

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par :

HAMDI LINA

**Thème: STABILISATION DES SOLS INSTABLE PAR
DES MATERIAUX RECYCLES**

Sous la direction de : Dr ; BENAMARA Fatima Zohra

Juin 2024

Remerciements

Au terme de ce travail de recherche, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de mémoire, **Dr ; BENAMARA Fatima Zohra**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce projet. Sa rigueur scientifique et sa passion pour la recherche m'ont été d'une grande inspiration.

Je suis également reconnaissant envers **ZAIDI Lina**, pour son encadrement précieux, son expertise technique et sa patience face à mes nombreuses questions.

J'adresse mes sincères remerciements à **AMRAOUI Riad** et à toute l'équipe du laboratoire **LNHC Belkheir**, pour m'avoir accueilli au sein de leur structure et mis à ma disposition les équipements nécessaires à la réalisation des essais expérimentaux.

Je tiens également à remercier mes camarades de promotion pour leur soutien moral et les échanges fructueux que nous avons partagés.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur patience tout au long de mes études.

À tous, merci du fond du cœur.

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier **DIEU** de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Ma mère **N.SISA OUI**, pour votre amour inconditionnel, votre encouragement sans faille et vos sacrifices constants. Votre présence dans ma vie est un cadeau précieux que je chérirai toujours.

Mon père **AHMED**, pour votre sagesse, votre soutien indéfectible et votre exemple inspirant. Votre croyance en moi a été un moteur essentiel pour me propulser vers la réussite.

Mon frère **YASSER** et mes sœurs **DJIHED** et **INES**, pour votre amour, votre soutien et votre présence dans ma vie. Votre présence constante et votre encouragement inconditionnel m'ont permis de surmonter les défis et de réaliser mes aspirations.

Mon ami, **RABIA GUETATLIA** et sa sœur **Dr.NAFISSA** pour votre amitié précieuse, votre soutien moral et votre présence constante dans les moments difficiles. Vos encouragements et votre écoute attentive ont été une source de réconfort et de motivation.

Je dédie ce mémoire au personnel du laboratoire **LNHC Belkheir**, pour leur soutien constant, leur expertise et leur précieuse collaboration. Je remercie particulièrement **HIBA CHEDDADI** pour sa guidance et sa confiance. La disponibilité et l'aide de tous les membres du laboratoire ont été un atout majeur pour la réalisation de ce travail.

J'exprime également ma gratitude pour les conditions de travail exceptionnelles qui ont été mises à ma disposition. Votre engagement envers la recherche et l'innovation est une source d'inspiration et de motivation pour tous les chercheurs.

Ce travail est le fruit de nombreuses années de dévouement, de persévérance et de passion pour le génie civil et géotechnique.

Résumé

Les sols instables sont à l'origine de nombreux dommages pour les ouvrages en surface et en sous terrain, car ils peuvent provoquer des problèmes tels que les fissures dans les murs et les fondations, les glissements de terrain et les affaissements. Le traitement des sols instable par des matériaux recyclés consiste à renforcer les sols en y ajoutant des matériaux recyclés, tels que des fibres, des inclusions rigides fabriquées à partir de déchets recyclés tels que le plastique, les déchets issus de BTP,.....etc.). L'objectif principal est de déterminer leur potentiel en tant que solutions durables pour la stabilisation des sols argileux, répondant ainsi à la double problématique de la demande croissante en terrains constructibles et la nécessité de valoriser les déchets. Ce travail explore l'utilisation de matériaux recyclés, notamment le carrelage broyé et le PVC, pour améliorer les propriétés mécaniques d'un sol reconstitué (argile +bentonite). Décessais de caractérisation physiques et mécaniques sur le sol reconstitué avant et après traitement ont été réalisés au laboratoire afin d'évaluer l'efficacité du traitement par les matériaux recyclés (carrelage broyé et PVC) à différents pourcentages. Les résultats obtenues ont été comparés et interprétés

Mots clés : sol reconstitué, bentonite, stabilisation, caractérisation, carrelage broyé, PVC.

Abstract

Unstable soils cause a lot of damage to above and below ground structures, as they can cause problems such as cracks in walls and foundations, landslides and subsidence. The treatment of unstable soils with recycled materials consists of reinforcing the soils by adding recycled materials, such as fibers, rigid inclusions made from recycled waste such as plastic, construction waste, etc. .). The main objective is to determine their potential as sustainable solutions for the stabilization of clay soils, thus responding to the dual problem of the growing demand for building land and the need to recover waste. This work explores the use of recycled materials, notably crushed tiles and PVC, to improve the mechanical properties of a reconstituted soil (clay + bentonite). Physical and mechanical characterization tests on the reconstituted soil before and after treatment were carried out in the laboratory in order to evaluate the effectiveness of the treatment with recycled materials (crushed tiles and PVC) at different percentages. The results obtained were compared and interpreted.

Keywords: reconstituted soil, bentonite, stabilization, characterization, crushed tile, PVC.

تُسبب التربة غير المستقرة العديد من الأضرار للمنشآت السطحية والجوفية، حيث يمكن أن تؤدي إلى مشاكل مثل التشققات في الجدران والأساسات، وحدوث الانهيارات الأرضية، و هبوط التربة. تتمثل معالجة التربة غير المستقرة باستخدام المواد المُعاد تدويرها في تقوية التربة عن طريق إضافة مواد مُعاد تدويرها إليها، مثل: الألياف، والقطع الصلبة المصنوعة من نفايات مُعاد تدويرها مثل البلاستيك، ونفايات البناء والتشييد، إلخ. ويهدف هذا الإجراء بشكل أساسي إلى تحديد مدى فاعلية هذه المواد كحلول مستدامة لجعل التربة الطينية أكثر استقرارًا، مما يُساهم في مواجهة التحديات المتمثلين في زيادة الطلب على الأراضي الصالحة للبناء و ضرورة الاستفادة من النفايات. تركز هذه الدراسة على استخدام مواد مُعاد تدويرها، لا سيما بلاط السيراميك المكسور والبولي فينيل كلورايد المطحون، بهدف تحسين الخواص الميكانيكية لتربة مُعاد تشكيلها (الطين + البنتونيت). تم إجراء اختبارات لتحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة المُعاد تشكيلها قبل وبعد المعالجة في المختبر. يهدف هذا إلى تقييم مدى كفاءة المعالجة باستخدام المواد المُعاد تدويرها (بلاط السيراميك المكسور والبولي فينيل كلورايد المطحون) بنسب مختلفة. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها وتحليلها.

الكلمات المفتاحية: التربة المُعاد تشكيلها، البنتونيت، الاستقرار، التوصيف، بلاط السيراميك المكسور، البولي فينيل كلورايد المطحون.

SOMMAIRE

	Page
Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Sommaire	1
Liste des figures	5
Liste des tableaux	8
Notations et Symbols	10
Introduction générale	12
Chapitre I : Généralité sur les sols de mauvaise qualité	
I.1 Introduction	18
I.2. Définition des Sols instable	18
I.3 Types de sol	18
I.3.1 Sol sableux	18
I.3.2 Sol limoneux	18
I.3.3 Sol argileux	19
I.3.4 Sol humifère	19
I.4 Généralités les argiles	20
I.4.1 les minéraux des argiles	20
I.4.2 Composition des sols argileux	20
I.4.3 Les Familles des Argiles	21
I.4.3.1 Les Familles des Argiles	21
I.4.3.2. L'illite	23
I.4.3.3 Montmorillonite	24
I. 4.3.4 Smectites	26
I.4.3.5 Bentonite	27
I. 4.3.6 Chlorite	29
I.4.3.7 Vermiculite	30
I.5 Classification des sols	31
I.5.1 Classification des sols grenus	32
I.5.1.1 La classification L.C.P.C	32
I.5.1.2 Système de classification Unified Sol Classification System	33

(USCS)	
I.5.1.3 Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)	34
I.5.1.4 Système de classification AASHTO T88 - 70 (Anciennement HRB)	35
I.5.2 Classification des sols fins	35
I.5.3 Classification des sols organiques (MO>3%)	36
I.6 Les sols à problème	36
I.6.1 Les sols gonflant	37
I.6.1.1 Phénomène de tassement par retrait-gonflement	37
I.6.1.2 Phénomène de glissement	37
I.6.2 Les sols affaissables	38
I.7 Conclusion	39
Références bibliographiques du premier chapitre	40
Chapitre II : Les méthodes d'amélioration des sols médiocres	
II.1 Introduction	43
II.2. Les méthodes d'amélioration des sols médiocres	43
II.2.1 Techniques de Modification de la Structure Interne du Sol	43
II.2.1.1 Consolidation des sols	43
II.2.1.2 Compactage dynamique	44
II.2.2 Techniques de Renforcement du Sol par Ajout d'Inclusions	44
II.2.2.1 Inclusions rigides de béton	44
II.2.2.2 Colonnes ballastées	45
II.2.2.3 Colonnes de Jet Grouine	46
II.2.2.4 Colonnes de Sol Mixant	46
II.2.3 Géo synthétiques	47
II.2.4 Stabilisation chimique	47
II.2.4.1 Ciment	47
II.2.4.2 Chaux	48
II.2.4.3 Cendres volantes	49
II.2.5 Traitement thermique	50
II.3 Stabilisation par les matériaux recyclés	50
II.3.1 Les granulats Issus du BTP	50
II.3.2 Plastiques recyclés	51
II.3.3 Poudrette de pneus usagers	52
II.3.4 Verre recyclé	53
II.3.5 Bille de polystyrène	54
II.3.6 Poudre de céramiques	54

II.3.7 Déchets de briques	55
II.3.8 Laitier de haut fourneau	56
II.3.9 Poudre de sciure de bois	56
II.3.10 Cendre de bois	57
II.3.11 Coquilles d'œufs	58
II.3.12 Fibre de bambou	58
II.3.13 Déchet d'olive brûlé	59
II.3.14 Fibre de sisal	59
II.4 Conclusion	60
Références Bibliographiques de deuxième chapitre	61
Chapitre III : Matériaux et procédures Expérimentales	
III.1 Introduction	65
III.2 Cratérisation des matériaux utilisés	65
III.2.1 Caractérisations du sol utilisé	65
III.2.1.1 Essai de teneur en eau selon NF P 94-050 et NF P 94-053	65
III.2.1.2 Densité apparente selon NF P 94-050 et NF P 94-053	66
III.2.1.3 Essai de sédimentométrie (NF P 94-057)	68
III.2.1.4 Essai de limites d'Atterberg (NF P 94-051)	70
III.2.1.4.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement de notre argile	72
III.2.1.5 Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)	73
III.2.2 La bentonite utilisée dans le sol reconstituée	74
III.2.3 Caractérisation du Carrelage	74
III.2.3.1 Analyse granulométrique de Carrelage broyé (NF 18-304)	75
III.2.3.2 La masse volumique apparente	76
III.2.3.3 La masse volumique absolue	76
III.2.3.4 Essai du bleu méthylène sur le carrelage broyé	77
III.2.4 Caractérisation du PVC	77
III.2.4.1 Analyse granulométrique (NF 18-304)	77
III.2.4.2 La masse volumique apparente de PVC	79
III.2.4.3 La masse volumique absolue de PVC	80
III.3 Les essais mécaniques	80
III.3.1 Essai Proctor (NF P 94-093)	80
III.3.2 Essai de cisaillement (NF P 94-071-1)	81
III.3.3 Essai résistance à la compression (ISO 17892-7:2017)	83
III.3.4 Essai œdométrique (XP P 94-090-1 et XP P 94-091)	84
III.4 Conclusion	86

Références Bibliographies de Troisième chapitre	87
Chapitre IV : Présentation et interprétation des résultats d'essais	
IV.1 Introduction	89
IV.2. L'influence du carrelage broyé sur le sol reconstitué	89
IV.2.1 L'effet du carrelage broyé sur le bleu de méthylène (VBS)	89
IV.2.2 Effet du carrelage broyé sur les limites de consistance (Atterberg)	89
IV.2.3 Effet du carrelage broyé sur le compactage	95
IV.2.4 Effet du carrelage broyé sur la résistance au cisaillement	99
IV.2.5 Effet du carrelage broyé sur la résistance à la compression	106
IV.2.6 Essai œdométrique	107
IV.3. L'influence du PVC sur le sol reconstitué	110
IV.3.1 Effet du PVC sur le compactage	110
IV.3.2 Effet du PVC sur la résistance au cisaillement	112
IV.4 Effet du PVC sur la résistance à la compression	117
IV.5 Conclusion	117
Conclusion Générale	120

Liste des figures

		La page
Figure I.1	Sol sableux	18
Figure I.2	Sol limoneux	19
Figure I.3	Sol argileux	19
Figure I.4	Sol humifère	20
Figure I.5	Représentation schématique des deux types de couches octaédriques	21
Figure I.6	La Kaolinite	22
Figure I.7	Représentation schématique de la structure de kaolinite	22
Figure I.8	L'illite (grains concassés)	23
Figure I.9	Représentation schématique de la structure de l'illite	24
Figure I.10	La montmorillonite	25
Figure I.11	Structure de montmorillonite	26
Figure I.12	Les smectites	26
Figure I.13	Structure d'un feuillet de smectite	27
Figure I.14	Structure d'un feuillet de bentonite	29
Figure I.15	chlorite verte à texture micacée	30
Figure I.16	Vermiculite	30
Figure I.17	Structure d'un feuillet de Vermiculite	31
Figure I.18	Abaque de plasticité de Casa grande (simplifiée)	36
Figure I.19	Tassement par retrait et gonflement	37
Figure I.20	Glissement fortement rétrogressif, Saint-Jude, 2010	38
Figure I.21	Une route affaissée en Mayenne	39
Figure II.1	Préchargement	44
Figure II.2	Compactage dynamique	44
Figure II.3	Différents composants de fondations complètes sur des inclusions rigides	45
Figure II.4	Techniques de mise en œuvre des colonnes ballastées	45
Figure II.5	Le jet grouine	46
Figure II.6	Sol Mixant	47
Figure II.7	Nappes ou géotextiles	47
Figure II.8	Stabilisation des sols par le ciment	48
Figure II.9	Stabilisation des sols par la chaux	48
Figure II.10	Les cendres volantes - ACPresse	49
Figure II.11	Les granulats recyclés	50
Figure II.12	Plastiques recyclés	51
Figure II.13	Les différents diamètres de granulats des pneus usés après broyage	53
Figure II.14	Le verre recyclé	53
Figure II.15	Billes de polystyrène	54
Figure II.16	Poudre de céramique	55
Figure II.17	Déchets de briques	55
Figure II.18	Le laitier de hauts fourneaux	56
Figure II.19	Sciure de Bois	57
Figure II.20	Cendre de bois	57
Figure II.21	Fibre de bambou	59

Figure II.22	Déchet d'olive brûlé	59
Figure II.23	fibre de Sisal	60
Figure III.1	Sol argileux	65
Figure III.2	Essai de la densité apparente	68
Figure III.3	Matériel d'essai de sédimentométrie	69
Figure III.4	Courbe granulométrique du sol	70
Figure III.5	Détermination des limites d'Atterberg	71
Figure III.6	Courbe de la limite de liquidité WL d'argile	71
Figure III.7	Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins	72
Figure III.8	Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).	73
Figure III.9	Poudre de carrelage	74
Figure III.10	Courbe granulométrique de la poudre de carrelage	75
Figure III.11	Masse volumique apparente	76
Figure III.12	Essai de la masse volumique absolue	77
Figure III.13	Fibres de PVC	77
Figure III.14	Série de tamis et tamiseuse électrique	78
Figure III.15	Courbe granulométrique du PVC	79
Figure III.16	Masse volumique apparente	79
Figure III.17	Essai de la masse volumique absolue	80
Figure III.18	Essai Proctor	81
Figure III.19	Courbe Proctor	81
Figure III.20	Appareil de cisaillement direct	81
Figure III.21	Préparation de l'échantillon	83
Figure III.22	Appareil de compression	83
Figure III.23	Appareil odométrique	85
Figure III.24	Courbe œdométrique sol reconstitué (argile+ 25 bentonite)	85
Figure IV.1	valeurs du bleu de méthylène en fonction des pourcentages en carrelage broyé	89
Figure IV.2	Résultats des essais des limites d'Atterberg pour le sol reconstitué (0%)	90
Figure IV.3	Résultats des essais des limites d'Atterberg pour 5%	91
Figure IV.4	Résultats des essais des limites d'Atterberg pour 10%	92
Figure IV.5	Résultats des essais des limites d'Atterberg pour 20%	93
Figure IV.6	Résultats des essais des limites d'Atterberg pour 30%	94
Figure IV.7	La courbe de limite de plasticité en fonction de % carrelage broyé.	95
Figure IV.8	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué	96
Figure IV.9	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +5% carrelage broyé	96
Figure IV.10	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +10% carrelage broyé	97
Figure IV.11	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +20% carrelage broyé	97
Figure IV.12	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +30% carrelage broyé	98
Figure IV.13	Courbe de compactage Proctor pour différents pourcentages du carrelage broyé	98
Figure IV.14	Courbe de γ_d en fonction des pourcentages du carrelage	99

	broyé.	
Figure IV.15	Courbe de Wopt fonction des pourcentages du carrelage broyé	99
Figure IV.16	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué (argile +25% bentonite)	100
Figure IV.17	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +5% carrelage broyé	101
Figure IV.18	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +10% carrelage broyé	102
Figure IV.19	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +20% carrelage broyé	103
Figure IV.20	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +30% carrelage broyé	104
Figure IV.21	Variation de la cohésion en fonction des mélanges traités au carrelage broyé à 24 heures	105
Figure IV.22	variation de l'angle de frottement en fonction des mélanges traités au carrelage broyé à 24 H, 7jours et 28 jours	105
Figure IV.23	variation de la cohésion des mélanges traités au carrelage broyé à 24 H, 7jours et 28 jours	106
Figure IV.24	Les résistances à la compression en fonction de sol reconstitué et des mélanges sols reconstitué + carrelage broyé à différents pourcentages à 24H, 7 jours et 28jours	107
Figure IV.25	Courbe de compressibilité œdométrique pour sol reconstitué (0% car br)	107
Figure IV.26	Courbe de compressibilité œdométrique (sol reconstitué +10% car br)	108
Figure IV.27	Courbe de compressibilité œdométrique (sol reconstitué +20% car br)	108
Figure IV.28	Courbe de compressibilité œdométrique (sol reconstitué +30% car br)	109
Figure IV.29	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +5% PVC	110
Figure IV.30	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +10% PVC	111
Figure IV.31	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +15% PVC	111
Figure IV.32	Courbe de γ_d en fonction des pourcentages du PVC	111
Figure IV.33	Courbe de Wopt fonction des pourcentages du PVC.	112
Figure IV.34	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +5% PVC	113
Figure IV.35	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué 10% PVC	114
Figure IV.36	Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué 15% PVC	115
Figure IV.37	Variation de la cohésion des mélanges traités au PVC à 24 heures	115
Figure IV.38	variation de l'angle de frottement des mélanges traités au PVC à 24 H, 7jours et 28 jours	116
Figure IV.39	variation de la cohésion des mélanges traités au PVC à 24 H, 7jours et 28 jours	116
Figure IV.40	Les résistances à la compression en fonction de sol reconstitué et des mélanges sols reconstitué + PVC à différents pourcentages à 24H, et 7 jours	117

Liste des Tableaux

		Page
Tableau I.1	Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite d'Algérie	29
Tableau I.2	Caractéristiques des argiles	31
Tableau I.3	Classification L.P.C. des sols grenus.	33
Tableau I.4	Classification USCS des sols d'après la grosseur des grains.	33
Tableau I.5	La classification GTR pour les sols A, B, C et D.	34
Tableau I.6	Classification des sols de l'AASHTO	35
Tableau I.7	Classification des sols organiques.	36
Tableau III.1	Essai de teneur en eau	66
Tableau III.2	Essai de densité apparente	68
Tableau III.3	Les caractéristiques physique du sol	68
Tableau III.4	Analyse granulométrique par sédimentométrie	69
Tableau III.5	Degré de plasticité des sols	71
Tableau III.6	Estimation du potentiel de gonflement	72
Tableau III.7	Estimation du potentiel de gonflement	72
Tableau III.8	Classification des sols suivant la valeur au bleu de méthylène	74
Tableau III.9	Caractéristiques pétrographiques minéralogiques	74
Tableau III.10	Composition chimique de la bentonite résultats de fluorescence X	74
Tableau III.11	Analyse granulométrique de la poudre de carrelage	75
Tableau III.12	Les critères de courbure et d'uniformité	75
Tableau III.13	Masse volumique apparente du Poudre de carrelage	76
Tableau III.14	Masse volumique absolue du Poudre de carrelage	76
Tableau III.15	Analyse granulométrique du PVC	78
Tableau III.16	Les critères de courbure et d'uniformité	79
Tableau III.17	Masse volumique apparente de PVC	79
Tableau III.18	Masse volumique absolu de PVC	80
Tableau III.19	Résultat de l'essai Proctor sur argile	81
Tableau III.20	Compressibilités des sols	81
Tableau III.21	Les résultats de l'essai œdométrique d'état charge	81
Tableau IV.1	Récapitulatif des paramètres de consistances des différents	94

	teneurs enCarrelage broyé	
Tableau IV.2	Récapitulation des essais Proctor normal à différentes teneur en carrelage broyé	95
Tableau IV.3	Résultat d'essai Proctor (sol rec+0% car)	95
Tableau IV.4	Résultat d'essai Proctor (sol rec+5% car)	96
Tableau IV.5	Résultat d'essai Proctor (sol rec+10% car)	96
Tableau IV.6	Résultat d'essai Proctor (sol rec+20% car)	97
Tableau IV.7	Résultat d'essai Proctor (sol rec+0% car)	97
Tableau IV.8	Bilan des résultats de l'essai de cisaillement pour le sol reconstitué et mélanges de sols reconstitué traités avec du carrelage broyé	104
Tableau IV.9	influence du carrelage broyé sur les paramètres de compressibilité du sol reconstitué et les mélanges (sol reconstitué +carrelage)	109
Tableau IV.10	Récapitulation des essais Proctor normal à différentes pourcentage de PVC	110
Tableau IV.11	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +5% PVC	110
Tableau IV.12	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +10%PVC	110
Tableau IV.13	Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +15% PVC	111
Tableau IV.14	Bilan des résultats de l'essai de cisaillement pour le sol reconstitué et mélanges de sols traités avec PVC	112

Notations et Symboles

USDA: United States Département of Agriculture.
C.E.C : Capacité d'Echange Cationique
CAP : Centre Algérien du Patrimoine.
BTC: Brique de Terre Compressée
ASTM: American Society for Testing and Materials
GTS : Guide Du Traitement De Sol
LHR : Liant Hydraulique Routier
GTR : Guide De Terrassement Routier
VBS : Valeur de Bleu de Méthylène.
OPN : Optimum Proctor Normal
OPM : Optimum Proctor Modifié
CU : Essais triaxial consolidés-non drainés.
UU : Essais triaxial non consolidés-non drainés.
CD : Essais triaxial consolidés-drainés.
IP : Indice de plasticité.
LP : Limite de plasticité.
LL : Limite de liquidité.
Wopt : La teneur en eau optimum.
 Φ' : Angle de frottement interne
C : Cohésion.
 ρ_d : Masse volumique sèche
 ρ_h : Masse volumique humide.
 σ_3 : Contrainte principale mineure.
 σ_1 : Contrainte principale majeure.
Rc : résistance à la compression simple
L : Limite de liquidité
p : Limite de plasticité
IP : Indice de plasticité.
IC : Indice de consistance
Wn: Teneur en eau de sol naturelle
Sr : Degré de saturation
 ε_g : Potentiel de gonflement
g : Pression de gonflement
Cg : Indice de gonflement
Cc : Indice de compressibilité
Pc : Pression de consolidation
e : Indice de vide
opt : La teneur en eau optimum
 γ_{dmax} : Densité Sèche Maximale
 γ_s : Poids volumique spécifique
 γ_d : Poids volumique sèche
 γ_h : Poids volumique humide
C : La cohésion
 φ : L'angle de frottement interne
LNHC : Laboratoire National habitat et Construction
GMT : Guide Manuel Technique du Pont TM Typer géotextile.
SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
LHR : Liant Hydraulique Routière

GTS : Guide technique du traitement de sol des remblais et couches de forme
GTR : Guide de terrassement routière
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
BRGM : Bureau de Recherche Géologiques et Minières
PF : Perte au Feu
CEC : la Capacité d'échange Cationique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

La croissance de la demande en terrains constructibles, associée à la nécessité de valoriser les déchets, a entraîné un intérêt important pour l'emploi de ces matériaux dans les méthodes de stabilisation des sols.

La stabilisation des sols instables est un processus qui vise à améliorer la résistance mécanique et la durabilité des sols face aux pressions extérieures telles que le poinçonnement des véhicules ou l'érosion. En outre la stabilisation des sols médiocres implique une approche naturelle qui améliore les propriétés du sol, utilise des techniques de renforcement et prend en compte la gestion efficace des eaux pour assurer une résistance mécanique et une durabilité optimales.

Les sols argileux présentent des défis importants pour la construction en raison de leur sensibilité à l'eau, qui peut entraîner des phénomènes de gonflement, de retrait et de tassement. Ces variations volumiques peuvent compromettre la stabilité des fondations et des infrastructures.

La stabilisation des sols par des matériaux recyclés est une technique prometteuse qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques des sols tout en valorisant des déchets. Les matériaux recyclés comme le plastique PET, le verre broyé et les fibres de cellulose peuvent être utilisés pour stabiliser les sols. Cela permet de réduire l'extraction de matières premières, de créer des emplois, de protéger l'environnement et de développer l'économie circulaire

Ce mémoire explore l'utilisation de deux types de matériaux recyclés, le carrelage broyé et le PVC, comme ajouts dans un sol argileux reconstitué d'un sol argileux est 25 % de bentonite afin d'augmenter les paramètres de gonflement du sol d'origine. Une campagne expérimentale a été menée pour caractériser les propriétés physiques et mécaniques du sol argileux d'origine, du sol reconstitué et des mélanges traités.

Des essais en laboratoire, conformes aux normes internationaux, ont été réalisés pour étudier la granulométrie, les limites d'Atterberg, le comportement sous compactage, la résistance au cisaillement, la résistance à la compression et la compressibilité.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence de ces ajouts (carrelage broyé et PVC) sur les caractéristiques du sol reconstitué et de déterminer leur potentiel en tant que solutions durables pour la stabilisation des sols argileux gonflants.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres suivants détaillent les aspects théoriques et pratiques de ce travail.

Le premier chapitre présente des généralités sur les sols de mauvaise qualité, avec un accent particulier sur les sols argileux et leurs caractéristiques minéralogique provocants des problèmes spécifiques aux ouvrages de génie civil.

Le deuxième chapitre offre un aperçu des techniques d'amélioration des sols médiocres, y compris les méthodes traditionnelles de renforcement, ainsi que la présentation des principaux matériaux recyclés utilisés dans le contexte d'amélioration des sols instables.

Introduction Générale

Le troisième chapitre décrit les matériaux et les procédures expérimentales utilisés pour la caractérisation des matériaux utilisés dans l'amélioration du sol reconstitué d'un mélange de 75% d'argile et 25% de bentonite, le carrelage broyé et le PVC , ainsi que les essais mécaniques effectués tels que l'essai Proctor normal, l'essai de cisaillement direct, l'essai de compression non confiné et l'essai de compressibilité.

Le quatrième chapitre présente une présentation des résultats des essais effectués et leurs interprétations, analysant l'influence des ajouts de carrelage broyé et de PVC sur les propriétés du sol reconstitué.

Enfin, la conclusion générale résume les principaux résultats et discute des perspectives futures pour le domaine de recherche sur l'amélioration des sols instables au moyen de matériaux recyclés .

Chapitre I :
Généralité sur les sols
de mauvaise qualité

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SOLS DE MAUVAISE QUALITE

I.1. Introduction

La mise en place de sols de mauvaise qualité est de plus en plus indispensable, étant donné la croissance de l'humanité et de ses activités. Certains sols, jusqu'alors négligés, car ayant des caractéristiques mécaniques faibles, doivent être renforcés afin de garantir la stabilité des bâtiments et des infrastructures de génie civil qu'ils sont destinés à supporter. Les sols contenant un taux d'argile élevé sont généralement instables, d'où vient l'intérêt de les stabiliser par ajout de déchets recyclés. La stabilisation des sols est un processus à moyen terme qui vise à améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques d'un sol, afin de lui donner une stabilité permanente à l'eau et au gel. Cela se manifeste, entre autres, par une nette rigidification du mélange après l'opération du compactage.

I.2. Définition des Sols instable

Un **sol instable** est une cause reconnue de l'apparition de fissures. Le phénomène de fissuration est assez récurrent en cas d'instabilité du sol. Cela signifie de manière générale, que le sol n'est adapté à la construction qu'il accueille, et qu'elle va inévitablement se détériorer si des actions ne sont pas menées pour stabiliser le terrain. En pratique, le sol est une combinaison d'organismes vivants, de matières organiques, d'eau, d'air, etc. Chaque terrain a ses spécificités propres en fonction de sa consistance, et va retenir plus ou moins l'eau ou l'air. Par conséquent, il définira ses propres mouvements [4].

I.2 Types de sol

Les sols varient en fonction de leur texture et de leur structure. La texture d'un sol dépend de la taille des particules qui le composent. En effet, un sol composé majoritairement d'argile forme une boule qui se tient dans la main alors qu'un sol fait de sable file plutôt entre les doigts. La texture du sol influence directement sa structure, sa teneur en nutriments, son humidité et sa capacité à drainer l'eau. On peut regrouper les sols en quatre grands types.

I.2.1 Sol sableux

IL contient surtout du sable; sol très poreux qui ne retient pas l'eau; sèche et se réchauffe en peu de temps. Il glisse entre les doigts en raison de l'absence de cohésion entre les particules; très sensible à l'érosion par le vent et au lessivage.



Figure I.1 Sol sableux

I.2.2 Sol limoneux

Contient surtout du limon; adhésion partielle des particules du sol qui se désagrègent en petits morceaux sous l'effet de l'environnement; porosité moyenne. Les particules relativement serrées permettant à l'air et à l'eau de circuler plus ou moins facilement; sujet à la formation superficielle d'une croûte sèche qui limite l'infiltration d'eau, tout en favorisant le ruissellement; très grande sensibilité à l'érosion par l'eau, surtout là où les pentes sont abruptes. c'est un matériau peu cohérent, il a une cohésion C généralement faible et elle est inverse à sa teneur en eau w , dans le domaine plastique, par ailleurs, il a un angle de frottement interne ϕ faible.



Figure I.2 Sol limoneux [5]

I.2.3 Sol argileux

Contient surtout de l'argile; sol lourd et compact dont les particules demeurent collées entre elles comme de la pâte à modeler; risque de compaction du sol si des masses lourdes (comme des camions) se retrouvent en surface; un sol compacté sera alors difficilement drainé; souvent désigné sous le nom de « glaise ». Il y'a peu de place pour la circulation de l'eau et de l'air; retient bien l'eau et les éléments nutritifs; sensibilité à l'érosion par le vent, car si la surface est sèche, cette couche superficielle peut être littéralement pulvérisée; tendance à être alcalin, c'est un matériau très cohérent, qui a une cohésion plus importante que celle du limon, mais en même temps, elle a un frottement interne très faible. Les caractéristiques mécaniques de l'argile sont très variables en fonction du temps comme pour le limon [1].



Figure I.3 Sol argileux [6]

I.2.4 Sol humifère

Contient surtout de la matière organique; particules foncées relativement lâches qui glissent entre les doigts; permet à l'eau de s'écouler facilement. Il peut retenir une grande quantité d'eau sans devenir collant comme le sol argileux; retient bien les engrais; peut être sensible à l'érosion par le vent.



Figure I.3 Sol humifère

I.3 Généralités les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption. . Lorsqu'elles renferment du calcaire, trois sous-classes sont définies entre le pôle argile et le pôle calcaire, en fonction de leur teneur en calcaire : argile calcaire, puis marne, et enfin calcaire argileux.

I.3.1 les minéraux des argiles

Les argiles sont des roches constituées d'une variété de minéraux très fins, plus ou moins bien définis, et la forme généralement aplatie. Ils sont constitués par des minéraux spécifiques dits: argileux, mais on trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phylliteux, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphe et des carbonates.

L'argile se rapporte à la terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines dont la taille supérieure est fixée à 2 μ m. Chargée négativement comme la smectite, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques. Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre [2].

I.3.2 Composition des sols argileux

Les sols que l'on rencontre dans la nature ont des dimensions de grains très variables. Généralement ces sols, à l'état naturel, sont un mélange de sable, d'argile ainsi que d'autres minéraux tels que l'alumine, les sulfures, les oxydes et les hydroxydes, les feldspaths, les carbonates, la matière organique, etc., chacun de ces minéraux jouant un rôle non négligeable dans les propriétés physico-chimiques du sol.

L'argile se forme le plus souvent par altération chimique des roches qui affleurent à la surface de l'écorce terrestre sous l'action des eaux. Le domaine privilégié de l'argile se trouve donc dans les zones superficielles, où elle est associée à des dépôts sédimentaires, provenant des

roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires rencontrées dans le substratum régional. Les argiles ont trois origines initiales.

- l'héritage, c'est l'apport de minéraux formés ailleurs sur le continent et transportés soit par l'eau, soit par le vent. Au cours du transport, les argiles déjà formées ne subissent que de faibles modifications de structure et de composition. En général, elles arrivent ensuite dans la mer ou dans les bassins lacustres.
- la transformation, les minéraux argileux conservent certains caractères structuraux des matériaux originels, mais ils subissent au cours du transport des transformations qui peuvent être importantes et qui les font passer d'un type minéralogique à un autre par élimination de certains cations ou par fixation d'ions.
- les néogènes, les minéraux argileux sont dans ce cas formés par précipitation d'ions en solution (Si^{4+} , Al^{3+} et K^+) susceptibles de réagir entre eux quand ils sont mis en contact par diffusion ou mélange. Les composés ainsi formés sont stables dans les conditions physico-chimiques du milieu où ils ont pris naissance (Fig 1.4) [1].

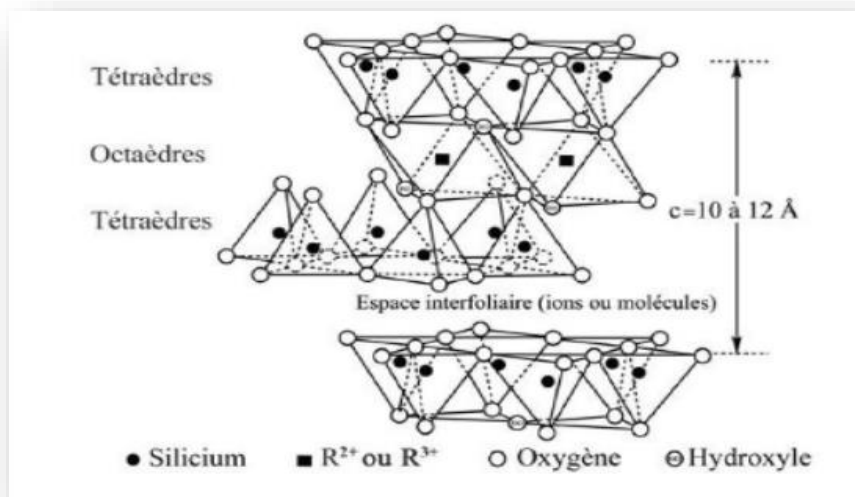


Figure 1.4 Représentation schématique des deux types de couches octaédriques : (a) = trioctaédrique ; (b) = dioctaédrique [7]

I.3.3 Les Familles des Argiles

I3.3.1 La Kaolinites

La kaolinite est un minéral d'argile de silicate stratifié qui se forme à partir de l'altération chimique du feldspath ou d'autres minéraux de silicate d'aluminium. La kaolinite a une faible capacité de retrait-gonflement et une faible capacité d'échange de cations, ce qui la rend idéale pour de nombreuses applications industrielles.

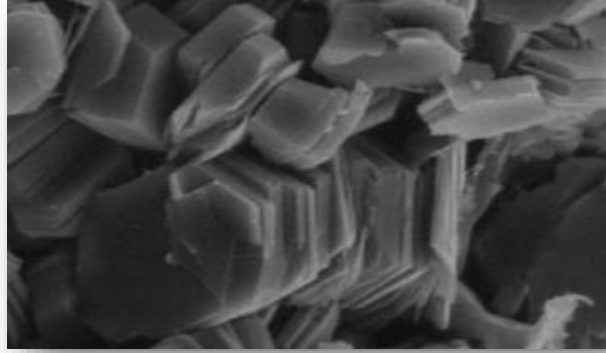


Figure 1.5 La Kaolinite

La kaolinite est un minéral phyllosilicaté commun. Il donne son nom au groupe Kaolinite, dont les membres appartiennent également au groupe général plus large connu sous le nom d'argiles. La structure de la kaolinite est composée de feuilles de silicate (Si_2O_5) liées à des couches d'oxyde/hydroxyde d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{OH})_4$) appelées couches de gibbsite.

La kaolinite est de loin la plus courante et la plupart des gisements d'argile contiennent au moins un peu de kaolinite. En fait, les dépôts d'argile seront souvent presque 100 % purs de kaolinite. Elle est le plus souvent sous forme de masses compactes non façonnées. Les cristaux sont microcristallins sous forme de minuscules grains et plaques. Les cristaux sont rarement visibles à l'œil nu [8].

La kaolinite est très friable, et peut être coupée et moulée, surtout lorsqu'elle est mouillée. Elle peut également proposer une odeur d'argile lorsqu'elle est mouillée ou

La kaolinite est importante pour la production de céramique et de porcelaine. Il est également utilisé comme charge pour la peinture, le caoutchouc et les plastiques car il est relativement inerte et de longue durée. Ainsi, une kaolinite idéale est caractérisée par un empilement de feuillets où tous les sites sont libres Figure 4.1 [8].

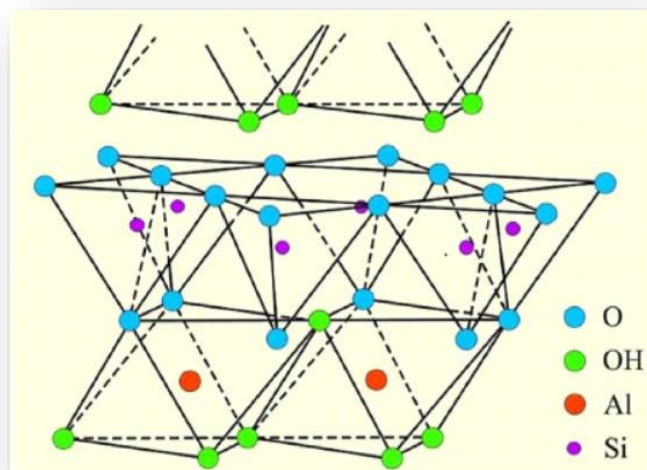


Figure 1.6 Représentation schématique de la structure de kaolinite [11]

I.3.3.2. L'illite

L'illite est un minéral argileux micacé commun de nombreux sols et substrat, produit de dégradation de la muscovite en montmorillonite. Une illite est une argile non expansive et un phyllosilicate ou un silicate stratifié. L'illite est de couleur gris-blanc à blanc-argenté, gris-vert. Elle est un cristal prismatique, comme le mica et d'autres phyllosilicates. Structurellement l'illite est assez similaire à la muscovite ou à la séricite avec un peu plus de silicium, de magnésium, de fer et d'eau; et un peu moins d'aluminium tétraédrique et de potassium interlaminaire. Sa structure est un sandwich 2 : 1 de couches de tétraèdres de silice (T) - alumine octaèdre (O) - silice tétraédrique (T). L'espace entre cette séquence de couches TOT est occupé par des cations potassium faiblement hydratés qui sont responsables de l'absence de gonflement.

La formule chimique est $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$, mais il y a aussi une substitution ionique considérable (isomorphe). Il est produit sous la forme d'agrégats de petits cristaux monocliniques gris à blanc.

L'illite est un produit de l'altération ou de l'altération de la muscovite et du feldspath dans un environnement d'altération hydrique et thermique (hydrothermale). Elle peut être un composant de la séricite. Elle est commune dans les sédiments, les sols et les roches sédimentaires argileuses (telles que les schistes et les grès) ainsi que dans certaines roches métamorphiques de faible qualité. (Fig.I.7)



Figure I.7 L'illite (grains concassés)

L'illite est un minéral argileux de type 2/1. Cela signifie qu'un feuillet élémentaire d'illite est formé de trois couches (tétraédrique, octaédrique, tétraédrique: TOT) :

une couche octaédrique (O) située tout au centre du feuillet ; $Al(OH)_5O$: 7 atomes pour 6 sommets + l'aluminium au centre. Les hydroxydes et l'oxygène étant partagés entre les différents octaèdres qui composent la couche et deux couches tétraédriques (T) qui recouvrent de part et d'autre la couche octaédrique centrale ; SiO_4 : 5 atomes pour 4 sommets + le silicium au milieu. Les oxygènes étant partagés entre les différents tétraèdres qui composent la couche.

L'espace interfoliaire est occupé par des ions potassium (K^+) peu hydratés, responsables du collapse des feuillets argileux et de l'absence de propriété de gonflement de l'illite ou des micas (biotite, muscovite). (Fig I.8).

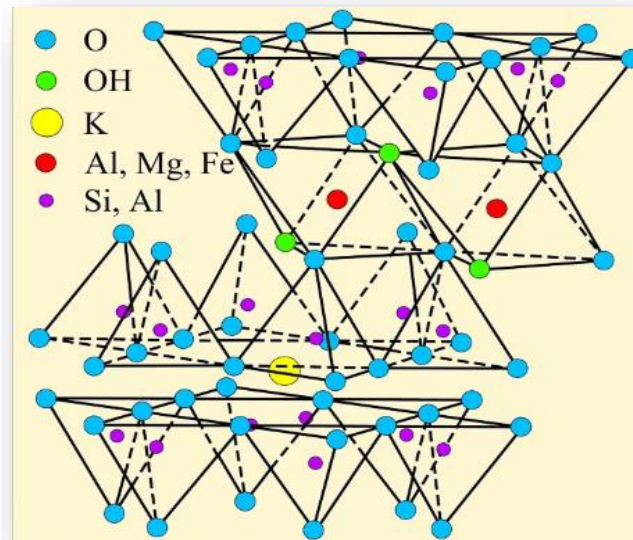


Figure I.8 Représentation schématique de la structure de l'illite [9]

I. 3.3.3 Montmorillonite

Le nom vient de la localité française de Montmorillon, dans la Vienne où existait un filon aujourd'hui épuisé et de la localité de Sommières, dans le Gard. Des gisements de montmorillonite existent aux États-Unis (Utah, Wyoming, Texas).

La montmorillonite est le constituant principal des argiles gonflantes, qui ont la propriété de créer de larges fentes de dessiccation en période de sécheresse. Ces fentes peuvent être profondes d'un mètre et assurent un travail du sol en profondeur.

La montmorillonite est un minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté, de formule $(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n H_2O$, et appartenant au groupe des smectites, de la famille des phyllosilicates. Elle est aussi appelée terre de Sommières.



Figure I.9 La montmorillonite [10]

La montmorillonite est une argile de type 2/1, dite encore TOT (pour tétraèdre/octaèdre/tétraèdre). Cela signifie qu'un feuillet de montmorillonite est formé de trois couches :

une couche octaédrique $\text{Al}(\text{OH})_5\text{O}$: 7 atomes pour 6 sommets + l'aluminium au centre. Les OH^- et l'oxygène étant partagés entre les différents octaèdres qui composent la couche.

et deux couches tétraédriques qui recouvrent de chaque côté la couche octaédrique à sa base; SiO_4 : 5 atomes pour 4 sommets + le silicium au milieu. Les atomes d'oxygène étant partagés entre les différents tétraèdres qui composent la couche.

Les imperfections dans le cristal sont compensées par des cations inter-foliaires qui assurent la neutralité électrique du minéral.

Une des propriétés les plus remarquables des montmorillonites est leur capacité de gonflement résultant de l'entrée d'eau dans l'espace entre les feuillets. Une montmorillonite dispersée dans l'eau donne très facilement une suspension colloïdale stable. Leurs propriétés de plasticité et d'imperméabilité sont également très recherchées dans l'industrie.

Cette aptitude au gonflement, et inversement au retrait (collapsus des feuillets argileux, lors de la dessiccation) pose des problèmes notables sur le plan de la géotechnique, en provoquant des déplacements parfois importants aux fondations au gré des variations d'humidité du sous-sol.

En présence de sels (comme du chlorure de sodium ou des sels de calcium), la montmorillonite ne présente pas de propriétés de gonflement. D'autre part, une suspension colloïdale de montmorillonite qui a obtenu son gonflement par préparation dans de l'eau douce perd ses propriétés et flocule en cas de contamination par du sel [11].

Parmi les utilisations principales : adjuvant dans les charges minérales, échangeur de cations, adjuvant de filtration, sables de fonderie pour la réalisation des moules, agent de viscosité pour des dispersions, réalisation d'ouvrages de travaux publics (principalement exécution des excavations dites à parois moulées et creusement des tunnels par tunneliers à pression de boue), préparation des fluides de forage (forages d'eau, forages géothermiques, forages pétroliers) et des utilisations pharmaceutiques. La montmorillonite est employée principalement pour ses propriétés d'adsorption sur les muqueuses. On l'utilise alors sous forme de suspension dans de l'eau douce.

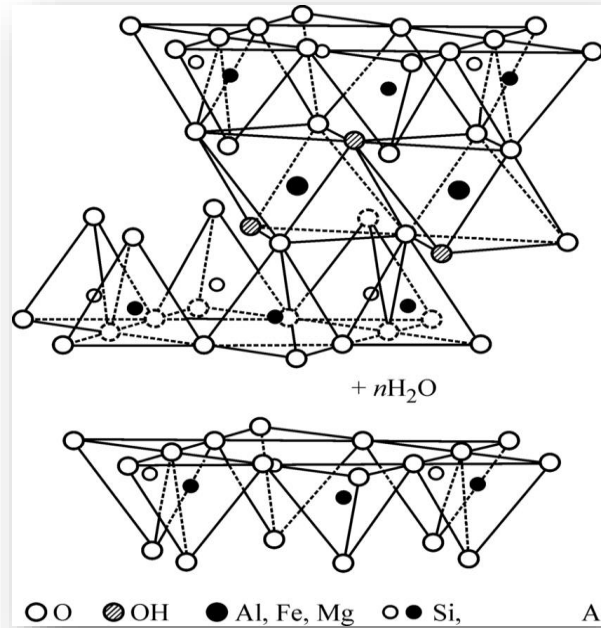


Figure I.10 Structure de montmorillonite [12]

I. 3.3.4 Smectites

Les minéraux de smectite se trouvent couramment dans roches sédimentaires et sont utilisés comme indicateurs des environnements passés et des conditions de dépôt. Ils peuvent également être utilisés pour dater des événements géologiques et reconstituer des paléoenvironnements [13].



Figure I.11 Les smectites

Smectite est un groupe de minéraux phyllosilicates qui se caractérisent par une structure en couches et la capacité de gonfler lorsqu'ils sont exposés à l'eau. Le groupe minéral comprend une variété d'espèces, notamment la montmorillonite, la nontronite, la saponite et l'hectorite.

Les minéraux de smectite sont formés à partir de la altération de cendres volcaniques ou d'autres matériaux volcaniques, et se trouvent couramment dans les sols, les sédiments et roches. Ils sont importants pour une variété d'applications, telles que les fluides de forage, le traitement des eaux usées et comme catalyseurs dans les réactions chimiques.

Les smectites sont structurées selon le même schéma que les illites, soit trois couches. La formule chimique des smectites est $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{22}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{H}_2\text{O})_n$. L'espace inter foliaire est de 14 à 17 Å. Dans ce groupe, les feuillets sont minces et peu reliés entre eux, d'où la possibilité d'association avec l'eau et la matière organique dans l'espace inter foliaire, d'où le terme d'argile gonflante.

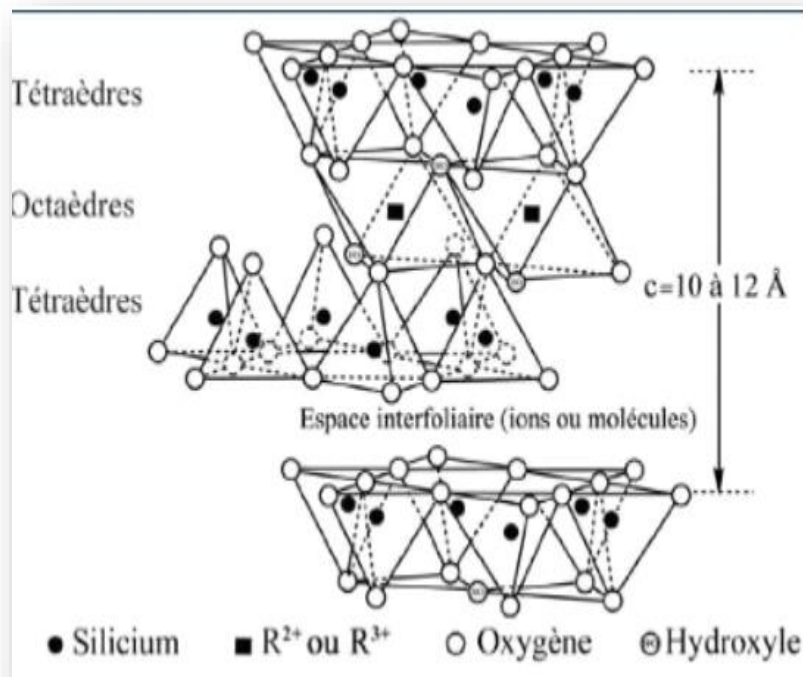


Figure I.12 Structure d'un feuillet de smectite

Les minéraux de smectite peuvent gonfler lorsqu'ils sont exposés à l'eau en raison de la présence de molécules d'eau entre les couches. Cette propriété est importante pour la stabilité du sol, la rétention d'eau et dans diverses applications industrielles et environnementales.

I.3.3.5 Bentonite

La bentonite est une argile colloïdale dont le nom vient de Fort Benton dans le Wyoming aux États-Unis. Connue aussi sous le terme de *terre à foulon*, elle peut être considérée comme une smectite, étant essentiellement constituée de montmorillonite $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_n$ (80 %) qui est une argile ce qui explique sa capacité de rétention d'eau car la montmorillonite est un type de smectite particulièrement gonflant. le feldspath, la pyrite ou la calcite.

Les bentonites se forment généralement dans un environnement sédimentaire marin à basse énergie, à partir de cendres volcaniques qui se sont accumulées dans l'eau et ont formé des couches argileuses après avoir perdu la plus grande partie de leur silice (désilification).

Elle possède diverses propriétés. Notamment, elle absorbe les protéines, réduit l'activité des enzymes. Les boues bentonitiques (contenant une fraction de bentonite) sont utilisées comme boues de forage dans les travaux de fondations, de parois moulées, du fait de laisser rapidement et facilement la place au béton coulé à leur place et sur lequel elles flottent en raison de la différence de densité. Elles peuvent être ajoutées au compost.

Il existe deux types de bentonite en Algérie:

- **La bentonite sodique** appelée aussi bentonite de Wyoming ou bentonite de l'ouest. Sa teneur en $\text{Na}_2\text{O} > 2\%$ lui confère un indice de gonflement élevé entre 15 et 20 et cette bonne propriété est mise en valeur dans les mastics pour l'enfouissement des matières polluantes dans les sols et pour la fabrication des boues de forage. Cette propriété est mise en valeur dans les mastics, ou encore pour construire le revêtement étanche des décharges de déchets destinées à l'enfouissement de matières polluantes dans le sol. Elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et la recherche géothermique.

- **La bentonite calcique** (pascalite), bentonite à base de calcium ou bentonite du sud qui est la plus courante et qui ne possède pas de propriétés de gonflement, mais sa teneur élevée en ion échangeable en particulier Mg^{2+} , lui confère une capacité d'adsorption très élevée, d'où son utilisation dans la production de terres décolorantes., a des applications parapharmaceutiques dont les résultats restent à prouver, notamment dans le domaine du système digestif.

Le débouché le plus important de la bentonite se situe dans les techniques du génie civil, particulièrement dans l'étanchéité des édifices, la construction de digues, la pose de canalisations, l'édification de tunnels, l'injection de vides souterrains (ex. : carrières de Paris) que l'on souhaite combler, la réalisation de fondations spéciales (parois moulées, barrettes, pieux)... La bentonite est conditionnée pour cet usage en bâtons (ou granulés) et fournit une obturation hydrologique sûre. Les bâtons sont constitués de 99 % de bentonite et d'environ 1 % de fibres synthétiques de remplissage.

La bentonite est utilisée comme liant pour produire des granulats de minerais de fer⁴

La bentonite est également utilisée dans les techniques de géothermie (pompes à chaleur) pour empêcher les tuyaux de geler. Elle sert de produit d'étanchéité dans les étangs artificiels. Elle peut être employée comme déshydratant et comme additif alimentaire (anti-agglomérant dans les colorants, au maximum 5 %⁵). Son numéro E est le 558.

On l'utilise dans l'industrie alimentaire pour clarifier les vins, les bières, les jus de fruits et le beurre de cacao lors de leur fabrication.

Des essais sont effectués pour utiliser la bentonite comme protection artificielle dans le stockage géologique des déchets radioactifs.

Elle est également utilisée comme fluide de forage servant à la tenue des parois et à l'évacuation des matières forées et en obturateur d'urgence lorsqu'un forage traverse accidentellement le plancher d'un aquifère et que des pertes non désirées importantes ont alors lieu dans les terrains sous-jacents[14].

Elle sert de liant dans la fabrication de moules en sable pour la fonderie (afin de coller les grains de sable entre eux).

On l'utilise également dans la conception de feux d'artifice et de divers engins pyrotechniques afin de sceller ces derniers en la compactant.

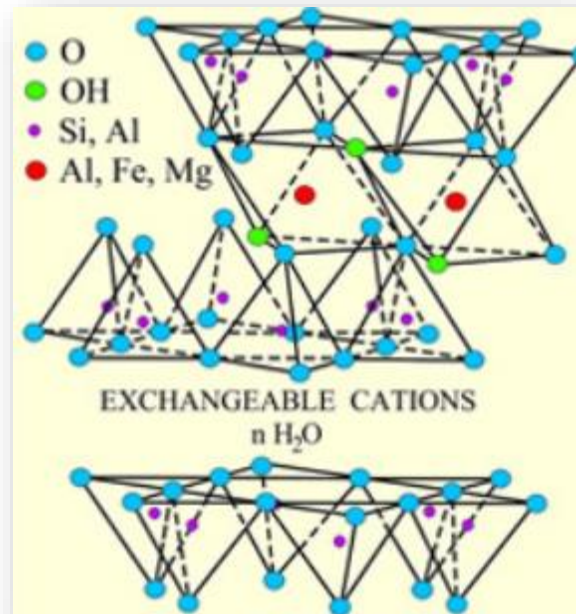


Figure I.13 Structure d'un feuillet de bentonite

▪ La bentonite en Algérie

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent à l'ouest algérien. On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Synthèse Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes onctueuse au toucher, sa teinte est blanche, grise ou légèrement teinte de jaune. Elle provient de la dévitrification des couches volcaniques sous l'influence des eaux à réaction alcaline ou acide.

En plus de la montmorillonite, cette terre peut contenir d'autres minéraux argileux (kaolinite, illite,...) ainsi que des impuretés sous forme de gypses, de carbonates,...etc.[14].

Tableau I.1 Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite d'Algérie

Bentonites	Surface spécifique (m ² /g)	pH	Cation échangeable (még/100g)			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Mostghanem	65	9.1	46,7	8,1	7,8	6
Maghnia	80	6.2	30,6	12,8	36,2	9,5

I. 3.3.6 Chlorite

Les chlorites sont les argiles vertes pour des emplois médicaux divers. Les feuillets sont étroitement reliés les uns aux autres par des groupements hydratés de magnésium, d'aluminium et de fer. L'espace inter foliaire atteint 14 Å; Leur formule générale est (Fe,Mg,Al)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH)₈.

La chlorite est un minéral communément associé au grade métamorphique des schistes verts, accompagné de l'actinote et l'épidote. Dans les roches ignées, la chlorite est un minéral secondaire qui se forme durant l'altération des pyroxènes, amphiboles, biotite et grenat. Ce minéral vert est responsable de la coloration verte de plusieurs roches ignées et métamorphiques, dont les schistes verts.



Figure I.14 chlorite verte à texture micacée[15]

I.3.3.7 Vermiculite

La **vermiculite** est un minéral naturel de la famille des phyllosilicates de formule chimique $(Mg,Ca)_{0,7}(Mg,Fe,Al)_6(Al,Si)_8O_{22}(OH)_4 \cdot 8H_2O$ formé par l'hydratation de certains minéraux basaltiques, et souvent associé dans la nature à l'amiante. Il possède des propriétés d'expansion sous l'effet de la chaleur (exfoliation), et est principalement utilisé industriellement sous forme exfoliée.



Figure I.15 Vermiculite

Les vermiculites tirent leur nom de leur aspect de petits vers, après chauffage (vermiculas, « petit vers » en latin). L'eau contenue entre leurs feuillets peut être éliminée par chauffage à plus de 300°C. L'espace interfoliaire se réduit alors de 14 à 10 Å. Ce sont les argiles utilisées dans le bâtiment comme isolants.

La vermiculite possède une structure argileuse monoclinique de type 2:1, avec deux feuillets de type tétraédrique (T, tétraèdre de silice, SiO_2) entourant chaque feuillet de type octaédrique (O, octaèdre d'alumine ou de gibbsite, Al_2O_3). Sa structure est de type TOT.

Elle possède une capacité d'expansion ou de contraction moyenne et est considérée comme une argile à faible capacité d'expansion. Sa dureté Mohs est de 1,5 à 2 et sa densité de 2,3 à 2,7. Sa capacité d'échange cationique est élevée, de l'ordre de 100-150 meq/100 g. Les argiles de type vermiculite ont une structure de micas au sein desquels les ions K^+ situés entre les feuillets ont été remplacés par des cations Mg^{2+} et Fe^{2+} .

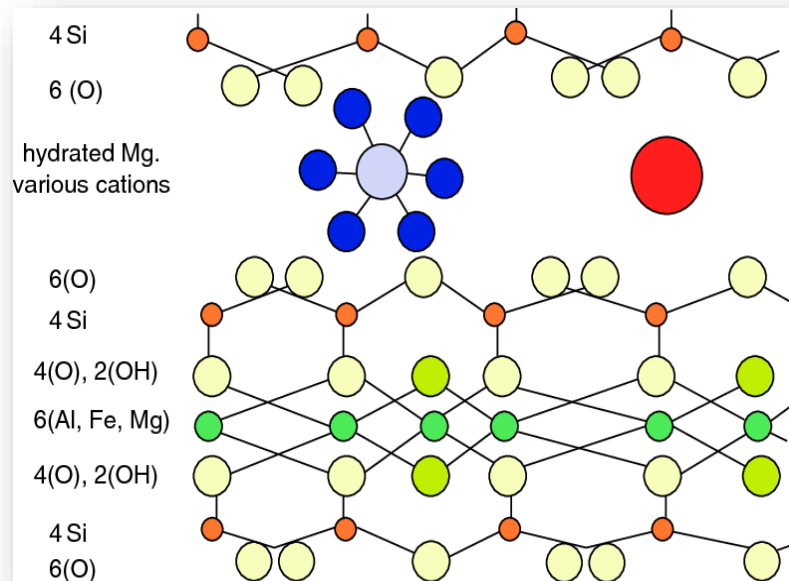


Figure I.15 Structure d'un feuillet de Vermiculite [16]

Tableau I.2 Caractéristiques des argiles

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (μm)	Epaisseur d'une particule (μm)	Surface spécifique en m^2/g	C.E.C. en meq/100g
Kaolinite	1:1	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 - 20	3 - 15
Illite	2:1	1 - 10	0,1 - 1	0,003 - 0,01	65 - 100	10-40
Montmorillonite (smectite)	2:1	1	0,1	0,001	700 - 840	80 - 150
Chlorite	2:1:1	1	0,1	0,005	800	10-40

I.4 Classification des sols

Afin de trouver des solutions aux problèmes géotechniques, il est essentiel de définir un sol et de le classer, c'est-à-dire de le placer dans un groupe comportant des caractéristiques similaires.

Il y a de nombreuses classifications à travers le monde. En règle générale, une simple identification visuelle permet de désigner le matériau : marne bleue, argile jaune, sable fin,...

Suivant les propriétés physiques et chimiques des grains ; on distingue trois grands types de sols, chacun est classifié par un ou plusieurs systèmes de classification :

- Classification pour les sols grenus, où plus de 50% des éléments en poids sont supérieurs à 80 μm ;
- Classification pour les sols fins, où plus de 50% des éléments en poids sont inférieurs à 80 μm ;
- Classification pour les sols organiques, dont la teneur en matière organique dépasse les 10% [17].

I.4.1 Classification des sols grenus

Il existe plusieurs systèmes de classification des sols dans différents pays:

- Classification **U.S.C.S** (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande ;
- Classification **L.C.P.C** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) identique à la classification **U.S.C.S** ;
- Classification **A.A.S.H.O** (American Association State Highways Officials);
- Classification **G.T.R** (Guide des terrassements routier).

I.4.1.1 La classification L.C.P.C [3]

La classification (L.P.C.) s'appuie essentiellement sur l'analyse granulométrique et sur les caractéristiques de plasticité de la fraction fine, complétée par des essais très simples (couleur, odeur, effets de l'eau, etc.). Lorsque le pourcentage de la fraction inférieure à 0,08 mm est compris entre 5 % et 12 % ; on utilise un double symbole

- pour les graves : Gb-GL, Gb-GA, Gm-GL, Gm-GA ;
- pour les sables : Sb-SL, Sb-SA, Sm-SL, Sm-SA.

La classification LPC classe les sols grenus d'après leurs granulométries et, les sols fins d'après l'abaque de Casagrande.

Tableau I.4. Classification L.P.C. des sols grenus[18]

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 35 \%$	A1 à A4 selon VBS ou Ip
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35 \%$	B1 à B6 selon VBS ou Ip et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\max} > 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 12 \%$ ou passant à $80 \mu\text{m} \leq 12 \%$ + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS, Ip et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	

I.4.1.2 Système de classification Unified Soil Classification System (USCS) 18]

Le système de classification unifié est la base de la majorité des autres systèmes de classification postérieurs, tel que LPC. Ce système est applicable aux projets de barrages, aux fondations et aux pistes d'atterrissage, etc. Le principe de base de ce système consiste à classer les sols à gros grains d'après leurs granulométries et, les sols à grains fins d'après leur plasticité.

Tableau I.5 Classification USCS des sols d'après la grosseur des grains. 18]

Composante de sol			Symbole	Grosseur (mm)
Blocs			/	> 300
Cailloux			/	[300 – 75[
Sols à grains grosiers	Gravier	Grossier	G	[75 – 19[
		Fin		[19 – 4,75[
	Sables	Grossier	S	[4,75 – 2,0[
		Moyen		[2,0 – 0,425[
	Fin		[0,425 – 0,075[
Sols à grains fins	Silts		M	< 0,075
	Argiles		C	< 0,002
Sols organiques			O	/
Tourbes			Pt	/

I.4.1.3 Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)

La classification GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme) proposent un classement des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Cette méthode s'appuie sur les retours d'expériences des chantiers de terrassement et de conception d'ouvrages en terre dans le domaine des routes et autoroutes. Dans sa première version de 1992, le guide GTR avait remplacé l'ancienne « Recommandation pour les terrassements routiers » (RTR) éditée en 1976. Le guide GTR a fait l'objet de mises à jours et de modifications mineures dans sa deuxième version rééditée en 2000. Ce guide est aujourd'hui appliqué par l'ensemble de la profession des travaux publics

On distingue 3 familles :

- Les sols de classe : A, B, C et D
- Les matériaux rocheux de classe : R
- Les sols organiques et sous-produits industriels de classe : F

Les 4 classes de sols (famille 1) :

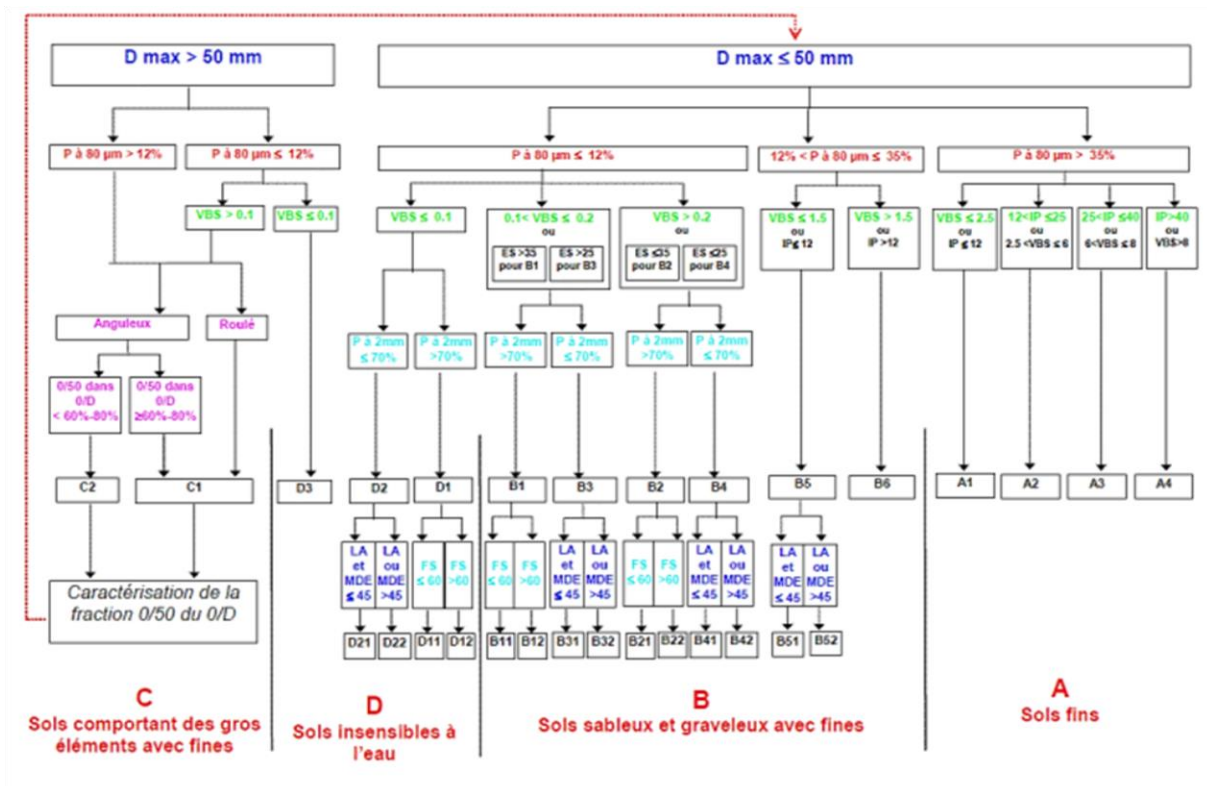
Classe A : sols fins

Classe B : sols sableux et graveleux avec fines

Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments

Classe D : sols insensibles à l'eau [3].

Tableau I.6 La classification GTR pour les sols A, B, C et D. [3].



I.4.1.4 Système de classification AASHTO T88 - 70 (Anciennement HRB)

Les système de l'American Association of State Highway and Transportation Officials est mondialement utilisé pour la construction des routes. On entre dans la table de la gauche à droite et d'en haut en bas, jusqu'à rencontrer le premier groupe et sous groupe qui correspond en accord avec les données de granulométrie et de plasticité.

Tableau I.7 Classification des sols de l'AASHTO [3].

Classification générale	Matériaux granulaires 35% ou moins passent au tamis H200						Matériaux argille-limon + 35% passent au tamis H200				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Classification par groupes	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamisage % qui passe											
2.00 mm (N. 10)	50 max.	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.425 mm (N. 40)	30 max.	50 max.	51 min.	----	----	----	----	----	----	----	----
0.075 mm (N. 200)	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Fraction qui passe tamis N40											
Limite Liquide	----	----	----	40 max.	41 max.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Indice de plasticité	6 max.		N.P.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Matériaux le + commun	Fragment roche Grave sable		Sable fin	Graves et sables Argileux - Limoneux				Sols limoneux		Sols argileux	
Comportement général comme sous-couche	Excellent à Bon						Régulier à mauvais				

I.4.2 Classification des sols fins

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité de Casagrande. Les mots argile et limon sont liés aux valeurs des limites d'Atterberg (plasticité) et non à des classes granulométriques. Il s'agit donc d'une classification basée sur la nature minéralogique des particules de sol et non de leur dimension. Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité W_L et pour ordonnée l'indice de plasticité I_p , on définit quatre grandes catégories principales.

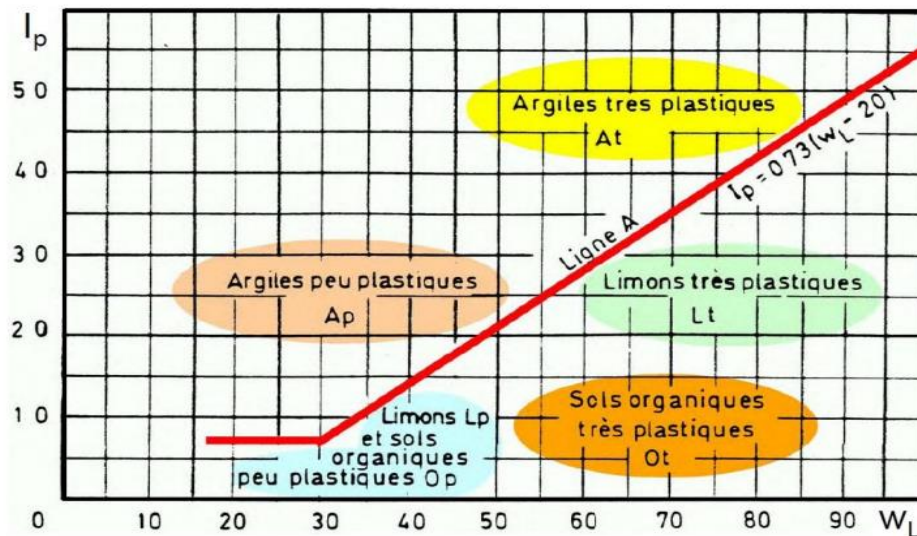


Figure I.16 Abaque de plasticité de Casagrande (simplifiée). [3].

I.4.3 Classification des sols organiques (MO>3%)

Les caractéristiques utilisées pour la classification des sols organiques sont :

- La teneur en matières organiques : % MO · Sol faiblement organique (fo) pour $3\% < MO < 10\%$ · Sol moyennement organique (mo) pour $10\% < MO < 30\%$ · Sol fortement organique (to) pour $MO > 30\%$
- Les limites d'Atterberg pour les sols « fo » utilisent le diagramme de Casagrande en rajoutant le terme (fo).
- Les résultats du test d'humification Von Post pour les sols « mo » et « to » donnent 10 classes de sols organiques de H₁ à H₁₀ [19].

Tableau I.9 Classification des sols organiques.

Teneur en matière organique	Désignation géotechnique		
0-3 (%)	Sol inorganique	/	/
3-10 (%)	Sol faiblement organique	FO	vase
10-30 (%)	Sol moyennement organique	mO	Sol tourbeux
>30 (%)	Sol très organique	TO	Tourbe

I.5 Les sols à problème

Les sols problématiques sont des types de sols qui présentent des caractéristiques particulières pouvant poser des défis lors de la construction d'ouvrages. Voici les principaux types de sols problématiques :

- Les sols dispersifs : ce sont des sols argileux qui se dispersent dans l'eau, fragilisant les ouvrages en terre comme les barrages [20].
- Les sols affaissables : ce sont des sols qui subissent un tassement important et soudain lorsqu'ils sont mouillés, même sans charge appliquée. Ils sont caractérisés par une structure

ouverte et métastable, un indice des vides élevé, une faible densité sèche et une sensibilité élevée à l'eau [21][22][20].

- Les sols gonflants : ce sont des sols argileux qui gonflent de manière importante au contact de l'eau, pouvant endommager les fondations des bâtiments.
- Les sols liquéfiables : ce sont des sols sableux saturés qui se transforment en boue liquide sous l'effet de sollicitations dynamiques comme un séisme [20].
- Les sols sableux : les sables purs sont des sols très perméables et peu portants qui nécessitent souvent un traitement pour être utilisés en fondations [23].

I.5.1 Les sols gonflant

Les sols argileux peuvent évoluer selon les fluctuations de l'eau du sol. Le manque d'eau provoque un tassement irrégulier du sol en surface lors des périodes de sécheresse : on parle de retrait. En revanche, une nouvelle injection d'eau dans ces terrains entraîne un phénomène de dilatation.

En outre, le glissement représente l'un des défis des sols fins, car il représente un mouvement généralement lent sur une pente, le long d'une surface de rupture (cisaillement) visible, d'une masse de terrain cohérente, d'un volume et d'une épaisseur variable.

I.5.1.1 Phénomène de tassement par retrait-gonflement

Un tassement se produit lorsque la résistance du sol ne permet plus de supporter le passage des engins sans dégrader profondément la qualité structurale du sol. Cette qualité dépend du maintien de la porosité du sol. Les pores sont créés par le travail du sol, la présence de micro fissures. Le retrait par dessiccation des sols argileux lors d'une sécheresse prononcée et/ou durable produit des déformations de la surface du sol (tassements différentiels). Il peut être suivi de phénomènes de gonflement au fur et à mesure du rétablissement des conditions hydrogéologiques initiales ou plus rarement de phénomènes de fluage avec ramollissement.

La nature du sol est un élément prépondérant : les sols argileux sont a priori sensibles, mais en fait seuls certains types d'argiles donnent lieu à des variations de volume non négligeables. La présence d'arbres ou d'arbustes au voisinage de constructions constitue un facteur aggravant en raison de l'absorption de l'eau du sol par les racines. Ce phénomène de retrait-gonflement des argiles engendre chaque année des dégâts considérables. La grande majorité des sinistres concerne les maisons individuelles. (Fig I.17).

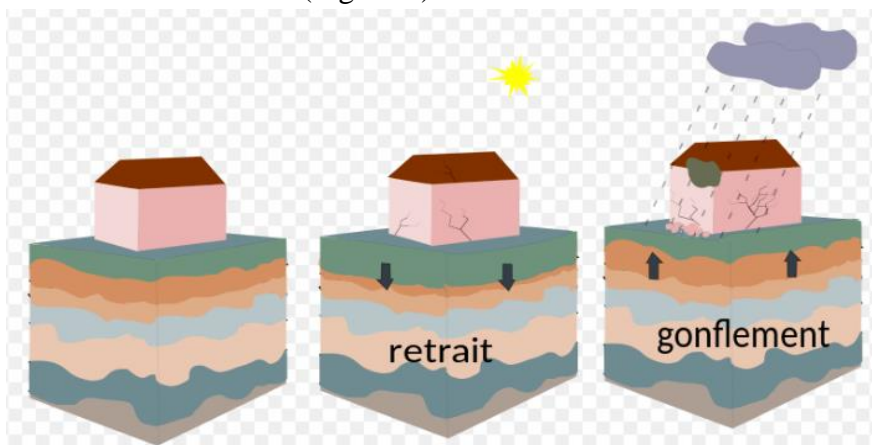


Figure I.17 Tassement par retrait et gonflement[24]

I.5.1.2 Phénomène de glissement

Un glissement de terrain peut être défini comme le mouvement vers le bas d'une pente d'une masse de sols le long d'une surface de rupture, qui s'amorce dans un talus sous l'effet de la gravité (figure 3). La surface de rupture est celle le long de laquelle glisse la masse de sols. Un glissement de terrain peut constituer une menace à la sécurité des personnes et des biens. Selon leur type, les glissements de terrain peuvent présenter des caractéristiques très différentes et atteindre des dimensions variables. Ceux qui surviennent dans les sols argileux sont les plus préoccupants car ils sont les plus fréquents et peuvent atteindre de très grandes dimensions. Les glissements fortement rétrogressifs se produisent uniquement dans les sols argileux. Ils affectent non seulement le talus, mais aussi des bandes de terrain de dimensions importantes à l'arrière du sommet du talus (Fig. I.18). Leurs dimensions peuvent atteindre plusieurs dizaines, et parfois plusieurs centaines de mètres, et ce, en quelques minutes seulement [25].



Figure I.19 Glissement fortement rétrogressif, Saint-Jude, 2010

I.5.2 Les sols affaissables

Ce sont des sols qui subissent un tassement important et soudain lorsqu'ils sont mouillés, même sans charge appliquée. Ils sont caractérisés par :

- Une structure ouverte et métastable [26][27][28].
- Un indice des vides élevé.
- Une faible densité sèche .
- Une porosité élevée .
- Une sensibilité élevée à l'eau .
- De faibles liaisons interparticulaires [29].

Il existe deux principaux types de sols affaissables :

1. Les sols faits par l'homme et compactés du côté sec de l'optimum, comme les remblais routiers, les barrages en terre, etc.[28][29].
2. Les sols naturels de structure métastable, comme les loess, qui se sont déposés géologiquement récemment[30].

Pour identifier les sols affaissables, on peut utiliser des critères basés sur les propriétés fondamentales comme les limites d'Atterberg. Un sol est susceptible de s'affaisser si son indice de plasticité $IP \leq 20$ et sa limite de liquidité $15 \% \leq wL \leq 35 \%$. L'affaissement devient très probable si son indice de maniabilité $Iw \leq 1$ [27].

L'édification d'ouvrages sur ces sols nécessite un traitement, par exemple par ajout de chaux [26] ou de ciment[31], pour améliorer leur portance et réduire les risques d'affaissement.



Figure I.20 Une route affaissée en Mayenne.

I.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire une revue générale des connaissances disponibles dans la littérature sur les sols et en particulier les argiles en particulier les différents types d'argile et leurs liaisons structurales. Les sols argileux présentent un risque majeur pour les habitations en raison du phénomène de retrait-gonflement, qui est lié aux conditions météorologiques et peut entraîner des mouvements du sol. En ce qui concerne les sols affaissables, qui sont généralement des combinaisons d'argile et de sable de faible densité, ils sont sensibles à l'eau et caractérisés par une faible force de liaison inter particulaire. Cependant, Phénomène de gonflement, glissement et tassement sont les principaux problèmes rencontrés. Pour prévenir ces risques, il est important de bien caractériser la nature et les propriétés des sols en place,

Références bibliographiques du premier chapitre

[1] DJEMILI M Rafik .2021.modification des proprietes d'un sol argileux par ajouts de dechets de marbre,Mémoire de Master En Genie Civil Université Badji Mokhtar Annaba.

[2] Mansouri F/ Z et Fatimetu M/L 2018. Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile d'Adrar ,Mémoire De Master En Génie Civil Université Ahmed Draia Adra).

[3]http://ressources.unit.eu/cours/geotechnique_routiere/3_ClassificationSols/co/Contenu_1_ClassificationMateriaux.html.

[4]<https://opengroupe.fr/fissure-sol-instable/#:~:text=C'est%20quoi%20un%20sol,men%C3%A9es%20pour%20stabiliser%20le%20terrain.>

[5] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-types-de-sols-s1330>

[6]https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Agriculture/articles-Wikipedia/Argile_Wikipedia-Fr.pdf

[7]<https://www.memoireonline.com/06/15/9140/Argile-et-mineraux-argileux-proprietes-physico-chimiques-et-proprietes-et-proprietes-collo.html>

[8] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/5186/kaolinite>

- [9] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Illite>
- [10] <https://www.mindat.org/min-2821.html>
- [11] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite>
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structure-of-montmorillonite_fig1_225318231
- [13] <https://fr.geologyscience.com/min%C3%A9raux/silicates-min%C3%A9raux/smectite/>
- [14] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bentonite>
- [15] <https://cours.polymtl.ca/PBedard/glq1100/mineraux/chlorite/chlorite.html>
- [16] https://www.researchgate.net/figure/Structure-scheme-of-vermiculite-Reproduced-with-permission-from-Ref-143_fig13_323386920
- [17] <file:///C:/Users/2022/Downloads/Activit%C3%A9%202.4%20%20Classification%20des%20sols.pdf>
- [18] https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/Introduction_a_la_MDS.pdf
- [19] https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/Introduction_a_la_MDS.pdf
- [20] <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/881/1/m%C3%A9moire.pdf>
- [21] https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/AleaEtRisquesNaturelsPartie_CH7Partie2.pdf
- [22] <https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/1996/04/geotech1996077p69.pdf>
- [23] <https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/1999/01/geotech1999086p53.pdf>
- [24] <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/12324/1/Th%C3%A8se%20%20DoctoratF.pdf>
- [25] https://fr.wikipedia.org/wiki/Tassement_du_sol
- [26] https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_terrains_types_causes.pdf
- [27] <https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/1996/04/geotech1996077p69.pdf>
- [28] <https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/1999/01/geotech1999086p53.pdf>
- [29] https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/AleaEtRisquesNaturelsPartie_CH7Partie2.pdf
- [30] <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/12324/1/Th%C3%A8se%20%20DoctoratF.pdf>
- [31] <https://trid.trb.org/view/999924>

Chapitre II : Les méthodes d'amélioration des sols médiocres

CHAPITRE II : LES METHODES D'AMELIORATION DES SOLS MEDIOCRES

II.1 Introduction

Construire sur des **sols médiocres** peut être un défi, mais avec les bonnes techniques de stabilisation, il est possible d'ériger des structures solides et durables. Les sols médiocres peuvent causer des mouvements différentiels dans le sol, entraînant des fissures dans les murs et les cloisons des bâtiments. Cela peut également entraîner des dégâts importants, notamment si les fondations ne sont pas adaptées à ce type de sol. Leurs variations de volume peuvent engendrer également des dommages aux chaussées et aux structures. Avant de commencer la construction, il est essentiel d'évaluer la qualité du sol. Cela peut inclure des tests de compaction, des analyses géotechniques et des études sur la capacité portante. Comprenez les caractéristiques du sol, telles que sa teneur en eau, sa plasticité et sa cohésion. Pour remédier à ces problèmes, des techniques d'amélioration des sols sont nécessaires pour assurer la stabilité et la durabilité des ouvrages. Ce chapitre offre un aperçu des techniques d'amélioration des sols médiocres fréquemment employées dans le domaine du génie civil.

II.2. Les méthodes d'amélioration des sols médiocres

Construire sur des **sols médiocres** peut être un défi, mais avec les bonnes techniques de stabilisation, il est possible d'ériger des structures solides et durables. Les méthodes d'amélioration des sols médiocres sont essentielles pour rendre des terrains autrefois inconstructibles aptes à supporter des structures.

II .2.1 Techniques de Modification de la Structure Interne du Sol

Ces techniques visent à augmenter la compacité du sol en place, soit en réduisant le volume des vides, soit en appliquant des vibrations dans le sol pour le densifier par réarrangement des grains. Les méthodes majeures utilisées sont présentées ci après.

II .2.1.1 Consolidation des sols

La consolidation des sols est un processus complexe, mais essentiel pour garantir la stabilité des constructions. Les ingénieurs choisissent la méthode la mieux adaptée en fonction des spécificités du projet et des contraintes budgétaires [17]. La consolidation des sols est une étape cruciale dans la préparation d'un terrain avant le lancement de travaux de construction. L'une des méthodes les plus employées est le pré-chargement. Elle consiste à placer provisoirement un remblai sur la surface à charger. Après un laps de temps plus ou moins important, le sol existant atteint la capacité portante calculée. Afin de libérer les pressions interstitielles dans les sols fins, et donc d'accélérer le tassement, il est nécessaire de mettre en place des drains. En effet, la faible perméabilité de ce genre de sol ralentit le passage de l'eau qui empêche le tassement

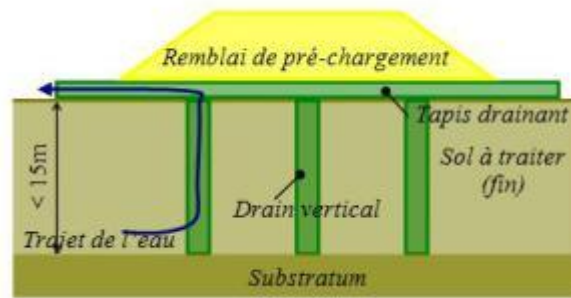


Figure II.1 Préchargement [8]

II .2.1.2 Compactage dynamique

Le compactage dynamique est un procédé d'amélioration du sol qui densifie les sols en place et les remblais à l'aide d'une masse par l'augmentation de la capacité portante. Le compactage dynamique est possible dans une large gamme de sol, y compris des remblais à blocs, loin de toute autre construction. L'augmentation de la capacité portante est provoquée par chute d'une quinzaine de mètres d'une masse pouvant atteindre 20 tonnes. Cette méthode permet de densifier le sol sur une profondeur inférieure à 10 m, sous les impacts d'une masse de 15 à 150 tonnes tombant de 20 à 40 m. Deux ou trois passes de compactage peuvent ensuite être nécessaires par site, selon le type et l'état du sol. Les empreintes formées après chaque passage de compactage sont remplies de matériau granulaire [9]

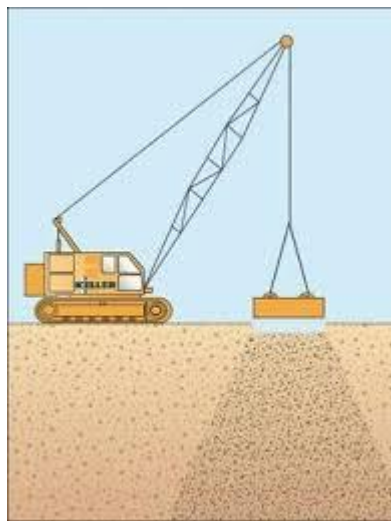


Figure II.2 Compactage dynamique [6]

II .2.2 Techniques de Renforcement du Sol par Ajout d'Inclusions

Ces techniques font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. Les méthodes utilisées incluent :

II .2.2.1 Inclusions rigides de béton

Cette méthode consiste en la mise en place d'une maille régulière d'éléments verticaux de forte rigidité (dans la plupart des cas des éléments circulaires en béton ou mortier). Après

renforcement du sol, l'ouvrage à construire est fondé de manière superficielle et les travaux de génie civil peuvent commencer sans délai d'attente. Les inclusions rigides peuvent être utilisées dans tous les secteurs de la construction. Elles sont utilisées sous les semelles, radiers, dallages et remblais avec ou sans matelas. L'espacement, la profondeur et le diamètre des inclusions rigides seront définis pour obtenir

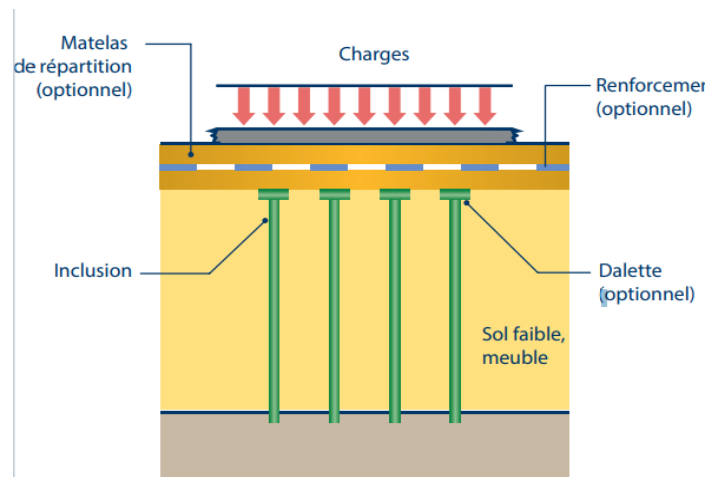


Figure II.3 Différents composants de fondations complètes sur des inclusions rigides[5]

II .2.2.2 Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont une technique de renforcement des sols qui consiste à créer des colonnes en gravier ou ballast à l'aide d'un vibreur. Les colonnes ballastées sont réalisées en incorporant du matériau granulaire compacté dans le sol. Ces colonnes s'étendent verticalement sur la hauteur des sols compressibles. Le processus commence par la mise en station d'une foreuse au point de fonçage. Un chargeur à godet approvisionne le granulat. L'outil est ensuite enfoncé dans le sol sous pression d'air jusqu'à la profondeur de traitement. Un vibreur descend par vibration et une poussée en pointe pour compacter le matériau. La colonne est formée par passes successives jusqu'à la plateforme d'intervention. Des contrôles réguliers assurent l'intégrité des colonnes pendant la production. Ces colonnes contribuent à la réduction des tassements, l'augmentation de la capacité portante (réduction de la taille des semelles) et enfin à la rigidité du massif de sol.[2]

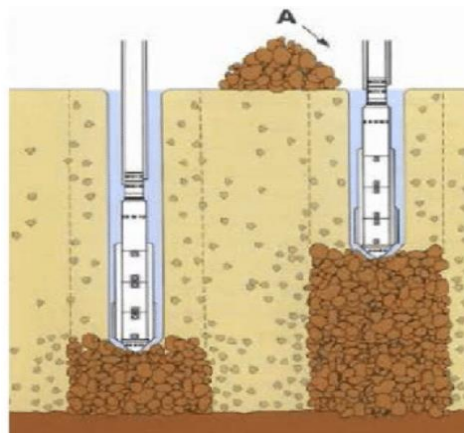


Figure II.4 Techniques de mise en œuvre des colonnes ballastées [1]

II .2.2.3 Colonnes de Jet Grouine

Le « jet grouine » est un procédé de consolidation de sol qui consiste au traitement du sol dans la masse par injection sous haute pression d'un jet de coulis à base de ciment, réalisant in situ un mélange sol-ciment. La technique de réalisation se décompose en deux étapes principales. La première étape est la réalisation d'un forage dans le sol sur la hauteur du terrain à consolider et la mise en place dans le forage d'un train de tiges creuses (de diamètre 60 à 90 mm) équipé en pied, de buses d'injection et en partie haute d'une tête d'alimentation rotative.

La deuxième étape est l'injection du coulis sous haute pression au travers de buses de petits diamètres par remontée et rotation simultanée du train de tige. Le jet de coulis déstructure le terrain par l'effet dynamique généré par sa grande vitesse et grâce au mouvement combiné de rotation et de remontée, le coulis se mélange intimement au terrain en place et crée, du bas vers le haut, une colonne de sol ciment. Cette colonne de forme cylindrique peut atteindre jusqu'à 2 m de diamètre[10]

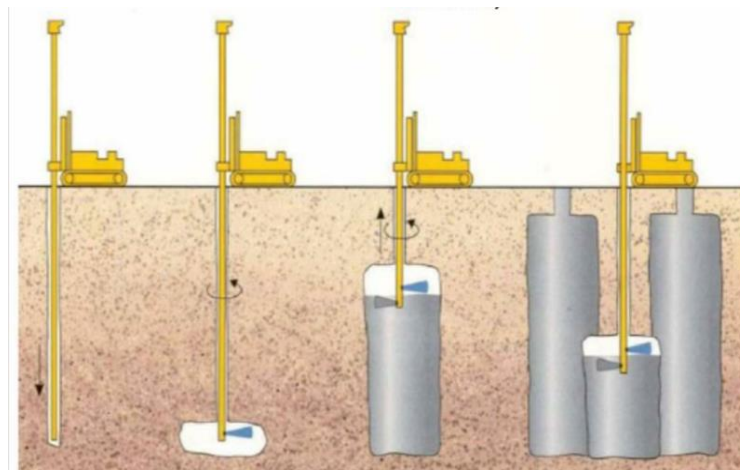


Figure II.5 Le jet grouine

II .2.2.4 Colonnes de Sol Mixant

Le sol Mixant consiste à mélanger le sol en place avec un liant de façon à améliorer ses caractéristiques. On cherche soit à améliorer les paramètres mécaniques du sol, soit à réduire sa perméabilité. Le sol mixant permet de renforcer le sol sous appui de structure, améliorant ainsi la capacité portante et réduisant les tassements. Cette méthode permet de réaliser diverses structures, notamment les parois de colonnes jointives ou sécantes, ces parois sont utiles pour stabiliser les talus, réduire l'aléa de liquéfaction sous séisme et renforcer les ouvrages de soutènement. Les étapes typiques du sol mixant comprennent la déstructuration mécanique du terrain, l'incorporation du liant ou du réactif, puis l'homogénéisation du mélange. Les colonnes ainsi créées génèrent très peu de déblais. Le dosage en liant hydraulique est fonction de la lithologie du sol (argile, sable) et des objectifs de résistance à atteindre. [4]



Figure II.6 SolMixant[3]

II.2.3 Géo synthétiques

La stabilisation des sols par géo synthétiques est une technique couramment utilisée dans les ouvrages de génie civil. Leur comportement en renforcement dépend du mode de sollicitation auquel ils sont soumis. Le dimensionnement des géo synthétiques nécessite des essais de caractérisation des produits et de leur interaction avec le sol environnant. Il faut tenir compte de leur nature et des facteurs d'influence liés à leur environnement.[49] . L'utilisation de géo synthétiques de renforcement permet d'augmenter la stabilité d'un ouvrage en apportant au sol une résistance en traction qu'il ne possède pas seul (ou très peu pour les sols cohérents). Si le renforcement géo synthétique seul n'est pas suffisant, on peut combiner cette méthode avec des inclusions rigides ou une plate-forme de transfert de charge. L'utilisation de matériaux drainants avec des géo synthétiques peut également accélérer la consolidation du sol compressible.



Figure II.7 Nappes ou géotextiles[7]

II.2.4 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique est une approche efficace pour améliorer les propriétés des sols gonflants et réduire les risques de dommages aux infrastructures.

II.2.4.1 Ciment

L'ajout de ciment au sol permet de former des liaisons hydrauliques, renforçant sa structure et réduisant le gonflement. Le ciment réagit avec l'eau pour former des silicates de calcium,

améliorant la résistance du sol [19]. Le ciment, en réagissant avec l'eau et l'argile, forme un matériau solide et stable, augmentant la résistance, la durabilité et l'imperméabilité du sol. [1]



Figure II.8 Stabilisation des sols par le ciment [38]

Le ciment contribue à la stabilisation par la réduction de la plasticité et du gonflement, lorsque l'argile du sol (qui contient de la silice et de l'alumine) entre en contact avec le ciment, elle peut former des réactions pouzzolaniques. Ces réactions entraînent une réduction de la plasticité du sol et de son potentiel de gonflement [17]. En d'autres termes, le ciment aide à rendre le sol moins sensible à l'eau, ce qui limite les problèmes de gonflement.

L'ajout de ciment permet également l'amélioration de la stabilité et de la portance d'augmenter la capacité de rétention de l'humidité du sol et sa stabilité.

La stabilisation du sol se produit lorsque la quantité appropriée de ciment est mélangée à un sol réactif, ce qui initie le développement de produits cimentaires. Par exemple, une addition de ciment peut augmenter considérablement l'indice CBR (California Bearing Ratio) du sol, passant de 3,6 à 28,9 [19]. En résumé, le ciment est un excellent moyen de stabiliser les sols argileux gonflables, améliorant ainsi leur résistance et leur comportement face à l'eau.

II .2.4.2 Chaux

La chaux réduit la plasticité, le gonflement et le retrait des sols argileux en formant des composés cimentaires qui augmentent leur résistance. [10]



Figure II.9 Stabilisation des sols par la chaux [39]

L'ajout de chaux à ces sols peut être une solution efficace. La chaux contribue à la stabilisation des sols gonflants par la réduction de la plasticité et du gonflement. Lorsque l'argile du sol (qui contient de la silice et de l'alumine) entre en contact avec la chaux, elle peut former des silicates et des aluminates calciques hydratés. Cette réaction, appelée pouzzolanique, entraîne une réduction de la plasticité du sol et de son potentiel de gonflement [41] [48]

En d'autres termes, la chaux aide à rendre le sol moins sensible à l'eau, ce qui limite les problèmes de gonflement.

L'ajout de chaux permet également d'augmenter la capacité de rétention de l'humidité du sol et sa stabilité. La stabilisation du sol se produit lorsque la quantité appropriée de chaux est mélangée à un sol réactif, ce qui initie le développement de produits cimentaires. Par exemple, une addition de 5 % de chaux vive peut augmenter considérablement l'indice CBR (California Bearing Ratio) du sol, passant de 3,6 à 28,9 [42] [43]

II.2.4.3 Cendres volantes

Les cendres volantes, un sous-produit de la combustion du charbon, peuvent être utilisées comme liant hydraulique en combinaison avec de la chaux ou du ciment pour stabiliser les sols. [1, 4]. Les cendres volantes peuvent être utilisées pour stabiliser les sols gonflants. Elles réagissent avec l'argile et améliorent la cohésion du sol. [33]

Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment. Elles ont un aspect de poudre fine, douce au toucher et leur couleur varie d'un brun crème au gris noir. Leur couleur dépend de la teneur en carbone non brûlé, en oxyde de fer et de leur humidité.

L'ajout de cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. En conséquence, l'eau a moins d'influence sur le gonflement du sol, car elle pénètre moins facilement dans les pores [33]. Grâce à leurs propriétés pouzzolaniques, les cendres volantes peuvent augmenter la résistance mécanique d'un sol pendant plusieurs années. Elles réagissent avec les composants argileux du sol, formant des liaisons hydrauliques et renforçant ainsi la structure du matériau [34]



Figure II.10 Les cendres volantes - ACPresse

II.2.5 Traitement thermique

La chaleur modifie la structure minéralogique du sol, améliorant sa résistance et sa stabilité, particulièrement pour les sols argileux et organiques. [4]

La stabilisation thermique des sols gonflants est une méthode qui vise à réduire le potentiel de gonflement des sols argileux en utilisant la chaleur.

L'idée est d'appliquer de la chaleur au sol argileux pour provoquer des réactions physico-chimiques qui modifient sa structure. La chaleur peut être fournie par des méthodes telles que le traitement à la vapeur, le chauffage électrique, ou même l'exposition au soleil.

La stabilisation thermique est utilisée dans la construction d'ouvrages tels que les routes, les tunnels, et les fondations.

Les effets de la stabilisation thermique se résument à la réduction de la plasticité, la chaleur provoque la déshydratation des minéraux argileux, ce qui diminue leur capacité à absorber l'eau. Cela réduit la plasticité du sol et son potentiel de gonflement. Aussi l'amélioration de la résistance mécanique par la modification de la structure argileuse renforce le sol améliorant ainsi sa capacité portante.

La stabilisation thermique peut nécessiter des équipements spécifiques et une expertise technique. Elle doit être soigneusement planifiée pour éviter toute détérioration excessive du sol.

II.3 Stabilisation par les matériaux recyclés

Les sols médiocres, comme les sols argileux expansifs ou compressibles, posent problème pour la construction. [8] Leurs variations de volume face aux changements d'humidité peuvent causer des dommages aux fondations et aux structures. [9] Améliorer leurs propriétés mécaniques est donc indispensable. [6] L'utilisation de matériaux recyclés dans ce domaine représente une solution durable et éco-responsable. [7].

II .3.1 Les granulats Issus du BTP

Les granulats issus de la démolition de béton ou de maçonnerie peuvent être concassés et utilisés comme ajout pour améliorer la portance et la stabilité des sols argileux. [2, 7]



Figure II.11 Les granulats recyclés

Le recyclage des granulats est une pratique essentielle dans le domaine du BTP (Bâtiment et Travaux Publics). Elle contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des déchets.

Les granulats sont de petits fragments de roche utilisés dans la construction, tels que les graviers et les sables. Le recyclage des granulats consiste à fabriquer de nouveaux granulats à partir de déchets du BTP (déconstruction, retours de toupies, rejets de béton de préfabrication, etc.). Différents types de matériaux, tels que les bétons, les terres, les roches diverses et les briques,

peuvent être transformés en granulats recyclés après traitement dans des installations spécifiques[44]

Les granulats recyclés offrent une opportunité de valoriser ces déchets inertes qui étaient autrefois stockés ou déposés en décharges sauvages. En utilisant des granulats recyclés localement, on limite les transports et donc les émissions de CO₂ associées[45].

Avant d'utiliser des granulats recyclés, il est essentiel de démontrer leur caractère inerte et leur innocuité pour l'environnement.

Différentes analyses réglementaires sont réalisées pour vérifier leur conformité, notamment les tests de granulométrie, de résistance à la fragmentation (Los Angeles), de réactivité à l'alcali, etc.

Ces granulats recyclés peuvent être utilisés en technique routière ou dans la fabrication de bétons, sous réserve de respecter les spécifications et réglementations en vigueur [12]

II .3.2 Plastiques recyclés

Sept grandes familles selon la classification établie par la Société de l'Industrie Plastique dans les années 80. Seulement voilà, si ce classement permet d'y voir plus clair dans la jungle des typologies de plastiques, il est encore peu connu en dehors de la sphère des pros du recyclage. On vous éclaire !

- Le polyéthylène téréphtalate (PET)
- Le polyéthylène haute densité (PEHD)
- Le polychlorure de vinyle (PVC)
- Le polyéthylène basse densité (LDPE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polystyrène (PS)



Figure II.12 Plastiques recyclés[37]

Des études récentes ont montré que l'ajout de certains types de plastiques recyclés, notamment en granulés, peut améliorer la résistance au cisaillement et réduire la perméabilité des sols. [7]. ont utilisé des polymères PVC et HDPE avec des pourcentages différents (0%, 3% et 6%) afin d'améliorer le comportement géotechnique des sols argileux. Les résultats ont montré que l'ajout de PVC et de HDPE au sol argileux réduit ses limites d'Atterberg, son potentiel de gonflement et sa pression de gonflement, et augmente sa densité sèche maximale et ses valeurs CBR.

La stabilisation des sols gonflables par ajout de plastique recyclé est une approche intéressante qui vise à renforcer les sols gonflants tout en contribuant à la réduction des déchets plastiques. L'ajout de plastique recyclé dans les sols gonflables est une méthode innovante pour améliorer leurs propriétés mécaniques et réduire leur gonflement. On mélange des granulats de plastique recyclé (issus de bouteilles, sacs, etc.) avec le sol gonflable.

Le plastique agit comme un renfort, réduisant la sensibilité du sol à l'absorption d'eau. Le plastique recyclé peut remplir les vides entre les particules d'argile, réduisant ainsi l'espace disponible pour l'expansion du sol lorsqu'il est hydraté.

Cette technique offre une double bénéfice : elle renforce le sol tout en valorisant les déchets plastiques.

Le plastique recyclé est durable et résistant aux intempéries, à la pourriture, aux insectes et à l'humidité, ce qui le rend adapté à des applications de stabilisation des sols. En utilisant du plastique recyclé, on contribue à la réduction des déchets plastiques dans l'environnement. Le plastique recyclé est souvent moins cher que d'autres matériaux de renforcement.

II .3.3 Poudrette de pneus usagers

Les granulats de pneus recyclés sont issus du broyage des pneus usagés. Ils sont utilisés dans divers domaines, y compris la construction et l'aménagement paysager. Ces granulats peuvent être mélangés avec d'autres matériaux pour renforcer les sols, améliorer leur drainage et augmenter leur résistance.

Différentes tailles de granulats sont disponibles, allant des plus fins (0,5 à 2,5 mm) aux plus gros (3 à 6 mm).

Ces granulats peuvent être incorporés dans des projets de construction pour améliorer les propriétés des sols. Par exemple, ils peuvent servir de géotextiles ou être utilisés dans la construction de surfaces sportives, aires de jeux et revêtements de sol. [46]

L'ajout de granulats de pneus usagés peut modifier les caractéristiques mécaniques des sols. Des études ont montré que l'augmentation du dosage en granulats de pneus peut influencer les valeurs des teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales des sols. Cela peut avoir un impact sur la stabilité et la portance du sol [18]

La résistance au cisaillement et le déplacement maximal augmente avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. L'existence de la fibre dans le squelette granulaire empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire. Les essais de cisaillement ont montré une augmentation de l'angle de frottement interne et une diminution de la cohésion après chaque augmentation du pourcentage d'ajout, ce qui a permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance. Les granulats de pneus recyclés contribue à la réduction des déchets et à la valorisation des matériaux existants. Ils peuvent renforcer les sols, réduire l'érosion et améliorer la stabilité.



Figure II.13 Les différents diamètres de granulats des pneus usés après broyage [11]

II .3.4 Verre recyclé

Le verre broyé peut être utilisé comme ajout dans les sols pour améliorer leur résistance et leur durabilité, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser son utilisation. [7]

Le verre est un matériau fabriqué à partir de matières premières naturelles, principalement du sable (silice), du carbonate de sodium (fondant) et d'autres composés tels que le calcaire et la magnésie.

Le verre est un matériau écologique par excellence. Voici pourquoi :

Le recyclage du verre se fait grâce à l'utilisation de calcin (verre brisé issu des déchets de fabrication ou de la collecte sélective).

Le verre est inerte et se décompose dans le sol sans libération de produits chimiques. Il ne libère aucun composé organique volatil (COV) nuisible pour la santé. Sa texture lisse et non poreuse facilite le nettoyage, ce qui contribue à une hygiène irréprochable. [46]

L'ajout de verre peut réduire le gonflement en amortissant les pressions développées lors de l'expansion des argiles gonflantes. Cependant, il est essentiel de mener des études spécifiques pour évaluer l'efficacité du verre broyé dans des conditions locales[46]

En résumé, le verre broyé peut jouer un rôle positif dans la stabilisation des sols gonflants. Son utilisation écologique et ses propriétés inertes en font un choix intéressant pour minimiser les effets du gonflement.



Figure II.14 Le verre recyclé[40]

II .3.5 Bille de polystyrène

Pour étudier les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé (BPE) sur un sol léger Stabilisé, des études en laboratoire ont été menées par sur un sol sableux. Les teneurs en ciment été fixées à 20, 40, 60, 80 et 100 kg/m³. Les teneurs volumétriques en billes BPE ont été fixées à 33%, 50%, 60% et 67%. Les résultats ont fourni des relations quantitatives entre les propriétés physico-mécaniques du sol et la proportion du matériau stabilisant. Les auteurs ont remarqués une amélioration de la cohésion en fonction de la teneur en ciment et une augmentation considérable de la résistance à la compression simple en fonction du contenu volumétrique des BPE.



Figure II.15 Billes de polystyrène

II .3.6 Poudre de céramiques

L'ajout de poudre de céramique peut améliorer la stabilisation des sols argileux de plusieurs. L'incorporation de poudre de céramique dans les sols argileux permet d'augmenter leur résistance à la compression et à la traction. Cela est dû à la réaction pouzzolanique entre la poudre de céramique et le ciment, qui forme des produits de cimentation renforçant la matrice du sol.

La poudre de céramique remplit les vides entre les particules d'argile, diminuant ainsi la perméabilité du sol et sa sensibilité à l'eau. Cela limite les problèmes de gonflement et de retrait liés aux variations de teneur en eau.

Il a été constaté une diminution de la compressibilité des sols argileux, les rendant moins sensibles aux tassements différentiels.

Les études ont montré que l'ajout de 10% de poudre de céramique, combiné à du ciment, permet d'améliorer significativement les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux . Cette technique de stabilisation s'avère donc efficace pour limiter les problèmes liés au gonflement et au retrait des argiles. a utilisé la poudre de céramique comme stabilisant pour un sol expansif de provenance local, la poudre de céramique a été ajoutée progressivement de 5% à 30% avec un incrément de 5%. Les résultats obtenus ont montrés que la poudre de céramique est parfaitement efficace pour la stabilisation des matériaux de chaussée.



Figure II.16 Poudre de céramique

II .3.7 Déchets de briques

Les déchets de briques rouges, souvent disponibles en grandes quantités, représentent une solution intéressante et économique pour améliorer les propriétés des argiles gonflantes, en particulier lorsqu'ils sont combinés à de la chaux. Cela permet de valoriser ces déchets tout en stabilisant les sols argileux pour diverses applications de construction. L'ajout de déchets de briques rouges peut améliorer la stabilisation des argiles gonflantes.

L'incorporation de 30% de déchets de briques rouges et de sable concassé dans les briques d'adobe (terre crue) augmente significativement leurs résistances mécaniques (compression et traction) et leur durabilité. Cela réduit aussi leur absorption d'eau totale et capillaire ainsi que leur gonflement[13].

L'ajout de poudre de déchets de briques rouges à l'argile, en plus d'un faible dosage de chaux (1%), rend les mélanges moins sensibles à l'eau, bien que cela diminue un peu leur densité sèche. Cela traduit une bonne compactibilité des mélanges argile-déchets de brique broyés[16].

L'utilisation de poudre de déchets de briques rouges, combinée à la chaux, permet de stabiliser les propriétés physico-chimiques et mécaniques des argiles gonflantes. Cela les rend plus adaptées pour des applications dans les centres de stockage de déchets[21]

L'addition de poudre de déchets de briques rouges à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Selon le type de sol, un mélange de déchets de briques et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule pour stabiliser les sols argileux[20].



Figure II.17 Déchets de briques

II .3.8 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un déchet qui peut être utilisé pour stabiliser les argiles gonflantes. Il contient des minéraux tels que la silice et l'alumine, qui réagissent avec l'eau pour former des hydrates solides, ce qui renforce les propriétés mécaniques des sols[23].

Lorsqu'il est utilisé pour stabiliser les argiles, le laitier de haut fourneau peut améliorer leurs propriétés hygrothermiques. Les études préliminaires ont montré que les terres stabilisées au laitier activé présentent des propriétés hygrométriques plus intéressantes que celles stabilisées au ciment[25].

L'ajout de laitier de haut fourneau, seul ou activé avec de la chaux, peut augmenter la densité spécifique des sols argileux. Cela est particulièrement notable lorsque le laitier est activé, ce qui rend le sol plus dense et plus résistant[30].

Les mélanges stabilisés avec du laitier activé présentent des caractéristiques de compactage plus favorables, avec une teneur en eau optimale et une densité sèche maximale augmentées[30].

L'utilisation du laitier de haut fourneau pour stabiliser les argiles gonflantes offre des avantages environnementaux et de durabilité. Les déchets de haut fourneau sont souvent considérés comme des résidus dangereux, mais leur utilisation dans la stabilisation des sols peut les valoriser et réduire les impacts environnementaux associés à leur élimination[25].

Il est recommandé d'utiliser un pourcentage d'ajout de 20% de laitier activé pour obtenir les meilleurs résultats[30].



Figure II.18 Le laitier de hauts fourneaux,

II .3.9 Poudre de sciure de bois

ont canalisé leur recherche dans l'association de la sciure et la chaux pour améliorer les caractéristiques géotechnique d'un sol latéritique avec une variation de 2, 4, 6, 8 et 10% en poids de sol. Les résultats des tests ont montré que l'ajout d'un mélange de chaux et de sciure de bois augmentait la teneur en humidité optimale et diminuait la densité sèche maximale du sol traité. D'autre part, la résistance à la compression simple du sol traité été améliorée de manière optimale par l'ajout de 6% de mélange de sciure de bois et de chaux.

La durabilité des matériaux de terre stabilisée est influencée par les propriétés hygrothermiques, et des recherches ont été menées pour étudier les effets de l'attaque chimique sur ces matériaux, notamment en présence de sulfates[22][32][29].

En résumé, la poudre de sciure de bois peut contribuer à améliorer la stabilité et les propriétés des argiles en occupant les vides et en renforçant la structure du sol. Cependant, il est important de considérer les effets à long terme et les interactions avec d'autres facteurs, tels que l'attaque chimique, pour évaluer l'efficacité de cette méthode de stabilisation.



Figure II.19 Sciure de Bois

II .3.10 Cendre de bois

La cendre de bois peut avoir un effet protecteur sur les sols argileux en réduisant leur sensibilité à l'eau et en améliorant leur résistance. Cela est particulièrement important pour les sols gonflants, qui peuvent être affectés par des fluctuations saisonnières de la nappe superficielle. La cendre de bois peut être utilisée en combinaison avec des liants hydrauliques, tels que la chaux, pour stabiliser les sols argileux. Cette approche permet de lier et de cimenter les particules entre elles, augmentant ainsi la résistance du matériau et réduisant sa sensibilité à l'eau[35]. a évalué le potentiel de la cendre de bois à stabiliser un sol argileux avec des proportions variables de 5%, 10%, 15% et 20% en poids de sol. Les résultats ont montré que les paramètres géotechniques des sols argileux étudiés sont améliorés par l'ajout de 10% de cendre de bois. La plasticité a été réduite de 35% et le CBR et la résistance à la compression ont augmenté de 23 à 50% et de 49 à 67%, respectivement.



Figure II.20 Cendre de bois

II .3.11 Coquilles d'œufs

La poudre de coquille d'œuf a un effet significatif sur la stabilisation des sols argileux[36][26]. Les études ont montré que l'ajout de poudre de coquille d'œuf améliore les propriétés techniques du sol stabilisé, en le rendant plus résistant et moins sensible à l'eau[36][26].

Cela suggère que la poudre de coquille d'œuf peut être utilisée comme un liant naturel pour stabiliser les sols argileux[36][26]. Cette approche permettrait de lier et de cimenter les particules argileuses entre elles, augmentant ainsi la résistance du matériau et réduisant sa sensibilité à l'eau.

En résumé, la poudre de coquille d'œuf semble être un produit naturel efficace pour la stabilisation des sols argileux, en améliorant leurs propriétés techniques et leur résistance à l'eau[28][27] ont stabiliser un sol argileux avec trois ajouts à savoir les coquilles d'œufs, le ciment et un 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 réduisait considérablement l'indice de plasticité et la densité sèche, mais augmentait la teneur en eau et la résistance à la compression du sol traité.

Une étude a montré que la poudre de coquilles d'œuf peut être utilisée en remplacement de la chaux pour stabiliser les sols argileux[27]. Ces combinaisons peuvent permettre de lier et de cimenter les particules entre elles, augmentant ainsi la résistance du matériau et réduisant sa sensibilité à l'eau.

II .3.12 Fibre de bambou

Les fibres de bambou ont un impact significatif sur la stabilité des argiles en tant que renfort dans des composites. Les fibres de bambou ont des propriétés mécaniques élevées, avec un module et une contrainte à rupture. Pour améliorer les propriétés des fibres de bambou, il est essentiel de les traiter avant leur utilisation. Les méthodes de traitement incluent l'élimination de la lignine et de l'hémicellulose par immersion dans une solution de soude, ainsi que la modification de la surface des fibres par des agents chimiques tels que l'amino-silane, l'acide acétique ou le chlorure d'acétyle[24].

Les caractérisations par analyse thermogravimétrique montrent que le traitement de surface des fibres de bambou augmente leur stabilité thermique à haute température. Les fibres de bambou jouent un rôle majeur dans la liaison entre la matrice polymère et les fibres lors de l'élaboration de matériaux composites, ce qui peut influencer considérablement leurs propriétés mécaniques[24]. ont utilisé des fibres de bambou naturel ayant respectivement un diamètre de 3 et 6 mm et une longueur de 10 et 20 mm pour stabiliser un sol argileux. La proportion de fibre de bambou été de 0,20 à 1,40 % avec un incrément de 0,2%. L'ajout de fibres de bambou a amélioré le comportement ductile du sol traité et a augmenté les valeurs CBR. Cette augmentation été significative avec un ajout de fibre de bambou de l'ordre de 1,2%.



Figure II.21 Fibre de bambou

II .3.13 Déchet d'olive brûlé

Les déchets d'olive brûlés, tels que les cendres de grignons d'olive, peuvent être utilisés pour stabiliser les sols médiocres. Les cendres de grignons d'olive ont des propriétés mécaniques élevées, avec un module et une contrainte à la rupture plus élevés que les cendres de balles de riz et les argiles calcinées[15]. Elles peuvent donc agir comme un renfort efficace dans les composites. Pour optimiser leurs performances, les cendres de grignons d'olive doivent être traitées avant utilisation.

L'ajout de cendres de grignons d'olive à des argiles gonflantes peut réduire significativement leur sensibilité à l'eau, en modifiant les caractéristiques de compactage et en améliorant la résistance en compression[15]. Cela les rend plus stables et adaptées aux ouvrages géotechniques.

L'utilisation des cendres de grignons d'olive permet de valoriser un déchet de l'industrie oléicole, qui pose des problèmes environnementaux lorsqu'il n'est pas traité[15]. ont montré que l'ajout de 2,5% en poids des déchets d'olives brûlées augmentera la résistance à la compression simple et la densité sèche maximale du sol traité, au-delà de cette valeur ces caractéristiques diminuent. D'autre part, l'ajout de 7,5% en poids de cendres d'olive minimise la pression de gonflement du sol traité. Les résultats des tests semblent prometteurs pour que ce matériau soit utilisé comme stabilisant et pour résoudre de nombreux problèmes liés à son accumulation.



Figure II.22 Déchet d'olive brûlé

II .3.14 Fibre de sisal

Les fibres de sisal réduisent le gonflement des argiles en modifiant les propriétés mécaniques et physiques de la matrice argileuse. Les fibres de sisal augmentent la résistance mécanique du mortier de terre, ce qui réduit le gonflement. L'ajout de fibres de sisal augmente la vitesse de propagation des ondes dans le mortier de terre, ce qui indique une amélioration de la densité et de l'homogénéité du matériau[14].

Les fibres de sisal réduisent le gonflement des argiles en modifiant les caractéristiques de compactage et en améliorant la résistance en compression. L'ajout de fibres de sisal augmente légèrement l'absorption d'eau totale et capillaire du mortier de terre, mais cela est compensé par une augmentation de la résistance mécanique. La longueur des fibres de sisal a un impact significatif sur le gonflement. Les fibres de 1 cm de longueurs donnent des résultats optimaux pour la réduction du gonflement[14].

La teneur en fibres de sisal influence également le gonflement. L'ajout de 0,5% de fibres de 1 cm de longueurs est considéré comme le dosage optimal pour réduire le gonflement[14].

ont choisi la fibre de sisal comme matériau de renforcement, elle a été incluse dans le sol avec quatre pourcentages différents 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1 % en poids de sol brut. Dans cette étude, quatre longueurs de fibres différentes ont été utilisées à savoir 10, 15, 20 et 25 mm. Les résultats ont montré que la fibre de sisal peut être considérée comme un bon matériau de renforcement des sols argileux.



Figure II.23 Fibre de Sisal [31]

II.4 Conclusion

L'amélioration des sols médiocres est une étape essentielle pour garantir le succès et la pérennité des projets de construction. La sélection de la méthode adéquate est influencée par divers éléments, tels que la nature du sol, les conditions environnementales, les exigences de performance et les contraintes économiques. L'emploi de matériaux recyclés dans les méthodes d'amélioration des sols offre une opportunité prometteuse pour diminuer l'empreinte écologique de la construction tout en exploitant les ressources disponibles. Il est essentiel de mener des études approfondies et des essais de laboratoire rigoureux afin d'améliorer l'efficacité de ces matériaux à long terme.

Références Bibliographiques Du Deuxième Chapitre

- [1] ACI Committee 230. 2003. *Report on soil cement*. American Concrete Institute.
- [2] Bell, F. G. 2007. *Engineering geology (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann
- [3] Cedergren, H. R. 1989. *Seepage, drainage, and flow nets (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- [4] Chu, J., Huang, R. J., & Chen, J. S. 2002. *Stabilization/solidification of heavy metal contaminated soil using cement and rice husk ash*. *Journal of Hazardous Materials*, 95(3), 255–268.
- [5] Das, B. M. 2014. *Principles of geotechnical engineering (8th ed.)*. Cengage Learning.
- [6] Hausmann, M. R. 1990. *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill
- [7] Koerner, R. M. 2005. *Designing with geosynthetics (5th ed.)*. Pearson Prentice Hall
- [8] Mitchell, J. K., & Soga, K. 2005. *Fundamentals of soil behavior (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.2
- [9] Nelson, J. D., & Miller, D. J. 1992. *Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons.
- [10] Rogers, C. D. F., Glendinning, S., & Jewell, R. A. 1996. *Lime modification of clay soils for use in earthworks*. *Géotechnique*, 46(3), 395–413.

- [11] Yamoun, Mourad .2016. *Comportement mécanique d'une argile sous l'effet d'ajout des granulats de pneus usés, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 145p*
- [12] <https://bing.com/search?q=recyclage+des+granulats+issus+de+BTP>.
- [13] http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/14861/1/ishak_zerrouki.pdf
- [14] http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/21693/1/Assam_Benmachiche.pdf
- [15] <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/824/1/Touati%20Lounis.pdf>
- [16] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/3018/1/TH.M.GC.FR.2020.17.pdf>
- [18] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/1276/CD14.pdf?sequence=1>.
- [19] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/1276/CD14.pdf?sequence=1>.
- [20] <https://bing.com/search?q=stabilisation+des+sols+gonflables+par+le+ciment>.
- [22] <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/741fd6d9-72d0-4822-bc2f-0718c9178cc1/content>
- [23] <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/871/1/Am%C3%A9lioration%20et%20stabilisation%20des%20propri%C3%A9t%C3%A9s%20physico-chimiques%20et%20m%C3%A9caniques%20des%20argiles%20de%20la%20r%C3%A9gion%20d'E2%80%99Adrar%20dans%20des%20ap~1.pdf>
- [24] https://dspace.univ-guelma.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/10073/OUMEDDOUR_NOURHANE_G%C3%A9nie%20civil._G%C3%A9otechnique.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- [25] <https://repository.usthb.dz/bitstream/handle/123456789/7873/TH9245.pdf?isAllowed=y&sequence=4>
- [26] https://theses.hal.science/tel-00652477/file/37399_DO.pdf
- [27] <https://theses.hal.science/tel-03934730/document>
- [28] <https://theses-algerie.com/1282825695913109/memoire-de-master/universite-larbi-tebessi---tebessa/%C3%A9tude-exp%C3%A9rimentale-de-stabilisation-des-sols-argileux-avec-la-poudre-de-coquille-d-%C5%93uf>
- [29] <https://theses-algerie.com/1282825695913109/memoire-de-master/universite-larbi-tebessi---tebessa/%C3%A9tude-exp%C3%A9rimentale-de-stabilisation-des-sols-argileux-avec-la-poudre-de-coquille-d-%C5%93uf>
- [30] <https://theses-algerie.com/8911897673333965/memoire-de-master/universite-larbi-tebessi---tebessa/%C3%A9tude-exp%C3%A9rimentale-de-stabilisation-des-sols-argileux-avec-la-poudre-de-coquille-d-oeuf>
- [31] <https://www.afriquescience.net/PDF/15/5/1.pdf>
- [32] <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/download/172537/161940>
- [33] <https://www.alamyimages.fr/photos-images/sisal-fiber.html?sortBy=relevant>
- [34] https://www.mattech-journal.org/fr/articles/mattech/full_html/2017/02/mt160087/mt160087.html
- [35] https://www.memoireonline.com/04/20/11788/m_Stabilisation-des-sols-gonflants154146126.html
- [36] https://www.memoireonline.com/08/15/9252/m_Stabilisation-des-sols-gonflants25.html
- [37] <https://www.memoireonline.com/08/15/9252/Stabilisation-des-sols-gonflants.html>
- [38] <https://www.naturanimmo.com/poudre-de-coquilles-d-oeuf-techniegg->
- [39] <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage-2/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/plastiques/>

- [40] <https://www.pussemer.be/uploads/slider/35/stabilisation-ciment-5.jpg>
- [41] <https://www.stabilisation.be/>
- [42] <https://www.usinenouvelle.com/article/le-verre-recycle-a-74.N1619932>
- [43] <https://bing.com/search?q=stabilisation+des+sols+gonflables+par+la+chaux>.
- [44] <https://www.graymont.com/fr/marches/materiaux-de-contruction/la-chaux-dans-la-stabilisation-des-sols>.
- [45] <https://www.calcinor.com/fr/nouvelles/analyse-de-produit/la-chaux-un-produit-trois-effets-dans-la-stabilisation-des-sols>.
- [46] <https://bing.com/search?q=granulats+recycl%c3%a9s+%c3%a0+partir+de+d%c3%a9chets+du+BTP>
- [47] <https://solutionsdurables.euofins.fr/solutions/reutilisation-des-ressources/les-granulats-recycles/>.
- [48] <https://www.geoplastglobal.com/fr/blog/plastique-recycle-pour-la-construction-durable/>.
- [49] <https://www.geopolymertech.com/fr/stabilisation-des-sols/>.
- [50] <https://www.cfmr-roches.org/sites/default/files/jngg/192.pdf>.
- [51] https://www.memoireonline.com/08/15/9252/m_Stabilisation-des-sols-gonflants24.html

Chapitre III : Matériaux et procédures Expérimentales

Chapitre III : Matériaux et procédures Expérimentales

III.1 Introduction

Ce chapitre présente la campagne expérimentale visant à caractériser les propriétés physiques et mécaniques d'un sol argileux et les matériaux utilisés. Des essais en laboratoire, conformes aux normes françaises, ont été menés pour étudier la granulométrie, les limites d'Atterberg, le comportement sous compactage, la résistance au cisaillement, la résistance à la compression et la compressibilité du sol.

III.2 Caractérisation des matériaux utilisés

Cette section décrit en détail les matériaux utilisés pour les essais, ainsi que les méthodes expérimentales mises en œuvre. Les normes suivies pour la préparation des échantillons et la réalisation des essais y sont également précisées.

III.2.1 Caractérisations du sol utilisé

Le sol utilisé dans cette étude est un sol reconstitué d'un sol argileux (75%) et de la bentonite (25%). Le sol argileux provient d'un site en cours de construction dans la wilaya de Skikda.



Figure III.1 Sol argileux

III.2.1.1 Essai de teneur en eau selon NF P 94-050 et NF P 94-053

La teneur en eau (w) d'un sol est définie comme le rapport de la masse de l'eau (M_w) contenue dans un échantillon à la masse des particules solides (M_s) de cet échantillon, exprimé en pourcentage.

$$W(\%) = (M_w / M_s) \times 100 \dots \dots \dots (III.1)$$

La détermination de la teneur en eau s'effectue par pesée de l'échantillon à l'état initial (humide) et après passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

- **Mode opératoire**

1. Prélever un échantillon représentatif du sol à analyser.
2. Peser la boîte de pesée vide (m_1).
3. Introduire l'échantillon humide dans la boîte de pesée et peser l'ensemble (m_2).
4. Placer la boîte de pesée ouverte contenant l'échantillon dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (généralement 24 heures).
5. Retirer la boîte de pesée de l'étuve, la placer dans le dessiccateur jusqu'à refroidissement complet puis peser l'ensemble (m_3).

$$\text{Teneur en eau (W\%)} = [(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)] / (m_3 - m_1) \times 100 \dots \dots \dots (\text{III.2})$$

Tableau III.1 Essai de teneur en eau

Échantillons	1	2
N° tare	408	321
P.H+ p .tare (g)	154.3	166.7
P.S+P.Tare (g)	127.9	137.1
P. Tare(g)	23.6	232.1
P. eau(g)	26.4	29.6
P. Sol sec(g)	104.3	114.0
Teneur en eau (%)	25.31	25.96
Moyenne ('%)	25.64	

III.2.1.2 Densité apparente selon NF P 94-050 et NF P 94-053

Bien qu'il n'existe pas de norme française spécifique à la méthode de la paraffine, la norme NF P 94-053 (2013): Reconnaissance et essais de matériaux - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Méthode de la trouchemétrie peut être utilisée comme référence pour les aspects généraux concernant la détermination de la densité apparente des sols.

L'essai consiste à déterminer :

- Masse de l'échantillon sec (M_s): Obtenue après séchage à l'étuve à 105°C.
- Volume de l'échantillon (V_t): Déterminé par immersion de l'échantillon paraffiné dans l'eau et mesure de la poussée d'Archimède.

La densité apparente (ρ_d) est ensuite calculée en utilisant la formule :

$$\rho_d = M_s / V_t \dots \dots \dots (\text{III.3})$$

- **Mode opératoire**

1) Préparation de l'échantillon

- a. Prélever un échantillon de sol représentatif et homogène.
- b. Peser l'échantillon humide (M_h).
- c. Sécher l'échantillon à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (M_s).

2) Enrobage de l'échantillon

- Faire fondre la paraffine au bain-marie à une température légèrement supérieure à son point de fusion en évitant toute surchauffe.
- Attacher un fil fin à l'échantillon sec et l'immerger complètement dans la paraffine fondue pendant quelques secondes.
- Retirer l'échantillon et le laisser refroidir pour que la paraffine se solidifie formant un enrobage étanche.

3) Mesure du volume de l'échantillon paraffiné

- Remplir le bécher ou l'éprouvette graduée d'eau distillée à température ambiante. Noter le niveau initial de l'eau (V_1).
- Immerger délicatement l'échantillon paraffiné dans l'eau en veillant à ce qu'il soit complètement immergé et qu'il ne touche ni le fond ni les parois du récipient.
- Noter le nouveau niveau de l'eau (V_2). La différence de volume ($V_2 - V_1$) correspond au volume de l'échantillon paraffiné (V_p).
- Déterminer la masse de l'échantillon enrobé de paraffine (M_p).

$$M_{\text{paraffine}} = M_p - M_s \dots \dots \dots (\text{III.4})$$

$$V_{\text{paraffine}} = M_{\text{paraffine}} / \rho_{\text{paraffine}} \dots \dots \dots (\text{III.5})$$

$$V_t = V_p - V_p \dots \dots \dots (\text{III.6})$$

4) Remarques

- La précision de l'essai dépend de l'homogénéité de l'enrobage de paraffine et de l'absence de bulles d'air piégées.
- Il est important de choisir une paraffine dont le point de fusion est suffisamment bas pour ne pas altérer l'échantillon de sol.
- Cette méthode est particulièrement adaptée aux sols cohérents remaniés ou non, mais peut-être moins précise pour les sols grenus. [1]

$$M_s = M_h / (1 + w/100) \dots \dots \dots (\text{III.7})$$



Figure III.2 Essai de la densité apparente**Tableau III.2** Essai de densité apparente

PH. Paraffine (g)	378.0	347.0
Poids humide (g)	356.3	323.4
Poids paraffine (g)	21.7	23.6
P. Matériaux dans l'eau (g)	160.0	146.6
Volume brut (cm ³)	218.0	200.4
Volume paraffine (cm ³)	24.11	26.22
Volume net (cm ³)	193.89	174.18
Densité humide (t /cm ³)	1.84	1.86
Teneur en eau (%)	31.15	30.81
Densité sèche (t /cm ³)	1.47	

Tableau III.3 Les caractéristique physique du sol

W(%)	Densité humide (t /cm ³)	Densité sèche (t /cm ³)	Sr(%)
25.64	1.85	1.47	82.77

III.2.1.3 Essai de sédimentométrie (NF P 94-057)

- **Mode opératoire:**

1. Préparer une suspension de sol dans de l'eau distillée avec un agent dispersant pour éviter la floculation des particules.
2. Verser la suspension dans l'éprouvette de sédimentométrie.
3. Mesurer la densité de la suspension à différentes profondeurs et à différents intervalles de temps à l'aide du densimètre.
4. Calculer la granulométrie du sol en utilisant la loi de Stokes, qui relie la vitesse de sédimentation d'une particule à son diamètre.



Figure III.3 Matériel d'essai de sédimentométrie

Tableau III.4 Analyse granulométrique par sédimentométrie

Date et heure	T (mn)	Lecture R	Temp é (°C)	C.M C.D C.T	Lecture corrigée R1	D (mm)	% Passant
08 :00 :30	30 (s)	24.8	16°	- 0.64	24.16	0.0727	100
08 :01	1	23.8	16°	- 0.64	23.16	0.0522	95.86
08 :02	2	23.6	16°	- 0.64	22.96	0.0381	95.03
08 :05	5	23.6	16°	- 0.64	22.96	0.0248	95.03
08 :10	10	23.5	16°	- 0.64	22.86	0.0180	94.62
08 :20	20	22.5	16°	- 0.64	21.86	0.0129	90.48
08 :40	40	22.0	16°	- 0.64	21.36	0.0092	88.41
09 :20	80	21.0	17°	- 0.5	20.50	0.0067	84.85
12 :00	240	20.0	17°	- 0.5	19.50	0.0032	80.71
08 :00	1440	16.5	17°	- 0.5	16.00	0.0015	66.22

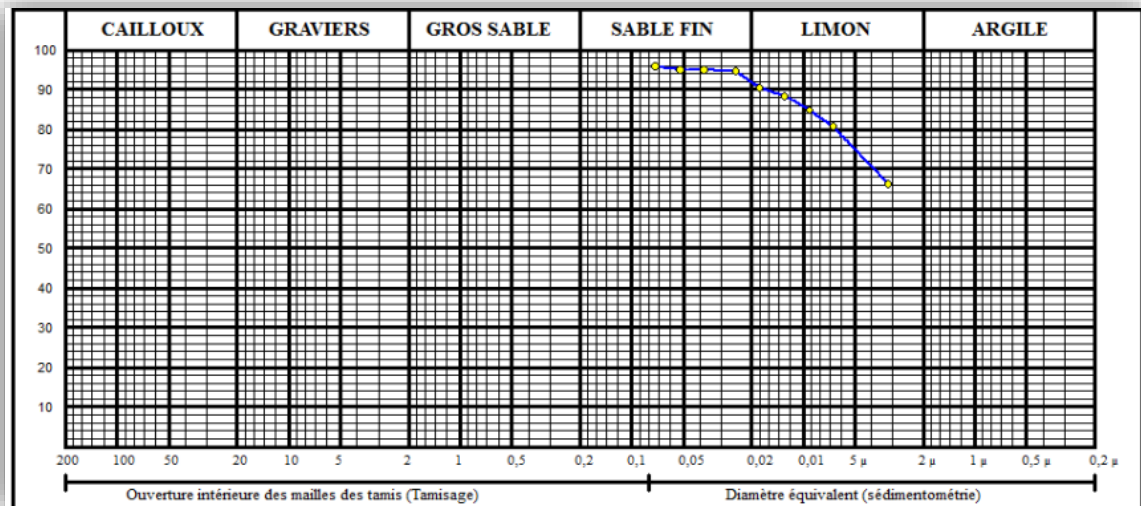


Figure III.4 Courbe de sédimentométrie du sol

Les paramètres essentiels obtenus de cette courbe granulométrique pour ce sol sont :

Les éléments inférieurs à $80 \mu\text{m} = 96,10\%$.

On constate qu'il s'agit d'un sol fin puisque le pourcentage des éléments fins (le diamètre inférieures à 80μ) est supérieur à 50%.

III.2.1.4 Essai de limites d'Atterberg (NF P 94-051)

- **Mode opératoire**

a) Limite de liquidité (w_L)

1. Mélanger environ 100 g de sol tamisé à $400 \mu\text{m}$ avec de l'eau distillée pour obtenir une pâte homogène.
2. Placer une partie de la pâte dans la coupelle de Casagrande et la rainurer au centre à l'aide de l'outil à rainurer.
3. Soulever et laisser retomber la coupelle d'une hauteur de 1 cm à une fréquence de 2 coups par seconde.
4. Compter le nombre de coups nécessaires pour refermer la rainure sur une longueur de 12 mm.
5. Répéter les étapes 3 et 4 pour différents teneurs en eau en augmentant progressivement la quantité d'eau ajoutée au sol.
6. Tracer la courbe représentant le nombre de coups en fonction de la teneur en eau correspondante.
7. Déterminer la teneur en eau correspondant à 25 coups, qui représente la limite de liquidité (w_L).

b) Limite de plasticité (w_P)

1. Prélever une partie de la pâte de sol utilisée pour la détermination de la limite de liquidité.
2. Rouler la pâte sur une surface lisse et non absorbante pour former un petit boudin de 3 mm de diamètre.

3. Répéter l'opération en diminuant progressivement la teneur en eau du sol.
4. La limite de plasticité (w_p) est atteinte lorsque le boudin se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.

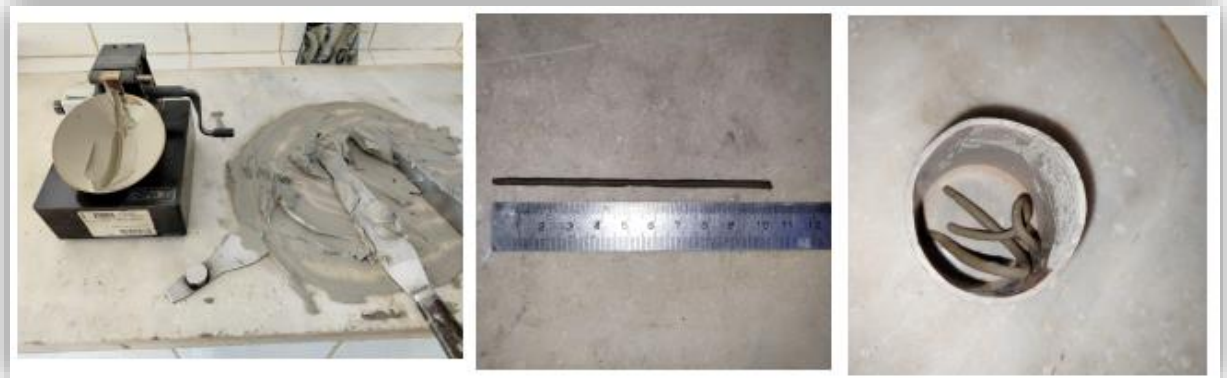


Figure III.5 Détermination des limites d'Atterberg

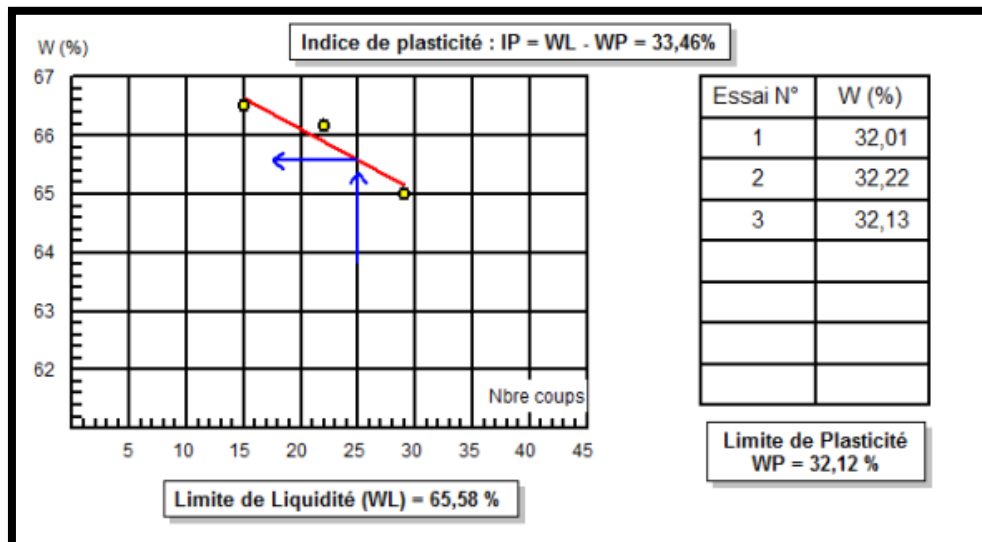


Figure III.6 Courbe de la limite de liquidité W_L de l'argile

Tableau III.5 Degré de plasticité des sols [6]

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

- ✓ En fonction de la valeur de l'indice de plasticité et du tableau III.5, le sol est classé comme argile plastique.

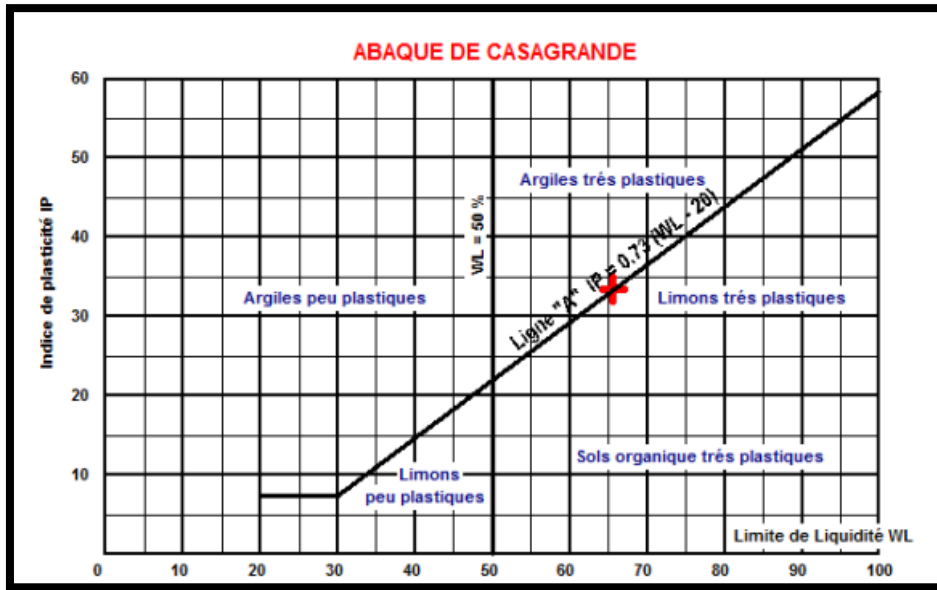


Figure III.7 Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins

III.2.1.4.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement de notre argile

Dans ce qui suit, sur la base de plusieurs travaux de front, nous pouvons estimer le potentiel de gonflement en fonction des caractéristiques physiques découvertes. On peut estimer que le potentiel de gonflement de notre sol est mentionné par les tableaux de classification suivant basé sur les travaux précédents.

Tableau III.6 Estimation du potentiel de gonflement [6]

WL	Ip	Potentiel de gonflement	Classification
<50	<25	<0.5	Faible
50-60	25-35	0.5-1.5	Moyen
>60	>35	>1.5	Elevé

Tableau III.7 Estimation du potentiel gonflement [1]

WL	Ip	Classification
20-49	15-24	Faible à moyen
50-70	24-46	Elevé
>70	>46	Très Elevé

A partir de ces Tableaux et les valeurs trouvées des paramètres physiques (WL= 65.58 % et Ip=33.46%) ; on peut conclure que l’argile a un potentiel de gonflement élevée.

III.2.1.5 Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

- **Mode opératoire:**

1. Peser une masse connue de sol sec (typiquement 5 g pour un sol fin).
2. Introduire le sol dans un bécher contenant un volume d'eau distillée (typiquement 100 ml).
3. Agiter la suspension à l'aide de l'agitateur magnétique pendant 5 minutes.
4. Ajouter progressivement la solution de bleu de méthylène par incréments de 1 ml à l'aide de la burette graduée tout en maintenant l'agitation.
5. Après chaque ajout, prélever une goutte de la suspension à l'aide d'une baguette en verre et la déposer sur le papier filtre.
6. La fin de l'essai est atteinte lorsque l'auréole formée autour de la goutte sur le papier filtre présente un halo bleu clair persistant pendant 5 secondes.
7. Noter le volume de solution de bleu de méthylène utilisé pour atteindre ce point.



Figure III.8 Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).

- **Expression des résultats**

La valeur de bleu de méthylène (VBS) est exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbé par 100 g de sol sec.

$$\text{VBS} = \text{V} / \text{M} \dots \dots \dots \text{(III.8)}$$

$$\text{VBS} = 380 / 60 = 6.33\%$$

Avec:

- V : Volume de solution de bleu de méthylène utilisé (ml)
- M : Masse de sol sec utilisée (g)

Tableau III.8 Classification des sols suivant la valeur au bleu de méthylène

Valeur de bleu de méthylène (VB)	Catégorie de sol
$0.1 < VBS < 0.2$	sol insensible à l'eau
$0,2 \leq VBS < 1,5$	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq VBS < 2,5$	Sol sablo argileux, peu plastiques
$2,5 \leq VBS < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq VBS < 8$	sol argileux.
$8 < VBS$	sol très argileux.

- **Observation :**

Si $6 \leq 6.33 \leq 8$: SOLS ARGILEUX

III.2.2 La bentonite utilisé dans le sol reconstitué

Les caractéristiques de la bentonite utilisée dans cette étude sont en partie celles fournies par le fabricant. Elles sont présentées dans les tableaux III.9 où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption. Les principales caractéristiques sont : VBS : 25, WL=175 et PH=9

Tableau III.9. Caractéristique pétrographiques-minéralogiques [7]

Couleur	Grise
Aspect	Homogène
Texture	Massive
Nature pétrographique	Calcaire Microcristallin

Tableau III.10 Composition chimique de la bentonite, Résultats de fluorescence X. [7]

Type de sol	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO	SO ₃	P ₂ O ₅
Bentonite	65.8	6.36	14.5	3.5	2.65	2.87	3.04	0.34	0.47	/

III.2.3 Caractérisation du Carrelage

Nous avons utilisé du carrelage broyé. La Figure III.9 présente un échantillon de poudre obtenue. Pour déterminer ses propriétés nous avons réalisés les essais ci-après :

**Figure III.9** Poudre de carrelage

III.2.3.1 Analyse granulométrique du Carrelage broyé (NF 18-304)

Tableau III.11 Analyse granulométrique de la poudre de carrelage

Tamis (mm)	Tamis (g)	Tamis +refus (g)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisat Cumulé %
				(g)	(%)	
4	417.6	417.6	0	0	0	100
2	412.3	441.5	29.2	29.2	2.92	97.08
1	337.5	384.1	46.6	75.8	7.58	92.42
0.5	301.3	381.4	80.1	155.9	15.59	84.41
0.315	283.1	392	108.9	264.8	26.48	73.52
0.25	280.7	373.4	92.7	357.5	35.75	64.25
0.16	275.3	557.2	281.9	639.4	63.94	36.06
0.125	267.6	511.9	244.3	883.7	88.37	11.63
0.063	261.8	372.1	110.3	994	99.4	0.6
Fond	248	253.2	5.2	999.2	99.92	0.08

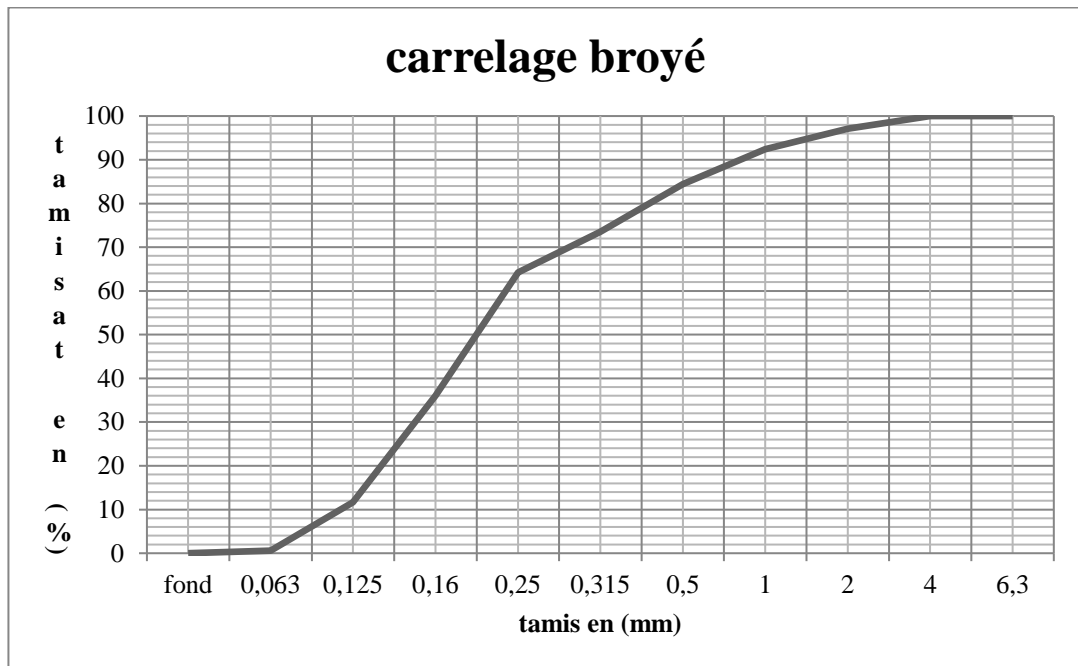


Figure III.10 Courbe granulométrique de la carrelage broyé

Tableau III.12 Les critères de courbure et d'uniformité

D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c
0.125	0.151	0.223	1.784	0.818

Cu < 6 et 1 < Cc < 3. On a une condition non satisfaite, donc le matériau du carrelage broyé est mal gradué.

III.2.3.2 La masse volumique apparente

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V \dots\dots\dots (III.9)$$

Tableau III.13 Masse volumique apparente du Poudre de carrelage

V (cm ³)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ _{app} (g/cm ³)	ρ _{app} (moy) (g/cm ³)
420	46.2	511.1	1.11	1.11
420	46.2	511.2	1.11	
420	46.2	509.5	1.10	



Figure III.11 Masse volumique apparente

III.2.3.3 La masse volumique absolue

La méthode de l'éprouvette graduée

$$\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (III.10).$$

Tableau III.14 Masse volumique absolue du carrelage broyé

M (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ _{abs} (g/cm ³)	ρ _{abs} (moy) (g/cm ³)
80	80	116	2.22	2.20
100	100	146	2.17	
120	120	174	2.22	



Figure III.12 Essai de la masse volumique absolue

III.2.3.4 Essai du bleu au bleu de méthylène sur carrelage broyé

Un essai au bleu de méthylène a été effectué sur le carrelage broyé pour vérifier s'il est un matériau gonflant

$$\text{VBS} = 10 / 60 = 0.16\%$$

On a $0.1 < \text{VBS} < 0.2$: sol insensible ou peu sensible à l'eau

III.2.4 Caractérisation du PVC

Dans cette étude, nous avons utilisé les fibres de PVC, La Figure III.13. Présente un échantillon des fibres obtenues. Pour déterminer ses propriétés nous avons réalisés les essais ci-après :



Figure III. 13 Fibres de PVC

III.2.4.1Analyse granulométrique (NF 18-304)

Analyse granulométrique par tamisage



Figure III.14 Série de tamis et tamiseuse électrique.

Tableau III.15 Analyse granulométrique du PVC

Tamis (mm)	Tamis (g)	Tamis +refus (g)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisat Cumulé %
				(g)	(%)	
5	401.5	401.5	0	0	0	100
4	417.5	650.1	232.6	232.6	64.72	35.28
2	384.6	621.4	236.8	469	93.8	6.2
1	337.5	361.1	23.6	492.6	98.52	1.48
0.5	300.6	305.7	5.1	497.7	99.54	0.46
0.315	283	284.4	1.4	499	99.8	0.2
0.250	280.6	281.2	0.5	499.5	99.9	0.1
0.160	275	275.3	0.3	499.8	99.96	0.04
0.063	261.5	261.6	0.1	499.9	99.98	0.02
Fond	248.5	248.6	0.1	500	100	0

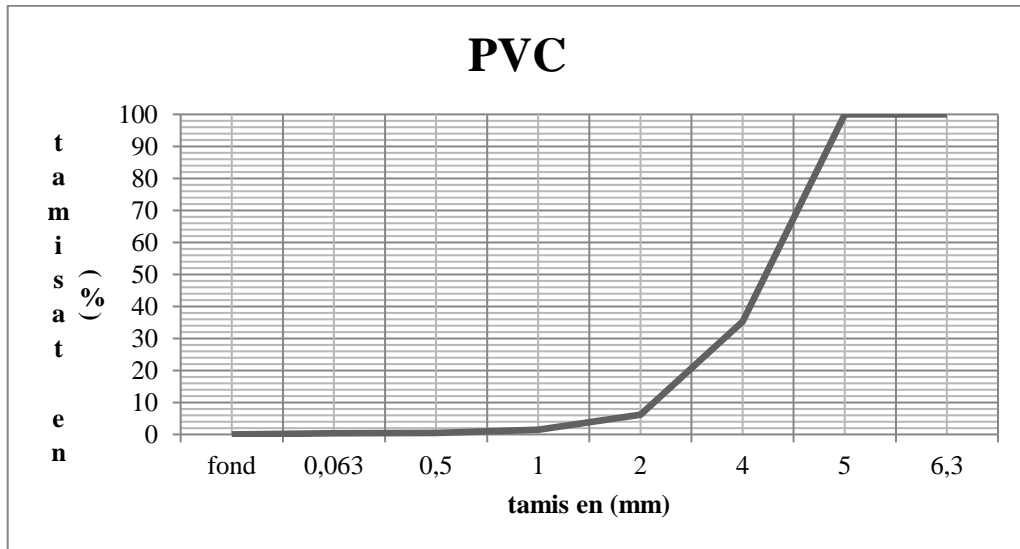


Figure III.15 Courbe granulométrique du PVC

Tableau III.16 Les critères de courbure et d'uniformité

D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c
2.3	3.6	4.30	1.87	1.31

C_u < 6 et 1 < C_c < 3. On a une condition non satisfaite, donc les fibres de PVC sont mal gradué.

III.2.4.2 La masse volumique apparente de PVC

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V \dots \dots \dots (III.9)$$

Tableau III.17 Masse volumique apparente de PVC

V (cm ³)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ _{app} (g/cm ³)	ρ _{app} (moy) (g/cm ³)
420	46	348.9	0.720	0.721
420	46	350.5	0.725	
420	46	347.3	0.717	



Figure III.16 Masse volumique apparente

III.2.4.3 La masse volumique absolue de PVC

La Méthode de l'éprouvette graduée

$$\rho_{\text{abs}} = M / (V_2 - V_1) \dots \dots \dots \text{(III.10)}$$

Tableau III.18 Masse volumique absolu de PVC

M (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ _{abs} (g/cm ³)	ρ _{abs} (moy) (g/cm ³)
80	80	142	1.290	1.325
100	100	174	1.351	
400	400	700	1.333	



Figure III.17 Essai de la masse volumique absolue

III.3 Les essais mécaniques

III.3.1 Essai Proctor (NF P 94-093)

- **Mode opératoire:**

1. Préparer un échantillon de sol séché à l'air et tamisé à une granulométrie définie.
2. Diviser l'échantillon en plusieurs parties et ajouter de l'eau à chaque partie pour obtenir une gamme de teneurs en eau croissante.
3. Pour chaque teneur en eau :
 - Compacter le sol dans le moule Proctor en plusieurs couches successives, en appliquant un nombre de coups de dame Proctor défini pour chaque couche.
 - Après compactage, agrafer le moule et peser l'ensemble.
 - Prélever un échantillon de sol au centre du moule pour la détermination de la teneur en eau.
4. Déterminer la teneur en eau de chaque échantillon après passage à l'étuve.
5. Calculer la densité sèche (γ_d) pour chaque teneur en eau.
6. Tracer la courbe Proctor, représentant la densité sèche (γ_d) en fonction de la teneur en eau (w).

- Déterminer la densité sèche maximale ($\gamma_d \text{ max}$) et la teneur en eau optimale ($w \text{ opt}$) à partir de la courbe Proctor.



Figure III.18 Essai Proctor sur l'argile

Tableau III.19 Résultat de l'essai Proctor sur l'argile

W%	22.97	25.045	28.085
Densité sèche γ_d (Mg/m³)	1.489	1.547	1.497

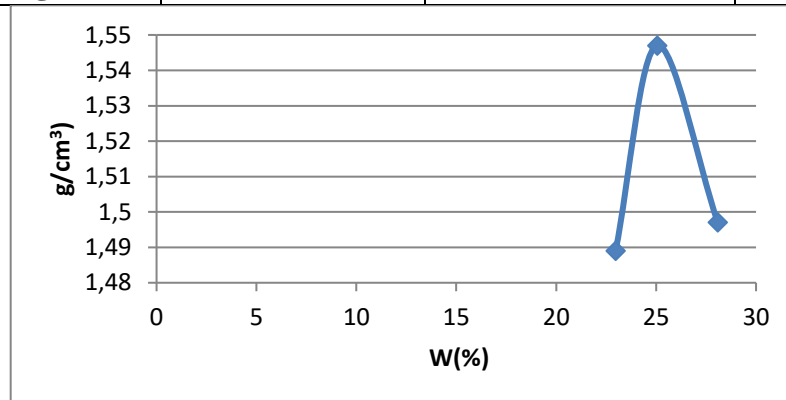


Figure III.19 Courbe Proctor du sol argileux

III.3.2 Essai de cisaillement (NF P 94-071-1)

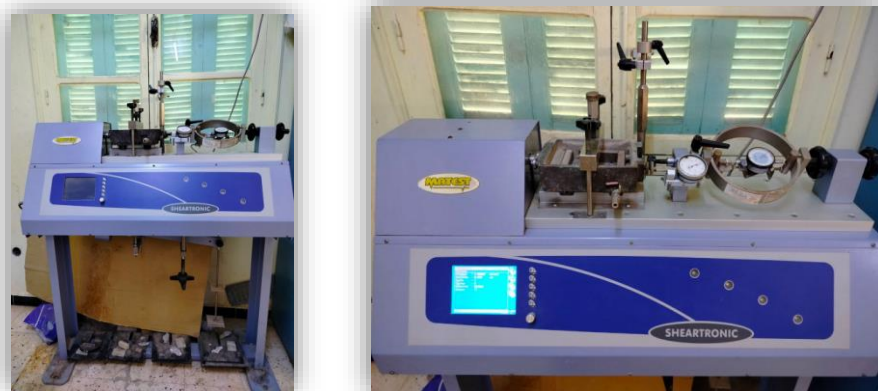


Figure III.20 Appareil de cisaillement direct

La machine est un essai de cisaillement direct Sheartronic fabriqué par MATEST. Il est utilisé pour mesurer la résistance au cisaillement du sol et d'autres matériaux granulaires.

La machine se compose d'un cadre, d'un dispositif de chargement, d'une boîte à cisaillement et d'un système d'acquisition de données. Le cadre assure le support des autres composants de la machine. Le dispositif de chargement applique une charge verticale à la boîte à cisaillement. La boîte à cisaillement contient l'échantillon de sol qui est testé. Le système d'acquisition de données enregistre la charge et le déplacement de l'échantillon pendant l'essai.

Pour effectuer un essai de cisaillement direct, l'échantillon de sol est placé dans la boîte à cisaillement et une charge verticale est appliquée. La boîte à cisaillement est ensuite cisailée à une vitesse constante jusqu'à la rupture de l'échantillon. La résistance au cisaillement de l'échantillon est calculée à partir des données de charge et de déplacement. L'essai de cisaillement direct est une méthode courante pour mesurer la résistance au cisaillement du sol. Il est utilisé pour concevoir des fondations, des pentes et d'autres structures géotechniques.

Voici quelques-unes des spécifications de l'essai de cisaillement direct Sheartronic :

1. Charge verticale maximale : 50 kN
2. Déplacement de cisaillement maximal : 20 mm
3. Vitesse de cisaillement : 0,01 à 10 mm/min
4. Système d'acquisition de données : 16 bits, 24 canaux

L'essai de cisaillement direct Sheartronic est un outil polyvalent et fiable pour mesurer la résistance au cisaillement du sol et d'autres matériaux granulaires. Il est utilisé par les ingénieurs géotechniciens et les chercheurs du monde entier.

Voici quelques détails supplémentaires sur la machine visibles sur l'image :

- La machine dispose d'un panneau de commande tactile numérique.
- La machine dispose d'un dispositif de chargement pneumatique.
- La machine dispose d'une boîte à cisaillement ronde.

- **Types d'essais de cisaillement**

- **Essai de cisaillement direct (boîte de Casagrande):** L'échantillon est placé dans une boîte en deux parties et cisailé horizontalement.
- **Essai triaxial:** L'échantillon est confiné latéralement par une pression de fluide et soumis à une contrainte verticale croissante.

- **Mode opératoire général**

1. Préparer un échantillon de sol de forme et de dimensions définies.
2. Placer l'échantillon dans l'appareil de cisaillement et appliquer les conditions de confinement latéral si nécessaire (essai triaxial).
3. Appliquer une force de cisaillement croissante à vitesse constante.
4. Enregistrer en continu la force appliquée, la déformation et la pression interstitielle (si mesurée).

5. Poursuivre le cisaillement jusqu'à la rupture de l'échantillon ou jusqu'à l'obtention d'une déformation significative.



Figure III.21 Préparation de l'échantillon pour l'essai de cisaillement

III.3.3 Essai résistance à la compression (ISO 17892-7:2017)

- **Mode opératoire général:**

1. Préparer un échantillon du matériau de forme et de dimensions normalisées.
2. Placer l'échantillon entre les plateaux d'une presse hydraulique.
3. Appliquer une force compressive axiale croissante à vitesse constante.
4. Enregistrer la force appliquée et la déformation correspondante.
5. Poursuivre la compression jusqu'à la rupture de l'échantillon ou jusqu'à l'obtention d'une déformation définie.

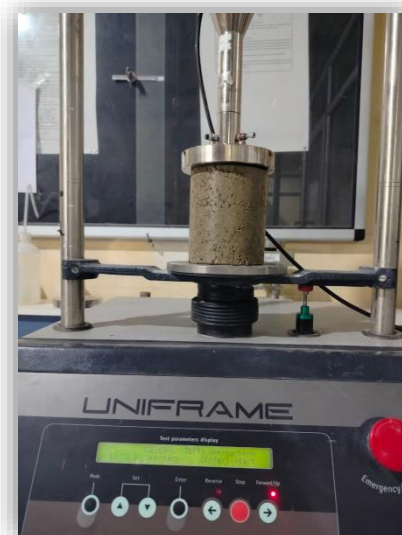


Figure III.22 Appareil de compression

Cet appareil est une machine d'essai de compression universelle, communément appelée "machine d'essai de résistance à la compression". Elle est utilisée pour déterminer la

résistance à la compression des matériaux tels que le béton, l'acier, les plastiques et la céramique. L'appareil est disponible au niveau du laboratoire de recherche (LGCH) Université de Guelma.

Voici comment elle fonctionne :

1. **Préparation de l'échantillon:** Un échantillon du matériau à tester est préparé sous forme de cylindre ou de cube, avec des dimensions spécifiques.
 2. **Placement dans la machine:** L'échantillon est placé sur la plaque inférieure de la machine d'essai, qui est généralement une plaque solide et plane.
 3. **Application de la charge:** La plaque supérieure de la machine d'essai est lentement abaissée vers l'échantillon, en appliquant une force de compression. Cette force est généralement contrôlée et mesurée avec précision.
 4. **Mesure de la résistance:** La machine enregistre la force appliquée et la déformation de l'échantillon. La déformation est la quantité de compression que subit l'échantillon. Lorsque l'échantillon commence à se fracturer ou à se briser, la force maximale atteinte est enregistrée comme la résistance à la compression du matériau.
- ✓ **Explication plus détaillée:**
- **Charge appliquée:** La force de compression est généralement appliquée progressivement et de manière constante.
 - **Système de mesure:** La machine d'essai utilise des capteurs de charge et de déplacement pour mesurer la force appliquée et la déformation de l'échantillon.
 - **Affichage des résultats:** Les données collectées sont généralement affichées sur un écran numérique ou enregistrées dans un logiciel pour analyse.

En bref: La machine d'essai de compression permet de mesurer la résistance d'un matériau en appliquant une force de compression contrôlée et en mesurant la force et la déformation jusqu'à la rupture de l'échantillon.

III.3.4 Essai œdométrique (XP P 94-090-1 et XP P 94-091)

- **Mode opératoire:**
 1. Préparer un échantillon de sol de forme cylindrique et le placer dans l'odomètre, en veillant à un bon contact avec la pierre poreuse.
 2. Appliquer une première charge verticale à l'échantillon.
 3. Mesurer les variations de hauteur de l'échantillon en fonction du temps jusqu'à stabilisation du tassement.
 4. Augmenter la charge verticale par paliers et répéter les mesures de tassement pour chaque palier.
 5. Poursuivre le chargement jusqu'à atteindre la contrainte effective maximale prévue.



Figure III.23 Appareil odométrique

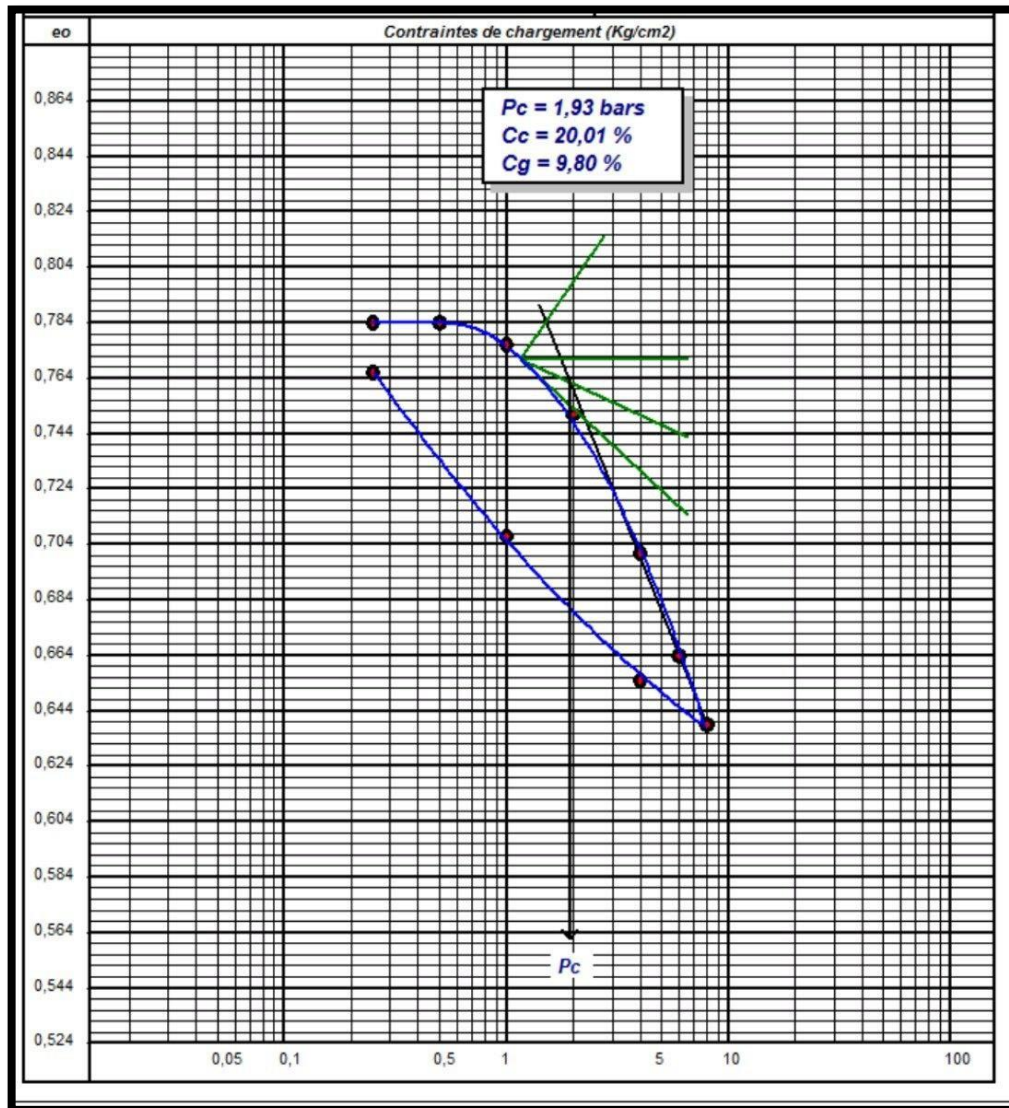


Figure III.24 Courbe œdométrique du sol reconstitué (argile +25% bentonite)

A partir de cette courbe, on peut déterminer le coefficient de gonflements et de compressibilité de notre sol reconstitué, qui sont essentiels à la classification des sols considérés. Les résultats sont regroupés dans le tableau III.20.

Le classement des argiles selon leurs indices de compressibilités; D'après le tableau III.21. Le $C_c = 0.208$, on peut conclure que notre sol reconstitué est moyennement compressible.

Selon le tableau III.22 $C_g = 0.098 > 0.05$ donc le sol est un sol argile gonflant

Tableau III.20 compressibilités des sols.

Nature du sol	Les dégradés de la compressibilité	Indice de compressibilité C_c
Sables	incompressible	$C_c < 0,02$
	très peu compressible	$0,02 < C_c < 0,05$
	peu compressible	$0,05 < C_c < 0,10$
Kaolinites	moyennement compressible	$0,10 < C_c < 0,20$
Illites	assez fortement compressible	$0,20 < C_c < 0,30$
	très compressible	$0,30 < C_c < 0,50$
Montmorillonites	extrêmement compressible	$0,50 < C_c$

Tableau III.21 Les résultats odométrique d'état charge

Indice de gonflement	Les dégradés de gonflement
$C_g > 0.05$	Sol gonflant
$C_g < 0.05$	Sol peu gonflant

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a réalisé des essais de caractérisation des matériaux utilisés (sol argileux, bentonite, poudre de carrelage et de PVC), Ces principaux essais sont: la teneur en eau, densité apparente, la masse volumique absolue et apparente, l'essai de sédimentométrie, l'essai au bleu méthylène et les limites d'Atterberg ainsi que les essais mécanique: l'essai Proctor, l'essai de cisaillement direct, l'essai œdométrique et l'essai de résistance à la compression.

Références Bibliographiques Du troisième Chapitre

[1] Abou-Bekr. N, Aissa Mamoune. S.M. 2004 Stabilization of swelling soils using salts.

Conférence internationale de géotechnique. Beyrouth, Lebanon.

[2] Batouchek H., 2010. Intercalation de liquides ioniques dans les argiles. Pour l'obtention du diplôme de magistère Université de Constantine. p8.

[3] Boukadah N., 2007. Etude de l'adsorption de micropolluants organiques sur la bentonite mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister, à l'Université 20 Août 55, Skikda. p39. 2

[4] Chikhi Kh., 2013. Adsorption du zinc sur la bentonite de Maghnia. Pour l'obtention du diplôme de magistère, Université Kasdi Merbah OUARGLA. p7

[5] Idoui, I., Bekkouche, R. B., Riad, B., & Inas, B : 2021. Use of biopolymers in the stabilization of clay soils. Selected scientific papers-journal of civil engineering, 16(2), 37-5. vol. 16, no2, pp.37-53.]

[6] Mohammed S et Ben Ahmed A; 2023. Amélioration et stabilisation des sols argileux par les déchets de la région d'Adrar pour la construction civile. Pour l'obtention du diplôme de Master, Université Ahmed Draia d'Adrar p4

[7] Moussaouiz ., 2012. Intercalation de dendromètres à travers la et bentonites sodiques. Pour l'obtention du diplôme de magistère, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. p19. et mémoire BOUKADAH N. p40.

Normes techniques

La Norme NFP 94-093 Détermination des références de compactage d'un matériau.

La Norme NFP 94-071-1 Essai de Cisaillement.

La Norme NFP 94-051 Détermination des limites d'Atterberg.

La norme NF P 94-053 la densité apparente

La norme NFNF P 94-057 la sédimentométrie

La norme NF NFP 94-068) le méthylène (VBS)

La norme XP P 94-090-1 Essai œdométrique

Chapitre IV : Présentation et interprétation des résultats d'essais

CHAPITRE IV : Présentation et interprétation des résultats d'essais

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats d'essais effectués sur le sol reconstitué (argile +25% bentonite) et deux mélanges (sol reconstitué + carrelage broyé et sol reconstitué + PVC). L'intérêt de cette étude est de voir l'influence de l'addition des déchets recyclés (carrelage broyé et PVC) sur certains paramètres physiques et mécaniques du sol reconstitué traités par des déchets recyclés tels que le compactage, la résistance au cisaillement, la compression non confiné et l'essai œdométrique.

IV.2. L'influence du carrelage broyé sur le sol reconstitué

IV.2.1 L'effet du carrelage broyé sur le bleu de méthylène (VBS)

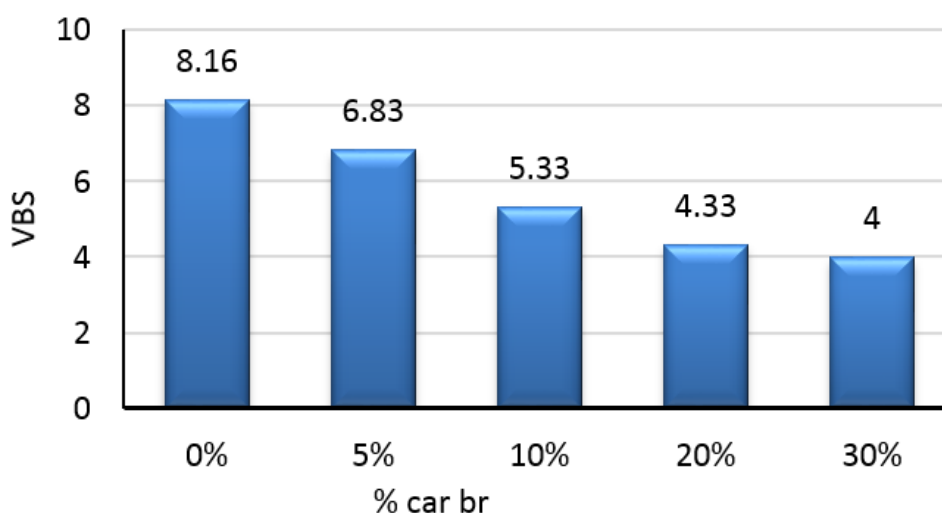


Figure IV.1 Valeurs du bleu de méthylène en fonction des pourcentages en carrelage broyé

D'après la figure IV.1, on remarque une diminution remarquable de la valeur au bleu pour les différents pourcentages du carrelage broyé, un VBS de 8.16 pour le sol reconstitué a diminué jusqu'à 4 pour le mélange sol reconstitué + 30% carrelage .

IV.2.2 Effet du carrelage broyé sur les limites de consistance (Atterberg)

Les essais des limites d'Atterberg pour les différents mélanges (0%, 5%, 10% , 20% et 30%) ont été effectués selon les mêmes normes que celle présentés dans le chapitre III. Les résultats des limites de consistance sont présentés sur les courbes des figures de IV.2 à IV.6.

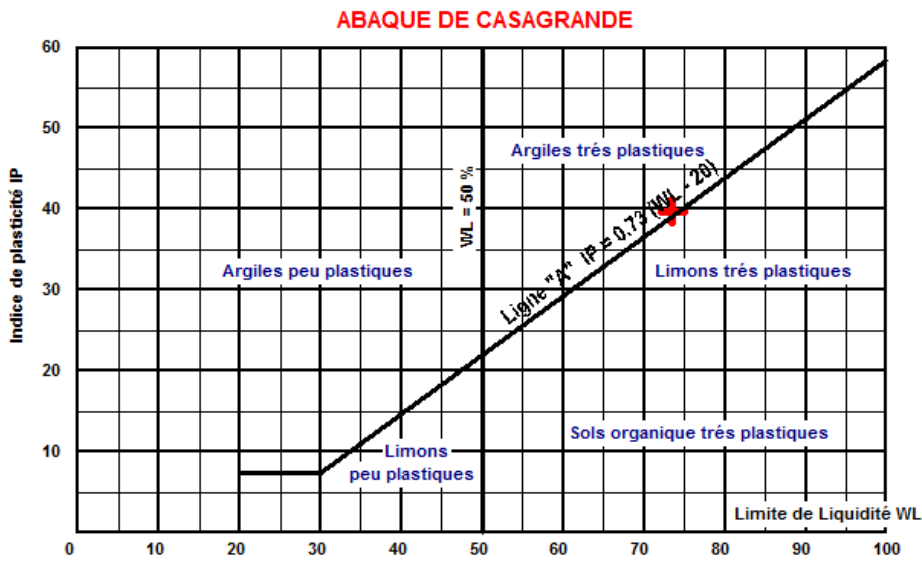
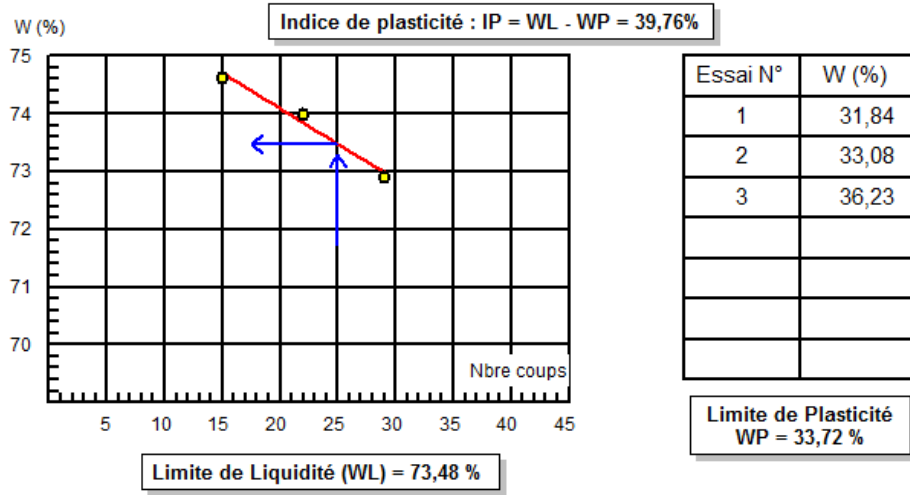


Figure IV.2 Résultats des essais des limites d'Atterberg pour le sol reconstitué (0%)

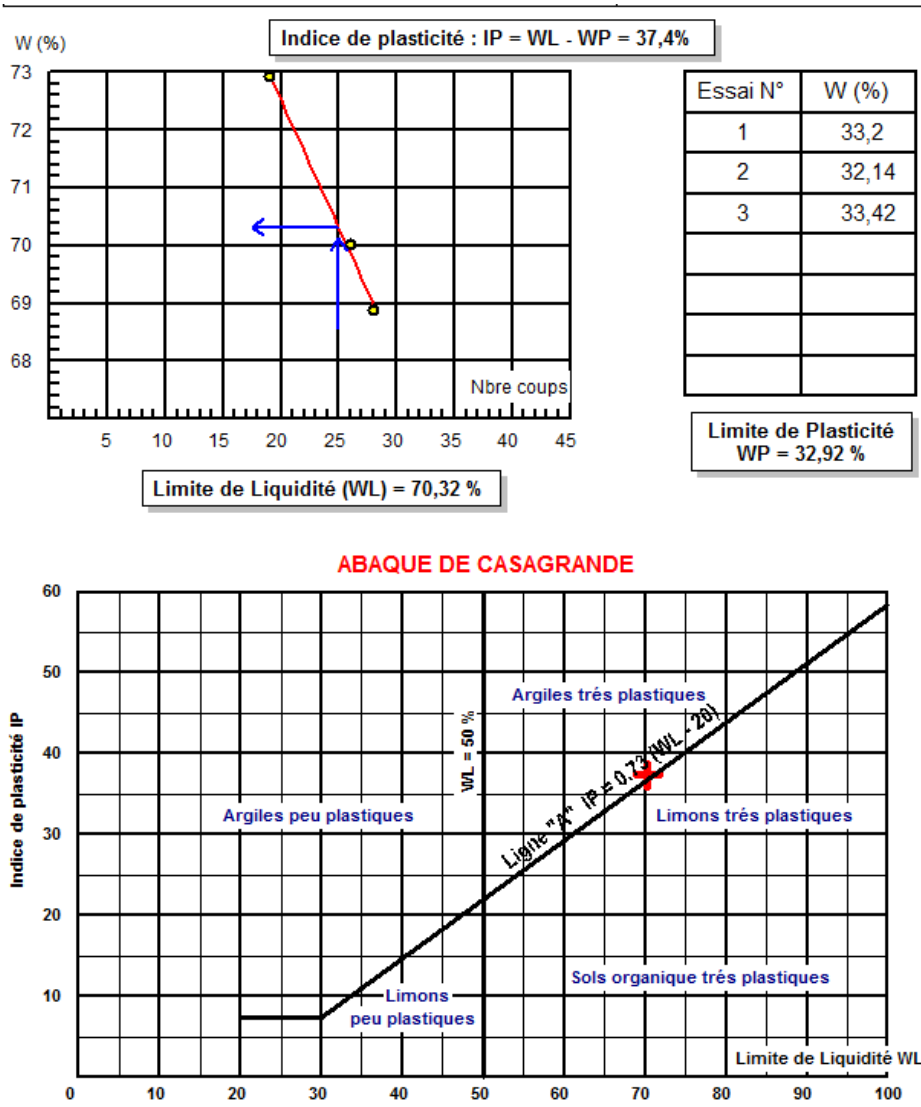


Figure IV.3 Résultats des essais des limites d'Atterberg pour sol reconstitué + 5% de carrelage broyé .

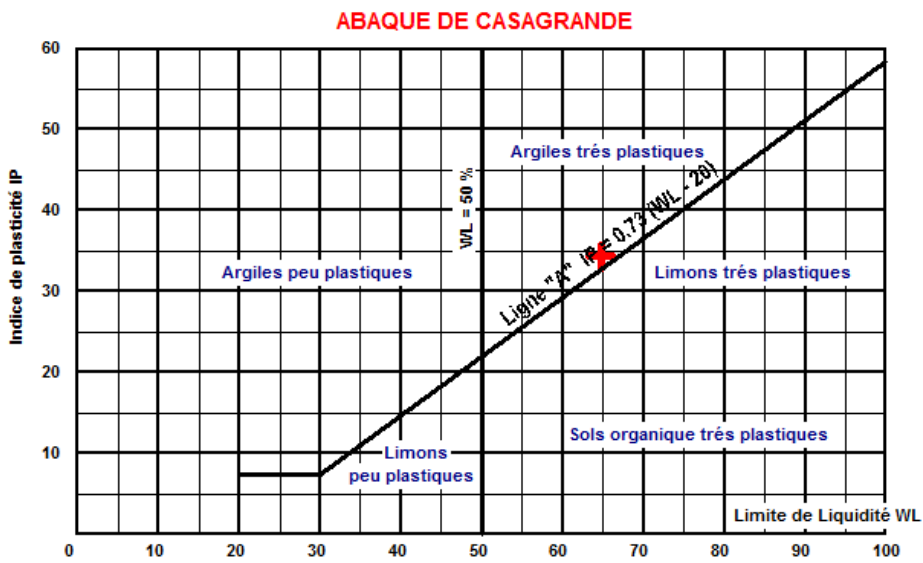
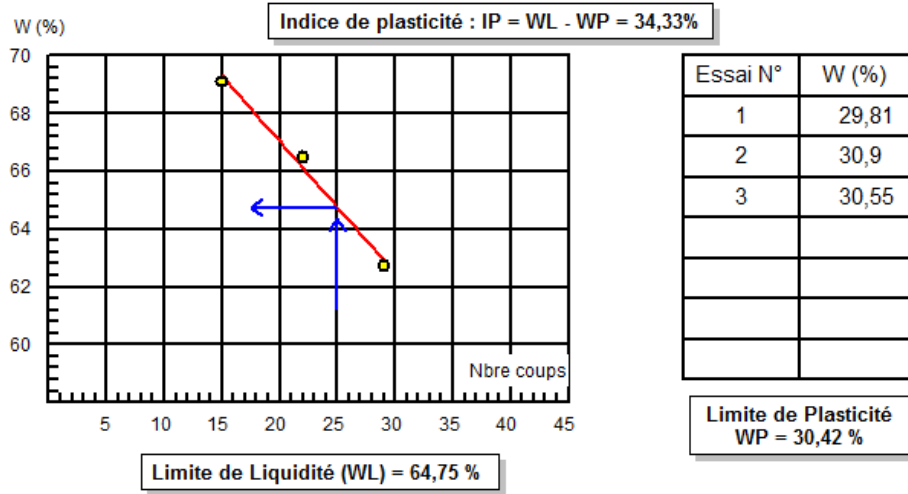


Figure IV.4 Résultats des essais des limites d'Atterberg pour 1sol reconstitué + 10% de carrelage broyé .

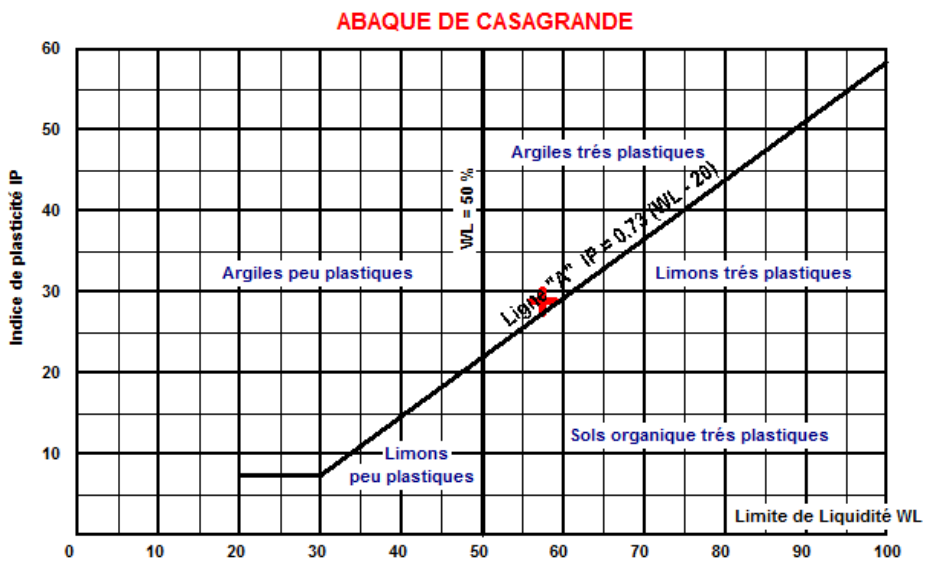
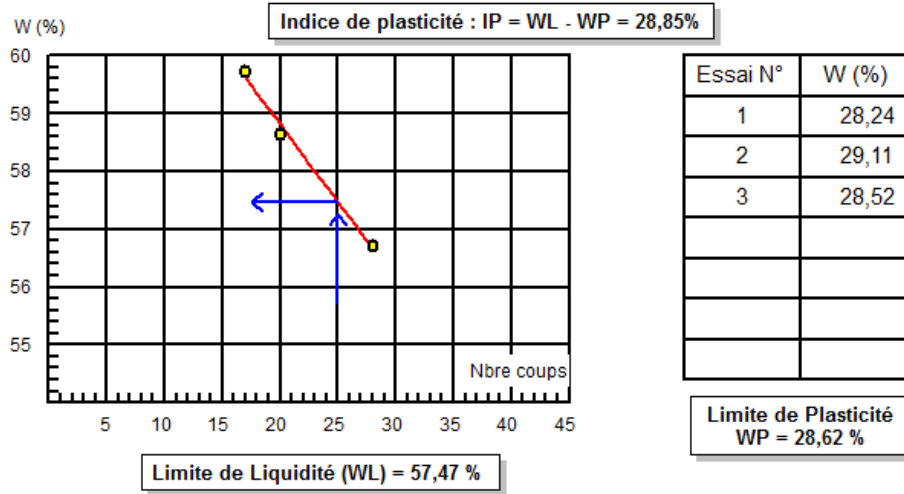


Figure IV.5 Résultats des essais des limites d'Atterberg pour sol reconstitué + 20% de carrelage broyé .

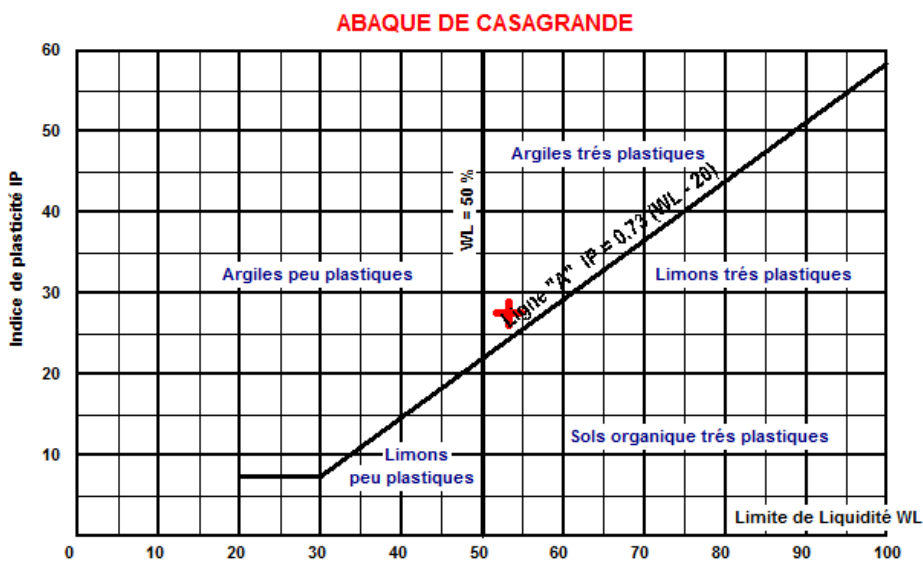
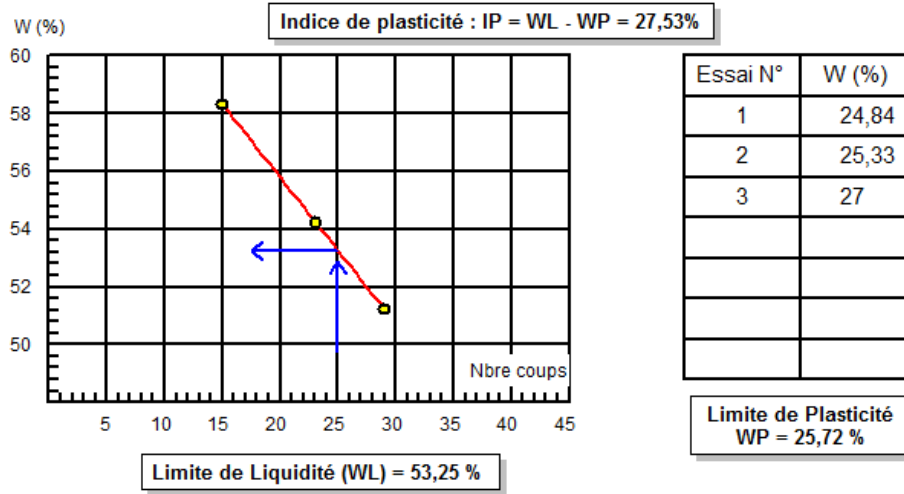


Figure IV.6 Résultats des essais des limites d'Atterberg pour sol reconstitué + 30% de .carrelage broyé .

Tableau IV.1 Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en Carrelage broyé

	0%	5%	10%	20%	30%
WL(%)	73.48	70.32	64.75	57.47	53.25
Wp(%)	33.72	32.92	30.42	28.62	25.72
Ip(%)	39.76	37.4	34.33	28.85	27.53

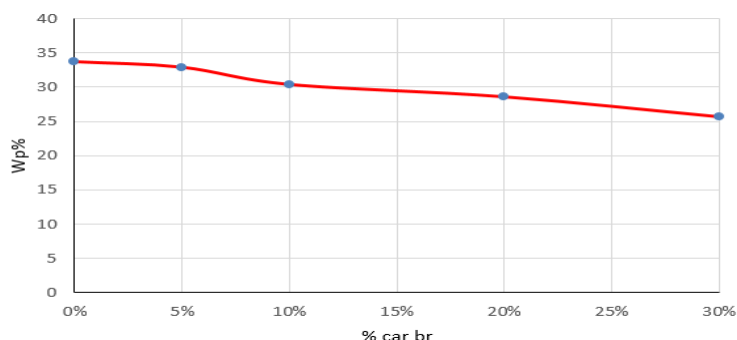


Figure IV. 7 La courbe limite de plasticité en fonction de % carrelage broyé.

Selon le tableau IV.1, on a remarqué que la limite de plasticité diminue graduellement avec l'ajout du pourcentage de carrelage broyé.

L'addition du carrelage broyé a engendré une diminution de l'indice de plasticité (tableau IV.1). Cette diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol instable. Une addition de 10% de carrelage broyé est suffisante pour augmenter la maniabilité du sol, en réduisant l'indice de plasticité de 33.72% à 30.42%.

IV.2.3 Effet du carrelage broyé sur le compactage

L'essai Proctor modifié a été effectué en accord avec la norme NF P 94-093 (chapitre III) afin de déterminer l'effet du carrelage broyé sur les paramètres de compactage à savoir la densité sèche maximale (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimale (w_{opt}) sont présentées sur le tableau IV 2 pour le sol reconstitué et les mélanges à différents pourcentage 5%, 10%, 20% et 30% de carrelage broyé.

Tableau IV.2 Récapitulation des essais Proctor normal à différentes teneur en carrelage broyé

% car	0%	5%	10%	20%	30%
γ_d [g/cm ³]	1.547	1.62	1.54	1.57	1.583
W opt %	25.045	18.92	25.88%	23.92%	21.99%

- **Sol reconstitué (argile +25% bentonite) :**

Tableau IV.3 Résultat d'essai Proctor (sol rec+0% car)

W%	22.97	25.045	28.085
γ_d [g/cm ³]	1.489	1.547	1.497

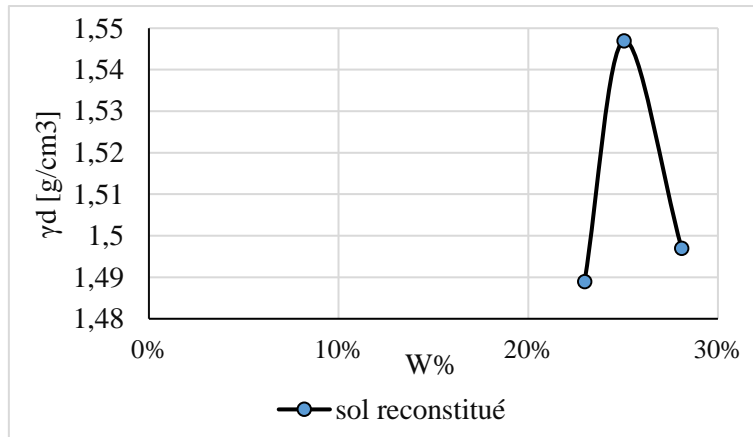


Figure IV.8 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué

▪ Sol reconstitué + 5% de carrelage broyé

Tableau IV.4 Résultat d'essai Proctor (sol rec+5% car)

W%	16.89	18.92	20.46
γd [g/cm³]	1.61	1.62	1.58

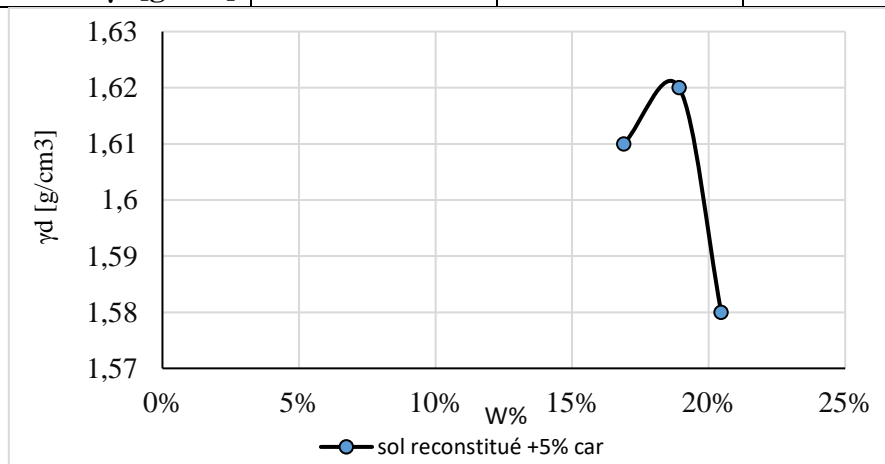


Figure IV.9 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +5% carrelage broyé

▪ Sol reconstitué +10% car :

Tableau IV.5 Résultat d'essai Proctor (sol rec+10% car)

W%	17.445%	25.88%	27.5%
γd [g/cm³]	1.51	1.54	1.514

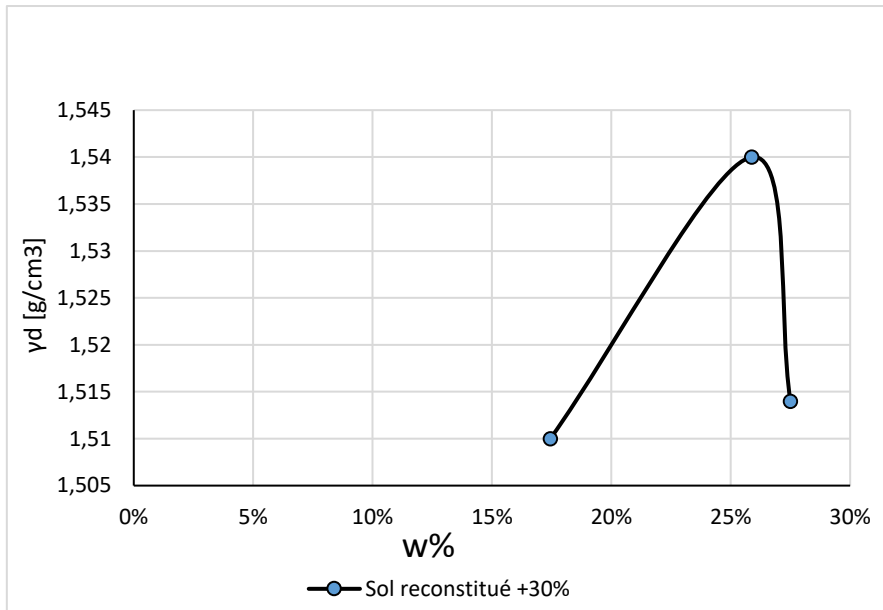


Figure IV.10 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +10% carrelage broyé

▪ Sol reconstitué +20% car:

Tableau IV.6 Résultat d'essai Proctor(sol rec+20% car)

W%	21.42%	23.535%	23.915%	23.92%	26.08%
γ_d [g/cm ³]	1.54	1.55	1.56	1.57	1.56

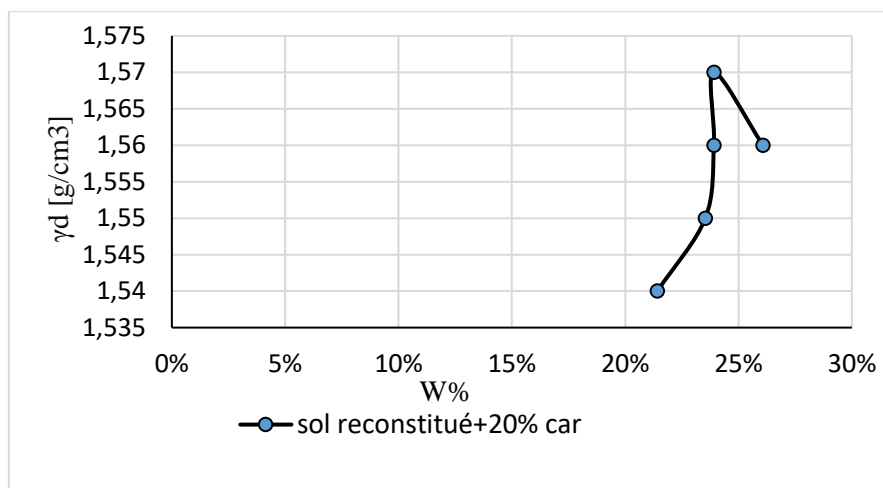


Figure IV.11 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +20% carrelage broyé

▪ Sol reconstitué +30% :

Tableau IV.7 Résultat d'essai Proctor (sol rec+0% car)

W%	17.68%	21.99%	26.555%	27.965%	30%
γ_d [g/cm ³]	1.515	1.583	1.55	1.514	1.449

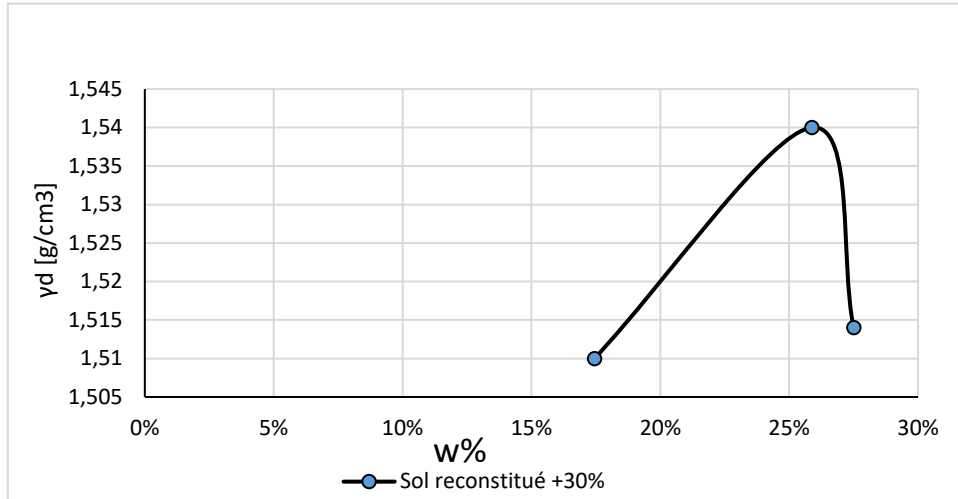


Figure IV.12 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +30% carrelage broyé

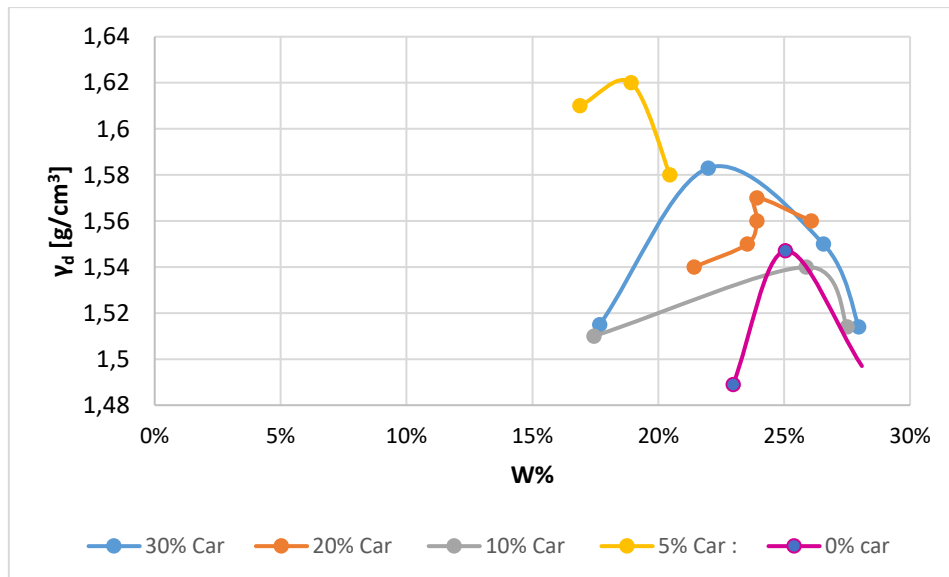


Figure IV.13 Courbe de compactage Proctor pour différents pourcentages du carrelage broyé

La figure IV.13 représente la courbe de comparaison de la densité sèche du sol reconstitué et après traitement avec différents pourcentages de l'ajout utilisé

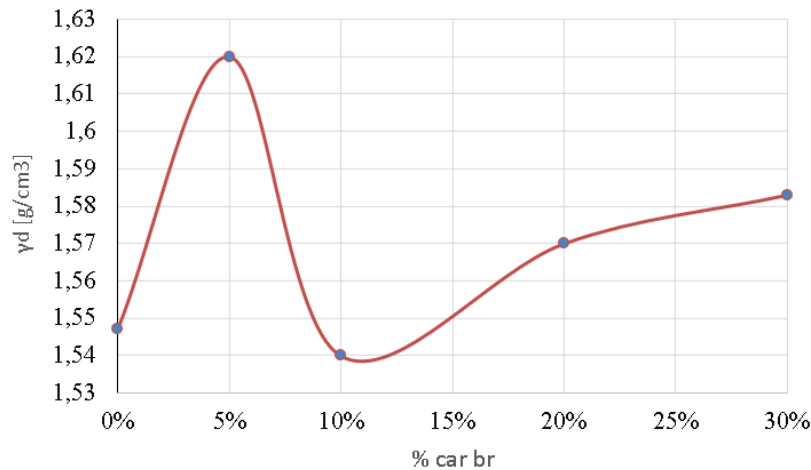


Figure. IV.14 Courbe de γ_d en fonction des pourcentages du carrelage broyé.

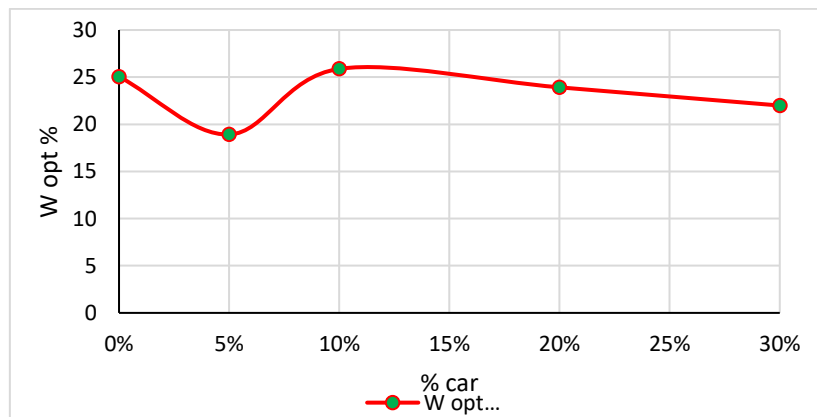


Figure. IV. 15 Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages du carrelage broyé..

La Figure IV14 indique que la valeur de densité sèche maximale a été obtenue par l'addition de 5% et 30% de carrelage broyé.

D'autre part, la Figure IV.15, indique que la valeur de la teneur en eau optimale la plus basse a été obtenue pour l'addition de 10% de carrelage broyé. L'ajout de pourcentages plus élevés entraîne une augmentation des valeurs de la teneur en eau optimale. Cette augmentation est due à l'ajout de carrelage broyé qui remplace une partie des fines particules du sol traité, ce qui nécessite plus d'eau pour compacter le mélange sol-carrelage broyé.

IV.2.4 Effet du carrelage broyé sur la résistance au cisaillement

Sur la base des essais de cisaillement direct sur les échantillons de sol traité avec 5, 10, 20 et 30% de carrelage broyé, nous avons tracé les courbes contrainte/déformation et les courbes intrinsèques qui sont présentés sur les figures IV. 16,17,18, et 19.

- Sol reconstitué

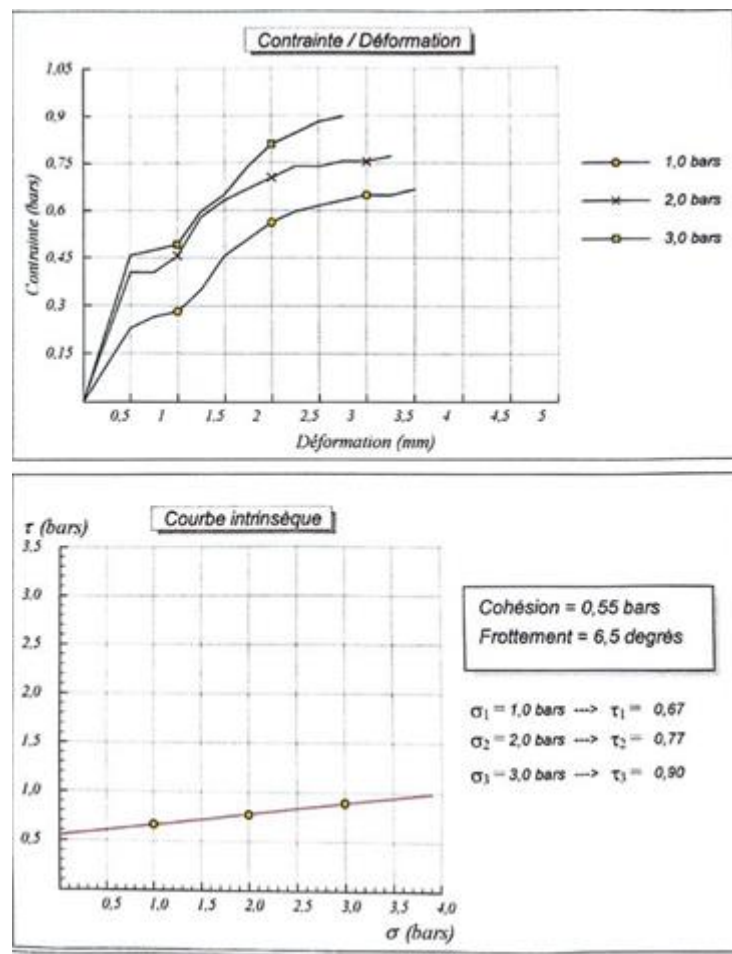


Figure IV.16 Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué (argile +25% bentonite)

▪ Sol reconstitué + 5 % car

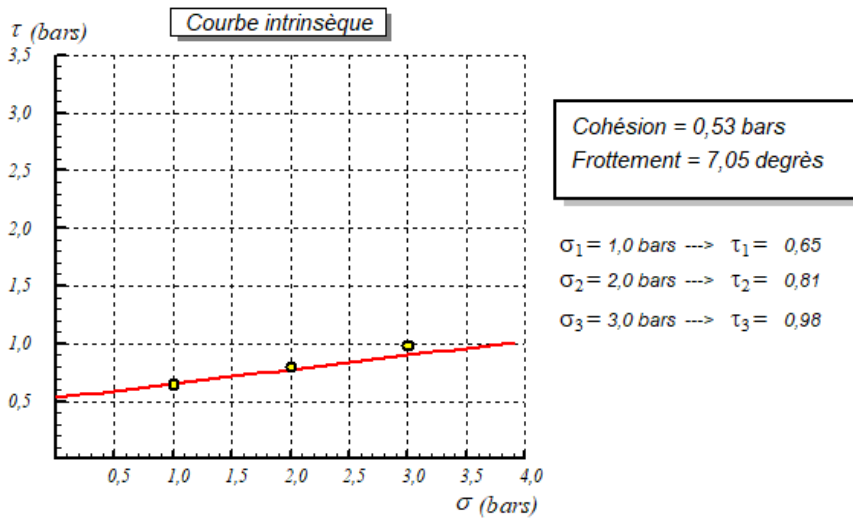
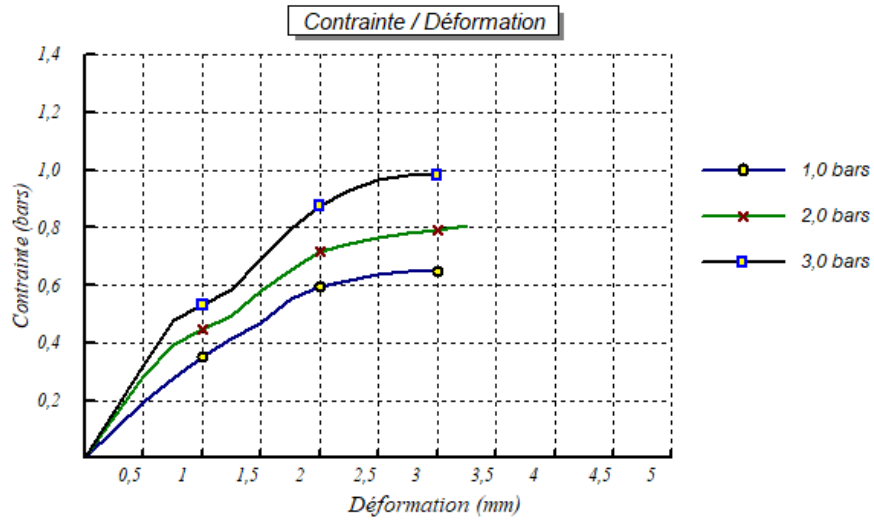


Figure IV.17 Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +5% carrelage broyé

▪ Sol reconstitué + 10 % car

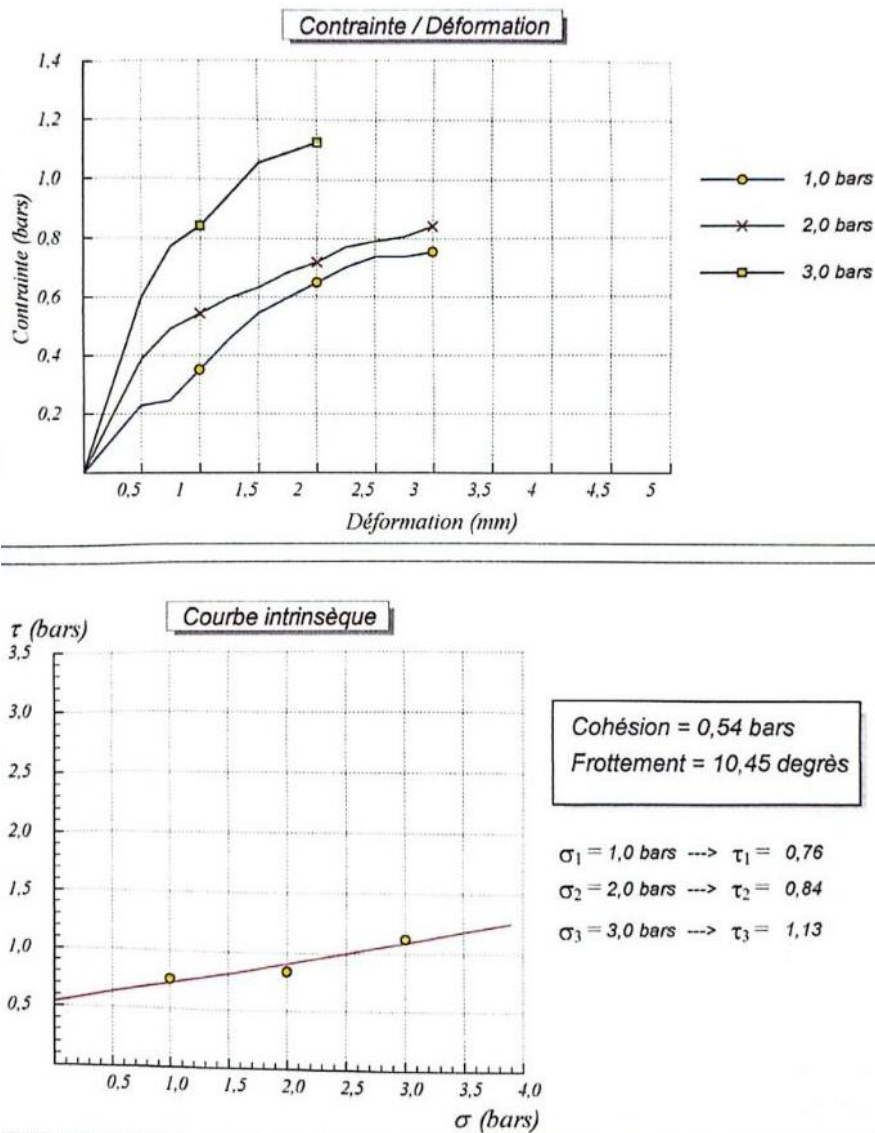


Figure IV. 18 Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +10% carrelage broyé

Sol reconstitué + 20 % car

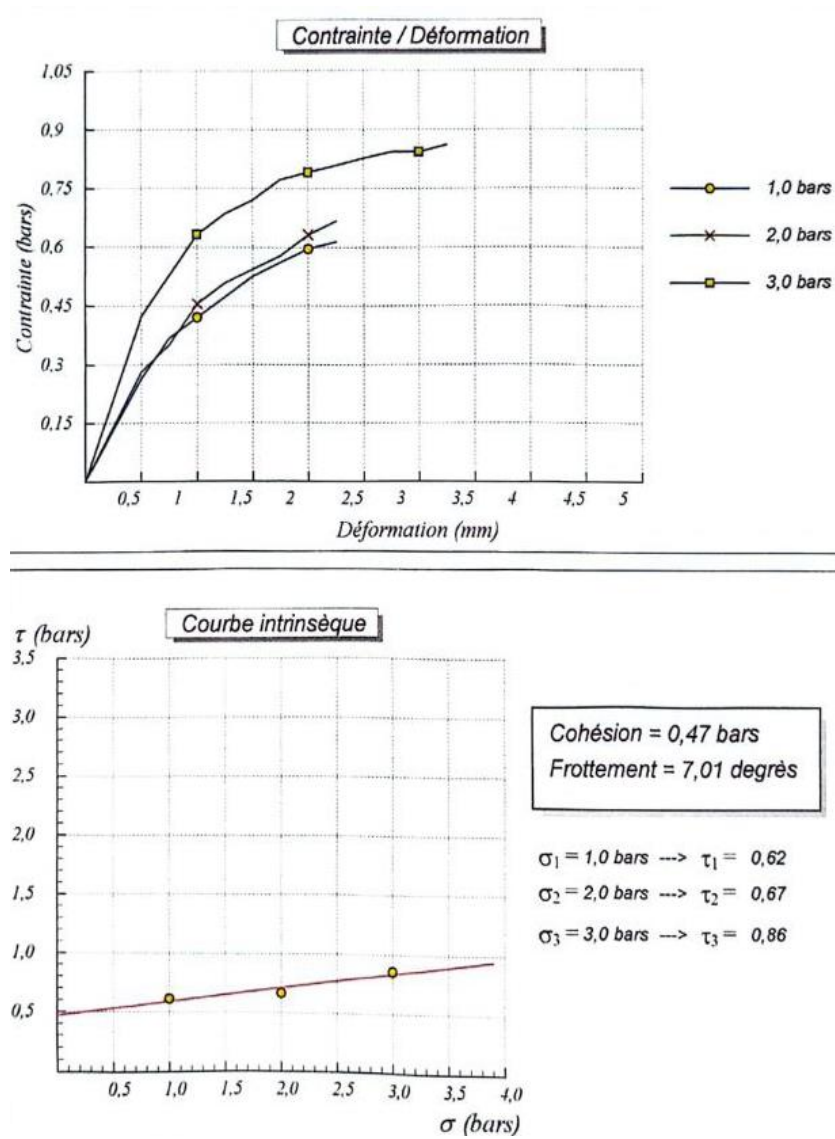


Figure IV.19 Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +20% carrelage broyé

Sol reconstitué + 30 % car

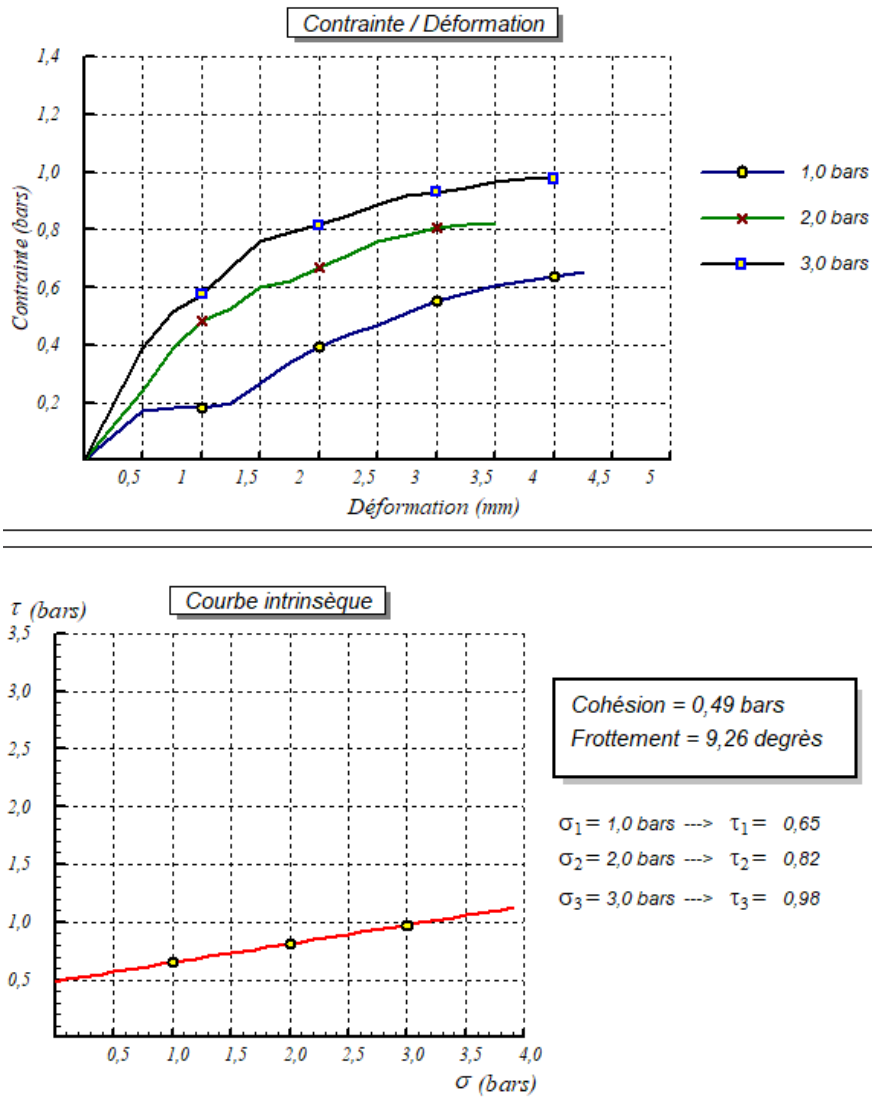


Figure IV.20 Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué +30% carrelage broyé

Tableau IV. 8 Bilan des résultats de l'essai de cisaillement pour le sol reconstitué et mélanges de sols reconstitués traités avec du carrelage broyé

% car br	0%	5%	10%	20%	30%
ϕ [°] (24H)	6.5	7,05	10.45	7.01	9,26
C [kPa] (24H)	55	53	54	47	49
ϕ [°] (7j)	11.91	11	10.92	9.3	9.48
C [kPa] (7j)	56	33	61	80	79
ϕ [°] (28j)	15.24	13	11.2	11.42	11.42
C [kPa] (28j)	59	62	69	1150	1150

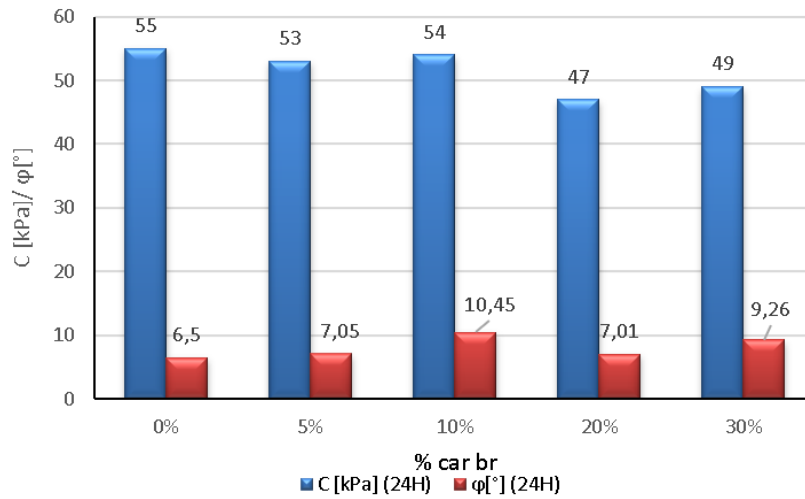


Figure IV. 21 Variation de la cohésion et l'angle de frottement en fonction des mélanges traités au carrelage broyé à 24 heures

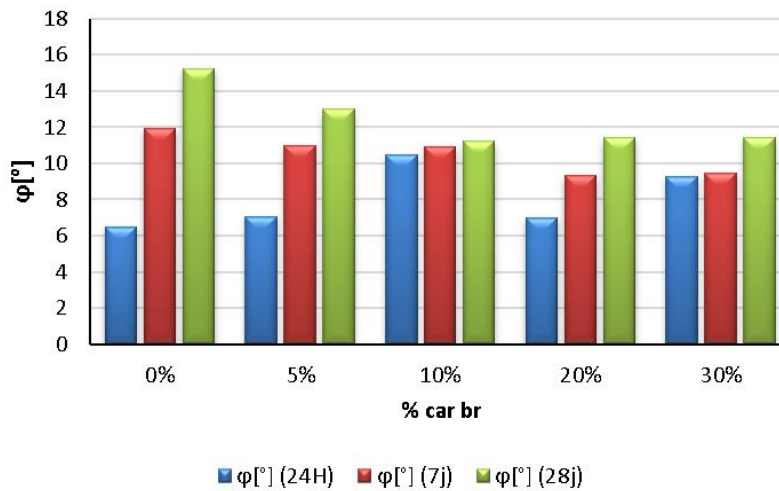


Figure IV.22 variations de l'angle de frottement en fonction des mélanges traités au carrelage broyé à 24 H, 7jours et 28 jours

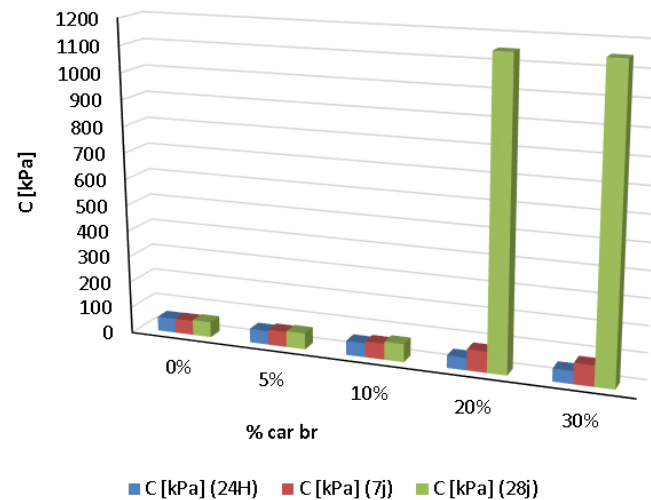


Figure IV.23 variation de la cohésion des mélanges traités au carrelage broyé à 24 H, 7 jours et 28 jours

D'après la figure IV.21, il n'y a pas d'amélioration dans les paramètres de cisaillement à 24 heures.

D'après la figure IV.22, on note une augmentation des valeurs de l'angle de frottement pour les éprouvettes de 7 jours et 28 jours pour le même type de sol.

D'après la figure IV.24, On remarque que le pourcentage 5% a enregistré une valeur maximale de l'angle de frottement égale à 28 jours, on remarque également que les cohésions augmentent avec l'augmentation de l'ajout du carrelage broyé, les valeurs maximales sont enregistrées pour 30% de carrelage broyé.

L'amélioration dans les paramètres de cisaillement est enregistrée à long terme à 7 jours et 28 jours

IV.2.5 Effet du carrelage broyé sur la résistance à la compression

La résistance à la compression a été évaluée en appliquant une force à l'aide d'une presse hydraulique à une vitesse de chargement de 0.5 mm/min. L'essai consiste à évaluer la capacité d'un échantillon cylindrique (diamètre de 101 mm et hauteur de 115 mm) à résister à une charge de compression.

Les échantillons du sol reconstitué et les mélanges des sols traitées avec carrelage broyé (5%, 10% 20% et 30%) ont été préparés au moyen du moule proctor normal en respectant les caractéristiques optimales obtenues par le compactage Proctor.

L'ensemble des éprouvettes préparées pour écrasement a 24 heures, 07 jours et 28 jours ont été soumises à l'essai de compression non confiné au moyen de l'appareil Uniframe disponible au niveau du laboratoire de recherche (LGCH).

La Figure IV. 24 présente les résistances à la compression des éprouvettes du sol reconstitué (0%) témoin à 24 heures, 7 jours et 28 jours. On remarque une amélioration dans les valeurs enregistrées pour le pourcentage 5% de carrelage broyé pour les trois durées du cures ensuite une légère diminution est enregistrée pour les pourcentages 10% et 20%, la valeur maximale de la contrainte 711,46 kPa a été enregistrée pour le pourcentage 30%.

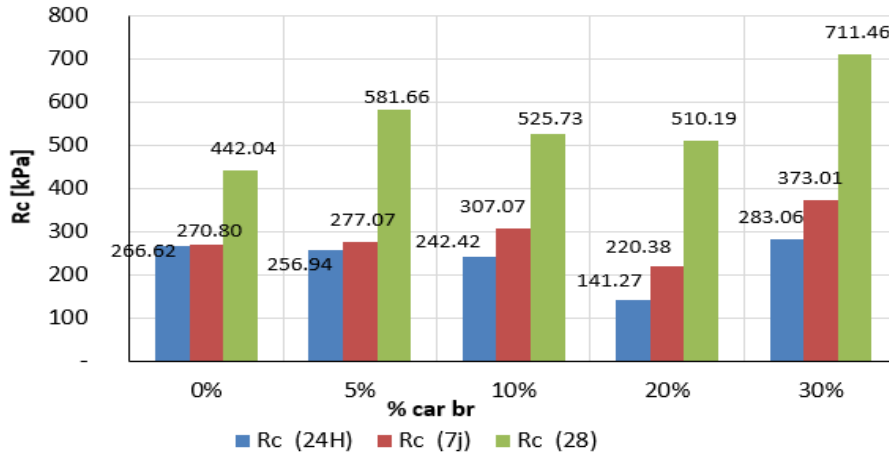


Figure IV.24. Les résistances à la compression du sol reconstitué et des mélanges sols reconstitué + carrelage broyé à différents pourcentages à 24H, 7 jours et 28 jours

IV.2.6 Essai œdométrique

- Sol reconstitué (argile +25% bentonite)

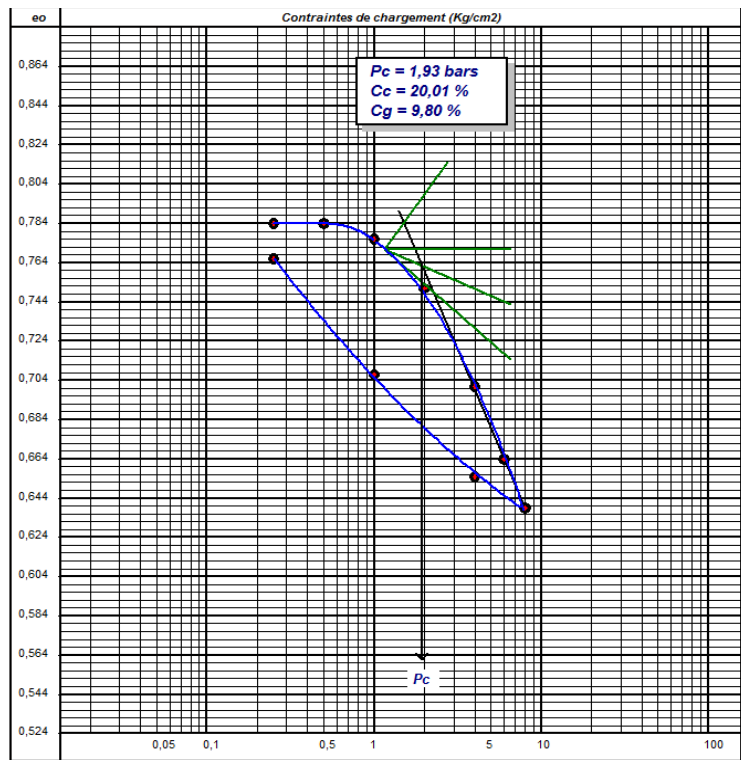


Figure IV.25 Courbe de compressibilité œdométrique pour sol reconstitué (0% car br)

▪ Sol reconstitué + 10% carrelage broyé

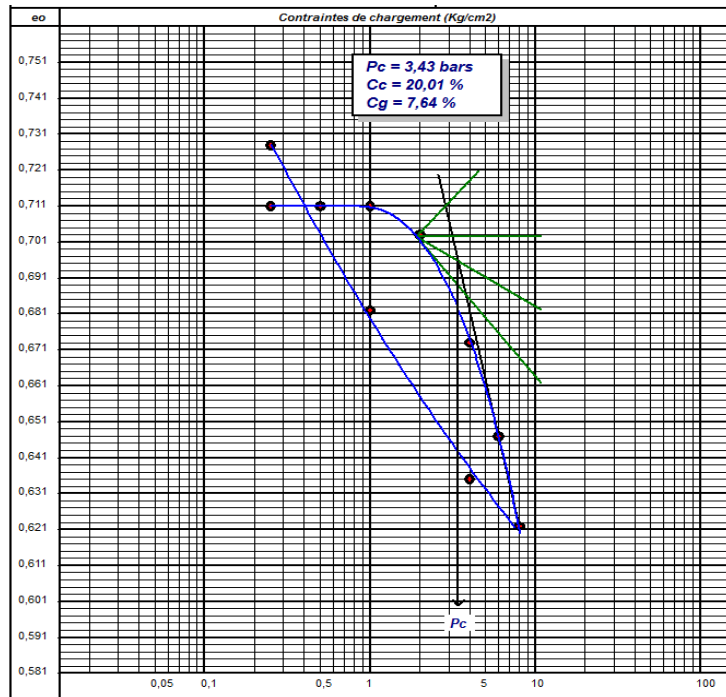


Figure IV.26 Courbe de compressibilité œdométrique (sol reconstitué +10% car br)

Sol reconstitué + 20% carrelage broyé

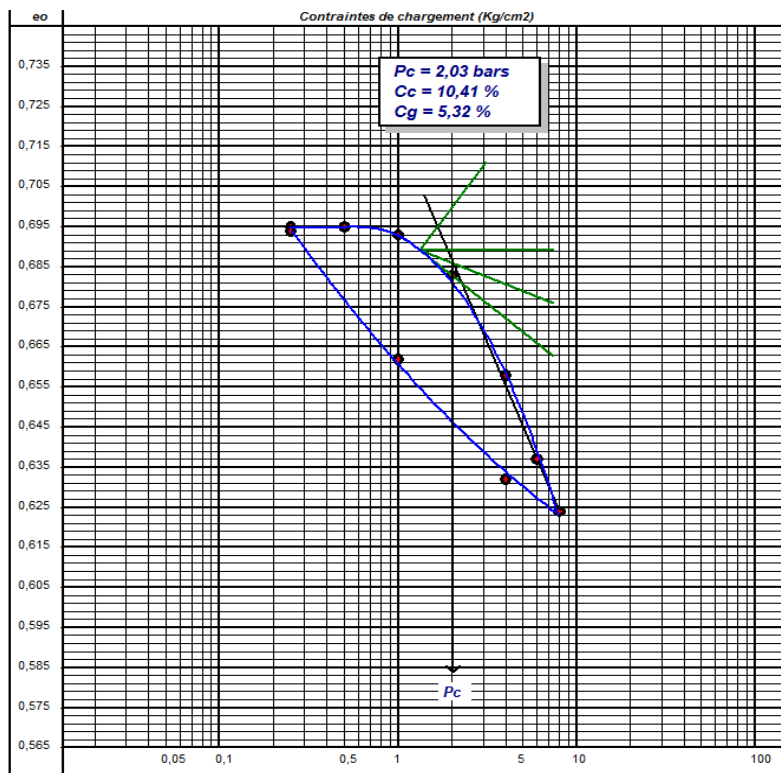


Figure IV.27 Courbe de compressibilité œdométrique (sol reconstitué +20% car br)

Sol reconstitué + 30% carrelage broyé

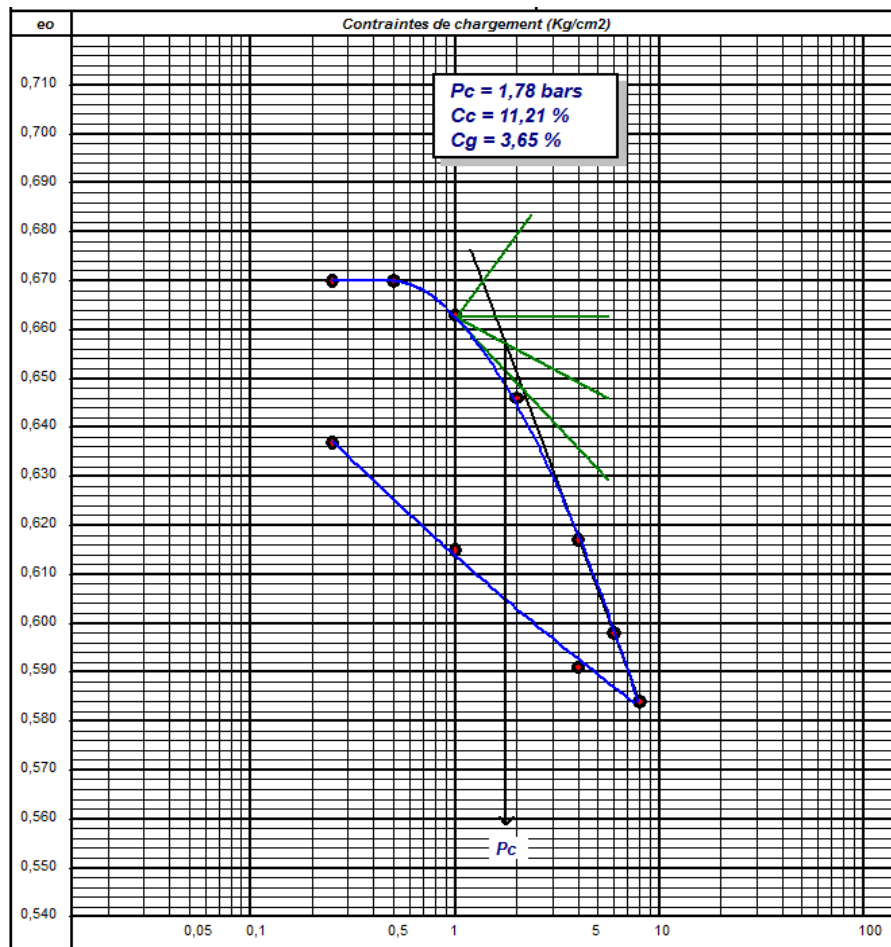


Figure IV.28 Courbe de compressibilité œdométrique (sol reconstitué +30% car br)

Tableau IV.9 influence du carrelage broyé sur les paramètres de compressibilité du sol reconstitué et es mélanges (sol reconstitué +carrelage)

% car br	0%	10%	20%	30%
Cc %	20.01	20.01	10.41	11.21
Cg %	9.80	7.64	5.32	3.65
Pc [kPa]	193	343	203	178

Les courbes de compressibilité pour différents pourcentage en carrelage broyé ont permis de calculer les indices de compressibilité (Cc) et de gonflement (Cg) correspondant à chaque pourcentage de carrelage broyé (10%, 20% et 30%). On note aussi une diminution de l'indice de compression (Cc) au fur à mesure que le pourcentage en carrelage broyé augmente (figure IV.25) et tableau IV.9. Concernant l'influence du carrelage broyé sur l'indice de gonflement (Cg), on note une diminution de cet indice au fur à mesure que la teneur en carrelage broyé augmente.

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'augmentation des pourcentages en carrelage broyé entraîne une augmentation de pression de préconsolidation (σ'_p) et elle est maximale pour

le pourcentage 10%, ensuite elle diminue pour 30% car br. On peut dire que la teneur en carrelage broyé modifie le comportement de l'argile (Tableau IV.9).

IV.3. L'influence du PVC sur le sol reconstitué

IV.3.1 Effet du PVC sur le compactage

Les résultats des essais Proctor normal effectués sur les échantillons sur sol reconstitué traités avec 5% , 10% et 15% de PVC sont présentés dans les tableaux et figures ci-dessous :

Tableau IV.10 Récapitulation des essais Proctor normal à différentes pourcentage de PVC

% PVC	5%	10%	15%
γ_d [g/cm ³]	1.57	1.54	1.53
Wopt %	21.285	21.38	21.54

▪ Sol reconstitué + 5% PVC :

Tableau IV.11 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +5% PVC

W%	15.13	21.285	22.95
γ_d [g/cm ³]	1.44	1.57	1.56

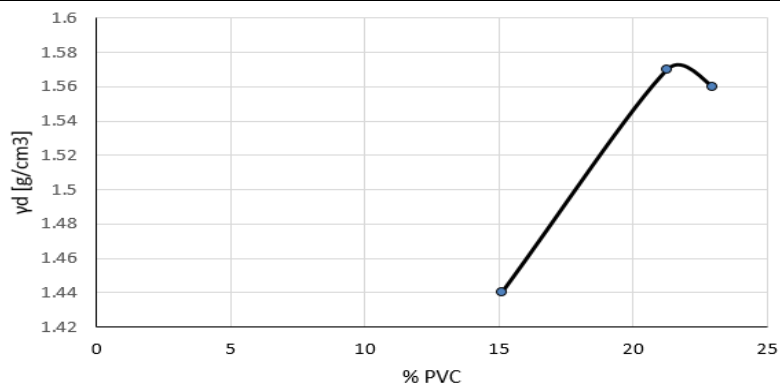


Figure IV.29 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +5% PVC

▪ Sol reconstitué + 10% PVC :

Tableau IV.12 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +10%PVC

W%	19.2	21.38	21.985
γ_d [g/cm ³]	1.51	1.54	1.52

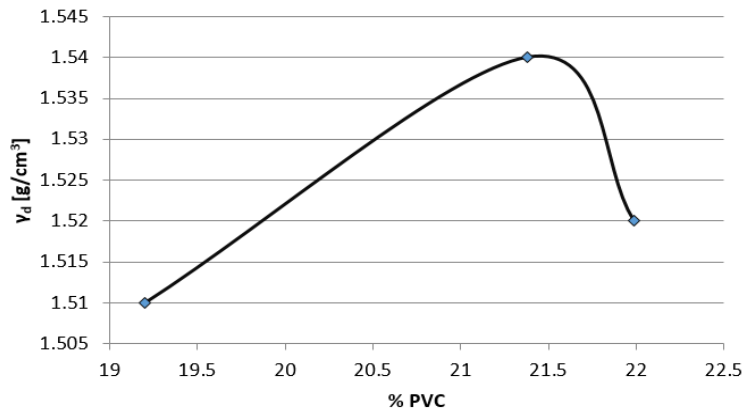


Figure IV.30 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +10% PVC

▪ Sol reconstitué + 15% PVC :

Tableau IV.13 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +15% PVC

W%	17.68	20.615	21.54	23.01
γ_d [g/cm ³]	1.46	1.52	1.53	1.51

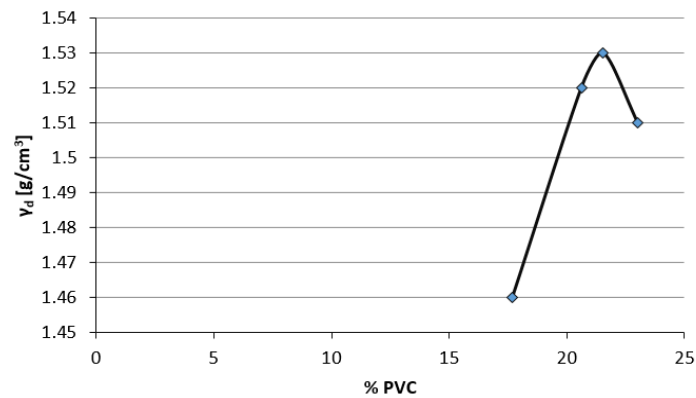


Figure IV.31 Courbe de compactage Proctor du sol reconstitué +15% PVC

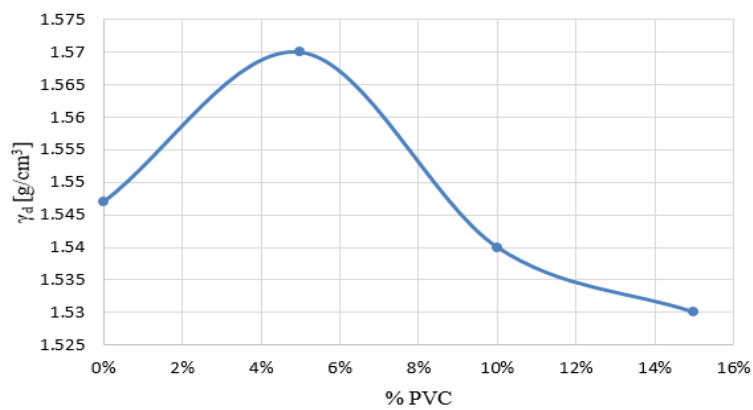


Figure. IV.32 Courbe de γ_d en fonction des pourcentages du PVC.

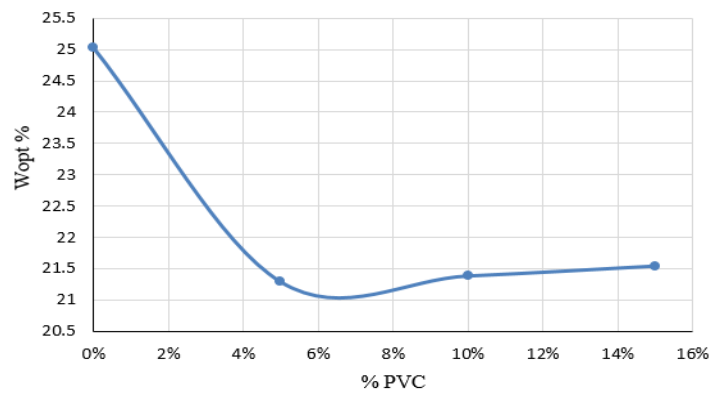


Figure. IV.33 Courbe de W_{opt} fonction des pourcentages du PVC.

La Figure IV.33 indique que la valeur de la teneur en eau optimale la plus basse a été obtenue pour l'addition de 5% de PVC. L'ajout de pourcentages plus élevés entraîne une augmentation des valeurs de la teneur en eau optimale. Cette augmentation est due à l'ajout de PVC qui remplace une partie des fines particules du sol traité, ce qui nécessite plus d'eau pour compacter le mélange sol-PVC.

IV.3.2 Effet du PVC sur la résistance au cisaillement

Sur la base des essais de cisaillement direct réalisés sur les échantillons de sol traité avec 5%, 10% et 15% de PVC, nous avons tracé les courbes contrainte/déformation et les courbes intrinsèques qui sont présentés sur les figures IV. 34, IV.35 et IV.36.

Tableau IV.14 Bilan des résultats de l'essai de cisaillement pour le sol reconstitué et mélanges de sols traités avec PVC

% PVC	0%	5%	10%	15%
ϕ [°] (24H)	6.5	6.5	10.95	7.52
C [kPa] (24H)	55	94	56	81
ϕ [°] (7j)	11.91	10.07	12.36	9.32
C [kPa] (7j)	56	1010	62	97
ϕ [°] (28j)	15.24	11.45	14.02	11.18
C [kPa] (28j)	59	1200	1130	1090

Sol reconstitué + 5 % PVC

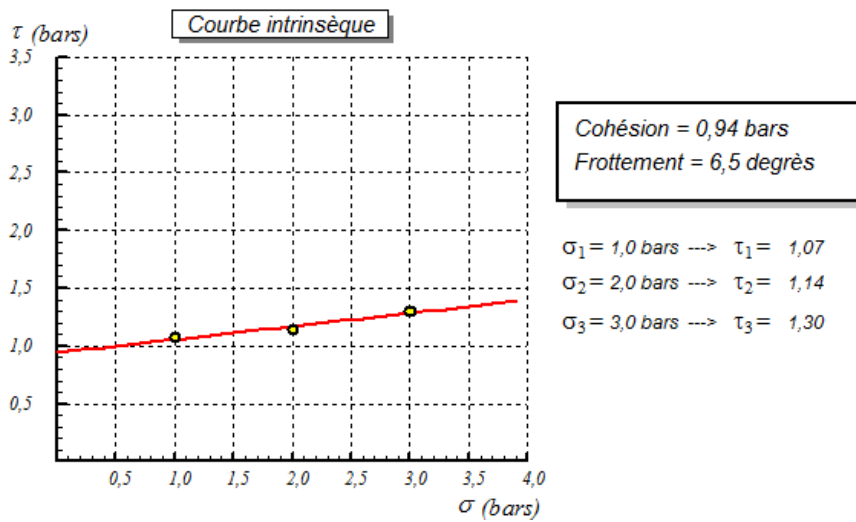
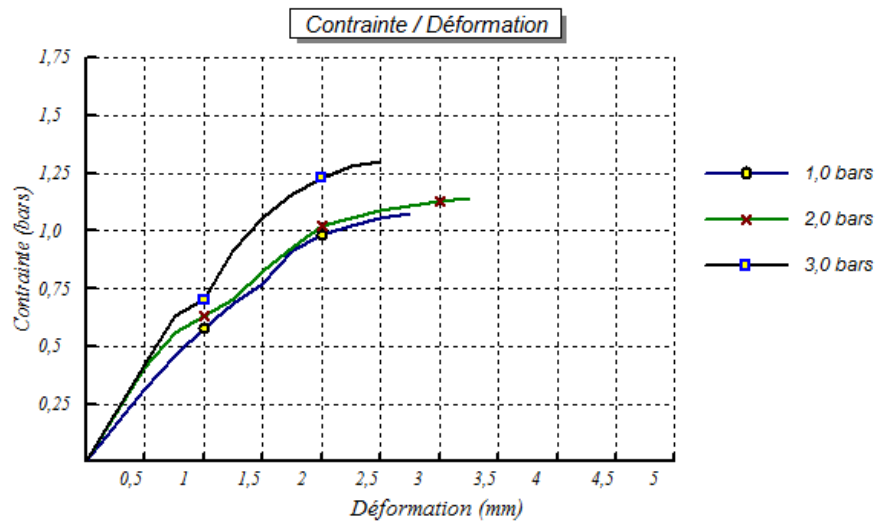


Figure IV.34 Courbes contraintes/déformations et intrinsèques du sol reconstitué +5% PVC

Sol reconstitué + 10 % PVC

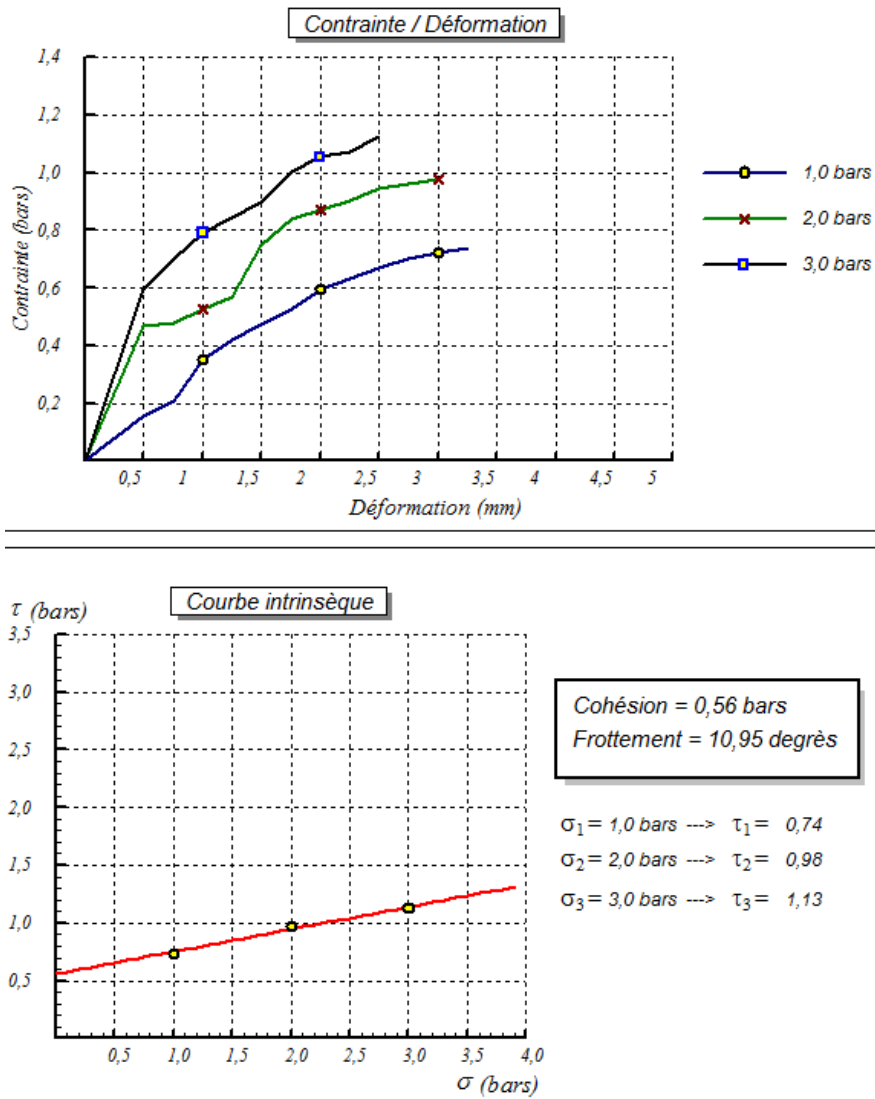


Figure IV.35 Courbes contraintes/ déformations et intrinsèques du sol reconstitué 10% PVC

Sol reconstitué + 15 % PVC

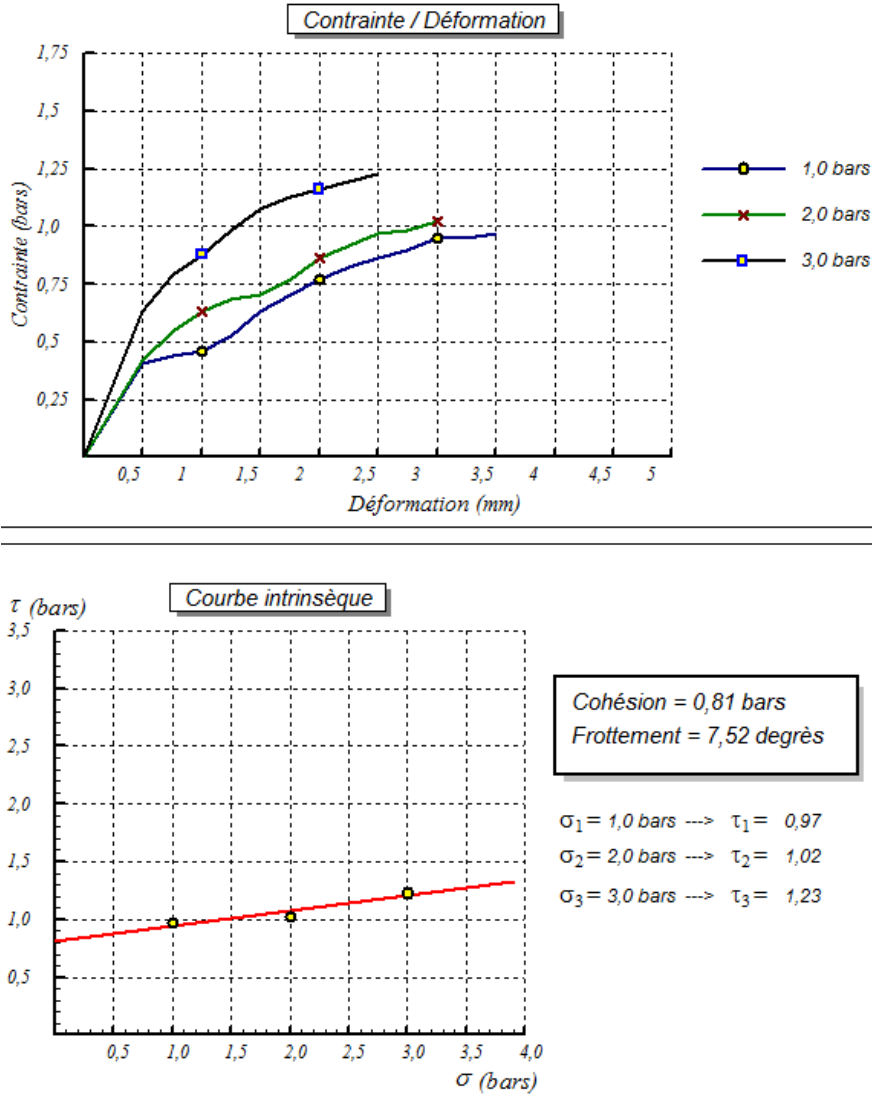


Figure IV.36 Courbes contraintes/déformations et intrinsèques du sol reconstitué 15% PVC

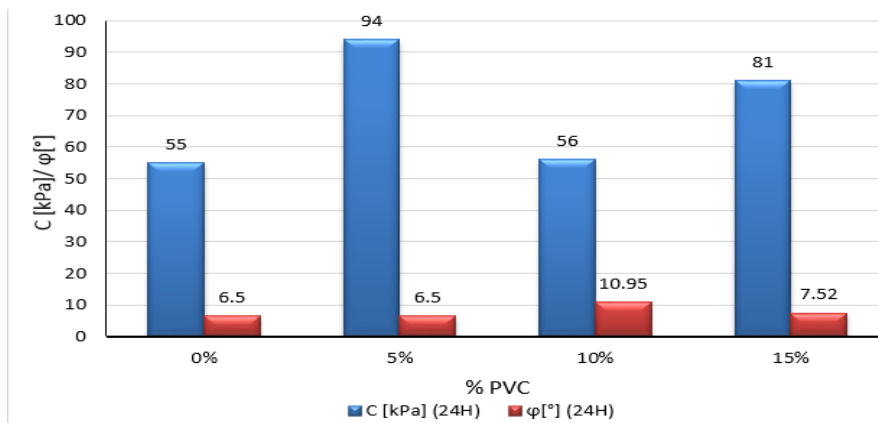


Figure IV.37 Variation de la cohésion des mélanges traités au PVC à 24 heures

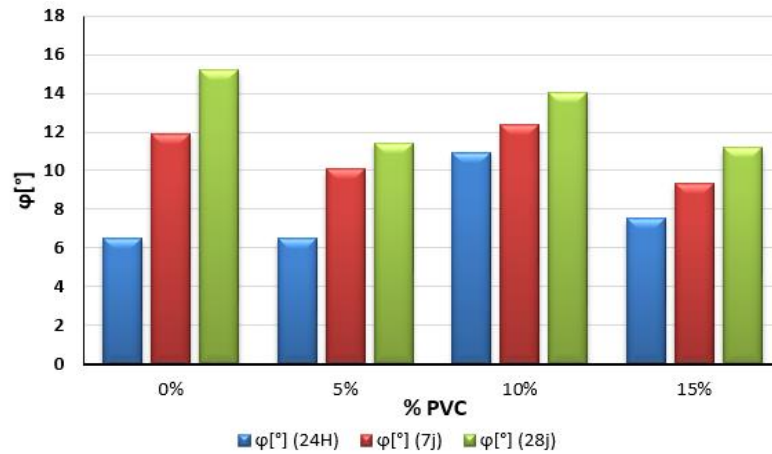


Figure IV.38 variation de l'angle de frottement des mélanges traités au PVC à 24 H, 7 jours et 28 jours

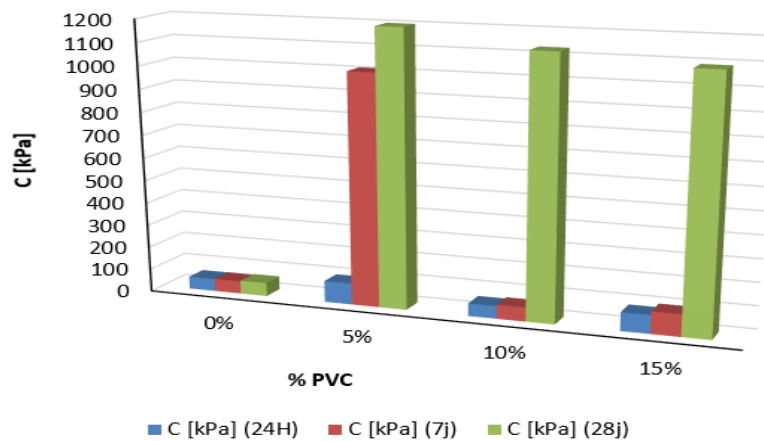


Figure IV.39 variation de la cohésion des mélanges traités au PVC à 24 H et 7 jours

Les résultats des essais concernant la variation de l'angle de frottement interne (ϕ) en fonction de la pourcentage en PVC sont présentés sur la figure IV.38, elle présente une diminution linéaire de l'angle de frottement interne (ϕ) des échantillons traités à partir de 5% de PVC. Au-delà de cette teneur, une diminution importante de l'angle de frottement interne (ϕ) et particulièrement pour les échantillons traités avec 10% et 15% de PVC à 24 H et 7 jours.

D'après la figure IV.39, on remarque que les cohésions augmentent avec l'augmentation de l'ajout PVC, les valeurs maximales sont enregistrées pour 5% de PVC à 28 jours.

IV.4 Effet du PVC sur la résistance à la compression

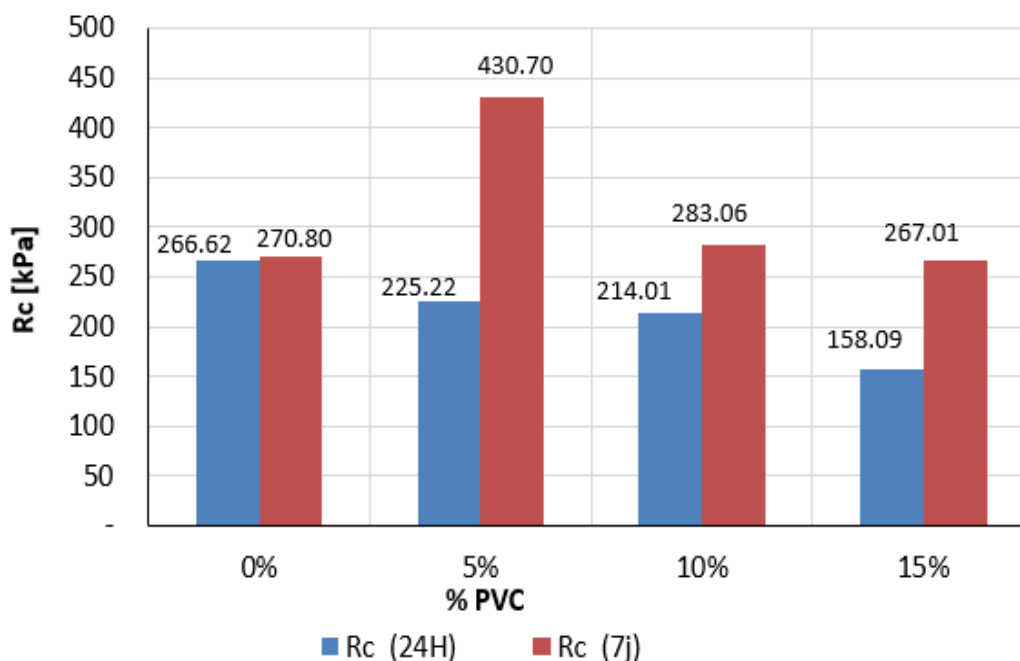


Figure IV.40. Les résistances à la compression en fonction de sol reconstitué et des mélanges sols reconstitué + PVC à différents pourcentages à 24H, et 7 jours

La Figure IV. 40 présente les résistances à la compression des éprouvettes du sol reconstitués (0%) témoin 24heure,et 7 jours. On remarque une amélioration dans les valeurs enregistrés pour le pourcentage 5% de PVC pour les deux dates ensuite une légère diminution est enregistrés pour les pourcentages 10% et 15%, la valeur maximale de la contrainte était de 430.7 kPa a été enregistrée pour un pourcentage 5%.

IV.3 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer l'influence de l'incorporation de déchets recyclés, notamment le carrelage broyé et le PVC, sur les propriétés physiques et mécaniques d'un sol reconstitué à partir d'argile et de bentonite.

Concernant l'ajout de carrelage broyé, il a été constaté:

- Une diminution de la plasticité du sol, se traduisant par une meilleure maniabilité.
- La densité sèche maximale a été améliorée pour certaines proportions de carrelage broyé, tandis que la teneur en eau optimale a globalement diminué.
- La résistance au cisaillement à long terme (7 et 28 jours) a été améliorée, notamment pour la cohésion avec des valeurs maximales atteintes pour 30% de carrelage broyé.
- La résistance à la compression a montré une tendance à l'amélioration, avec une valeur maximale pour 30% de carrelage broyé.

- Les essais œdométriques ont révélé une diminution des indices de compression et de gonflement avec l'augmentation du pourcentage de carrelage broyé, indiquant une meilleure stabilité volumétrique.

Concernant l'ajout de PVC :

- La densité sèche maximale a été optimisée pour 5% de PVC, tandis que la teneur en eau optimale a augmenté avec des proportions plus importantes de PVC.
- La résistance au cisaillement a été impactée différemment : la cohésion a augmenté significativement, tandis que l'angle de frottement interne a diminué, nécessitant une analyse plus approfondie de la performance globale.
- La résistance à la compression a présenté une amélioration pour 5% de PVC, suivie d'une diminution pour les proportions plus élevées.

En conclusion, l'incorporation de carrelage broyé semble présenter un potentiel intéressant pour améliorer les propriétés géotechniques du sol reconstitué, notamment en termes de maniabilité, de résistance au cisaillement et de stabilité volumétrique. L'ajout de PVC, quant à lui, nécessite une attention particulière, car s'il améliore la cohésion, il peut également affecter négativement l'angle de frottement interne.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les méthodes de stabilisation des sols instables sont variées et dépendent de plusieurs paramètres tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Les déchets recyclés peuvent être utilisés pour stabiliser les sols, ce qui contribue à réduire les déchets et à protéger l'environnement. Les matériaux recyclés tels que le plastique, le caoutchouc et les déchets issus du BTP plastiques recyclés peuvent être utilisés pour stabiliser les sols médiocres comme les argiles gonflants, réduisant ainsi la porosité et améliorant la résistance.

Ce mémoire a exploré l'utilisation de deux types de matériaux recyclés, le carrelage broyé et le PVC, comme ajouts pour améliorer les propriétés mécaniques d'un sol argileux reconstitué. Les résultats de la campagne expérimentale ont mis en évidence les points suivants :

L'ajout de carrelage broyé a conduit à une diminution significative de la valeur au bleu de méthylène et des limites d'Atterberg, indiquant une réduction de la sensibilité à l'eau et une amélioration de la maniabilité du sol.

L'essai Proctor a révélé une augmentation de la densité sèche maximale pour certaines proportions de carrelage (5% et 30%), tout en ayant un impact variable sur la teneur en eau optimale.

Les essais de cisaillement direct ont montré une augmentation de l'angle de frottement interne et de la cohésion à long terme, améliorant la résistance au cisaillement du sol. On a constaté que les cohésions ont augmenté avec l'augmentation de l'ajout du carrelage broyé, les valeurs maximales ont été enregistrées à 28 jours pour 30% de carrelage broyé.

On a remarqué également, une augmentation de la cohésion du sol reconstitué à 7 jours et 28 jours cela peut être argumenté par l'augmentation de la compacité du sol par la réduction des pores à long terme, des essais de la microstructure des échantillons est nécessaire pour donner plus d'explications.

L'essai de compression non confiné effectués sur des éprouvettes de différents pourcentages (5%, 10%, 20% et 30%) à 24 heures, 7 jours et 28 jours, dans le but d'étudier la durabilité du carrelage broyé sur le sol reconstitué à court et long termes. Ce dernier à donner des résultats promettant pour l'utilisation ce type de matériau recyclé en augmentant la résistance à la compression à long terme pour les pourcentages 5% et 30%

L'essai œdométrique a révélé une diminution des indices de compression et de gonflement, suggérant une meilleure stabilité volumique du sol.

L'ajout de PVC a également eu un impact sur le comportement du sol, avec une augmentation de la teneur en eau optimale et une influence variable sur la densité sèche maximale.

Les essais de cisaillement ont démontré une augmentation de la cohésion, et une influence variable sur l'angle de frottement (ϕ) des échantillons traités à partir de 10% de PVC. Au-delà de cette teneur, une diminution importante de l'angle de frottement interne (ϕ) est enregistrée pour les échantillons traités avec 15% de PVC. On a remarqué également que les cohésions augmentent avec l'augmentation de l'ajout PVC, les valeurs maximales sont enregistrées pour 5% de PVC à 7 et 28 jours.

La résistance à la compression s'est également améliorée avec l'ajout de PVC. Les valeurs maximales ont été enregistrées pour 5% de PVC.

Ces résultats prometteurs suggèrent que le carrelage broyé et le PVC peuvent être utilisés comme solutions durables pour la stabilisation des sols argileux, contribuant à la fois à la valorisation des déchets et à l'amélioration des caractéristiques géotechniques des sols. Cependant, des recherches complémentaires sont nécessaires pour optimiser les proportions d'ajout, étudier l'influence à long terme de ces matériaux et évaluer leur impact environnemental. Ce travail ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine de la stabilisation des sols argileux. L'exploration d'autres types de matériaux recyclés,