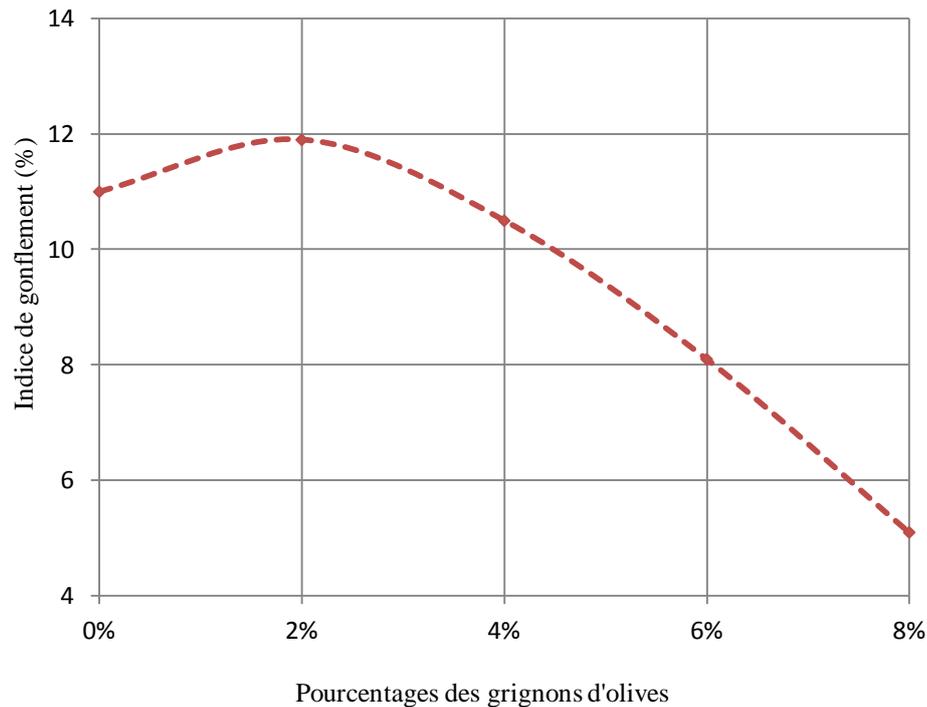


Fig. 83. Evolution de l'indice de gonflement en fonction des grignons d'olives.

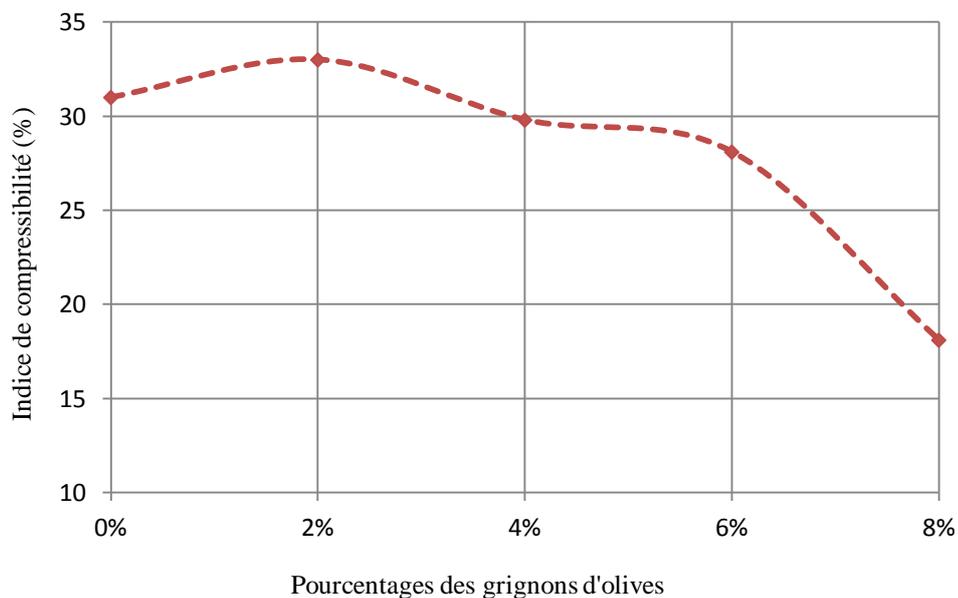


Fig. 84. Evolution des grignons d'olives sur l'indice de compressibilité

4.7. Effet des grignons d'olives sur la microstructure du sol :

Les résultats obtenus sur la microstructure du sol traité par l'ajout de grignons d'olives mettent en évidence de manière détaillée l'effet mécanique positif de cet ajout. Lors des observations microscopiques, des bâtonnets entourant les grains de sol ont été clairement identifiés, ce qui témoigne d'une modification significative de la morphologie du sol traité. Cette observation indique une augmentation de la cohésion entre les grains de sol. Cette modification de la microstructure du

sol le rend plus grossier et plus ductile. Ces caractéristiques renforcent la capacité du sol à résister aux contraintes et en font un matériau plus adapté pour une gamme d'applications géotechniques.

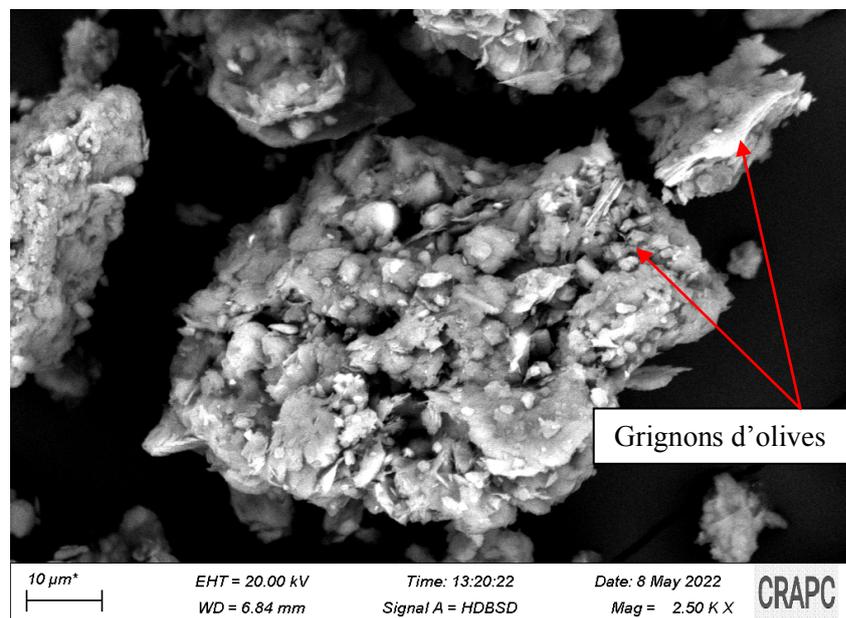


Fig.85 .Effet des grignons d'olives sur la microstructure du sol reconstitué

5. Effet de la fibre de jute sur le comportement mécanique du sol argileux (Sol El –Harrouche)

5.1. Effet de la fibre de jutes sur le compactage du sol :

L'augmentation du pourcentage de fibre de jute entraîne une diminution de la densité sèche maximale du sol, passant de 1,71 t/m³ à 1,42 t/m³. Cette diminution de la densité sèche est attribuable aux caractéristiques de la fibre de jute elle-même. En effet, la densité de la fibre de jute est intrinsèquement légère, ce qui contribue également à la diminution de la densité globale du mélange sol-fibre. On observe une augmentation de la teneur en eau du sol, passant de 14,92% à 19,43%. Cette augmentation est due à l'absorption d'eau par la fibre de jute.

Tableau 40. Résultats des essais Proctor normal du sol traité par les fibres de jute

Pourcentage des fibres de jute	0%	2%	4%	6%
Densité sèche maximale	1,71	1,62	1,51	1,42
Teneur en eau %	14,92	16,24	18,47	19,43

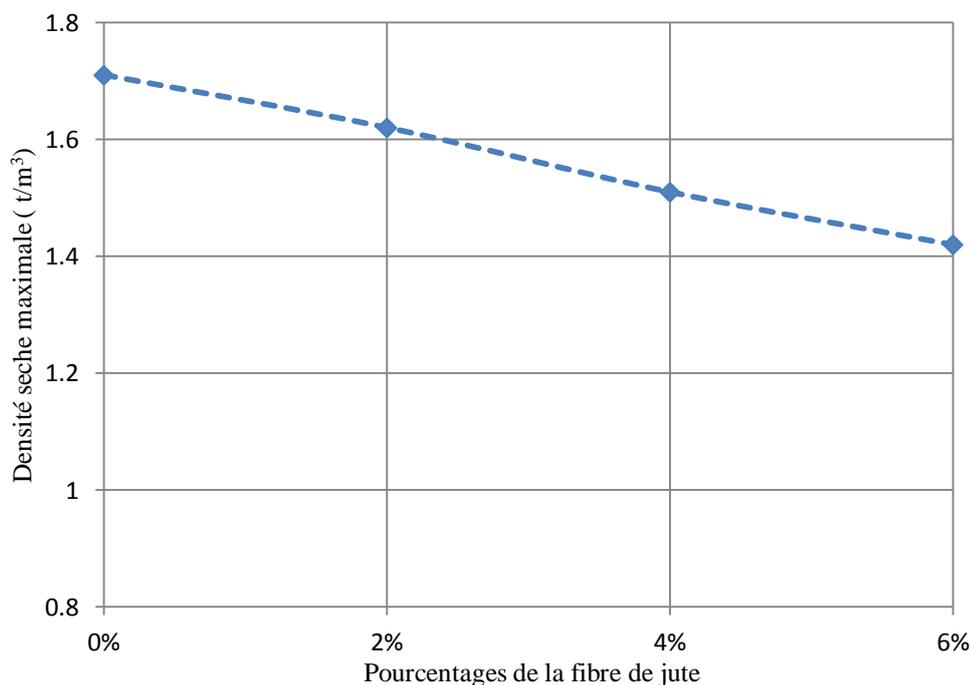


Fig. 86. Variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de la fibre de jute

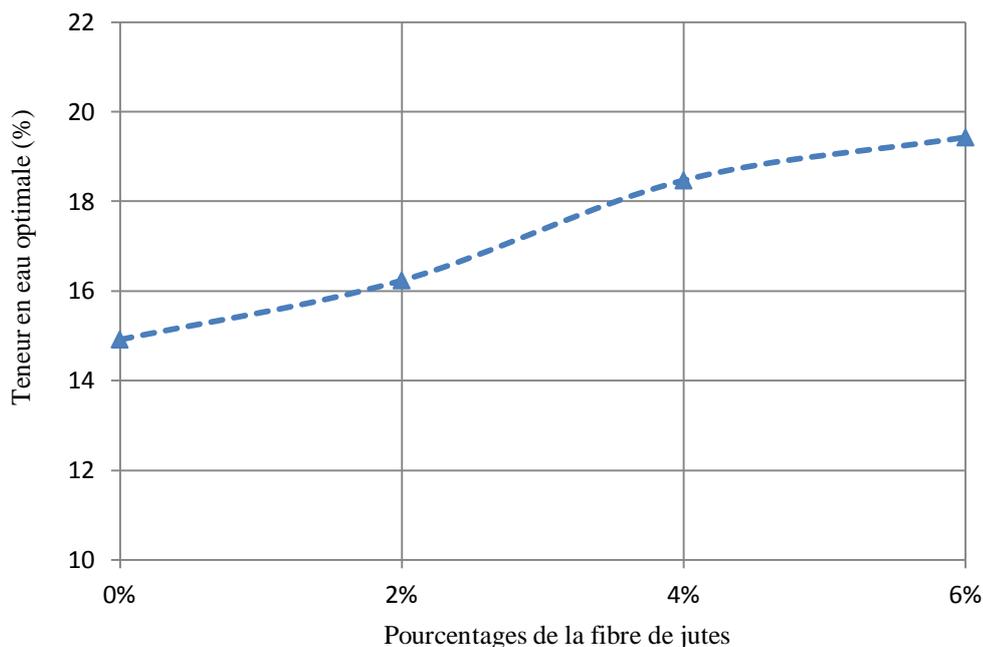


Fig. 87. Variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage de la fibre de jute

5.2. Effets de la fibre de jute sur la portance du sol :

Le **Tableau 41** montre que la valeur de CBR augmente proportionnellement à l'augmentation du pourcentage de fibre de jute dans le mélange sol-fibre. En effet, on observe une amélioration significative, jusqu'à cinq fois, par rapport au sol non traité. Cette amélioration démontre l'efficacité de l'ajout de fibre de jute pour renforcer les propriétés du sol, il est important de noter qu'au-delà d'un certain seuil, soit 4 % dans ce cas, l'effet bénéfique de l'ajout de fibre de jute devient inefficace. Cette observation suggère que la saturation est atteinte, ce qui limite l'efficacité de l'ajout supplémentaire de fibre de jute.

En outre, on observe une diminution du gonflement après immersion, passant de 2818 pour 0 % d'ajout à seulement 267 pour 8 % de fibre de jute. Cette diminution du gonflement indique une meilleure stabilité du sol traité,

Tableau 41. Résultats de CBR traité par les fibres de jute

Pourcentage des fibres de jutes	0%	2%	4%	6%
Indice de portance de sol (CBR)	1.10	2.20	5.01	3.36
gonflement après immersion	2818	2850	342	267

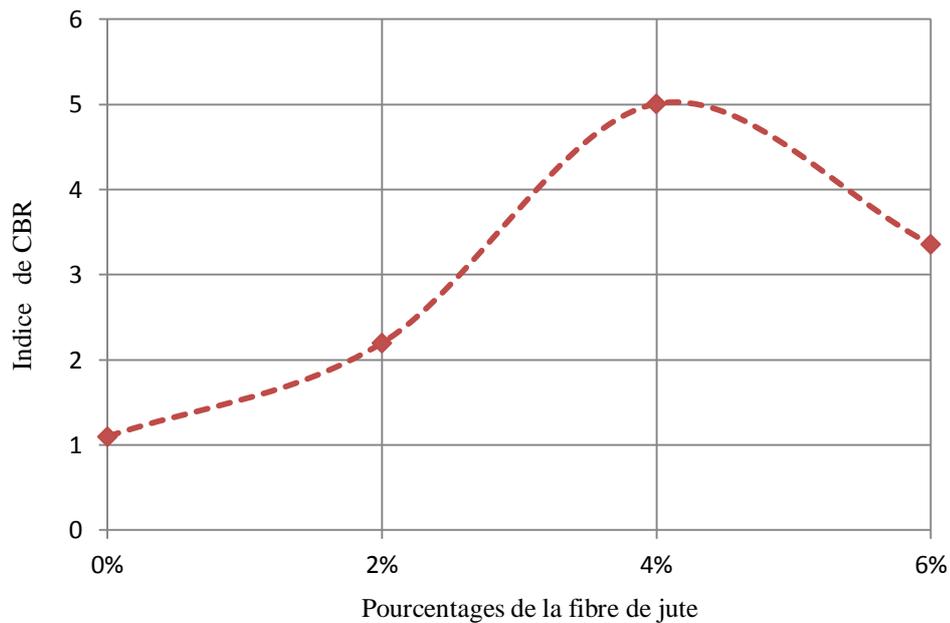


Fig. 88. Variation de l'indice de CBR en fonction du pourcentage de fibre de jute

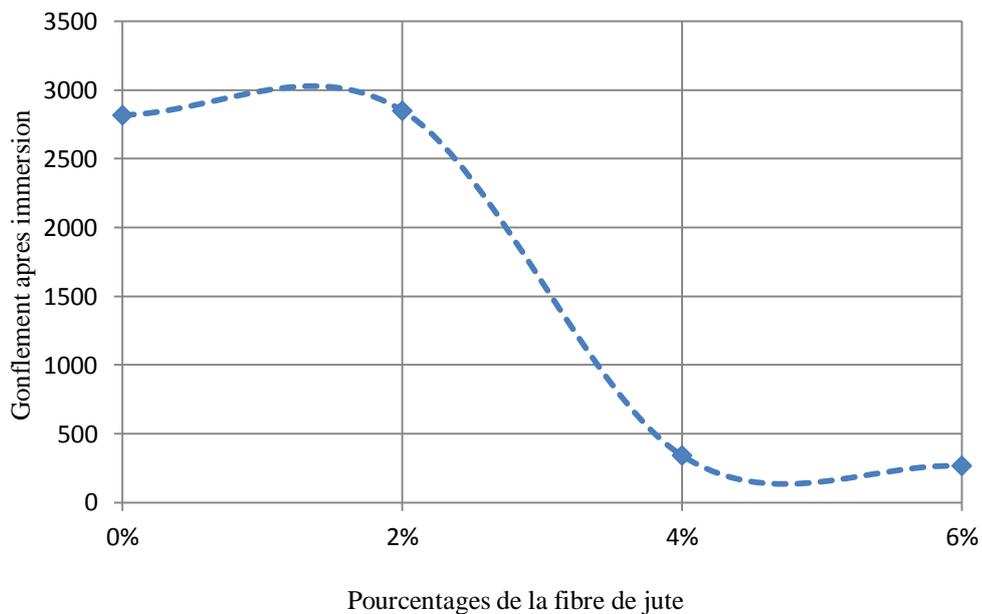


Fig. 89. Variation de gonflement en fonction du pourcentage de la fibre de jute

5.3. Effet de la fibre de jute sur les paramètres de cisaillement du sol:

Le **Tableau 42** présente de manière détaillée les résultats de l'effet de la fibre de jute sur les paramètres de cisaillement du sol. Globalement, on observe une augmentation de la cohésion du sol et de l'angle de frottement pour les différents pourcentages de fibre de jute testés.

Il est intéressant de noter que le pourcentage de 6 % de fibre de jute a entraîné un blocage de l'appareil de la boîte de Casagrande. Ceci est dû au fait que le volume de la fibre de jute ajoutée a dépassé le volume disponible dans la boîte de Casagrande, ce qui a rendu impossible la réalisation de l'essai.

L'amélioration de ces paramètres mécaniques est attribuée à la formation de liaisons fibreuses entre

les particules du sol, renforçant ainsi sa structure et sa cohésion. De plus, la fibre de jute fournit une résistance à la traction au sol, ce qui contribue à améliorer sa capacité à résister aux contraintes de cisaillement.

Tableau 42. Résultats de l'effet de fibre de jute sur les paramètres de cisaillement

Pourcentage des fibres de jutes	0%	1%	2%	4%	6%
la cohésion. (C)	22	41	64	55	/
l'angle de frottement (°)	8	16	22	36	/

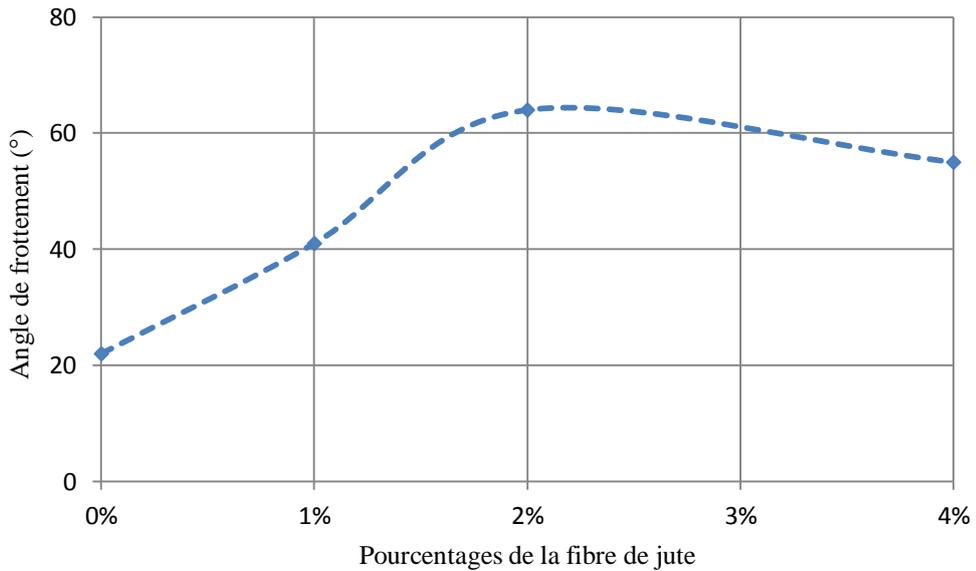


Fig.90. Variation de l'angle de frottement en fonction de la fibre

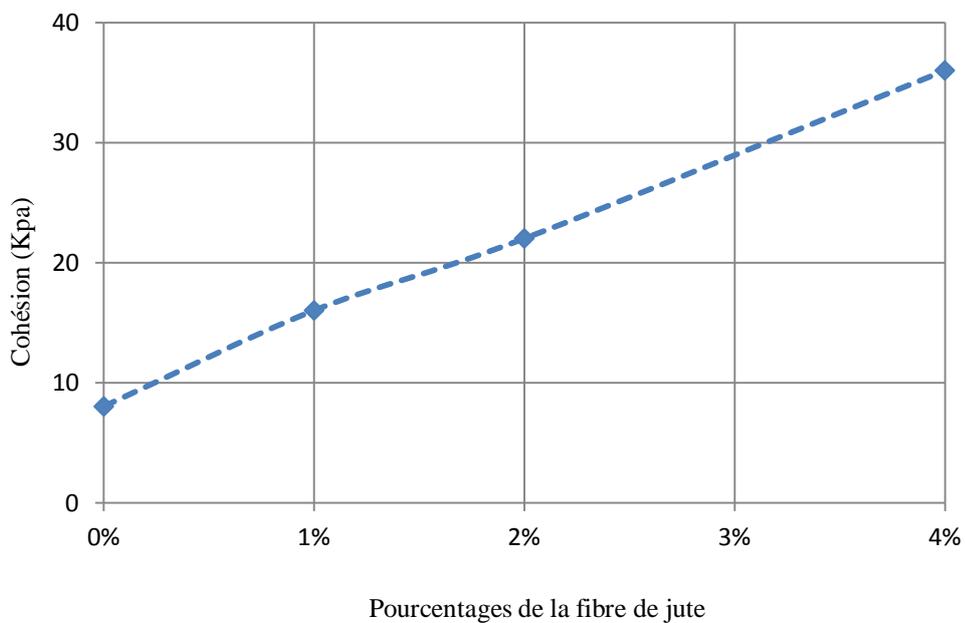


Fig. 91. Variation de la cohésion en fonction de la fibre

En raison de la pandémie de COVID-19, je n'ai pas pu achever l'intégralité du protocole expérimental initialement prévu. Cette situation a principalement été causée par les restrictions de

déplacement et la fermeture des laboratoires imposées pour contenir la propagation du virus. Ces mesures ont rendu difficile, voire impossible, l'accès aux équipements et aux installations nécessaires à la réalisation des expériences planifiées. En conséquence, certaines parties de l'étude n'ont pas pu être menées à bien, entraînant des retards dans l'avancement de la recherche.

Conclusion

Les ajouts ont un effet bénéfique sur la plasticité du sol, le rendant moins déformable, moins plastique et plus facile à travailler, ce qui le rend apte à une utilisation en génie civil. L'augmentation de la teneur en eau est due à la capacité d'absorption des ajouts, ainsi qu'à la réaction entre le sol et les ajouts, ce qui entraîne une diminution de la densité sèche en raison de la présence de particules plus légères.

Comparé au sol non traité, les paramètres de cohésion et l'angle de frottement sont améliorés, favorisant ainsi un changement de comportement mécanique et garantissant la capacité portante du sol. Les quatre ajouts apportent une amélioration significative des caractéristiques de compressibilité du sol, permettant de passer d'un sol compressible à un sol non compressible.

La résistance à la compression est accrue grâce à la réaction entre la cendre de papier et les particules du sol argileux, créant ainsi une liaison solide qui renforce la cohésion des particules du sol. De plus, la ductilité apportée par les grignons contribue également à augmenter la résistance à la compression.

La densification du sol avec des fibres de jute augmente la valeur CBR. Une insuffisance d'eau pour maintenir les particules de sol ensemble peut être la cause de la diminution de cette valeur. La formation de liaisons fibreuses entre les particules du sol et les ajouts, la résistance à la traction fournie au sol ainsi que la rigidité de la fibre contribuent à l'amélioration de ces paramètres mécaniques.

Conclusion générale et perspectives

Les coûts financiers et les méthodes de traitement associés à tout projet de développement urbain sont considérables, en particulier dans le cas des sols argileux, qui peuvent causer des dommages considérables en cas d'exposition à l'eau.

Notre recherche se concentre directement sur l'utilisation efficace de déchets agricoles, industriels et commerciaux dans le domaine de la stabilisation des sols. Ces matériaux offrent de nombreux avantages à la fois sur le plan technique, économique et environnemental. Le dosage des déchets est déterminé à partir de travaux préexistants et en se basant particulièrement sur les résultats d'expériences réalisées en laboratoire.

Nous avons utilisé un ensemble d'essais normalisés (Limite d'Atterberg, Compactages, Cisaillement, œdomètre, compression, CBR) afin de caractériser le sol. Les résultats ont révélé que les sols sont de nature gonflante, compressible et plastique.

Cette approche montre que le traitement modifie les paramètres physico-chimiques du sol et produit des résultats très satisfaisants en diminuant le potentiel de gonflement et la plasticité du sol, tout en renforçant sa résistance. Notre objectif était de transformer un sol instable en un matériau utilisable sur place afin de réduire les coûts de transport.

Suite à l'analyse des résultats et des discussions, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

L'incorporation des grignons d'olives améliore considérablement les propriétés physico-chimiques et mécaniques tant du sol reconstitué que du sol naturel. Cette amélioration se manifeste par une réduction notable de l'indice de plasticité et du potentiel de gonflement. Cependant, ce traitement entraîne une augmentation des paramètres de cisaillement.

L'ajout de cendre de papier joue un rôle crucial dans la modification des paramètres géotechniques en augmentant la résistance à la compression et au cisaillement, tout en réduisant le potentiel de gonflement des sols. On observe également une transformation de la microstructure du sol grâce à la formation de liants, qui réduisent les pores et améliorent la cohésion du sol. Le seuil de saturation est établi à 8 %.

Une amélioration significative des caractéristiques de compressibilité du sol traité avec de la rafle de maïs a été observée. Ce matériau stabilise le sol et offre les meilleurs résultats à un taux de 8 %.

En ce qui concerne l'effet de la fibre de jute sur le comportement des sols argileux, nos observations indiquent que les performances optimales sont obtenues à un taux de 4 %. En général, les fibres sont efficaces à des pourcentages faibles. Elles se traduisent par une augmentation notable de l'indice de CBR, de la cohésion et de l'angle de frottement interne, ainsi que par une diminution de l'indice de compression et de l'indice de gonflement

Les ajouts ont contribué à améliorer le comportement du sol, offrant ainsi une solution temporaire pour les pistes de chantier ou simplement pour le passage d'engins de travaux, ce qui permet d'améliorer la qualité du chantier.

Pour les futures recherches, nous envisageons les actions suivantes :

- Examiner le comportement à long terme afin de répondre à la question de la durabilité des remblais et des infrastructures traités avec des grignons d'olive, de la cendre de papier, de la rafle de maïs et de la fibre de jute.
- Effectuer une étude chimique pour analyser l'interaction chimique entre les ajouts et le sol.
- Tester le traitement des sols sur place avec ces ajouts, c'est-à-dire dans des conditions réelles.
- Explorer l'utilisation de ces ajouts dans d'autres types de sols problématiques.
- Rechercher de nouveaux stabilisants potentiels.

- Andrieux, J., Djellit, H. (1989). Structure de la petite Kabylie occidentale (Algérie) : flyschs "ultra" et flyschs externes. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II, p. 1191-1196.
- Akinwumi, I.I., Aidomojie, O.I. (2015). Effect of Corncob ash on the geotechnical properties of Lateritic soil stabilized with Portland cement. International Journal of Geomatics and Geosciences, 5 (3), p. 375-392.
- Al-Janabi, A.T., Abdulabbas, A.A. (2018). Evaluation the Swelling Soil Stabilized by Waste Corn Ash (WCA). Journal of engineering and applied sciences (science 13), p 10742 - 10746.
- AL-Saeedi, A.A., ALJanabi, A.J. (2019). Enhancement Characteristics Clay Soil by using Demolition Waste. Indian Journal of Natural Sciences, Vol.9, Issue 52,
- Amu, O.O., Salami, B.A. (2010). Effect of common salt on some engineering properties of eggshell stabilized lateritic soil. ARPN journal of Engineering and applied sciences, vol. 5, no 9, p. 64-73.
- Athira, T., Johnson, A., Krishnankutty, S.V. (2017). Expansive soil stabilization using coconut shell powder and Lime. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), vol. 6, no 3, p. 541-543.
- Attom, M.F., AL-Sharif, M.M. (1998). Soil stabilization with burned olive waste. Applied clay science, vol. 13, no 3, p. 219-230.
- Ayininuola, G.M., Balogun, L.O. (2018). Investigation of glass fiber potential in soil stabilization. Int. J. Eng. Adv. Technol, vol. 7, no 5, p. 113-117.
- Azzouz, F.Z. (2015). Clay soil Stabilization of the region Tlemcen by salts. ElWahat pour les recherches et les Etudes, Vol.8, n°1, p. 108 – 117. ISSN : 1112 - 7 163.
- Bairagi, H., Yadav, R.K., Jain, R. (2014). Effet des fibres de jute sur les propriétés techniques du sol de coton noir traité à la chaux. Int. J.Eng. Rés. Technol, vol. 3, n° 2, p. 1550-1552.
- Baghdad, A. (2017) . Caractérisation géologique, géotechnique et technologique des argiles de la wilaya de Jijel (Algérie nord orientale). Thèse de doctorat, Université de Jijel, 204 p.
- Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. Construction and building materials, vol. 19, no 6, p. 448-453.
- Benny, J.R., Jolly, J., Sebastian, J.M. (2017). Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN, p. 2278 - 0181.
- Bouzidi, N. (2012).Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson. Thèse de doctorat. Université de Bejaia ,116p.

Références bibliographiques

- Brahmachary, T.K., Rokonuzzaman, M. (2018). Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value. *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 9, p.1 – 11.
- Butt, W.A., Gupta.K., Jha, J. N. (2016). Strength behavior of clayey soil stabilized with saw dust ash. *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 7, no 1, 18 p.
- Canakci, H., Celik, F., bizne, M., Bizne, M.O. (2016). Stabilization of clay with using waste beverage can. *Procedia engineering*, vol. 161, p. 595-599.
- Chouafa, M. (2016). Comportement du Kaolin à l'enrichissement par flottation. Cas de la mine de Tamazert – Jijel. Thèse de doctorat, Univ annaba, 122 p.
- Cokca, E., Yazici,V., Ozaydin,V. (2009) . Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement. *Geotechnical and geological engineering*, vol. 27, no 4, p. 489-499.
- Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 113, no 1, p. 901-930.
- Dang, L.C., Khabbaz, H., Fatahi, B. (2017). An experimental study on engineering behaviour of lime and bagasse fibre reinforced expansive soils. In: *ICSMGE 2017-19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*,
- Danso, H., Martinson, D.B., Ali, M., Williams, J.B. (2015). Effect of sugarcane bagasse fibre on the strength properties of soil blocks. *Academic Journal of Civil Engineering*, 33 (2), p. 251-256.
- Debieche, M., Kaoua, F. (2019). Étude expérimentale des performances hydrauliques d'un sol reconstitué à l'état compact (sable-bentonite) étude expérimentale des performances hydrauliques d'un sol reconstitué à l'état compact. www.enstp.edu.dz/revue, p. 13-24.
- Durand Delga, M. (1955). Etude géologique de l'ouest de la chaine Numidique. Thèse de doctorat. Toulouse.
- Fauzi, A., Djauhari, Z., fauzi, U.J. (2016). Soil engineering properties improvement by utilization of cut waste plastic and crushed waste glass as additive. *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, no 1, p. 15-18.
- Galán-marín, C., Rivera-gómez, C., Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, vol. 24, no 8, p. 1462-1468.
- Gandhi, K.S. (2012). Expansive soil stabilization using bagasse ash. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 1, no 5, p. 2278 - 0181.
- Gobinath, R., Ganapathy, G.P., Akinwumi, I.I., Kovendiran, S., Hema, S., Thangaraj, M. (2016). Plasticity, strength, permeability and compressibility characteristics of black cotton soil stabilized

with precipitated silica. Journal of central south university, vol. 23, no 10, p. 2688-2694.

Gowtham, S., Naveenkumar, A., Ranjithkumar, R., Vijayakumar, P., Sivaraja, M. (2018). Stabilization of clay soil by using glass and plastic waste powder. International Journal of Engineering and Techniques 4 (2), p 146-150.

Hachichi, A., Bourokba, S., Fleureau, J.M. (2007). Chemical Stabilization of two expansive soils from the Oran region. French Geotechnical Review, no 118, p. 3 - 11.

Issac, S. (2021). Improving the Properties of Black Cotton Soil using Aluminium Cans. In : IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 822. 012007.

Jagwani, D., Jaiswal, A.(2019). Expansive Soil Stabilization by Cinder of Coconut Husk. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering et Applications (RAITEA), p. 1 - 9.

Jayashree, J., Yamini Roja, S. (2019). Stabilization of Expansive Soil using Rice Husk Ash and Lime. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), vol. 8, no 3, p 2661-2665.

Jimoh, Y.A., Apampa, O.A. (2014).An evaluation of the influence of corn cob ash on the strength parameters of lateritic soils. Civil and Environmental Research, vol. 6, no 5, p. 1 - 10.

Kalliyath, J., Joy, J., Paul, J., Vadakkal, A.M. (2016). Soil stabilization using plastic fibers. International Journal of Science Technology and Engineering, 2 (12), p. 484-487.

Khalid, N., Mukri, M., Kamarudin, F., Arshad, M.F. (2012). Clay soil stabilized using waste paper sludge ash (WPSA) mixtures. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17 (1), p.1215-1225.

Khalid, N., Mukri, M., Kamarudin, F., Ghani, A.H.A., Arshad, M.F., Baharudin, F (2015). Soft soil subgrade stabilization using waste paper sludge ash (WPSA) mixtures. In InCIEC 2014 : Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference, p 439-446. Springer Singapore.

Krishnan, K.D., Kiruthika, P., Ravichandran, P.T. (2020). Use of wood ash waste to stabilise soils. International Journal of Environment and Waste Management, 25 (1).p. 112-120.

Krishna, T.M., Beebi, S.S. (2015). Soil stabilization by groundnut shell ash and waste fiber material. In : International Conference on Recent Trends in Engineering and Technology, ISSN : 2320-9569, p. 1 - 5.

Kumar, A., Gupta, S.S. (2016). Strength development of soil using waste paper sludge (WPS). Int. Res. J. Eng. Technol, Vol 3, p 2144-2147.

Kumar, T., Panda, S., Hameed, S., Maity, J. (2018). Behaviour of soil by mixing of plastic strips. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, n° 05, p .2578-

2580.

Kumar, M., Azhar, M., Mondal, S., Singh, R.P. (2022). Stabilization of expansive soil subgrade by waste plastic. *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (10), p 936.

Kumar, G., Singh, R.V. (2022). Stabilisation of Soft Soil using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) and Lime. *International Research Journal of Engineering and Technology*, p. 153-159.

Kumar, S., Sahu, A.K., Naval, S. (2021). Study on the swelling behavior of clayey soil blended with geocell and jute fibre. *Civil Engineering Journal*, 7 (08), p.1327-1340.

Kumar, D., Nigam, S., Nangia, A., Tiwari, S. (2015). Improvement in CBR values of soil reinforced with jute fibre. *Int. J. Engrg. Tech. Res*, 3 (5), p. 290-293.

Lisbona, A., Vegas, I., Ainchil, J., Ríos, C (2012). Soil stabilization with calcined paper sludge : laboratory and field tests. *Journal of Materials in civil engineering*, 24 (6), P. 666-673.

Mathieu, C., Pieltain, F., Jeanroy, E. (2003). *Analyse chimique des sols : méthodes choisies*. Tec et Doc – Lavoisier

Magnan. J.P. (2001). *Description, identification, et classification des sols*. Ed. Techniques de L'ingénieur (TI). Paris, vol. 1, no C208, p. 16.

Mallikarjuna,V. Bindu Mani, T. (2016). Soil Stabilization Using Plastic Waste. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, ISSN, p. 2319 - 1163.

Mavroulidou, M., Ziniatis, A., Gray, C. (2017). Alternative calcium-based chemical stabilisers for ground improvement: Paper Sludge Ash treatment of London Clay. In 15th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2017),

Mavroulidou, M. (2018). Use of waste paper sludge ash as a calcium-based stabiliser for clay soils. *Waste Management and Research*, 36 (11), p. 1066-1072.

Mutman, U. (2013). Clay improvement with burned olive waste ash. *The Scientific World Journal*, Vol 2013, P. 1 - 5.

Nalbantoglu, Z., Tawfiq, S.(2006).Evaluation of the effectiveness of olive cake residue as an expansive soil stabilizer. *Environmental Geology*, vol. 50, no 6, p. 803-807.

Neeladharan, C., Vinitha,V., Priya,B., Saranya, S. (2017). Stabilisation of soil by using tiles waste with sodium hydroxide as binder. *Int J Innov Res Sci Eng Technol*, vol. 6, no 4, p. 6762-6768.

Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton, D.D., Nelson, E.J. (2015). *Foundation engineering for expansive soils*. John Wiley and Sons.

Références bibliographiques

- Nnochiri, E.S., Ogundipe, O.M. (2016). Geotechnical Properties of Lateritic Soil Stabilized with Ground- Nut Husk Ash. *Civil Engineering Journal*, vol. 2, no 11, p. 568-575.
- Nnochiri, E.S., Adetayo, O.A. (2019). Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with corn cob ash. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, vol. 12, no 1, p. 73-76.
- Nochiri, E.S., Emeka, H.O., Tanimola, M. (2017). Geotechnical Characteristics of Lateritic Soil Stabilized With Sawdust Ash-Lime Mixtures. *StavebníObz. -Civ. Eng. J*, vol. 26, no 1, p. 66-76.
- Olufowobi, J., Ogundaju, A., Michael, B., Aderinlewo, O. (2014). Clay soil stabilisation using powdered glass. *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 9, no 5, p. 541-558.
- Okagbue, C.O. (2007). Stabilization of clay using woodash. *Journal of materials in civil engineering*, vol. 19, no 1, p. 14-18.
- Onyelowe, K.C. (2017). Nanostructured waste paper ash stabilization of lateritic soils for pavement base construction purposes. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 22, no 9, p. 3633-3647.
- Oluwatuyi, O.E., Adeola, B.O., Alhassan, E.A. (2018). Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, p. 1 - 10.
- Ouahab, M. (2007). Proposition d'une méthode d'exploitation de gisement de bentonite de Mostaganem sur la base d'une analyse statistique multidimensionnelle. *Mémoire d'ingénieur d'état*, 90 p.
- Philipponnat, G., Hubert, B. (2016). *Fondations et ouvrages en terre*. Eyrolles. Paris, 548 P.
- Pillai, R., Ramanathan, A. (2012). An innovative technique of improving the soil using human hair fibers. In : *Proceedings of the 3rd international conference on construction in developing countries*, p. 4 - 6.
- Rani, T.G., Shivanarayana, Ch., Prasad, D., Raju, G.V.R. . (2014) . Strength behaviour of expansive soil treated with tile waste. *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 10, no 12, p. 52 - 57.
- Sabat, A.K. (2012). Stabilization of expansive soil using waste ceramic dust. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 17, no Z, p. 3915-3926.

Références bibliographiques

- Sabat, A.K. (2012). Effect of polypropylene fiber on engineering properties of rice husk ash–lime stabilized expansive soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 17, p 651-660.
- Saber, S.A. ., Iravanian, A. (2022). Using Waste Ceramic Dust in Stabilization of Clay Soils. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, vol. 13, no 1, p. 68-80.
- Saji, G ., Mathew, N. (2016). Improvement of clayey soil by using Egg Shell Powder And Quarry Dust. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE)*, e-ISSN, p. 278 - 1684.
- Santosh, M.,Vishwanath, C.S. (2015). Stabilization of Expansive Soil by using Wheat Husk Ash and Granulated Blast Furnace Slag. *Int J Sci Res Dev*, vol. 3, no 4, p. 2006-2018.
- Sharma, A.K., Sivapullaiah, P.V. (2016). Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations*, vol. 56, no 2, p. 205-212.
- Sharma, V., Rathore, P.K., Sharma, A. (2018). Soil Stabilization by Using Wheat Husk Ash. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, vol. 5, p. 31-35.
- Singh, M., Sharma, R. (2017). Soil stabilization using industrial waste (wheat husk and sugarcane straw ash). *Int. J. Res. Eng. Technol*, vol. 4, p. 589-596.
- Singh, A.K .,Yadev, R.K. (2016). Improvement in CBR of expansive soil with jute fiber reinforcement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 3, no 11, p. 767 - 761.
- Soni, S.R., Dahale, P.P., Dobale, R.M. (2011). Disposal of solid waste for black cotton soil stabilization. *International journal of advanced engineering sciences and technologies*, Vol, (8), p. 113 - 120.
- Subash, K., Sreerag, R., Deeraj, A.D., Sukesh, S., John, J. (2016). Stabilization of black cotton soil using glass and plastic granules. *Int. j. of engineering research and technology*, vol. 5, no 4, p. 480-483.
- Sridevi, G., Sreerama, R. (2014). Efficacy of GGBS stabilized soil cushions with and without lime in pavements. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*), p. 141-147.
- Tiwari, A., Mahiyar, H.K. (2014). Experimental study on stabilization of black cotton soil by fly

Références bibliographiques

ash, coconut coir fiber and crushed glass. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, no 11, p. 330-333.

Tomar, A., Sharma, T., Singh, S. (2020). Strength properties and durability of clay soil treated with mixture of nano silica and Polypropylene fiber. *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, p. 3449-3457.

Toumi, K.H. (2021). Valorisation des déchets agricoles des tourteaux d'olives algériens par adsorption de polluants organiques : étude expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, 113 p.

Vila, J.M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisien. Thèse Doctorat. Paris VI, 663 p.

Yusuf, I.T., Zava, A.E. (2019). Investigating the suitability of coconut husk ash as a road soil stabilizer. *International Journal of Technology*, 10 (1).

Yulianto, F.E., Mochtar, N.E. (2010). Mixing of rice husk ash (RHA) and lime for peat soil stabilization. In *Proceedings of the first Makassar international conference on civil engineering*, ISBN 978-602-95227-0-9.

Zemouli, S., Chelghoum, N. (2018). Use of ground granulated blast furnace slag in soils stabilization. *Rev. Sci. Technol*, Vol 36, p.103-114.

Normes

ISO, N. 10390 : Qualité du sol. Détermination du pH. AFNOR, Paris, (1994).

NF, P. 94-054 : reconnaissances et essais, Détermination de la masse volumique des particules solides des sols, Méthode du pycnomètre à eau. Association Française de Normalisation, France (in French), (1991).

IS-2720-PART-40: Free swell index test of soil, (1970).

NFP 94- 051 (1994).Détermination des limites d'Atterberg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau.

NF, P. 94-093: Détermination des références de compactage d'un matériau: essai proctor normal- Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation (AFNOR), (1999).

NF, P. 94-071-1. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte-Partie 1: Cisaillement direct. Association

Références bibliographiques

Française de Normalisation (AFNOR), (Août 1994).

XP P94-091 : « Sols .reconnaissance et essais - Essai de gonflement à l'œdomètre (décembre 1995). Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes. (AFNOR).

NF P 94-078 : « Indice CBR après immersion- Indice CBR immédiat- Indice Portant Immédiat»

SONAREM. (1968). Rapport interne de la mission chinoise sur Djebel Tamazert carte géologique.

GTR. (2000). Guide des Terrassements Routiers, réalisation de remblais et des couches de formes, fascicules I et II, GTR SETRA-LCPC 2ème édition.