

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر -

UNIVERSITÉ DE SAÏDA – Dr. MOULAY TAHAR – Faculté de Technologie

Département de Génie Civil & Hydraulique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de **MASTER en Génie Civil**

Spécialité : « Géotechnique »

THEME

EFFET DE L'INCORPORATION DES AGREGATS DE BETON RECYCLE SUR LES PROPRIETES D'UN SOL

Présenté par :

Mr. BENKREDDA Abdelkader

Membres du jury

Dr. L. BELOUADI

Dr. F. M. DERFOUF

Dr. A. SEKKEL

Maître de conférences A

Maître de conférences A

Maître de conférences A

Université Dr. Moulay Tahar de Saida

Université Dr. Moulay Tahar de Saida

Université Dr. TAHAR Moulay de Saida

Président

Examinateur

Encadrant

Année Universitaire : 2023 – 2024

جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر -

UNIVERSITÉ DE SAÏDA – Dr. MOULAY TAHAR – Faculté de Technologie

Département de Génie Civil & Hydraulique



**EFFET DE L'INCORPORATION DES AGREGATS DE BETON
RECYCLE SUR LES PROPRIETES D'UN SOL**

BENKREDDA Abdelkader

2023-2024

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donnée la foi, le courage et la volonté de réaliser ce modeste travail et qui a mis sur mon chemin les bonnes personnes pour une bonne prise en charge

En premier lieu, je tenais à remercier monsieur SEKEL Abdelkrim maître de conférences classe A à l'université Moulay Tahar de Saida pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de cette recherche.

Reconnaissance

Merci à Mr BELOUADI Larbi Maître de conférences A à l'université de SAIDA qui ont a fait l'honneur d'accepté la présidence du jury de mon mémoire.

Merci également l'honorables jury Mr DERFOUF Feth Ellah Mounir Maître de conférences A à l'université de SAIDA qui a bien évalué examiner mon travail.

Un grand merci à tous les personnages du Laboratoire des Travaux Publics de L'ouest antenne de SAIDA pour leurs aides, disponibilité et précieuse assistance. Merci BOUKHECHA Mohamed chef service au laboratoire et un merci spécial pour le responsable de laboratoire BRACI Nouredine, l'ingénieur KORCHI Nacer et le technicien BOUZID Bouaza.

Merci à mes parents, à ma famille à mes amis ainsi qu'à nos collègues les plus proches Et je tiens enfin à remercier toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué à la réussite de ce mémoire.

A tous, un grand Merci

Dédicaces

A mes chers parents Aucune dédicace ne peut exprimer mon respect, mon amour éternel et ma reconnaissance pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mon bien être. Merci pour tout le soutien et l'amour que vous m'avez apporté depuis mon enfance, et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours. J'espère que cet humble travail sera l'accomplissement de vos désirs tant attendus et le fruit de vos innombrables sacrifices. Que dieu vous accorde la santé, le bonheur et une longue vie, et que vous ne soyez jamais déçus par votre fils.

A ma plus belle sœur, ma deuxième mère et ses enfants A mon petit frère Youcef les mots suffisent à peine pour exprimer l'amour, l'attachement et l'affection que j'ai pour toi. Je vous aime.

A mon oncle bien-aimé Samir, qui a toujours été un fidèle conseiller. Il est comme un père, un ami et un professeur. Quelle chance j'ai d'avoir un oncle comme toi dans ma vie.

A tout ma famille, que dieu les protège et les donne la longévité et le bonheur.

A mes proches et ami(e)s pour leurs soutiens, encouragements, leurs aides et supports dans les moments difficiles.

À tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le nom.

Merci infiniment.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
ملخص.....	X
ABSTRACT	XI
RESUME	XII
LISTE DES SYMBOLES & ABREVIATIONS	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
 <u>CHEAPITRE 1.GENERALITES SUR LES SOLS</u>	 1
 1.1 INTRODUCTION.....	 2
1.2 LES SOLS.....	2
1.2.1 DEFINITION DES SOLS	2
1.2.2 CLASSIFICATION DES SOLS	2
1.2.3 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE	2
1.2.4 LES LIMITES D'ATTERBERG	3
1.2.5 PROPRIETES DES SOLS	4
1.2.5.1 Le limon	4
1.2.5.2 L'argile	4
1.3 LES SOLS ARGILEUX	4
1.3.1 DEFINITION	4
1.3.2 COMPOSITION DES SOLS ARGILEUX	5
1.3.3 ORIGINE DE L'ARGILE.....	5
1.3.3.1 Héritage et altération	5
1.3.3.2 Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation	6
1.3.3.3 Contexte de formation des sols argileux	6
1.3.4 FAMILLES DES ARGILES	6
1.3.4.1 Famille de la Kaolinite	6
1.3.4.2 Famille des Illites.....	7
1.3.4.3 Famille des smectites	8
1.3.5 PROBLEMES DES SOLS ARGILEUX	8
1.3.5.1 Phénomène de tassement.....	8
1.3.5.2 Phénomène de gonflement	9
1.4 AUTRES PROBLEMES GEOTECHNIQUES	9
1.4.1 AFFAISSEMENT.....	10
1.4.2 GLISSEMENT.....	10
1.5 SOLS PROBLEMATIQUES	11
1.5.1 TYPES DE SOLS A PROBLEMES	11
1.5.1.1 Sols affaissables (Effondrables).....	11
1.5.1.2 Sols liquéfiables.....	12
1.5.1.3 Sols compressibles	12
1.6 CONCLUSION.....	13
 <u>CHEAPITRE 2.DECHETS DE DEMOLITIONS ET DE CONSTRUCTIONS</u>	 14

2.1 INTRODUCTION.....	15
2.2 DEFINITION.....	15
2.3 CLASSIFICATION DES DECHETS.....	15
2.4 QUANTITES PRODUITES DE DECHETS.....	16
2.5 MODES DE TRAITEMENT DES DECHETS	16
2.6 TYPE DES DECHETS.....	16
2.6.1 DECHETS DE TYPE INERTES	17
2.6.1.1 Déchets spécifiques de type F, stockés en alvéole spécifique mono matériaux, dans un centre de stockage d'inertes.....	18
2.6.2 DECHETS BANALS (DIB) OU DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES (DMA)	19
2.6.2.1 Déchets banals (DIB)	19
2.6.2.2 Déchets assimilés (DMA)	20
2.6.3 DECHETS D'EMBALLAGE	22
2.6.4 DECHETS DANGEREUX ET DECHETS TOXIQUES EN QUANTITES DISPERSEES (DTQD)	22
2.7 DECHETS DE CONSTRUCTION ET DE DEMOLITION.....	24
2.7.1 DECHETS DE DEMOLITION.....	24
2.7.1.1 Déchets de béton	25
2.7.1.2 Déchets de bois (des bâtiments).....	26
2.7.1.3 Déchets de gypse	26
2.7.1.4 Déchets de métaux.....	26
2.7.1.5 Déchets de briques.....	27
2.8 TECHNIQUES DE DEMOLITION	27
2.8.1 TECHNIQUE DE DEMOLITION A L'AIDE D'OUTILS A MAIN.....	28
2.8.2 TECHNIQUES DE DEMOLITION A L'AIDE D'OUTILS PORTES	28
2.8.3 DEMOLITION PAR DYNAMITAGE	28
2.9 LES AGREGATS DE BETONS RECYCLES	28
2.9.1 PROPRIETES PHYSIQUES DE GBR	29
2.9.2 MORPHOLOGIE ET TEXTURE DES GBR	30
2.9.3 DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE	30
2.9.4 POROSITE ET ABSORPTION D'EAU	31
2.9.5 DENSITE	32
2.9.6 PROPRIETES MECANIQUES	33
2.9.7 PROPRIETES CHIMIQUES	33
2.9.8 CONTAMINANTS DANS LES GBR	34
2.10 CONCLUSION	34
 CHAPITRE 3.CARACTERISATION DU SOL ETUDIE.....	35
 3.1 INTRODUCTION.....	36
3.2 SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	36
3.3 PREPARATION DU SOL.....	36
3.4 ESSAIS D'IDENTIFICATION PHYSIQUES	37
3.4.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE	37
3.4.1.1 Méthode par tamisage à sec après lavage : (NF P 94-056)	37
A. Généralités	37
B. Objectif	37
C. Principe de l'essai.....	37
D. But de l'essai	38
E. Appareillage.....	38
3.4.1.2 Méthode par Sédimentation (NF P 94-057)	39
F. Généralités.....	39
G. Principe de l'essai	39
H. But de l'essai	39

I.	Appareillage.....	39
3.4.2	LES LIMITES D'ATTERBERG :(NF P 94-051)	41
3.4.2.1	Généralités.....	41
3.4.2.2	Principe de l'essai.....	42
3.4.2.3	But de l'essai	42
3.4.2.4	Appareillage	42
J.	Pour la préparation du sol.....	42
K.	Pour la détermination de la limite de liquidité W_L	42
L.	Pour la détermination de la limite de plasticité W_P	43
3.4.3	ESSAI AU BLEU METHYLENE (NF P 94-068)	47
M.	Généralités	47
N.	Principe de l'essai	47
O.	Appareillage	48
3.4.3.1	Surface spécifique Totale.....	48
3.4.3.2	Estimation de la sensibilité de l'argile selon la valeur du bleu	49
3.4.3.3	Classification GTR	50
3.5 ESSAIS CHIMIQUES		50
3.5.1	TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM : (NF P 94-048).....	50
3.5.1.1	Généralités.....	50
3.5.1.2	Principe de l'essai.....	50
3.5.1.3	Appareillage	51
P.	Matériel et produits	51
Q.	Calcimètre.....	51
3.6 ESSAIS MECANIQUES.....		52
3.6.1	ESSAI PROCTOR NORMAL (NF P 94-093) [68]	52
3.6.1.1	Généralités.....	52
3.6.1.2	But de l'essai.....	53
3.6.1.3	Principe de l'essai.....	53
3.6.2	ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE (NF P 94-071-1)	54
3.6.2.1	Généralités.....	54
3.6.2.2	Principe de l'essai.....	54
3.6.2.3	But de l'essai	55
3.6.3	ESSAI DE COMPRESSIBILITE A L'ŒDOMETRE (XP P 94-090-1)	56
3.6.3.1	Généralités.....	56
3.6.3.2	Principe de l'essai.....	57
3.6.3.3	Appareillage.....	58
3.6.3.4	Paramètres de compressibilité	58
3.7 CONCLUSION.....		60
CHAPITRE 4. AMELIORATION DU SOL.....		61
4.1 INTRODUCTION.....		62
4.2 LE BETON RECYCLEE		62
4.3 CONSTITUTION DES SOLS D'ESSAIS		63
4.4 EVOLUTION DE LA GRANULOMETRIE EN FONCTION DES AJOUTS		63
4.5 EVOLUTION DES LIMITES D'ATTERBERG EN FONCTION DES AJOUTS		65
4.6 EVOLUTION DU BLEU DE METHYLENE EN FONCTION DES AJOUTS.....		69
4.7 EVOLUTION DE LA TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM EN FONCTION DES AJOUTS		71
4.8 EVOLUTION DES PARAMETRES DE COMPRESSIBILITE EN FONCTION DES AJOUTS		72
4.9 EVOLUTION DE LA RESISTANCE DE CISAILLEMENT EN FONCTION DES AJOUTS		76
4.10 CONCLUSION.....		78
CONCLUSION GENERALE		80

LISTE DES FIGURES

<u>CHAPITRE 1.GENERALITES SUR LES SOLS.....</u>	1
FIGURE 1.1 COURBE GRANULOMETRIQUE [2]	3
FIGURE 1.2 DIAGRAMME DE CASAGRANGE [3]	3
FIGURE 1.3 SOL ARGILEUX [7]	5
FIGURE 1.4 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES D'UN SOL ARGILEUX [10]	6
FIGURE 1.5 STRUCTURE DE LA KAOLINITE. / UN FEUILLET DE KAOLINITE [12]	7
FIGURE 1.6 STRUCTURE DES ILLITES / L'ARGILE ILLITE [13].....	7
FIGURE 1.7 STRUCTURE DES SMECTITES [13].....	8
FIGURE 1.8 TASSEMENT D'UN SOL ARGILEUX [5]	9
FIGURE 1.9 GONFLEMENT D'UN SOL ARGILEUX [15]	9
FIGURE 1.10 AFFAISSEMENT DU TERRAIN ET STAGNATION DES EAUX [16]	10
FIGURE 1.11 GLISSEMENT DE TERRAIN A BOUMERDES [17].....	10
FIGURE 1.12 L'EFFONDREMENT DU SOL D'UN FORAGE REALISE PAR TOTAL A OUARGLA EN 1978 [19] ..	12
FIGURE 1.13 DES BATIMENTS RENVERSEES A EL ASNAM EN 1980 PAR LA LIQUEFACTION [22].....	12
FIGURE 1.14 REMBLAI SUR SOL COMPRESSIBLE [24].....	13
<u>CHAPITRE 2.DECHETS DE DEMOLITIONS ET DE CONSTRUCTIONS</u>	14
FIGURE 2.1 DECHETS INERTES [27]	17
FIGURE 2.2 DECHETS DE PLATRE SUR UN CHANTIER DE DECONSTRUCTION [28].....	19
FIGURE 2.3 DECHETS INDUSTRIELS BANALS [30]	19
FIGURE 2.4 DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES [31]	20
FIGURE 2.5 DECHETS DE DEMOLITION [32]	25
FIGURE 2.6 DECHETS DE BOIS [6]	26
FIGURE 2.7 DECHETS DE GYPSE [32].....	26
FIGURE 2.8 DECHETS DE METAUX (ACIER ET ALUMINIUM) [32]	27
FIGURE 2.9 DECHETS DE BRIQUES [32].....	27
FIGURE 2.10 GRANULAT DE BETON RECYCLE [44].....	29
FIGURE 2.11 GBR AVANT ET APRES LE TRAITEMENT AVEC 33 % HCl [52]	30
FIGURE 2.12 DENSITE EN CONDITION SATUREE SURFACE SECHE DE SBR COMPAREE A CELLE DE SABLES NATURELS [41].....	32
<u>CHAPITRE 3.CARACTERISATION DU SOL ETUDIE</u>	35
FIGURE 3.1 ZONE DE PRELEVEMENT.....	36
FIGURE 3.2 PREPARATION DE L'ECHANTILLON	36
FIGURE 3.3 LA COURBE GRANULOMETRIQUE	37
FIGURE 3.4 APPAREILLAGE – ESSAI GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE	38
FIGURE 3.5 APPAREILLAGE – ESSAI GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION	40
FIGURE 3.6 COURBE GRANULOMETRIQUE DU SOL ETUDIE	41
FIGURE 3.7 CLASSIFICATION AMERICAINE	41
FIGURE 3.8 APPAREILLAGE – POUR LA DETERMINATION DE LA LIMIT DE LIQUIDITE W_L	43
FIGURE 3.9 APPAREILLAGE – POUR LA DETERMINATION DE LA LIMIT DE PLASTICITE W_p	43
FIGURE 3.10 COURBE DE LA LIMIT DE LIQUIDITE	44
FIGURE 3.11 ABAQUE DE CASAGRANGE	44
FIGURE 3.12 ABAQUE POTENTIEL DE GONFLEMENT D'APRES DONALDSON ET WILLIAMS, 1980	47
FIGURE 3.13 ESSAI BLEU DE METHYLENE A LA TACHE	48

FIGURE 3.14 DIAGRAMME DE LA SENSIBILITE A L'EAU DONNE PAR MAGNAN ET YOUSSEFIAN (1989)....	49
FIGURE 3.15 CLASSIFICATION DES SOLS SELON LE GTR.....	50
FIGURE 3.16 ESSAI AU CARBONATE DE CALCIUM.....	51
FIGURE 3.17 SCHEMA D'UN CALCIMETRE — EXEMPLE	52
FIGURE 3.18 DIAGRAMME PROCTOR SIMPLE.....	53
FIGURE 3.19 COURBE PROCTOR NORMAL DU SOL ETUDIE	54
FIGURE 3.20 APPAREIL DE CISAILLEMENT	55
FIGURE 3.21 VARIATION DES CONTRAINTES TANGENTIELLES EN FONCTION DES DEFORMATIONS.....	56
FIGURE 3.22 COURBE INTRINSEQUES DU SOL	56
FIGURE 3.23 APPAREIL OEDOMETRIQUE.....	58
FIGURE 3.24 COURBE OEDOMETRIQUE DU SOL ETUDIE	60
 <u>CHAPITRE 4. AMELIORATION DU SOL.....</u>	<u>61</u>
FIGURE 4.1. DECHETS DE BETON RECYCLE	62
FIGURE 4.2. COURBES GRANULOMETRIQUES DES DIFFERENTS SOLS ETUDIES.....	64
FIGURE 4.3. EVOLUTION DE LA FRACTION ARGILEUSE EN FONCTION DES AJOUTS.....	64
FIGURE 4.4. COURBE DE DETERMINATION DE LA limite DE LIQUIDITE POUR UN AJOUT DE 5%	65
FIGURE 4.5. COURBE DE DETERMINATION DE LA limite DE LIQUIDITE POUR UN AJOUT DE 10%	66
FIGURE 4.6. COURBE DE LA limite DE LIQUIDITE DU TRAITEMENT A 20 %.....	67
FIGURE 4.7. EVOLUTION DES LIMITES DE PLASTICITE EN FONCTION DES AJOUTS	68
FIGURE 4.8. EVOLUTION DES LIMITES DE LIQUIDITE EN FONCTION DES AJOUTS.....	68
FIGURE 4.9. ÉVOLUTION DES INDICES DE PLASTICITE EN FONCTION DES AJOUTS	69
FIGURE 4.10. EVOLUTION DES VALEURS DE BLEU DE METHYLENE EN FONCTION DES AJOUTS.....	70
FIGURE 4.11. EVOLUTION DE LA SURFACE SPECIFIQUE EN FONCTION DES AJOUTS.....	71
FIGURE 4.12. COURBE OEDOMETRIQUE DU SOL TRAITE AVEC 5% D'AJOUT.....	73
FIGURE 4.13. COURBE OEDOMETRIQUE DU SOL TRAITE AVEC 10% D'AJOUT	73
FIGURE 4.14. COURBE OEDOMETRIQUE DU SOL TRAITE AVEC 20% D'AJOUT	73
FIGURE 4.15. EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE PRECONSOLIDATION EN FONCTION DES AJOUTS	74
FIGURE 4.16. EVOLUTION DU COEFFICIENT DE COMPRESSIBILITE DES DIFFERENTS AJOUTS.....	74
FIGURE 4.17. EVOLUTION DE L'INDICE DE GONFLEMENT ET DU COEFFICIENT DE GONFLEMENT DES SOLS TRAITES	75
FIGURE 4.18. EVOLUTION DU COEFFICIENT DE GONFLEMENT EN FONCTION DES AJOUTS.....	75
FIGURE 4.19. EVOLUTION DU MODULE OEDOMETRIQUE EN FONCTION DES AJOUTS.....	75
FIGURE 4.20. COURBES INTRINSEQUES DES MELANGES ETUDIES.....	77
FIGURE 4.21. EVOLUTION DE LA COHESION EN FONCTION DES AJOUTS	77
FIGURE 4.22. EVOLUTION DES ANGLES DE FROTTEMENT EN FONCTION DES AJOUTS	78

LISTE DES TABLEAUX

<u>CHAPITRE 2. DECHETS DE DEMOLITIONS ET DE CONSTRUCTIONS</u>	14
TABLEAU 2.1. CLASSIFICATION DES DECHETS [26]	18
TABLEAU 2.2. CLASSIFICATION DES DECHETS DE TYPE F [26]	19
TABLEAU 2.3. CLASSIFICATION DES DECHETS BANALS [26]	20
TABLEAU 2.4. CLASSIFICATION DES DECHETS D'EMBALLAGE [26]	22
TABLEAU 2.5. CLASSIFICATION SELON LA NOMENCLATURE DES DECHETS DANGEREUX [26]	23
TABLEAU 2.6. COMPOSITION CHIMIQUE DU SBR DES DIFFERENTES ANALYSES EXPERIMENTALES	33
<u>CHAPITRE 3. CARACTERISATION DU SOL ETUDIE</u>	35
TABLEAU 3.1. RESULTATS DE L'ESSAI DE GRANULOMETRIE PAR TAMISAGE (SOL S0).....	38
TABLEAU 3.2. RESULTATS DE L'ESSAI DE SEDIMENTOMETRIE (SOL S0).....	40
TABLEAU 3.3. LIMITE DE LIQUIDITE W_L (SOL S0)	43
TABLEAU 3.4. LIMITE DE PLASTICITE W_p (SOL S0).....	44
TABLEAU 3.5. ACTIVITE DU SOL ETUDIE.	45
TABLEAU 3.6. CLASSIFICATION DES SOLS SELON LEUR ACTIVITE A_c SELON SKEMPTON, 1953	45
TABLEAU 3.7. ACTIVITE DES PRINCIPALES FAMILLES D'ARGILE SELON SKEMPTON, 1953.....	45
TABLEAU 3.8. RELATION ENTRE GONFLEMENT ET IP (SEED, ET AL, 1962).....	46
TABLEAU 3.9. POTENTIEL DE GONFLEMENT D'APRES LE B.R.E, 1980.....	46
TABLEAU 3.10. SENSIBILITE D'UNE ARGILE SELON PRIAN ET AL., 2000.....	47
TABLEAU 3.11. CLASSIFICATION SELON VBS (GTR).	48
TABLEAU 3.12. SENSIBILITE D'UNE ARGILE A L'EAU (CHASSAGNEUX ET AL, 1996).....	49
TABLEAU 3.13. SURFACE SPECIFIQUE DES PRINCIPAUX MINERAUX ARGILEUX.	49
TABLEAU 3.14. CLASSIFICATION DES MATERIAUX EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE EN CARBONATE.	52
TABLEAU 3.15. DENSITE SECHE ET LA TENEUR EN EAU PROCTOR NORMAL DU SOL ETUDIE.....	53
TABLEAU 3.16. LE CLASSEMENT DES SOLS SELON LEURS INDICES DE COMPRESSIBILITES ET L'INDICE DES VIDES.....	59
TABLEAU 3.17. LE CLASSEMENT DES SOLS SELON LEURS INDICES DE GONFLEMENT.....	59
TABLEAU 3.18. PARAMETRES DE COMPRESSIBILITE DU SOL ETUDIE	59
<u>CHAPITRE 4. AMELIORATION DU SOL.....</u>	61
TABLEAU 4.1. CONSTITUTION DES ECHANTILLONS DES SOLS EXPERIMENTES	63
TABLEAU 4.2. RESULTATS OBTENUS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES TRAITEMENTS DES SOLS D'ESSAIS. 63	63
TABLEAU 4.3. RESULTATS DE L'ESSAI DE LA LIMITE DE LIQUIDITE POUR UN AJOUT DE 5%.....	65
TABLEAU 4.4. RESULTATS DE L'ESSAI DE L'ESSAI DE LA LIMITE DE PLASTICITE POUR UN AJOUT DE 5%.....	65
TABLEAU 4.5. RESULTATS DE L'ESSAI DE LA LIMITE DE LIQUIDITE POUR UN AJOUT DE 10%.....	66
TABLEAU 4.6. RESULTATS DE LA LIMITE DE PLASTICITE POUR UN TRAITEMENT DE 10 %.	66
TABLEAU 4.7. RESULTATS DE LA LIMITE DE LIQUIDITE DU TRAITEMENT A 20 %.	67
TABLEAU 4.8. RESULTATS DE LA LIMITE DE PLASTICITE POUR UN TRAITEMENT DE 20 %.	67
TABLEAU 4.9. RESULTATS DES LIMITES D'ATTERBERG DES DIFFERENTS MELANGES.....	67
TABLEAU 4.10. EVOLUTION DE LA VALEUR DU BLEU ET DE LA SURFACE SPECIFIQUE EN FONCTION DES AJOUTS 70	70
TABLEAU 4.11. VARIATION DE LA TENEUR EN CaCO_3 EN FONCTION DES AJOUTS	71
TABLEAU 4.12. PARAMETRES DE COMPRESSIBILITE DES SOLS TRAITES	74

ملخص

الدراسة الحالية تركز على إضافة الركام الخرساني المعاد تدويره وتأثيره على خصائص التربة. تدعم هذه النهج الأهداف المستدامة من خلال تقليل نفايات الخرسانة وتعزيز إعادة التدوير في التربة، مما يقدم حلًا واعداً لصناعة البناء، ويمكن من الجمع بين الأداء التقني والمسؤولية البيئية.

تم إجراء حملة تجريبية لدراسة تأثير إضافة الركام الخرساني المعاد تدويره على استجابة تربة ناعمة مشكلة عند محتويات تجريبية مقدرة بـ 5%، 10%، و 20%.

أظهرت النتائج موثوقية تقنية التحسين في المعنى الذي يقلل من خواص الانضغاط للتربة المدروسة، ويقلل من إمكانية انتفاخها مع زيادة مذهلة في المعامل الاودومترى ومعلمات قوتها القصية.

في نهاية المطاف، يعتبر تضمين الركام الخرساني المعاد تدويره نهجاً فعالاً لبدء استخدام المواد المعاد تدويرها. بنسب تصل إلى 20%， كان من الممكن تعزيز هيكل التربة مع البقاء مسؤولين بيئياً. يقدم هذا التكامل المعتدل توازناً جيداً بين الأداء التقني والاستدامة البيئية.

الكلمات المفتاحية:

الركام الخرساني المعاد تدويره، المتانة، البيئة، البناء الصديق للبيئة، النفايات، إعادة التدوير، القوة، الاستيطان، الانتفاخ

Abstract

The present study focuses on the incorporation of recycled concrete aggregates and their impact on soil properties. This approach supports sustainability goals by reducing concrete waste and promoting recycling in soils, offering a promising solution for the construction industry, enabling the combination of technical performance and environmental responsibility.

An experimental campaign was conducted to investigate the influence of adding recycled concrete aggregates on the response of a problematic fine soil at experimental contents estimated at 5%, 10%, and 20%.

The results demonstrated the reliability of the improvement technique in the sense that increasing additions decrease the compressibility of the studied soil, reduce its swelling potential while dramatically increasing its oedometer modulus and shear strength parameters.

Ultimately, the incorporation of recycled concrete aggregates is an effective approach to initiate the use of recycled materials. With proportions up to 20%, it was possible to strengthen the soil structure while remaining environmentally responsible. This moderate integration offers a good balance between technical performance and environmental sustainability.

Keywords: recycled concrete aggregates, durability, environment, eco-friendly construction, waste, recycling, strength, settlement, swelling

Résumé

Le présent travail s'intéresse à l'incorporation des agrégats de béton recyclé et leur impact sur les propriétés d'un sol. En effet cette démarche soutient les objectifs de durabilité en réduisant les déchets de béton et en favorisant le recyclage dans les sols, offrant une solution prometteuse pour l'industrie de la construction, permettant de conjuguer performance technique et responsabilité environnementale.

Une campagne expérimentale a permis d'étudier l'influence de l'ajout des agrégats de béton recyclé sur la réponse d'un sol fin problématique à des teneurs expérimentales estimées à 5%, 10%, et 20%.

Les résultats ont démontré la fiabilité de la technique d'amélioration au sens que l'augmentation des ajouts diminue la compressibilité du sol étudié, réduit son potentiel de gonflement tout en augmentant spectaculairement son module œdométrique et ses paramètres de résistance au cisaillement.

En finalité l'incorporation des agrégats de béton recyclé est une approche efficace pour initier l'utilisation de matériaux recyclés. Avec des proportions allant jusqu'à 20%, il a été possible de renforcer la structure du sol tout en restant écologiquement responsables. Cette intégration modérée offre un bon équilibre entre performance technique et durabilité environnementale.

Mots clés : agrégats de béton recyclé, durabilité, environnement, construction écologique, déchets, recyclage, résistance, tassement, gonflement.

Liste des Symboles & Abréviations

d_{10}, d_{30}, d_{60} : diamètre nominal des particules solides (du sol) (mm)

C_c : coefficient de courbure

C_u : coefficient de d'uniformité

R: lecture du densimètre (soumet du ménisque) a l'instant

CM: la correction due au ménisque

CD: la correction due au défloculant

CT : la correction due à la variation de température en cours d'essai

R_1 : la lecture courigee du densimetre

H_R : profondeur effective du centre de pousses (mm)

D : diamètre équivalent des particules (mm)

W_L : teneur en eau de la limite de liquidité (%)

W_P : teneur en eau de la limite de plasticité (%)

I_P : indice de plasticite (%)

A_C : activite du sol

C_2 : teneur en particule de dimension inferieure à $2\mu\text{m}$ (%)

CaCO_3 : teneur de carbonate de calcium (%)

ϕ : angle de frottement ($^\circ$)

C : cohésion (kpa)

σ : contrainte normal (bar)

τ : contrainte de cisaillement (bar)

σ'_{Pc} : contrainte effective de preconsolidation

σ'_v : contrainte axiale effective applique a l'eprouvette

C_c : indice de copression

C_s : indice de decompression

σ'_P : contrainte verticale effective de préconsolidation (kpa)

σ'_{vo} : contrainte verticale effective en place au droit de l'échantillon (kpa)

m_v : coefficint de compressibilite

E : module œdométrique (kpa)

R_{OC} :

e : indice des vides

γ_s : la masse volumique des grains solides (g/cm³)

γ_d : la masse volumique seche (g/cm³)

BTP : bâtiment travaux public

DAE : déchets d'activité économique

DIB : déchets industriels banals

DMA : déchets ménagers et assimiles

DTQD : déchets toxique en quantité dispersée

GBR : granulat de béton recycle

SBR : structure de béton recycle

LTPO : Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest

LCPC : Laboratoire centre des ponts chaussées

GTR : guide des techniques de réalisation

VBS : valeur de bleu de méthylène

SST : surface spécifique totale

KPa : kilo pascal

MPa : méga pascal

Co₂ : oxyde de carbonate

Ca Co₃ : carbonate de calcium

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine du génie civil et de la géotechnique, la recherche de solutions durables et innovantes pour améliorer les caractéristiques des sols constitue un axe majeur d'investigation. L'incorporation des agrégats de béton recyclé dans les sols fins émerge comme une alternative prometteuse, suscitant un intérêt croissant tant dans le milieu académique que professionnel. Cette pratique, en plus de répondre aux impératifs environnementaux en favorisant le recyclage des matériaux de construction, vise à optimiser les propriétés mécaniques des sols, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans le domaine de la construction durable.

Dans cette perspective, il est essentiel de comprendre comment l'ajout d'agrégats de béton recyclé influe sur les propriétés mécaniques des sols fins. Cette introduction se propose donc d'examiner les différentes études et recherches menées dans ce domaine. En analysant l'effet de l'incorporation des agrégats de béton recyclé sur des paramètres résistance au cisaillement à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne des sols fins, ainsi que les paramètres de compressibilité. Enfin, cette recherche vise à éclairer les praticiens et les chercheurs sur les possibilités et les limites de cette approche innovante.

Ce mémoire intitulé : « Effet de l'incorporation des agrégats de béton recyclé sur les propriétés d'un sol » propose d'abord de dresser un état de l'art sur le sujet, en mettant en lumière la valorisation des déchets issus de démolition et de constructions. Ensuite un programme expérimental est mené sur des échantillons d'argile mélangé à des teneurs en agrégats de béton recyclé estimées à 5%, 10% et 20%. Les résultats témoignent d'une bonne réponse du milieu caractérisé par une croissance des propriétés mécaniques et ceux des paramètres de compressibilité.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres.

- Le premier chapitre dresse des généralités sur les sols notamment les sols fins, leurs comportements et initie le lecteur aux sols problématiques ;
- Le second chapitre abordera les déchets issus de démolition et de construction et détaillant leurs type et techniques de démolition ;
- Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation du sol étudié au laboratoire en détaillant pas à pas les essais d'identifications physiques et les essais mécaniques ;
- Enfin, le dernier chapitre sera réservé à l'amélioration du sol étudié en détaillant les résultats des essais sur l'argile mélangée avec des agrégats de béton recyclé à 5%, 10% et 20%.

Enfin, le présent travail offre également un cadre conceptuel et méthodologique pour orienter les travaux futurs et stimuler le développement de solutions innovantes et durables dans le domaine de la géotechnique en proposant si possible des perspectives possibles à cet axe de recherche.

Chapitre 1. Généralités sur les sols

1.1 INTRODUCTION
1.2 LES SOLS.....
1.3 LES SOLS ARGILEUX.....
1.4 AUTRES PROBLEMES GEOTECHNIQUES.....
1.5 SOLS PROBLEMATIQUES.....
1.6 CONCLUSION.....

1.1 INTRODUCTION

Tous les ouvrages tels que routes, les bâtiments, les ponts, les châteaux d'eau, les barrages... etc, doivent passer par l'étude de fondation qui permettra de déterminer le choix de type de la fondation et les dimensions de la base de l'ouvrage.

Ce choix dépend de plusieurs facteurs tels que la nature du sol d'assise, ses caractéristiques, ainsi que l'importance et la valeur des charges de l'ouvrage.

Réaliser un ouvrage dans l'endroit voulu, ce n'est pas toujours évident. Pas mal de fois on est obligé de changer l'endroit d'implantation de l'ouvrage à cause la qualité médiocre du sol d'assise. La stabilité du sol support de n'importe quel ouvrage est parmi les premiers soucis des géotechniciens qui cherchent à fonder les structures sur un bon sol pour éviter tous les problèmes géotechniques, mais parfois on est obligé de construire sur des sols problématiques ou de faible portance. Dans ce cas, une amélioration de la portance du sol est indispensable pour protéger la structure de tout risque éventuel. Cet état de fait souligne l'importance de la connaissance des fondamentaux de la mécanique des sols. Ce chapitre se veut d'abord didactique en énonçant d'abord dans une première partie des généralités sur les sols pour aller ensuite en seconde partie vers des sols problématiques.

1.2 LES SOLS

1.2.1 Définition des sols

Le sol est défini par opposition au mot roche. En géotechnique, le sol est la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants [1].

Un sol est un mélange de trois phases en proportions variables : la phase solide (constituée par les grains minéraux), la phase liquide (constituée par l'eau) et la phase gazeuse (constituée par l'air).

Un sol est aussi caractérisé par sa porosité, son indice des vides, son degré de saturation et sa teneur en eau.

1.2.2 Classification des sols

Il existe différents essais pour caractériser la nature d'un sol.

1.2.3 L'analyse granulométrique

Un tamisage permet de trier les particules de diamètre supérieur à 80 micromètres pour séparer les sols grenus (constitués de plus de 50% de grains ayant un diamètre supérieur à 80 µm). Une sédimentométrie permet ensuite d'analyser la répartition des éléments de diamètre inférieurs à 80

micromètres pour les sols fins (constitués de plus de 50% de grains ayant un diamètre inférieur à 80 μm)

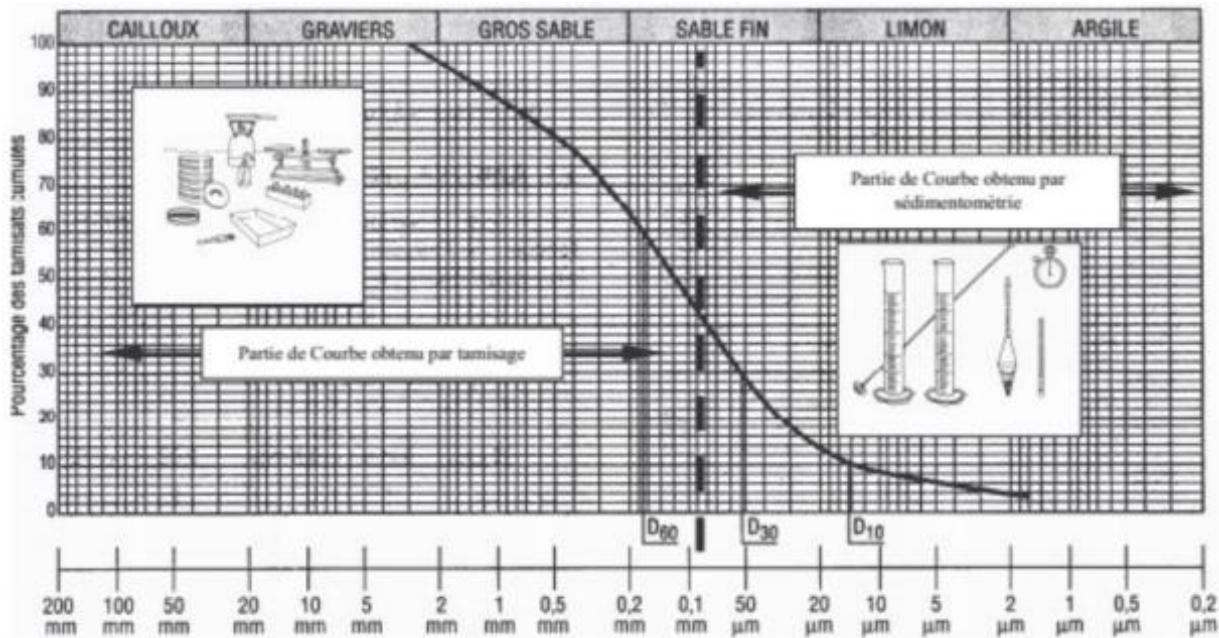


Figure 1.1 *Courbe granulométrique [2]*

1.2.4 Les limites d'Atterberg

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Il consiste à faire varier la teneur en eau d'une fraction de sol en observant sa consistance. Il existe deux limites dites d'Atterberg : la limite de liquidité et la limite de plasticité.

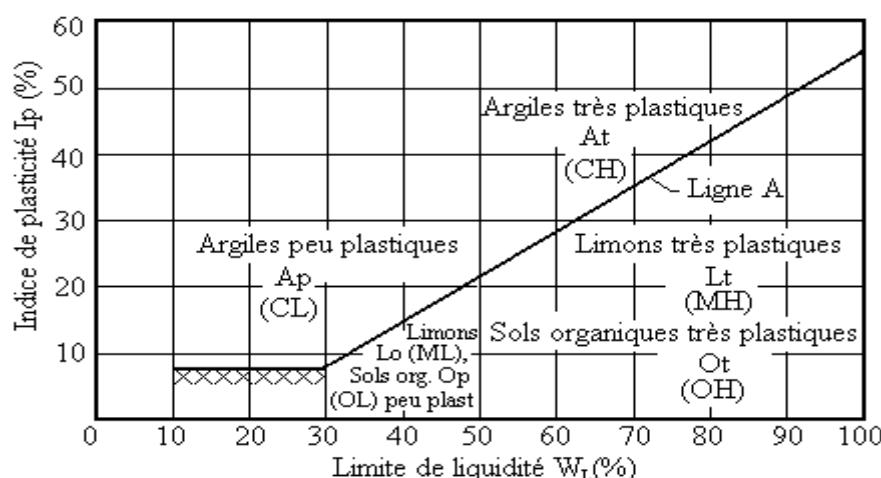


Figure 1.2 *Diagramme de Casagrande [3]*

1.2.5 Propriétés des sols

Les caractéristiques mécaniques des sols sont très variables d'un échantillon à l'autre, car elles dépendent de la structure, de la teneur en eau, de la température, etc...

Nous allons citer les propriétés de certains sols :

1.2.5.1 Le limon

Le limon est un sédiment classique incohérent transporté en suspension par les rivières et le vent, qui se dépose sur le lit des cours d'eau ou sur un terrain inondé. Les limons forment des sols fins avec des sédiments clastiques non consolidés dont les constituants sont principalement minéraux [4].

1.2.5.2 L'argile

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 [5].

1.3 LES SOLS ARGILEUX

1.3.1 Définition

L'argile se rapporte à la terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines dont la taille supérieure est fixée à $2\mu\text{m}$. 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 [6].

Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les argiles plastiques : elles sont tendres et très déformables ;
- Les argiles raides : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité, et cela à cause de la présence des carbonates et du quartz.

L'argile, matériau naturel qui contient habituellement des phyllosilicates (silicates en feuillets), est plastique à l'état humide et durcit par séchage ou chauffage [6].

C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait [6].

Il faut s'entendre sur la qualification de cette teneur en eau. Elle est composée de la teneur en eau liée et de la teneur en eau libre. Les cinétiques d'évolution dans le temps de ces deux teneurs en eau ne

sont pas identiques. En effet, la vitesse d'adsorption de l'eau liée, due aux phénomènes électrostatiques, est plus rapide [6].

La variation du volume des argiles est fortement influencée par des facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques, des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant [6].

Une description détaillée des phénomènes microscopiques est nécessaire pour bien comprendre et interpréter les phénomènes observables à l'échelle microscopique ou macroscopique [6].



Figure 1.3 *Sol argileux* [7]

1.3.2 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 [8].

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 [9].

1.3.3 Origine de l'argile

1.3.3.1 Héritage et altération

L'une des origines des minéraux argileux est liée à l'altération physique des roches. En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant seront différents. En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée et donne de la kaolinite en milieu drainé et des smectites en milieu confiné. En climat tempéré et humide,

l'altération est modérée, il apparaît des interstratifiés, des illites, des chlorites dégradées et des vermiculites.

1.3.3.2 Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggragation

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.

1.3.3.3 Contexte de formation des sols argileux

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 physicochimiques du milieu où ils ont pris naissance.

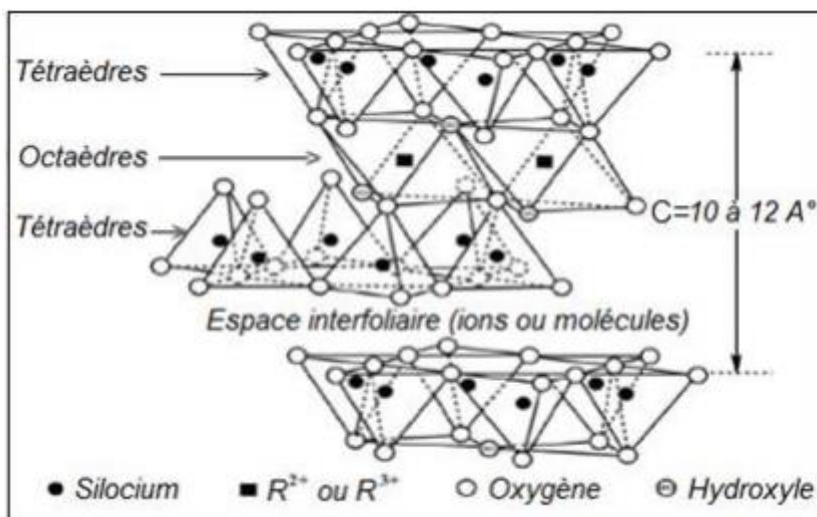


Figure 1.4 Propriétés physico-chimiques d'un sol argileux [10]

1.3.4 Familles des argiles

La structure des feuillets permet de classer les familles ou séries d'argiles en quatre principales familles :

1.3.4.1 Famille de la Kaolinite

Dans le cas de la kaolinite, le feuillet est toujours neutre, dioctaédrique et alumineux. Morphologiquement, la kaolinite se présente sous forme de particules hexagonales constituées par des empilements de feuillets (figure 1.5). La faible capacité d'échange des kaolinites est due à des sites de surface amphotères [11].

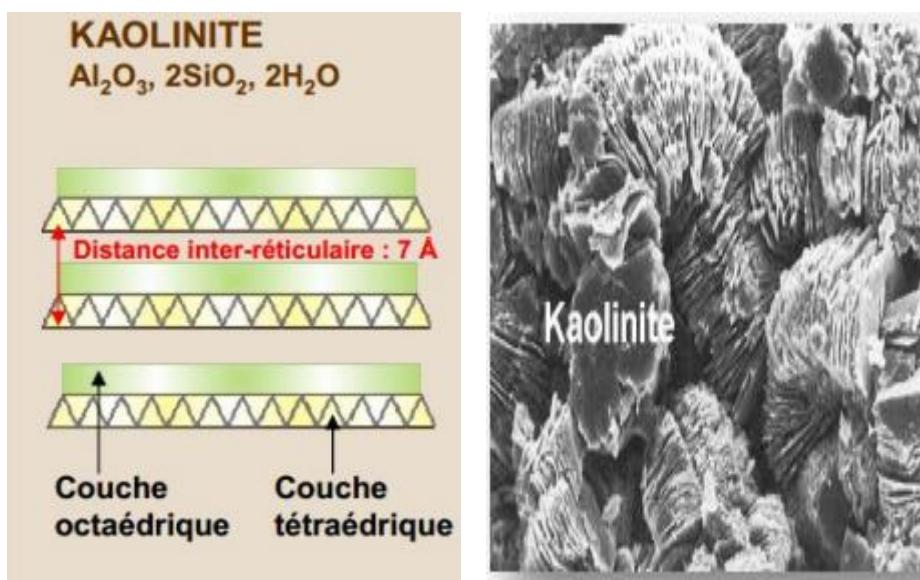


Figure 1.5 *Structure de la Kaolinite. / Un feuillet de Kaolinite [12]*

1.3.4.2 Famille des Illites

L'illite et la muscovite appartiennent à la famille des phyllosilicates 2 :1 dioctaédriques, caractérisée par un empilement régulier de feuillets constitués d'une couche octaédrique alumineuse prise en sandwich entre deux couches tétraédriques.

Une illite est un silicate hydroxylé d'aluminium et de potassium avec un peu de silicium, de magnésium, de fer, et d'eau. Structurellement la muscovite est assez similaire à l'illite mais avec de le silicate hydroxylé d'aluminium et de potassium uniquement.

Les liaisons au sein des feuillets sont identiques au cas de la kaolinite citée plus haut alors que les liaisons inter-feuillets sont assurées par l'attraction électrostatique entre les feuillets et les ions potassium et sont de ce fait plus fortes par rapport au cas de la kaolinite [5].

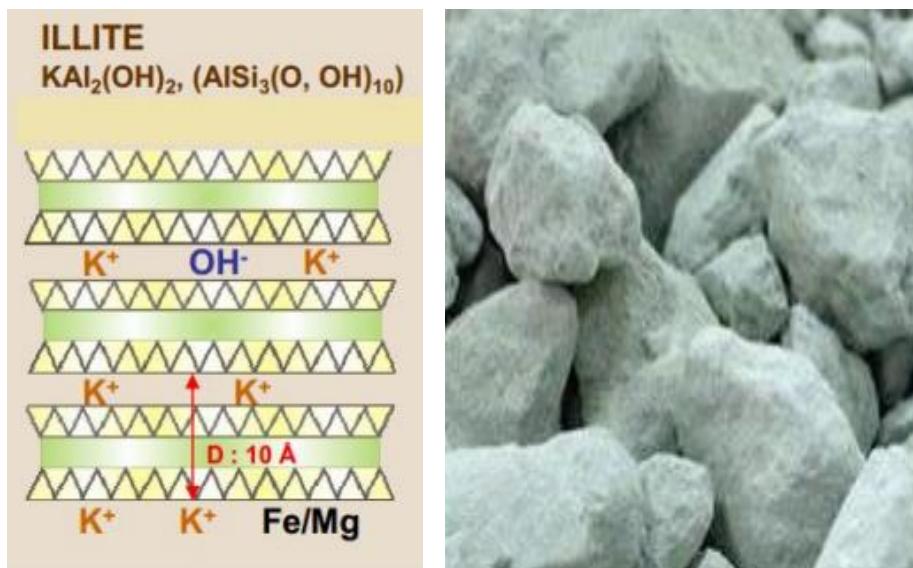


Figure 1.6 *Structure des Illites / L'argile illite [13]*

1.3.4.3 Famille des smectites

Ce sont des phyllosilicates constitués de deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique (phyllosilicates 2/1) et qui présentent des propriétés de gonflement (figure 1.7). Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite. La charge élevée de ces argiles est due pour l'essentiel à des substitutions isomorphiques. Cette charge est donc permanente, négative et dépendante du pH. Des cations compensateurs viennent alors se placer dans l'espace interfoliaire pour combler le déficit de charge. Ces argiles ont une capacité d'échange cationique élevée.

Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans l'espace interfoliaire. Le degré d'hydratation dépend de la nature du cation et de l'humidité relative. Cette possibilité de « gonflement » des espaces interfoliaires conduit à désigner ces argiles par le terme « d'argiles gonflantes ». D'un point de vue textural, les smectites sont généralement constituées de feuillets de grande extension latérale, associés, les uns aux autres en nombre très variable selon l'humidité et la nature du cation échangeable [14].

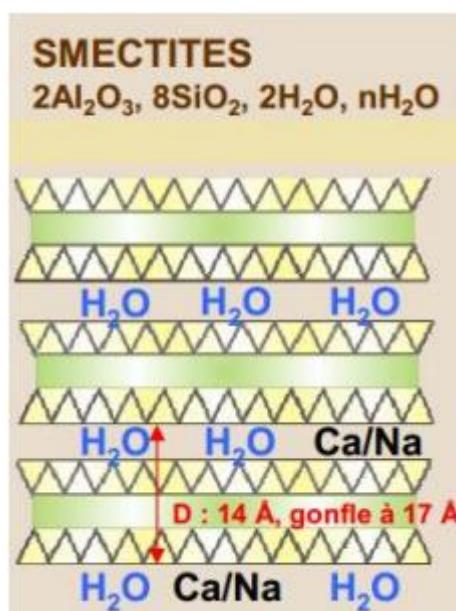


Figure 1.7 Structure des Smectites [13]

1.3.5 Problèmes des sols argileux

Les sols argileux peuvent se modifier en fonction des variations d'eau du terrain. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassemement irrégulier du sol en surface : on parle de retrait. À l'inverse, un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de gonflement [5].

1.3.5.1 Phénomène de tassemement

Le tassemement dans les sols argileux est la réduction de volume du sol argileux sous l'effet d'une charge appliquée, résultant de la compressibilité élevée des particules d'argile. Ce phénomène est

souvent causé par des processus de consolidation, des variations de teneur en eau, et peut conduire à des déformations et des mouvements du sol.



Figure 1.8 *Tassement d'un sol argileux [5]*

1.3.5.2 Phénomène de gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux comme les montmorillonites ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation) [5].



Figure 1.9 *Gonflement d'un sol argileux [15]*

1.4 AUTRES PROBLEMES GEOTECHNIQUES

On peut avoir d'autres manifestations des problèmes causés par des phénomènes d'affaissements et de glissements de terrains et la liste est non exhaustive.

1.4.1 Affaissement

Le phénomène d'effondrement (collapse) est la diminution du volume d'un sol, soumis à certaines conditions, suite à son humidification. Cette diminution de volume conduit à une densification irréversible du sol, initialement lâche ou peu dense (voir figure 1.10).



Figure 1.10 *Affaissement du terrain et stagnation des eaux [16]*

1.4.2 Glissement

Le glissement de terrain est défini comme le déplacement d'une masse de terrains meubles ou rocheux au long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistence (voir figure 1.11).



Figure 1.11 *Glissement de terrain à Boumerdes [17]*

1.5 SOLS PROBLEMATIQUES

Parfois et pour des raisons imprévisibles, le sol commence à se dilater ou à gonfler ou peut avoir des effets inattendus ou peut s'effondrer. Pour certaines raisons, la structure du sol peut également changer, modifiant ainsi la résistance du sol.

De nombreux sols peuvent se révéler comme problématiques en géotechnique, parce qu'ils se dispersent, développer, réduire, subir tassement excessif, et ont un manque de force ou sont solubles. Ces caractéristiques peuvent être attribuables à leur composition, la nature de leurs fluides interstitiels, leur minéralogie ou leur tissu. Il y a beaucoup de types de sols problématiques, certains de la plus notable étant le gonflement de l'argile, l'affaissement et les sols souples dispersifs. Tout cela peut créer beaucoup de problèmes pour la construction [5].

1.5.1 Types de sols à problèmes

Il existe deux types de sols à problèmes, les sols à problèmes chimiques et les sols à problèmes physiques :

Les sols à problèmes chimiques : lorsque le problème dans le sol est dû à la quantité de produits chimiques en excès, il est connu comme un sol à problème chimique. Il y a les types suivants des sols à problèmes chimiques.

- Sol acide ;
- Sol salin ;
- Sol alcalin ;
- Sol sodique.

Les sols à problèmes physiques : dépendent à la qualité physique d'un sol qui est étroitement liée à sa structure, c'est à dire à la façon dont les constituants minéraux et organiques sont assemblés les uns par rapport aux autres. Sa qualité dépend en grande partie de la taille, de la forme et de la disposition des pores et des particules solides (mottes de sable, de limon et d'argile).

On va citer les principaux types de sols ayant des problèmes physiques.

1.5.1.1 Sols affaissables (Effondrables)

Sol à effondrement brusque est défini comme le sol qui sujet à une réduction importante et soudaine du volume lors du mouillage. Les dépôts de sols affaissables se partagent deux caractéristiques principales :

- Ils sont lâches ;
- Ils sont naturellement très sec.

La plupart des chercheurs ont considéré le sol affaissable comme étant un sol partiellement saturé., ou encore comme étant tout sol non saturé qui subit un réarrangement des particules et une grande

diminution de volume due à l'inondation, avec ou sans chargement appliqué (Figure 1.12) montre un exemple de L'effondrement du sol d'un forage réalisé par Total à Ouargla en 1978 [18].



Figure 1.12 *L'effondrement du sol d'un forage réalisé par Total à Ouargla en 1978 [19]*

1.5.1.2 Sols liquéfiables

La liquéfaction du sol est un phénomène sismique géologique, généralement brutal et temporaire, par lequel un sol saturé en eau perd une partie ou la totalité de sa portance, permettant ainsi l'enfoncement et l'effondrement des constructions [20].

Le phénomène de liquéfaction concerne les formations géologiques peu compactes à la granulométrie faible (entre 0,05 et 2 mm) et uniforme. Les formations susceptibles de liquéfaction sont les sables, limons et vases. (Figure 1.13) montre des bâtiments renversés à El Asnam en 1980 par le phénomène de liquéfaction [21].



Figure 1.13 *Des bâtiments renversés à El Asnam en 1980 Par la liquéfaction [22]*

1.5.1.3 Sols compressibles

Les dépôts des sols fins mous et compressibles sont fréquents dans les vallées et en bordure des côtes. Ces zones ont été longtemps considérées comme peu propices à la construction, mais on y construit maintenant fréquemment tous les types d'ouvrages et les chaussées mais en réalité tous les

sols sont compressibles, car ils tassent lorsqu'ils sont soumis à un chargement. Cependant leur compressibilité varie d'un sol à un autre. La figure 1.14 montre remblai sur sol compressible [23].



Figure 1.14 Remblai sur sol compressible [24]

1.6 CONCLUSION

En vertu du présent chapitre on tire les conclusions suivantes :

L'analyse des fondations constitue une étape essentielle pour assurer la stabilité et la pérennité des infrastructures. Les propriétés des sols sont déterminantes dans le choix du type de fondation et des dimensions de la base de l'ouvrage. La variabilité des sols, leurs caractéristiques mécaniques, et les charges applicables doivent être soigneusement évaluées. Une compréhension approfondie des sols, en particulier des sols problématiques tels que les argiles, est cruciale pour prévenir les risques géotechniques. Les sols argileux, avec leurs propriétés minéralogiques et leur sensibilité à l'humidité, peuvent provoquer des phénomènes de gonflement et de retrait, posant des défis significatifs pour la construction. La maîtrise des mécanismes à l'échelle microscopique et macroscopique permet de concevoir des solutions adaptées, telles que l'amélioration de la portance du sol, pour garantir la stabilité des structures. Ce chapitre met en lumière l'importance de la géotechnique dans le domaine de la construction et la nécessité d'être bien formé et informé pour surmonter les défis posés par la diversité des sols rencontrés sur les chantiers.

Le chapitre suivant est entièrement dédié à la problématique des déchets provenant de la démolition et de la construction.

Chapitre 2. Déchets de démolitions et de constructions

2.1 INTRODUCTION.....	15
2.2 DEFINITION	15
2.3 CLASSIFICATION DES DECHETS	15
2.4 QUANTITES PRODUITES DE DECHETS	16
2.5 MODES DE TRAITEMENT DES DECHETS	16
2.6 TYPE DES DECHETS.....	16
2.7 DECHETS DE CONSTRUCTION ET DE DEMOLITION.....	24
2.8 TECHNIQUES DE DEMOLITION.....	27
2.9 LES AGREGATS DE BETONS RECYCLES	28
2.10 CONCLUSION	34

2.1 INTRODUCTION

Du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics (B.T.P) depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers. L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, la valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux, le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique.

Le renforcement des sols par les déchets de démolition et de construction et particulièrement les agrégats de béton recyclé est une nouvelle technique utilisée dans le but de d'améliorer les propriétés mécaniques du sol, sa stabilité, sa capacité portante et son comportement aussi bien vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement que celui du phénomène de la compressibilité.

Dans ce chapitre nous allons évoquer les déchets de construction et les techniques de traitement ou de d'élimination, ainsi le recyclage des agrégats de bétons et la réutilisation les déchets dans le domaine géotechnique.

2.2 DEFINITION

Le déchet est défini au niveau européen comme toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'obligation de se défaire.

Les déchets de chantier sont tous les déchets produits par le secteur du bâtiment et des travaux publics. Ils sont issus des travaux de construction, de démolition ou de réhabilitation de bâtiments. Soumise à une réglementation stricte, l'élimination des déchets est, selon le Code de l'environnement, de la responsabilité de leurs producteurs et détenteurs. [25]

2.3 CLASSIFICATION DES DECHETS

Il existe une grande variété de déchets qui peuvent être divisés en deux classes :

- Déchets ménagers avec comme producteur initial un ménage ;
- Déchets d'activités économiques (DAE) dont le producteur initial n'est pas un ménage.

On peut également classer les déchets selon leurs propriétés : déchets inertes, déchets non dangereux et déchets dangereux.

Au niveau européen, les déchets sont classés selon une codification à six chiffres indiquant le producteur principal, les propriétés des déchets ou encore le secteur de production. Ce code est nécessaire dans tous les documents officiels de gestion des déchets [25].

2.4 QUANTITES PRODUITES DE DECHETS

Des millions de tonnes de déchets issus des activités de travaux de bâtiment. En considérant que les matériaux réemployés sur place ou recyclés après transport ne constituent pas des déchets. Un pourcentage très important de déchets inertes pourrait être réemployé ou recyclé (on exclut les sols fins très humides et les boues) [25].

Pour le bâtiment, la répartition par type de chantier est la suivante :

- Démolition : 51 % ;
- Rénovation : 36 % ;
- Constructions neuves : 13 %.

Concernant les travaux publics, on observe une diminution des déchets depuis 2010, puisque la quantité était de 221 Mt, et elle est de 183,5 Mt en 2020. La répartition par type de déchets est la suivante :

- Déchets inertes : environ 85 % ;
- Déchets non dangereux : environ 5 % ;
- Déchets dangereux : 12 %.

Dans l'ensemble du BTP, 50 % des déchets ne sont pas triés sur chantier ; ils peuvent donc l'être ultérieurement soit à l'atelier, soit sur une installation spécifique.

2.5 MODES DE TRAITEMENT DES DECHETS

La réglementation a défini, afin d'encourager l'économie circulaire, des modes de traitement des déchets à privilégier suivant l'ordre établi ci-dessous [25]:

- Prévention ou réduction à la source (le meilleur déchet est celui que l'on ne produit pas) ;
- Réemploi ;
- Recyclage ;
- Autres formes de valorisation des matières (remblais de carrière, compostage, etc.) ;
- Incinération avec valorisation énergétique en priorité ;
- Enfouissement (stockage définitif) en dernier recours.

2.6 TYPE DES DECHETS

Les déchets de chantier sont de natures très variées. On peut les classer en quatre catégories :

- Les déchets inertes,
- Les déchets banals (DIB ou DMA),

- Les déchets d'emballages,
- Les déchets dangereux et les déchets toxiques en quantités dispersées (DTQD).

Les tableaux suivants présentent, pour chaque catégorie, le type de déchets concerné selon la nomenclature européenne (Décision 2001/118/CE) et le mode d'élimination ou valorisation à prévoir. Cette décision va être transcrit dans le droit français, courant 2002. Jusqu'à cette date, pour la classification des déchets dangereux la référence est le décret 97-517 du 15 Mai 1997 [26].

2.6.1 Déchets de type inertes

La Directive Européenne 1999/31/CE du 26 Avril 1999, relative à la mise en décharge, définit un déchet comme inerte « s'il ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une matière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. La production totale de lixiviats et la teneur des déchets en polluants ainsi que l'écotoxicité des lixiviats doivent être négligeables et, en particulier, ne doivent pas porter atteinte à la qualité des eaux de surface et/ou des eaux souterraines » [26].

D'après le « Guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes » (MATE – Avril 2001), les déchets inertes sont donc essentiellement des déchets minéraux ou assimilables au substrat naturel non pollué (figure 2.1).



Figure 2.1 Déchets inertes [27]

Le tableau ci-dessous offre une description détaillée des déchets.

Tableau 2.1. Classification des déchets [26]

Code de nomenclature	Désignation	Filières d'élimination ou valorisation
17 01 01	Béton (armé ou non) (1)	Stockage en classe III, recyclage, Remblaiement autorisé
17 01 02	Briques (1)	Stockage en classe III, recyclage, Remblaiement autorisé
17 01 03	Tuiles et céramiques (1)	Stockage en classe III, recyclage, Remblaiement autorisé
17 01 07	Mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques autres que ceux visés à la rubrique 17 01 06 (1)	Stockage en classe III, recyclage, Remblaiement autorisé
17 02 02	Verre	Recyclage, stockage en classe III
17 03 02	Mélanges bitumineux autres que ceux visés à la rubrique 17 03 01	Stockage en classe III, recyclage, Remblaiement autorisé
17 05 04	Terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17 05 03	Stockage en classe III, recyclage, Remblaiement autorisé
17 05 06	Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05	Stockage en classe III (boues pelletables), réutilisation, remblaiement autorisé
17 05 08	Ballasts de voie autre que ceux visés à la rubrique 17 05 07	Stockage en classe III, réutilisation ou recyclage, Remblaiement autorisé
17 06 04	Matériaux d'isolation autres que ceux visés aux rubriques 17 06 01 et 17 06 03	Stockage en classe III ou recyclage

Ces matériaux sont considérés comme inertes s'ils comportent une part insignifiante d'enduit de plâtre, de peintures (sans plomb), de papiers peints, de colle et de produits d'accrochage des revêtements muraux et de sols, de colles amiantées (guide technique relatif aux installations de stockage et de déblais des inertes, 2001).

A l'horizon 2002, seuls les déchets inertes non valorisables devraient être acceptés dans les décharges d'inertes de classe III et en remblaiement de carrières et autres sites. Le recyclage sous forme de granulats devrait donc être amené à se développer sous réserve de conditions techniques et économiques acceptables.

2.6.1.1 Déchets spécifiques de type F, stockés en alvéole spécifique mono matériaux, dans un centre de stockage d'inertes

Le guide du MATE (avril 2001) prévoit aussi le stockage dans des conditions spécifiques (en alvéole monomatériaux) de matériaux minéraux assimilés aux inertes pour leur condition de stockage. Ce sont les déchets de plâtre (carreaux de plâtre, cloisons, doublage, ...), (figure 2.2).



Figure 2.2 Déchets de plâtre sur un chantier de déconstruction [28]

L'acceptation des déchets de ce type (stockage de type F) est actuellement à l'étude au sein de la Commission Européenne (tableau 2.2). Le stockage de l'amiante-ciment (en alvéole de type F) sur les centres de stockage d'inertes comme le prévoyait le Guide n'est plus autorisé, car l'amiante-ciment est classé selon la nomenclature européenne de 2001 en déchet dangereux [26].

Tableau 2.2. Classification des déchets de type F [26]

Code de nomenclature	Désignation	Filières d'élimination ou valorisation
17 08 02	Matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17 08 01 (2)	Stockage en classe III en alvéole spécifique ou recyclage

Plâtre en enduit, plâtre en stuc, déchets de plaques de plâtre plus laine minérale (d'après le guide technique relatif aux installations de stockage et de déblais des inertes, avril 2001).

2.6.2 Déchets banals (DIB) ou déchets ménagers et assimilés (DMA)

2.6.2.1 Déchets banals (DIB)

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie (figure 2.3). Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie. [29].



Figure 2.3 Déchets industriels banals [30]

2.6.2.2 Déchets assimilés (DMA)

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants) [29].

Les déchets dont le recyclage est bien organisé sont les métaux (aluminium, cuivre, fer, acier, étain, zinc, ...), le verre et certains plastiques (figure 2.4).



Figure 2.4 Déchets ménagers et assimilés [31]

Le tableau suivant regroupe une classification des déchets banals

Tableau 2.3. Classification des déchets banals [26]

Code de nomenclature	Désignation	Filières d'élimination ou valorisation
03 01 05	Sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages autres que ceux visés à la rubrique 03 01 04	Incineration DMA avec valorisation énergétique, chaufferie, recyclage, compost, Centre de classe II
03 02 99	Produits de protection du bois non spécifiés ailleurs	Unité de traitement spécialisée, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 01 12	Déchets de peintures et vernis autres que ceux visés à la rubrique 08 01 11	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 01 14	Boues provenant de peintures ou vernis autres que celles visées à la rubrique 08 01 13	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 01 16	Boues aqueuses contenant de la peinture ou du vernis autres que celles visées à la rubrique 08 01 15	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 01 18	Déchets provenant du décapage de peintures autres que ceux visés à la rubrique 08 01 17	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 01 20	Suspensions aqueuses contenant de la peinture ou du vernis autres que celles visées à la rubrique 08 01 19	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 04 10	Déchets de colles et mastics autres que ceux visés à la rubrique 08 04 09	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique

08 04 12	Boues de colles et mastics autres que celles visées à la rubrique 08 04 11	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 04 14	Boues aqueuses contenant des colles et mastics autres que celles visées à la rubrique 08 04 13	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
08 04 16	Déchets liquides aqueux contenant des colles ou mastics autres que ceux visés à la rubrique 08 04 15	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
15 02 03	Absorbants, matériaux filtrants, chiffons d'essuyage et vêtements de protection autres que ceux visés à la rubrique 15 02 02	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
16 06 04	Piles alcalines (autres que rubrique 16 06 03)	Recyclage, incinération DMA avec valorisation énergétique
16 06 05	Autres piles et accumulateurs	Recyclage, incinération DMA avec valorisation énergétique
17 02 01	Bois	Stockage en classe II ou incinération avec valorisation énergétique, chaufferie
17 02 03	Matières plastiques	Stockage en classe II, recyclage, incinération DMA avec valorisation énergétique
17 04 01	Cuivre, bronze, laiton	Recyclage
17 04 02	Aluminium	Recyclage
17 04 03	Plomb	Recyclage
17 04 05	Fer et acier	Recyclage
17 04 06	Etain	Recyclage
17 04 07	Métaux en mélange	Recyclage
17 04 11	Câbles autres que ceux visés à la rubrique 17 04 10	Recyclage, stockage en classe II
17 06 04	Matériaux d'isolation (origine non minérale) autres que ceux visés aux rubriques 17 06 01 et 17 06 03	Stockage en classe II, incinération DMA avec valorisation énergétique
17 06 05	Matériaux de construction contenant de l'amiante avec liant autre que minéral (ex : vinyl-amiante)	Stockage en classe II
17 08 02	Matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17 08 01 (3)	Stockage classe II, recyclage
17 09 04	Déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés aux rubriques 17 09 01, 17 09 02, 17 09 03	Stockage en classe II ou, recyclage et stockage en classe III après tri

Déchets de doublage plâtre + polystyrène expansé, déchets de faux plafonds plâtre + lattis bois, déchets de faux plafonds plâtre + filasse (d'après le guide technique relatif aux installations de stockage de déblais et déchets inertes, avril 2001).

Les déchets dont le recyclage est bien organisé sont les métaux (aluminium, cuivre, fer, acier, étain, zinc, ...), le verre et certains plastiques.

2.6.3 Déchets d'emballage

L'ensemble des emballages et matériaux d'emballages dont le détenteur se défait après utilisation des produits qu'ils contenaient.

Le tableau suivant donne une classification sur les déchets d'emballage.

Tableau 2.4. Classification des déchets d'emballage [26]

Code de nomenclature	Désignation	Filières d'élimination ou valorisation
15 01 01	Emballages en :	
15 01 02	Papier, carton	
15 01 03	Matières plastiques	
15 01 04	Bois	Stockage interdit (sauf productions < 1 100 l/s et collectées avec les OM), recyclage ou incinération
15 01 05	Métalliques	
15 01 06	Composites	
15 01 07	Mélange Verre	DMA en centre de valorisation énergétique

2.6.4 Déchets dangereux et déchets toxiques en quantités dispersées (DTQD)

Les DTQD (déchets toxiques en quantité dispersée) sont des déchets dangereux produits et détenus par les professionnels en trop petites quantités pour suivre directement la filière habituelle de traitement des déchets dangereux. C'est donc le facteur "quantité" qui détermine la nature du déchet

Le tableau 2.5 donne une classification selon la nomenclature des déchets dangereux.

Tableau 2.5. Classification selon la nomenclature des déchets dangereux [26]

Code de nomenclature	Désignation	Filières d'élimination ou valorisation
08 01 11	Déchets de peintures et vernis contenant des solvants organiques ou d'autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 01 13	Boues provenant de peintures ou vernis contenant des solvants organiques ou autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 01 15	Boues aqueuses contenant de la peinture ou du vernis contenant des solvants organiques ou autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 01 17	Déchets provenant du décapage de peintures ou vernis contenant des solvants organiques ou autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 01 19	Suspensions aqueuses contenant de la peinture ou du vernis contenant des solvants organiques ou autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 01 21	Déchets de décapants de peintures ou vernis	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 04 09	Déchets de colles et mastics contenant des solvants organiques ou d'autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 04 11	Boues de colles et mastic contenant des solvants organiques ou d'autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
08 04 13	Boues aqueuses contenant des colles ou mastics contenant des solvants organiques ou d'autres substances	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée

08 04 15	Déchets liquides aqueux contenant des colles ou mastics contenant des solvants organiques ou d'autres substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
03 01 04	Sciure de bois, copeaux, chutes de bois, panneaux de particules et placages contenant des substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
03 02 01	Composés organiques non halogénés de protection du bois	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
03 02 02	Composés organochlorés de protection du bois	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
03 02 03	Composés organométalliques de protection du bois	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
03 02 04	Composés inorganiques de protection du bois	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée
03 02 05	Autres produits de protection du bois contenant des substances dangereuses	Stockage classe I (4), incinération DIS, unité de traitement spécialisée

2.7 DECHETS DE CONSTRUCTION ET DE DEMOLITION

2.7.1 Déchets de démolition

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers [32].

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf [32]. La figure 2.5 illustre les déchets de démolition.



Figure 2.5 Déchets de démolition [32]

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron.

Différents déchets peuvent être récupérés sur les chantiers, on peut citer les déchets de béton, de bois, de gypse, de métaux en encore de brique.

2.7.1.1 Déchets de béton

Les déchets de béton générés par la fabrication ont plusieurs origines : déchets de béton frais, déchets de béton durci, rebuts de fabrication et retours de chantiers. Ils peuvent être réintégrés in situ (usine de préfabrication ou unité de production de béton prêt à l'emploi) pour la fabrication de nouveaux produits, ou recyclés une fois durcis, sans nécessité de tri complémentaire, dans des installations de concassage [33].

Le tri, une étape obligée

Un tri est indispensable pour séparer les bétons des autres matériaux (plâtre, PVC, armatures, ...) lors de la déconstruction de bâtiments ou d'infrastructures, puis lors du traitement des déchets sur les plateformes de tri et de regroupement. Les techniques de tri s'améliorent régulièrement et les démarches de déconstruction sélectives devraient se systématiser toujours davantage. Le diagnostic déchets avant déconstruction, désormais obligatoire pour les bâtiments importants, participe à cette optimisation de la qualité du tri [34].

2.7.1.2 Déchets de bois (des bâtiments)

Le bois manufacturé représente la plus grande partie du bois que nous utilisons et qui se termine toujours en déchet (figure 2.6). Il n'est pas réutilisable principalement en raison des produits de protection, de conservation ou d'habillage (peinture et vernis...) qui sont utilisés pendant toute sa vie. Ses seules réutilisations, de façon marginale, sont les panneaux de particules que l'on obtient la aussi avec de la colle et des produits injectés.

Le bois en fin de vie devrait être pour destruction, en centrale spécifique comme le demande certains textes officiels, mais ce n'est qu'un rêve de le croire. Il est très souvent brûlé soit dans vos cheminées soit dans les centrales ou les produits nocifs sont soit éjectés dans l'atmosphère, soit stockés sans réutilisation en décharge (sauvage ...) et cela rarement pour le bien de notre santé.



Figure 2.6 Déchets de bois [6]

2.7.1.3 Déchets de gypse

Les déchets de gypse peuvent être récupérés à partir des cloisons sèches (figure 2.7). Dans le domaine de la construction durable, l'utilisation de matériaux issus du recyclage est un atout précieux que l'industrie du plâtre s'efforce de promouvoir efficacement. Grâce à un processus maîtrisé de calcination, tout matériau à base de plâtre peut réintégrer la chaîne de production sous forme de matière première pour la fabrication de plaques ou de blocs de plâtre. Ce processus, aussi appelé recyclage en boucle fermée, peut se répéter de manière infinie sans altération de la qualité des produits finis, car le plâtre est un matériau recyclable à 100%.



Figure 2.7 Déchets de gypse [32]

2.7.1.4 Déchets de métaux

Les déchets métalliques suivent un long chemin pour finalement revenir à un aspect « utile ». Triés avec soin par le consommateur et déposés dans le site stockage, nos déchets en acier et en aluminium

sont promis à une seconde vie. Ses déchets sont ensuite collectés auprès des particuliers puis acheminés vers un centre de tri de collecte sélective (figure 2.8), où ils vont être de nouveaux triés. Les déchets métalliques sont séparés du flux de déchets grâce à un overband électromagnétique ou à aimant permanent pour les déchets en acier et grâce à un courant de Foucault pour les déchets en aluminium.

Une fois séparés les déchets en acier et en aluminium sont broyés puis passent dans un four à basse température pour éliminer les impuretés, laque, vernis, étiquettes.



Figure 2.8 Déchets de métaux (acier et aluminium) [32]

2.7.1.5 Déchets de briques

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites (figure 2.9). Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel.



Figure 2.9 Déchets de briques [32]

2.8 TECHNIQUES DE DEMOLITION

Différents facteurs influencent le choix de la technique ou de la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition :

- La surface de travail disponible ;
- L'existence de réglementations locales ou nationales obligeant le tri des déchets ;

- L'existence de prescriptions environnementales (imposées par le Maître de l'Ouvrage) ;
- L'emplacement du chantier de démolition ;
- Le volume de démolition ;
- Le temps alloué pour réaliser la démolition.

Les techniques décrites ci-après ne peuvent être mises en œuvre que par des entreprises qualifiées, ayant compétences pour appliquer les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le voisinage.

2.8.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lente et coûteuse, mais elle permet un bon tri si elle est bien faite [35].

2.8.2 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets, BRH sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent [35].

2.8.3 Démolition par dynamitage

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Elles peuvent aussi être utilisées dans les différentes parties d'un bâtiment pour avoir une démolition sélective. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets [35].

2.9 LES AGREGATS DE BETONS RECYCLES

La production des granulats de béton recyclé (GBR)

Globalement les déchets de la Construction & Démolition sont constitués de grandes quantités de matériaux inertes [36]. Selon les enquêtes nationales SOeS de 2014, en France, les déchets des bâtiments sont de l'ordre de 46 millions de tonnes [37].

La quantité de déchets à base de béton est d'environ 17 millions de tonnes [37]. Afin d'éviter leur stockage dans des dépôts sauvages comme l'indique le point 33 de la feuille de route économique circulaire (Frec) [38], ces déchets pourraient être recyclés sous forme de granulats.

Les granulats de béton recyclé sont fabriqués sur des plateformes fixes ou mobiles qui transforment les matériaux inertes des chantiers de déconstruction [39]. Le recyclage de tels matériaux commence avec un tri sur le chantier de déconstruction pour s'assurer que seuls les matériaux valorisables sont inclus dans le processus de recyclage. Cette action est réalisée en fonction de l'ancienneté de l'ouvrage, car certains composants ne peuvent pas être utilisés pour former des gravillons recyclés comme le plâtre, le bois....

Les plateformes permettent d'obtenir différentes classes granulaires : gravillons et sables. Les procédés de fabrication des granulats recyclés varient en fonction des plateformes de recyclage. Généralement les opérations comprennent une phase d'extraction des éléments métalliques par des aimants, des systèmes de tri pour l'élimination de contaminants légers (bois, plastique, etc), concassage/criblage et flocculation des argiles [35], [40]. La complexité de la plateforme de fabrication dépend de la réglementation de chaque pays ou région. L'élimination des contaminants est importante, car ces derniers peuvent nuire à la qualité du béton dans lequel les granulats de béton seront recyclés. Une attention particulière doit être portée aux sables de béton recyclé (SBR), car le processus a tendance à y accumuler les contaminants.

2.9.1 Propriétés physiques de GBR

Comme le montre la Figure 2.10 à l'échelle macro, le granulat SBR peut être considéré comme un matériau à deux phases : le granulat naturel et la pâte de ciment résiduelle. À l'échelle micro, une troisième phase lui est attribuée, étant l'interface entre le granulat naturel et la pâte résiduelle [41]. Plus précisément, ces interfaces affectent le concassage et ainsi les propriétés physiques du GBR telles que (i) la forme des granulats et leur texture (ii) la distribution granulométrique et (iii) l'absorption de l'eau [42], [43].

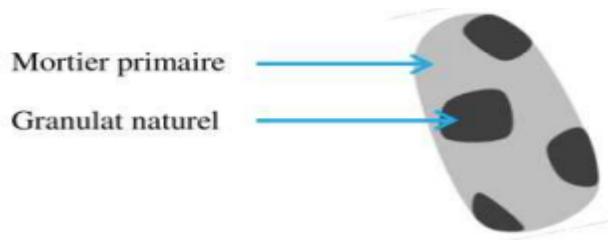


Figure 2.10 Granulat de béton recyclé [44]

Parce que la pâte de ciment est en général plus poreuse et moins résistante que le granulat naturel, elle modifie les propriétés des granulats recyclés. Et comme la proportion de pâte augmente en général quand la taille des GBR diminue [45], l'effet est plus marqué sur les sables de béton recyclé que sur les

gravillons, notamment en ce qui concerne la densité, la porosité ou le taux d'absorption en eau [41], [46]- [47]. Les conséquences néfastes sur les propriétés des bétons dans lesquels ils sont ensuite recyclés sont logiquement plus marquées avec les sables.

C'est la norme NF EN 12620+A1 [48] qui définit les termes relatifs aux granulats pour la fabrication du béton. Les sections suivantes décrivent certaines propriétés des GBR.

2.9.2 Morphologie et texture des GBR

À ce jour, aucune étude n'a été réalisée pour comparer la rugosité des granulats SBR à celle des granulats naturels. Toutefois, en raison de la pâte de mortier résiduelle, il peut être suggéré que la rugosité du SBR est supérieure à celle du sable [49]. Si la rugosité dépend alors de la pâte résiduelle, elle dicte également la morphologie des gravillons. On constate indirectement que la pâte de ciment résiduelle donne un côté frottant aux granulats recyclés qui se traduit par des valeurs faibles de compacités en particulier des sables recyclés [45]. Une conséquence bien connue de ce fait est que la demande en eau des bétons contenant des GBR augmente avec le taux de recyclage [50].

A ce sujet, la morphologie des gravillons recyclés pourrait donc être modifiée par la mise en œuvre de techniques visant à éliminer la pâte mortier résiduel.

Si de multiples procédés de broyage et d'attaques chimiques sont appliqués à la surface de gravillons recyclés, leur morphologie peut changer vers une forme sphérique, plus allongée [51], [52] (Figure 2.11). Ce qui peut contribuer à améliorer leur distribution granulométrique.

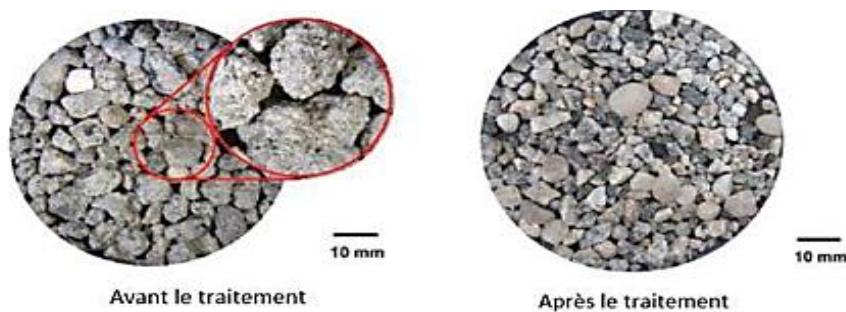


Figure 2.11 GBR avant et après le traitement avec 33 % HCl [52]

2.9.3 Distribution granulométrique

La granulométrie décrit la distribution des tailles des granulats. Ce paramètre est d'une grande importance, car l'ouvrabilité du béton en dépend. Sur ce dernier point, il a été démontré qu'en utilisant une bonne distribution granulométrique, il est possible de réduire le ciment ajouté de 50% et les émissions de CO₂ de 25% [53].

Il est important de noter que la distribution granulométrique de gravillons recyclés est fortement liée au type de béton recyclé et au type de broyage effectué [41].

2.9.4 Porosité et absorption d'eau

Les granulats, de façon générale, présentent une certaine porosité qui est accessible par l'eau. L'absorption d'eau quantifie la masse d'eau qui peut pénétrer dans cette porosité rapportée à la masse sèche du granulat. La masse d'eau absorbée est mesurée en faisant la différence entre la masse à l'état saturé surface sèche, et la masse sèche [41] [54], [55]. La norme EN 1097-6 :2013 [56] précise le mode opératoire pour évaluer cette grandeur.

La connaissance de cette valeur est indispensable pour calculer l'eau efficace d'un béton. L'eau efficace est l'eau totale contenue dans une formule de béton réduite de l'eau absorbée par les granulats. C'est donc l'eau réellement disponible pour la pâte de ciment. C'est l'eau efficace, et non l'eau totale, qui pilote l'ouvrabilité du béton. C'est également l'eau efficace qui est prise en compte pour l'évaluation de la résistance des bétons [57], et dans les critères de durabilité du tableau de la norme béton EN 206/CN [58].

La pâte de ciment présente une porosité nettement plus importante que les granulats naturels. De par leur nature composite, il en découle que les GBR ont une absorption en général sensiblement plus élevée que les granulats naturels. De plus, comme la proportion de pâte augmente quand la taille des grains diminue, les SBR présentent une absorption plus élevée que les gravillons de béton recyclé. C'est ainsi que l'absorption des gravillons de béton recyclé est typiquement dans la gamme 2.6 – 6.2 %, alors que celle des SBR est plutôt dans la gamme des 6.3-8.6% [59].

Il est donc particulièrement important de prendre en compte l'absorption des GBR lorsque l'on formule un béton avec des granulats recyclés. À titre d'illustration, pour un béton contenant 1500 kg/m³ de GBR d'absorption moyenne de 6%, l'eau absorbée représente 90 l/m³ alors que l'eau efficace visée est typiquement entre 160 et 180 l/m³.

Si l'absorption d'eau est relativement constante ou modérée, il est donc assez facile d'anticiper l'eau qu'il est nécessaire d'ajouter à un mélange de béton en fonction de l'état d'humidité réelle du granulat en écrivant l'équation (1) : $E_{eff} = E_{aj} + E_g - E_{abs}$

Où :

- E_{eff} est la quantité d'eau efficace en L. m⁻³;
- E_{aj} est la quantité eau ajoutée en L. m⁻³;
- E_g est la quantité eau amenée par les granulats en L. m⁻³ . Cette valeur est en général mesurée par des sondes en temps réel sur les centrales à béton ;
- E_{abs} est la quantité d'eau absorbée par les granulats en L. m⁻³;

Cependant lorsque l'absorption est élevée et fluctuante on voit qu'elle peut introduire des biais dans ce calcul et générer des fluctuations d'ouvrabilité des bétons à l'échelle industrielle. Ce problème est particulièrement marqué avec les SBR puisqu'ils contiennent de fortes proportions de pâte résiduelle et

que cette dernière peut être de nature variable en fonction des bétons d'origine. C'est une des principales raisons pour lesquelles les SBR sont dans la pratique peu recyclés [50].

À noter une difficulté supplémentaire pour les SBR : la détermination de leur absorption d'eau est difficile en raison de la présence de particules fines ($<25\mu\text{m}$) de pâte de ciment résiduelle, car celles-ci ont tendance à former des agglomérats rendant difficile l'identification de l'état de saturation surface sèche lors de la mesure. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'absorption d'eau du SBR, mais aucune d'entre elles n'est acceptée de manière générale [41].

2.9.5 Densité

De la même façon, la présence de pâte cimentaire qui présente une densité plus faible que celle des granulats recyclés conduit à abaisser la densité des GBR dans une gamme de l'ordre de 2,1 à 2,3 alors que celle des granulats naturels se trouve plutôt dans la gamme 2,5 à 2,7. Comme pour la porosité, cet effet est plus marqué pour les SBR qui contiennent en général plus de pâte que les gravillons de béton recyclés.

À titre d'exemple Nedeljković.al. [41] , présentent une analyse de différentes études comparant la densité en condition saturée surface sèche de sables naturels avec des SBR. Ils concluent que la densité des SBR est plus faible (en moyenne 2,295 kg /m³ contre 2,637 kg /m³ pour les sables naturels), (Figure 2.12).

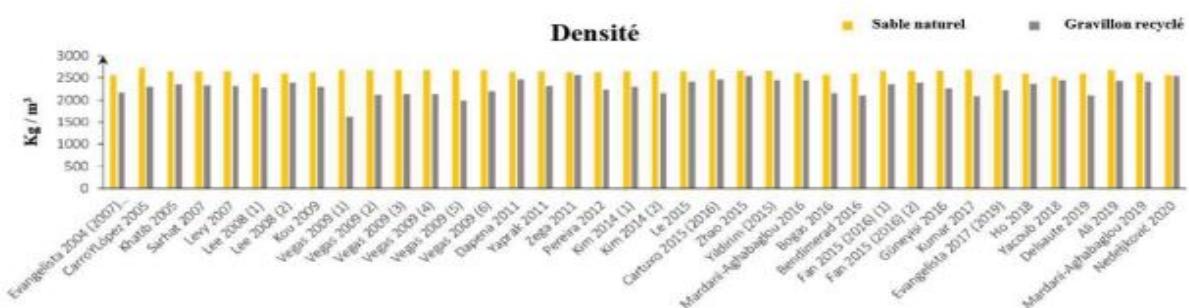


Figure 2.12 Densité en condition saturée surface sèche de SBR comparée à celle de sables naturels [41]

Cet effet sur la densité ne pose pas de problème particulier, au contraire il permet d'alléger le béton dans lequel les GBR sont introduits, ce qui pourrait être intégré dans les Eurocodes [60], [61]. Il faut par contre, bien le prendre en compte lorsque l'on effectue le bilan volumétrique du béton (une masse de GBR représentant un volume plus élevé que la même masse de granulats naturels) lors de la formulation d'un béton avec recyclés.

2.9.6 Propriétés mécaniques

Les bétons dont sont issus les granulats recyclés ont une résistance mécanique classiquement comprise entre 15 et 50 MPa, même si des valeurs plus élevées peuvent être observées quand des bétons modernes sont recyclés. Ces valeurs sont à comparer avec celle des granulats naturels qui sont en général largement supérieurs à 50 MPa (valeurs mesurables dans la roche mère pour les granulats concassés).

Les GBR ont donc des performances mécaniques en général plus faibles que les granulats recyclés. Cela se traduit donc par des valeurs de Los Angeles (NF EN 1097-2 [62]) et de Micro Deval (NF EN 1097-1 [63]) plus élevées [45].

De la même façon, le module élastique de la pâte de ciment est en général nettement plus faible que celui des granulats naturels. En conséquence les GBR ont un module élastique plus faible que celui des granulats naturels [45].

Il découle de ces constats que lorsqu'un volume de granulats naturels est remplacé dans un béton par le même volume de GBR, sa résistance à la compression décroît ainsi que son module élastique. Cette tendance est d'autant plus forte que le taux de remplacement des granulats naturels est important. Elle est également plus prononcée lorsque l'on utilise des SBR qui contiennent en général plus de pâte que les gravillons de béton recyclé [45] [50] [61].

2.9.7 Propriétés chimiques

Peu d'études décrivent la composition chimique des GBR (Tableau 2.6; [60]- [63]), cependant, elles soulignent qu'elles dépendent de la composition initiale du béton recyclé. Parmi ces études, il est indiqué que la composition chimique est principalement influencée par la taille des particules et non par leur origine géographique [64].

Tableau 2.6. Composition chimique du SBR des différentes analyses expérimentales

Auteurs	Sable et fraction analyse	Composition chimique
Angulo et al. [38]	Déchets de Construction Gravier, sable $\leq 37 \mu\text{m}$	SiO ₂ (48.0–84.2%), Al ₂ O ₃ (5.0–17.2%), CaO (2.4–13.9%)
Bianchini et al. [39]	(0.125–0.075 mm; < 0.075 mm) Déchets de Construction	SiO ₂ 39.9%, Al ₂ O ₃ 68.3%, Fe ₂ O ₃ 3.7% et CaO 20.76%
Sicakova et al. [40]	Déchets de Construction SBR $\leq 125 \mu\text{m}$	SiO ₂ 31.1%, Al ₂ O ₃ 8.7%, Fe ₂ O ₃ 2.7%, CaO 12.4% autres éléments 45.1%.
Lotfi and Rem [41]	Déchets de Construction CEM III SBR $\leq 125 \mu\text{m}$	SiO ₂ 41.2%, Al ₂ O ₃ 6.4%, Fe ₂ O ₃ 3.0% et CaO 35.2%

2.9.8 Contaminants dans les GBR

Les contaminants des GBR peuvent être séparés en deux familles : physiques et chimiques. Les contaminants physiques tels que le verre, les métaux et les plastiques peuvent être retirés avant ou après le processus de fabrication, par l'utilisation d'outils technologiques tels que des machines automatisées [41]. La norme EN 933-11 [65] permet d'évaluer la teneur résiduelle de ces contaminants ce qui permet de définir des classes de composition dans la norme EN 12620+A1 [48].

Les contaminants chimiques, font partie de la structure des granulats SBR, ce sont les chlorure (Cl^- , effet : risque de corrosion du métal du béton armé), le sulfate (SO_4^{2-} , effet : attaque interne au sulfate) et les alcalins solubles (effet, réaction alcali silice des agrégats).

En France, les normes NF EN 206/CN/2014 [58] (en particulier la partie NA 5.1.3), EN 12620+A1 [48] et NF P 18-545/2011 [66], indiquent les contraintes particulières imposées aux GBR. Un seuil maximum de sulfates solubles dans l'eau est ainsi fixé. Une caractérisation des chlorures solubles dans l'acide est également requise mais aucun seuil n'est imposé [67]. À noter que le PN Recybéton recommande de mesurer plutôt les chlorures solubles dans l'eau [66].

2.10 CONCLUSION

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités.

C'est pourquoi il est impératif de réduire la consommation du matériel, et d'utiliser efficacement les ressources naturelles à l'aide de recyclage des déchets qualitatifs à évaluer. Par conséquence le recyclage est extrêmement important en termes de protection, également pour l'utilisation efficace des ressources naturelles.

La construction est l'un des secteurs dans lequel la matière première est le plus consommée. Le domaine de la construction cherche à minimiser les rentrées des procès de fabrication, ainsi que diminuer autant que possible la consommation en matière première, la consommation de l'énergie, les émissions et l'utilisation de l'espace.

De ce fait il est nécessaire de diminuer les déchets provenant des activités de construction et de démolition afin de réduire les problèmes des déchets de façon effective et productive.

Chapitre 3. Caractérisation du sol

étudié

3.1 INTRODUCTION.....	36
3.2 SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	36
3.3 PREPARATION DU SOL	36
3.4 ESSAIS D'IDENTIFICATION PHYSIQUES.....	37
3.5 ESSAIS CHIMIQUES	50
3.6 ESSAIS MECANIQUES.....	52
3.7 CONCLUSION	60

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la caractérisation approfondie de l'argile collectée dans la zone de Dhar Chih, à proximité de l'université Moulay Tahar, dans la wilaya de Saïda. L'objectif est d'analyser les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de l'argile conformément aux normes en vigueur, afin d'évaluer son applicabilité dans divers projets d'ingénierie géotechnique. Après une présentation des méthodes de collecte et de préparation des échantillons, nous détaillons les essais réalisés : granulométrie, sédimentométrie, limites d'Atterberg, dosage au bleu de Méthylène, mesure de la teneur en CaCO_3 , essai Proctor, essais œdométriques et de cisaillement. Chaque essai est choisi pour son rôle clé dans la compréhension du comportement et des caractéristiques du matériau étudié. Les résultats de ces analyses fourniront une base solide pour évaluer les propriétés de cette argile et son éventuelle amélioration.

3.2 SITUATION GEOGRAPHIQUE

Dans notre étude, nous avons sélectionné un matériau provenant de la zone Dhar Chih (figure 3.1), située à proximité de l'université Moulay Tahar dans la wilaya de Saïda.



Figure 3.1 Zone de prélèvement

3.3 PRÉPARATION DU SOL

Après prélèvement du sol on a broyé manuellement de manière à ne pas modifier ces caractéristiques ensuite, on a le tamisé dans une classe granulaire de 5mm.

Après tout ça le matériau a été mis dans l'étuve jusqu'à séchage à la température de 50°C (figure 3.2).

Par la suite ont a réalisé des essais pour identifier notre sol au laboratoire LTPO unité de Saida.



Figure 3.2 Préparation de l'échantillon

3.4 ESSAIS D'IDENTIFICATION PHYSIQUES

3.4.1 Analyse granulométrique

3.4.1.1 Méthode par tamisage à sec après lavage : (NF P 94-056)

A. Généralités

Les granulats utilisés dans le domaine de génie civil sont des matériaux roulés ou concassés d'origine naturelle ou artificielle, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de taille égale mais par un ensemble de grains dont les tailles varient et se répartissent entre deux limites : la plus petite (d) et la plus grandes (D) dimension en mm.

L'analyse granulométrique s'intéresse {la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

B. Objectif

C'est un essai qui a pour objet de déterminer la répartition des grains suivant leur dimension ou grosseur. Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés sous forme d'une courbe dite courbe granulométrique et construite sur un graphique.

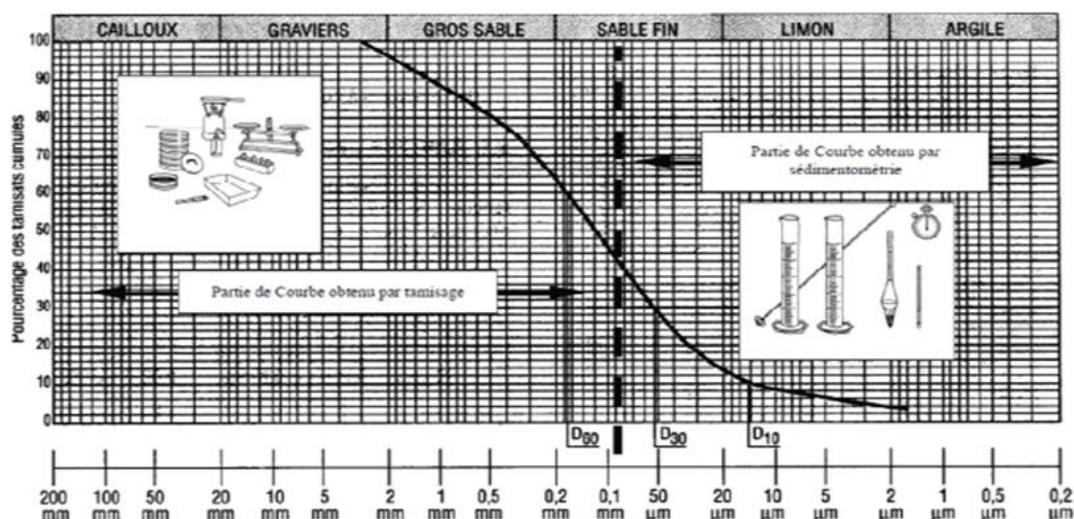


Figure 3.3 La courbe granulométrique

Les dimensions des tamis correspondant à d_{10} , d_{30} et d_{60} sont interpolées graphiquement sur la courbe. A partir de ces résultats on peut calculer le facteur de courbure C_c et le facteur d'uniformité (coefficient de Hazen) C_u .

C. Principe de l'essai

- L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

- Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.
- Les masses des différents refus et tamisats sont rapportés à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

D. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

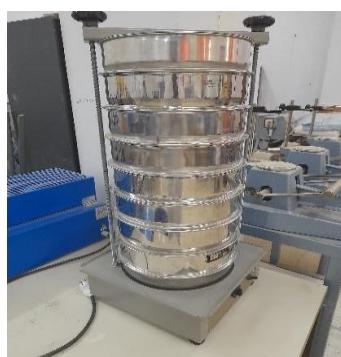
E. Appareillage

La figure 3.4 illustre l'appareillage réservé à l'essai de granulométrie par voie de tamisage.

- Une étuve ;
- Une série de tamis dont le fond est constitué par un grillage de maillage carre s'étalant entre 0.080 et 80 mm ;
- Une balance ;
- Une tamiseuse électrique ;
- Brosseras pour nettoyer les tamis.



a- Etuve



b- Tamiseuse électrique



c- Balance électronique

Figure 3.4 Appareillage – essai granulométrique par tamisage

Le tableau suivant regroupe des résultats de l'analyse granulométrique par tamisage.

Tableau 3.1. Résultats de l'essai de granulométrie par tamisage (*Sol S0*)

Tamis (mm)	Refus (g) Ri	Refus cumulés (g) R+Ri	Refus cumulés (%) (R+Ri/M)*100	Passant (%) 100-[(R+Ri/M)*100]
5	0.00	0.00	0.00	100.00
2	8.50	8.50	1.70	98.30
1	4.25	12.75	2.55	97.45
0,4	6.25	19.00	3.80	96.20
0,2	0.20	19.20	3.84	96.16

0,1	3.65	22.85	4.57	95.43
0,08	0.05	22.90	4.58	95.42

3.4.1.2 Méthode par Sédimentation (NF P 94-057)

F. Généralités

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 80 microns.

Les grains de diamètre différent sédimentent dans un milieu liquide au repos à vitesses différentes. La relation entre diamètre des grains et vitesse de sédimentation est donnée par la loi de stocks.

G. Principe de l'essai

L'échantillon est tamisé par voie humide au tamis de 100µm. L'eau de lavage est recueillie dans un bac puis mise à décanter. L'eau claire est ensuite siphonnée. Le reliquat d'eau est éliminé par étuvage.

Le matériau sec est désagrégé dans un mortier au moyen d'un pilon puis mis en solution avec de l'hexamétaphosphate de sodium pour provoquer la défloculation des agrégats formés par l'étuvage. Le mélange est ensuite agité puis déversé dans une éprouvette de 02 litres. On lit périodiquement les masses volumiques au moyen du densimètre.

H. But de l'essai

La sédimentométrie a pour but l'analyse granulométrique des sols cohérents dont le diamètre des grains est inférieur à 0,100 mm.

I. Appareillage

La figure 3.5 illustre l'appareillage d'essai granulométrie par sédimentométrie.

- Balance ;
- Tamis ;
- Bac ;
- Etuve ;
- Eau distillée ou déminéralisée et défloculant ;
- Agitateur mécanique ;
- Eprouvette de 2000 ml ;
- Agitateur manuel ;
- Chronomètre.



Figure 3.5 Appareillage – essai granulométrique par sédimentation

Le tableau 3.2 regroupe les résultats d'essais de séimentométrie.

Tableau 3.2. Résultats de l'essai de séimentométrie (Sol S0)

t (mn)	R	T (°)	CM, CD, CT	R1	D (μm)	Passants (%)
15 (s)	25.00	18	0.4	25.40	0.100	95.42
30 (s)	24.50	18	0.4	24.90	0.075	93.51
1	24.50	18	0.4	24.90	0.055	93.51
2	24.00	18	0.4	24.40	0.038	91.60
5	22.00	18	0.4	22.40	0.025	83.97
10	21.50	18	0.4	21.90	0.017	82.06
20	21.00	18	0.4	21.40	0.012	80.15
40	18.00	18	0.4	18.40	0.008	68.70
80	16.50	18	0.4	16.90	0.006	62.98
160	14.50	20	0.0	14.50	0.004	55.34
320	12.00	20	0.0	12.00	0.003	45.80
1440	8.50	20	0.0	8.50	0.002	32.44

La

Figure (3.6) montre la Courbe granulométrique du sol étudié.

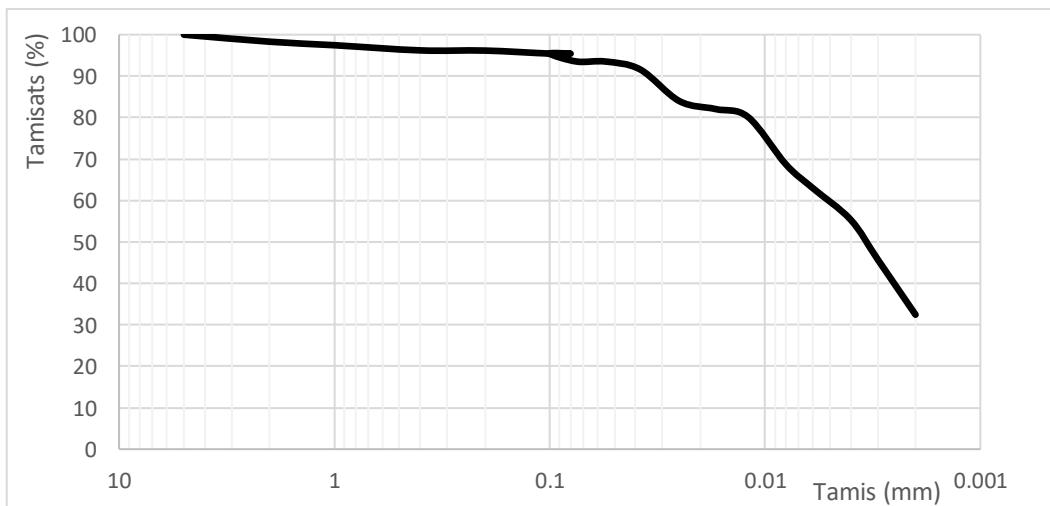


Figure 3.6 Courbe granulométrique du sol étudié

Le sol présente 95,42% d'éléments inférieurs à 80µm, ce qui, selon la classification LCPC, le met dans la catégorie des sols argileux. La désignation du type nécessite la détermination des limites d'Atterberg.

Selon le triangle américain (figure 3.7) le sol correspond à un limon Argileux fin.

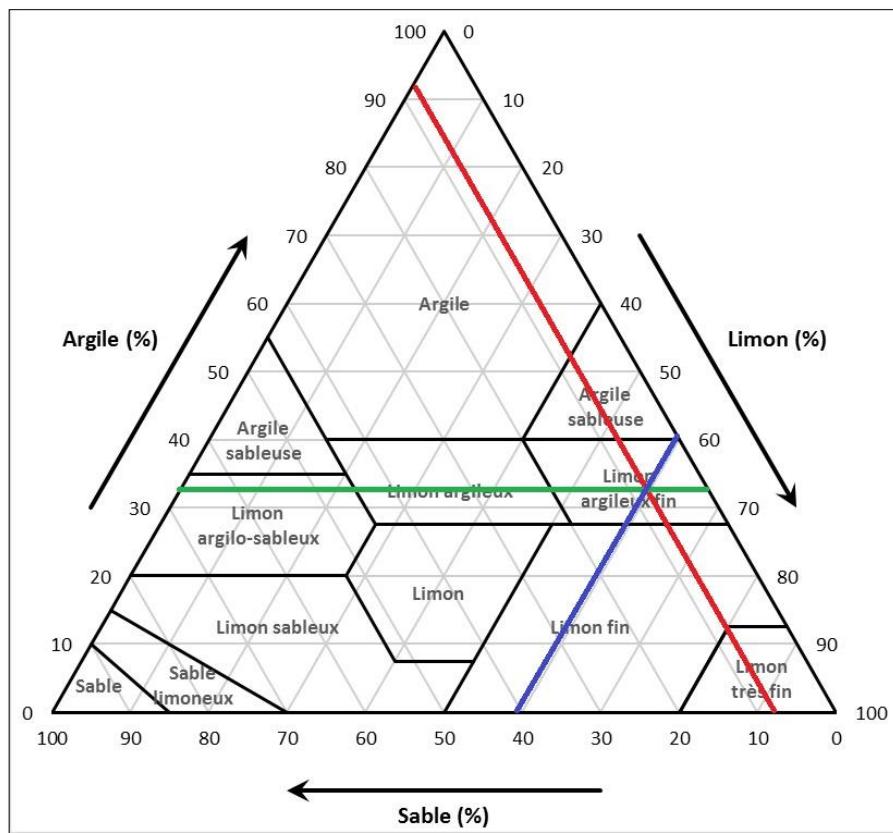


Figure 3.7 Classification Américaine

3.4.2 Les limites d'Atterberg : (NF P 94-051)

3.4.2.1 Généralités

Atterberg, ingénieur agronome suédois, a défini en 1911, des teneurs en eau limites qui séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneurs en eau particulière sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg, et Casagrande a repris plus tard ce lesquelles la transition s'effectue.

3.4.2.2 Principe de l'essai

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol.

La consistance d'un sol fin varie avec sa teneur en eau, la limite de liquidité W_L (teneur en eau pondérale) sépare l'état liquide de l'état plastique, la limite de plasticité W_P (teneur en eau pondérale) sépare l'état plastique de l'état solide. La limite de retrait W_s ou (W_r) est la teneur en eau pondérale au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon ne varier plus.

3.4.2.3 But de l'essai

Déterminer la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_P qui sont des teneuses en eau pondérales, caractéristiques du sol. Ces résultats permettent de prévoir le comportement des sols sous l'action des variations de teneur en eau.

3.4.2.4 Appareillage

J. Pour la préparation du sol

- Tamis de 400 μm ;
- Récipient ;
- Etuve.

K. Pour la détermination de la limite de liquidité W_L

La figure 3.8 illustre l'appareillage de détermination de la limite de liquidité W_L .

- Appareil de Casa grande, ou appareil de la limite de liquidité avec une coupelle lisse ;
- Outil à rainure ;
- Balance ;
- Truelle ;
- Spatule ;
- Pipette ;
- Des tares.



Figure 3.8 Appareillage – Pour la détermination de la limite de liquidité W_L

L. Pour la détermination de la limite de plasticité W_p

La figure 3.9 présente le dispositif permettant la détermination de la limite de plasticité W_p .

- Une plaque de verre et sa cale pour l'évaluation du diamètre du rouleau de sol ;
- Balance ;
- Deux tares.



Figure 3.9 Appareillage – Pour la détermination de la limite de plasticité W_p

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus pour la détermination de la limite de liquidité.

Tableau 3.3. Limite de liquidité W_L (Sol S0)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Nombre de coups	15	20	25	30	35
Nº Tare	23	37	16	92	66
Poids sol humide + tare (g)	12.70	12.80	12.00	11.30	11.90
Poids sol sec + tare (g)	9.47	9.66	9.09	8.72	9.21
Poids de tare (g)	4.10	4.19	3.88	3.79	3.95
Poids de l'eau	3.23	3.14	2.91	2.58	2.69
Poids sol sec (g)	5.37	5.47	5.21	4.93	5.26
Teneur en eau (%)	60.15	57.40	55.85	52.33	51.14

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus pour la détermination de la limite de plasticité.

Tableau 3.4. Limite de plasticité W_p (Sol SO).

	Essai 1	Essai 2
N° de la tare	12	53
Poids total humide (g)	9.80	9.30
Poids total sec (g)	8.53	8.07
Poids de la tare (g)	4.63	4.11
Poids de l'eau	1.27	1.23
Poids du sol sec (g)	3.90	3.96
Teneur en eau (%)	32.56	31.06

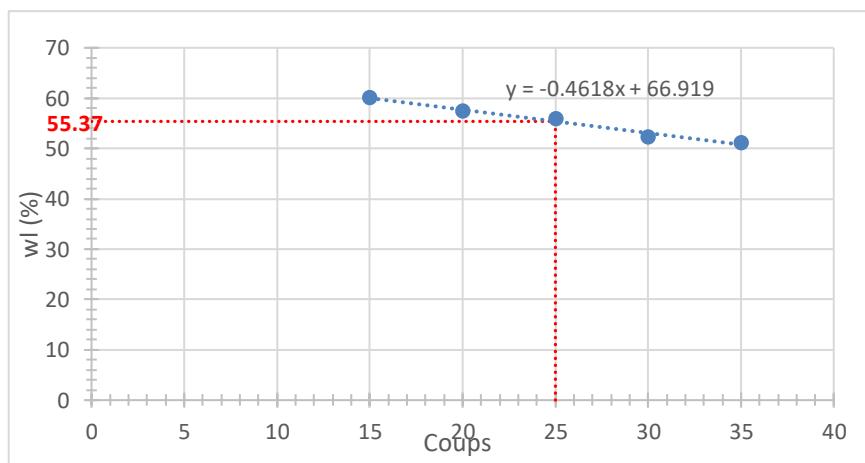


Figure 3.10 Courbe de la limite de liquidité

Selon l'abaque de Casagrande (figure 3.11) le sol étudié est un limon très plastique.

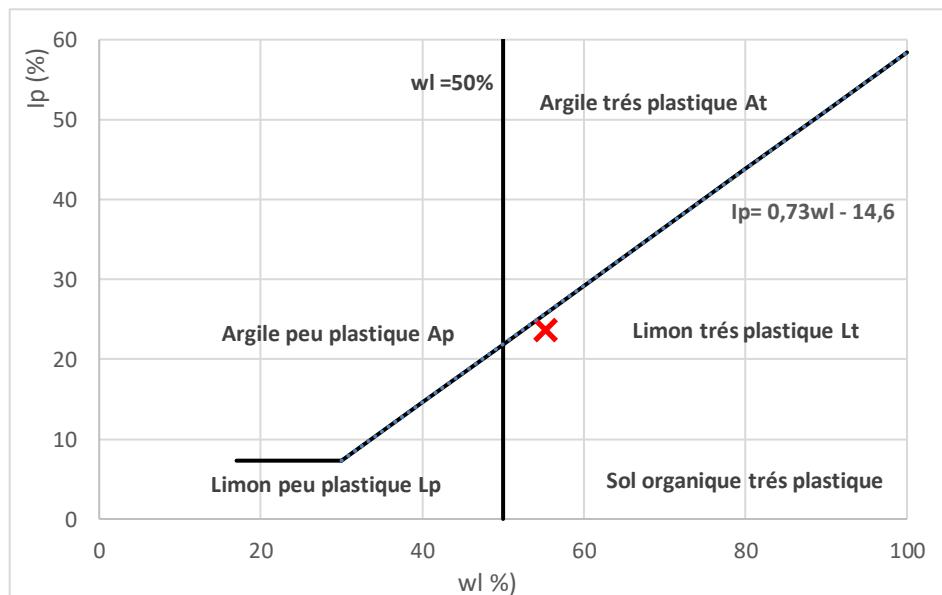


Figure 3.11 Abaque de Casagrande

SKEMPTON a défini un paramètre qui s'appelle l'activité A_c , c'est un rapport de l'indice de plasticité I_p du matériau à sa teneur en particules argileuses C_2 (teneur en particules de dimensions inférieures à $2\mu\text{m}$), la seule interagissant avec l'eau. Cette définition de l'indice de plasticité montre également que I_p est un paramètre important dans les propriétés de rétention d'eau du sol, et donc de gonflement. Le tableau 3.5 regroupe les différentes valeurs des limites du sol ainsi que l'activité correspondante.

Tableau 3.5. *Activité du sol étudié.*

Paramètres	$w_l(\%)$	$I_p (\%)$	$C_2 (\%)$	A_c
Sol étudié	55,37	23,56	32,44	0,73

SKEMPTON suggère une classification des argiles selon leur activité, comme le montre les tableaux 3.6 et 3.7. On peut déduire que l'argile étudiée représente un sol inactif avec présence de Kaolinite et probablement un peu d'Illite.

Tableau 3.6. *Classification des sols selon leur activité A_c selon Skempton, 1953*

Activité A_c	Type sol
0,50 – 0,75	Sol inactif
0,75 – 1,25	Sol normal
1,25 – 2,00	Sol actif
> 2	Sol très actif

Tableau 3.7. *Activité des principales familles d'argile selon Skempton, 1953.*

Minéral argileux	Indice activité argiles A_c
Kaolinite	0,33 à 0,46
Illite	0,90
Montmorillonite Ca ²⁺	1,50
Montmorillonite Na ²⁺	7,20

Plusieurs auteurs offrent une estimation approximative du potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité I_p :

- Seed et Al, 1962 : par projection sur le (tableau 3.8) on peut déduire que le sol présente un potentiel de gonflement moyen à élevé ;
- Building Research Establishment (B.R.E, 1980) (tableau 3.9) : l'argile présente un potentiel de gonflement élevé ;

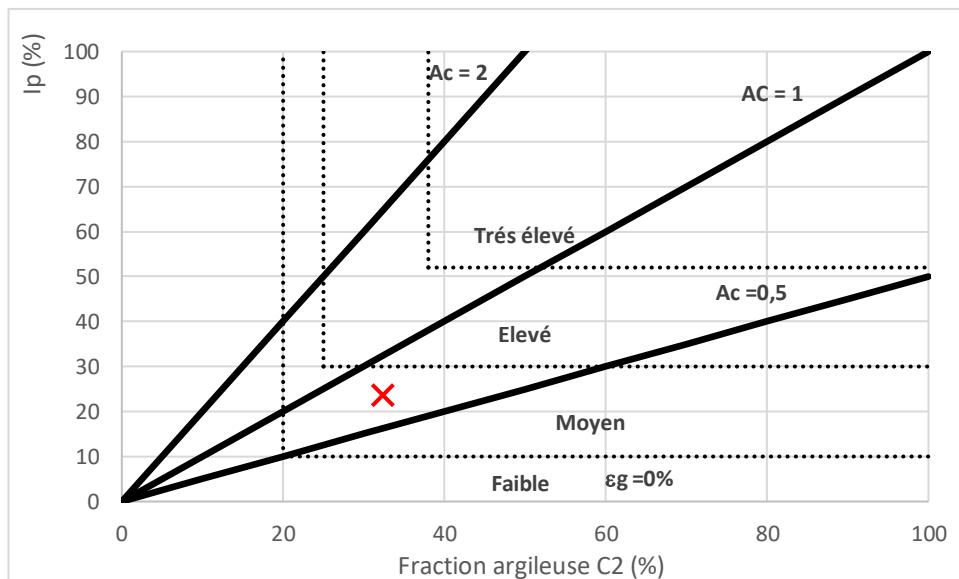
- Williams et Donaldson (1980) : permettent d'apprécier le potentiel de gonflement à partir de la teneur en particules argileuses C_2 , l'indice de plasticité I_p et l'activité de l'argile A_c . La figure 3.12 montre que l'argile a un potentiel de gonflement moyen à élevé ;
- Prian et al (2000) : ont raffiné la relation estimant le potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité I_p . Le tableau 3.10 montre que l'argile développe un potentiel de gonflement moyen ;

Tableau 3.8. Relation entre gonflement et I_p (Seed, et al, 1962).

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

Tableau 3.9. Potentiel de gonflement d'après le B.R.E, 1980.

I_p (%)	ϵ_g (%)	Potentiel de gonflement
0 - 10	0 - 1,5	Faible
10 - 20	1,5 - 5	Moyen
20 - 35	5 - 25	Elevé
> 35	> 25	Très élevé



*Figure 3.12 Abaque potentiel de gonflement d'après Donaldson et Williams, 1980*Tableau 3.10. *Sensibilité d'une argile selon Prian et al., 2000.*

Ip (%)	Potentiel de gonflement
< 12	Faible
12 – 25	Moyen
25 – 40	Elevé
> 40	Très élevé

3.4.3 Essai au Bleu Méthylène (NF P 94-068)

M. Généralités

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu » (figure 3.13), est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet absorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

N. Principe de l'essai

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2 mm des sables courants ou sur les fillers (0 / 0,125 mm) contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou un tout venant. Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

On appelle valeur de bleu sols VBS la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50 mm d'un sol. Pour cet essai on travaille sur la fraction 0/5 du matériau.

Une solution de bleu de méthylène est ajoutée progressivement par doses successives à une suspension de l'échantillon de granulats dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par l'échantillon est vérifiée après chaque ajout de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.



Figure 3.13 Essai bleu de méthylène à la tache

O. Appareillage

L'appareillage à utiliser est le suivant : une burette, du papier-filtre, une injection, une tige de verre, un agitateur à ailettes, capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre 700 tr/min, une balance, un chronomètre, un tamis, avec des ouvertures de 2 mm, un bécher d'une capacité d'environ 1 l à 2 l, une fiole d'une capacité de 1 l, une étuve et une spatule.

Selon les résultats obtenus le VBS du sol est de 3,17 ce qui d'après le tableau 3.11 correspond à un sol argileux.

Tableau 3.11. Classification selon VBS (GTR).

Valeur de bleu de méthylène (V _{BS})	Catégorie de sol
V _{BS} ≤ 0,1	Sol insensible à l'eau
0,1 ≤ V _{BS} ≤ 0,2	Apparition de la sensibilité
0,2 ≤ V _{BS} ≤ 1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux
1,5 ≤ V _{BS} ≤ 2,5	Sol limoneux de plasticité moyenne.
2,5 ≤ V _{BS} ≤ 6	Sol argileux.
V _{BS} > 8	Sol très argileux.

3.4.3.1 Surface spécifique Totale

La surface spécifique totale est la surface des grains solides sur laquelle le bleu de méthylène se fixe est donnée par :

$$S.S.T. = (VBS / 100) * (N / 373) * 130 \cdot 10^{-20} \Rightarrow S.S.T. = 66,5 \text{ VBS (m}^2/\text{g)} \quad (4.2)$$

3.4.3.2 Estimation de la sensibilité de l'argile selon la valeur du bleu

CHASSAGNEUX et AL. (1996) ont établi des seuils de sensibilité des sols argileux à partir de la valeur VBS (tableau 3.12). Dans notre cas le sol est de sensibilité moyenne.

Tableau 3.12. Sensibilité d'une argile à l'eau (Chassagneux et al, 1996)

Valeur de bleu VBS	Sensibilité
< 2,5	Faible
2,5 – 6	Moyen
6 – 8	Forte
> 8	Très forte

Magnan et Youssefian (1989) suggèrent d'intégrer la valeur de bleu dans la classification des sols fins à l'aide d'un diagramme (figure 3.14) faisant intervenir la teneur en fraction argileuse C_2 . Ainsi on peut qualifier le degré d'argilosité du sol et de sensibilité à l'eau. Dans notre cas le sol se présente comme limon moyennement actif.

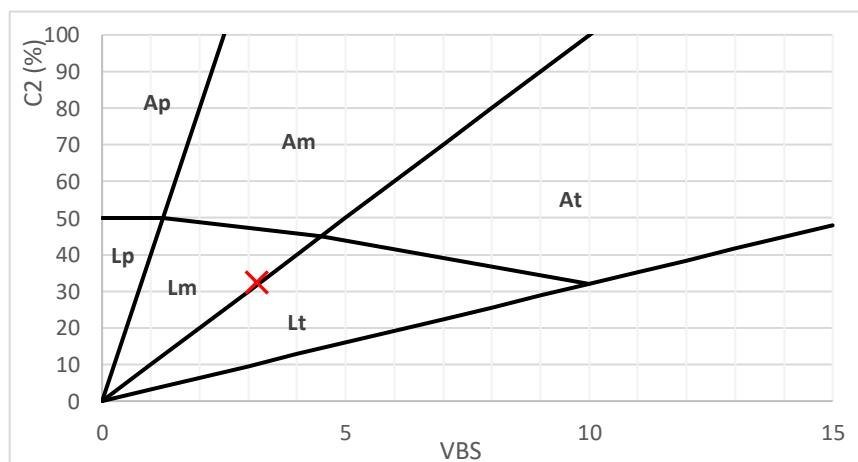


Figure 3.14 Diagramme de la sensibilité à l'eau donné par Magnan et Youssefian (1989)

Selon la surface spécifique de notre sol et selon le tableau 3.13 donnant les valeurs typiques de la surface spécifique des différents minéraux, on peut déduire que sol contient de la Kaolinite et probablement une petite fraction d'Illite.

Tableau 3.13. Surface spécifique des principaux minéraux argileux.

Famille d'argile	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Surface spécifique ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	15	80	800

3.4.3.3 Classification GTR

En procédant à la classification GTR (figure 3.15), le sol étudié est défini comme étant de type A2 qui correspond à un limon plastique.

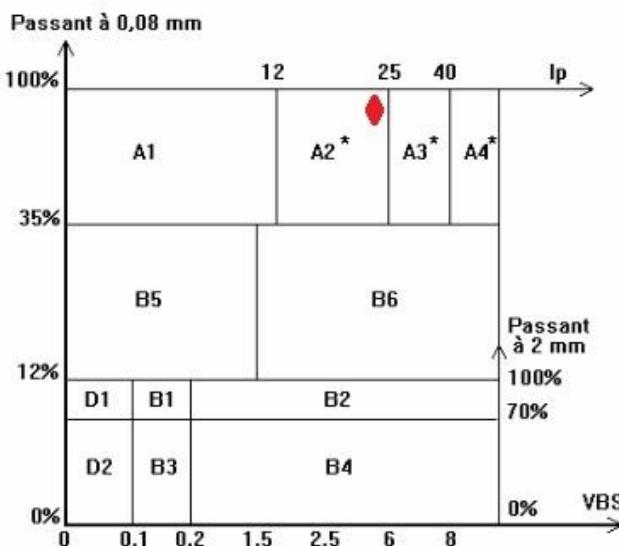


Figure 3.15 Classification des sols selon le GTR

3.5 ESSAIS CHIMIQUES

3.5.1 Teneur en carbonate de calcium : (NF P 94-048)

3.5.1.1 Généralités

Cette analyse a été réalisé au calcimètre Dietrich-Fruhling suivant les principes de la norme NF P 94-048. La détermination se fait par dissolution du carbonate de calcium (C_aCO_3) contenu dans le sol avec l'acide chlorhydrique. L'acide étant en excès dans la réaction, le volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé est proportionnel à la quantité de C_aCO_3 contenu dans l'échantillon.



3.5.1.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphériques connues) par un échantillon préparé pour l'essai (figure 3.16). Cela permet de déterminer la teneur en carbonates du matériau testé.



Figure 3.16 Essai au carbonate de calcium

3.5.1.3 Appareillage

P. Matériel et produits

- Etuve ;
- Un tamis à maille carrée d'ouverture de maille inférieure ou égale à $400 \mu\text{m}$;
- Balance ;
- Un flacon de réaction ou ampoule de 10 ml ouvert ;
- Eau distillée ou déminéralisée, à la température du local d'essai ;
- Acide chlorhydrique concentré de densité 1,19 (qualité analytique reconnue) ;
- Poudre de carbonate de calcium pur pour analyse (si nécessaire).

Q. Calcimètre

La figure 3.17 illustre le calcimètre servant d'essai de détermination de teneur en CaCO_3 .

- Flacon avec ampoule de niveau
- Burette graduée
- Robinet
- Bac d'eau de refroidissement à température ambiante
- Flacon à réaction
- Tube à essai
- Matériau soumis à essai
- Système réfrigérant
- Tubulure souple reliant à
- Liquide (avec colorant éventuel)
- Gaz dégagé par la réaction

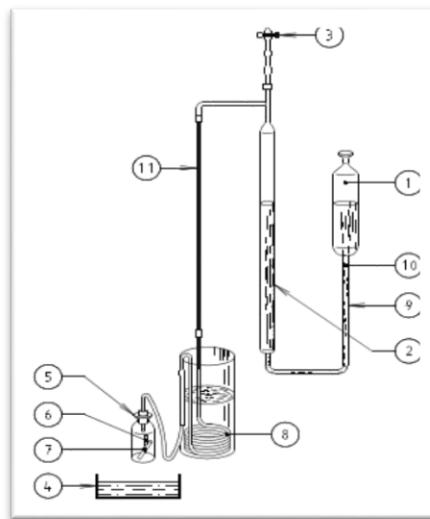


Figure 3.17 Schéma d'un calcimètre — Exemple

Tableau 3.14. Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate.

Teneur en carbonate (%)	Classification	Exemple
<10	Non calcaire	Argile, sable siliceux
10 à 29	Peu calcaire	Marne
30 à 69	Moyennement calcaire	Marne...
70 à 89	Fortement calcaire	Calcaire marneux...
≥ 90	Calcaire	Calcaire

Les résultats montrent un taux de carbonate de calcium de 18% ce qui correspond à un sol peu calcaire (tableau 3.14).

3.6 ESSAIS MECANIQUES

3.6.1 Essai Proctor normal (NF P 94-093) [68]

3.6.1.1 Généralités

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés).

Le protocole de l'essai Proctor suit la norme NF P 94-093 (détermination des références de compactage d'un matériau). Les valeurs obtenues par l'essai sont notées pour la teneur en eau optimale, et pour la masse volumique sèche optimale. Une autre référence peut être déterminée pour une énergie supérieure (notamment pour des couches de chaussées granulaires), il s'agit de l'optimum Proctor modifié (OPM).

3.6.1.2 But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

3.6.1.3 Principe de l'essai

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la densité sèche maximum Proctor ».

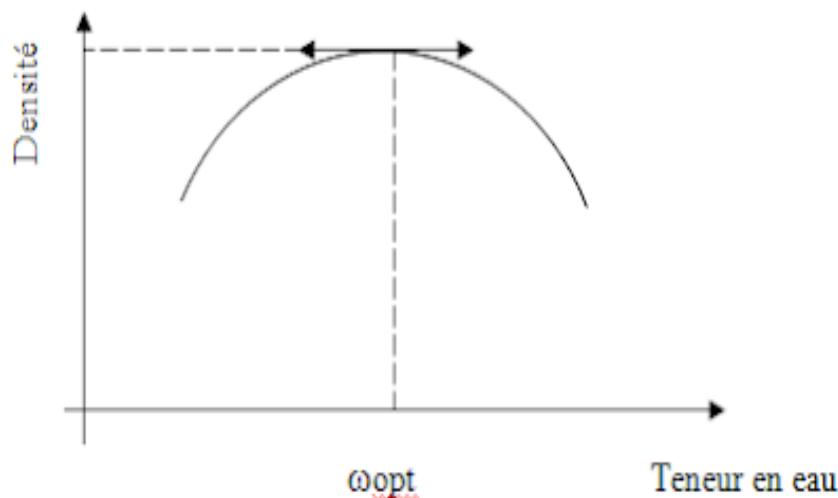


Figure 3.18 Diagramme Proctor simple

Tableau 3.15. Densité sèche et la teneur en eau Proctor normal du sol étudié

Poids sol humide + moule (g)	14338.674	14525.388	14556.056
Poids du moule (g)	9660	9660	9660
Poids du sol humide (g)	4678.674	4865.388	4896.056
Densité sèche γ_d (t/m ³)	1.82	1.86	1.84
Teneur en eau (%)	14	16	18

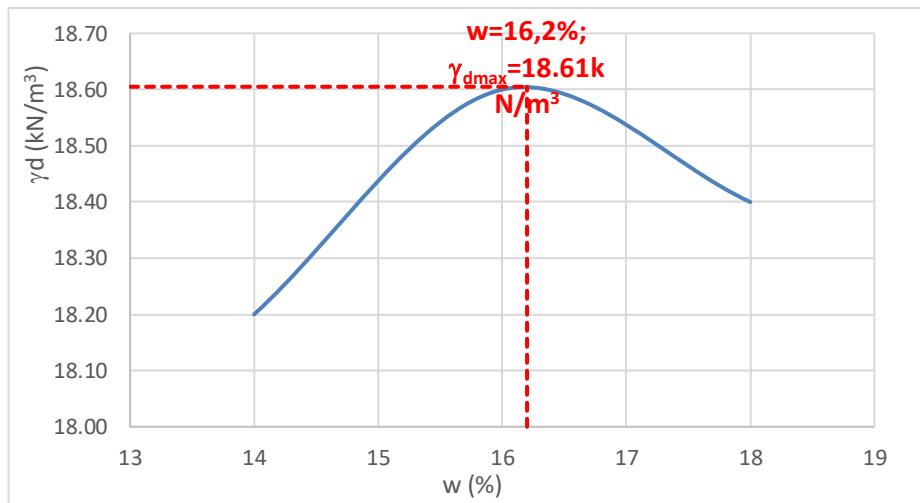


Figure 3.19 Courbe Proctor normal du sol étudié

La figure 3.19 représente la courbe Proctor en cloche. La teneur en eau optimale est de 16,2% et la densité sèche maximale est de 18,61kN/m³.

3.6.2 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (NF P 94-071-1)

3.6.2.1 Généralités

L'essai de cisaillement direct a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante. En vitesse lente et conditions drainées peuvent être déduites les valeurs de l'angle de frottement effectif ϕ' et la cohésion effective c' , qui sont utilisés pour les calculs de vérification des coefficients de sécurité à la rupture de talus, le dimensionnement de fondations et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement.

3.6.2.2 Principe de l'essai

Dans l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande illustré dans la figure 3.20, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé.

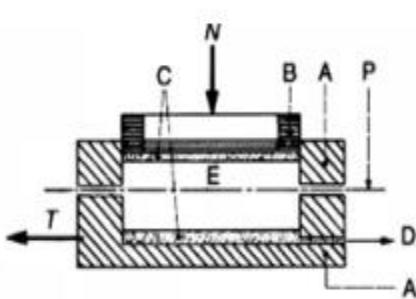
L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre. On applique à l'échantillon un effort normal de compression N , verticalement, par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant T , horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure. Un comparateur mesure la variation de hauteur de l'échantillon.

Figure 3.20 Appareil de cisaillement

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai ;
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif Δl à vitesse constante ;



- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.



- A-** Bati fixe
B- Piston
C- Pierres poreuses
D- Drainage
P- Plan de cisaillement
T- Force tangentielle

- A'-** bâti mobile
C- Pierres poreuses
E- Eprouvette
N- Force normal

3.6.2.3 But de l'essai

Le but de l'essai est d'évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol, c'est-à-dire la cohésion C , l'angle de frottement Φ' et la résistance au cisaillement τ_{\max} au moment de rupture.

Les résultats sont représentés sur les figures (3.21) et (3.22).

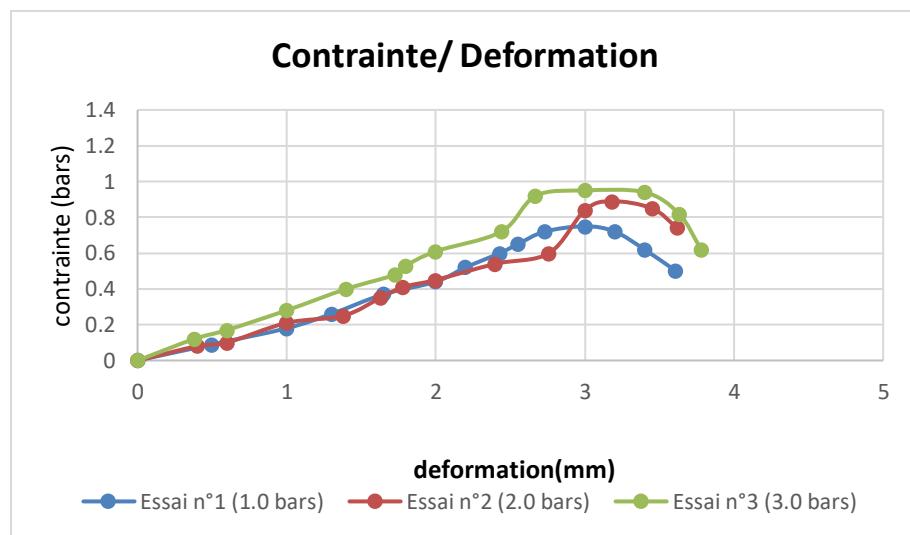


Figure 3.21 Variation des contraintes tangentielles en fonction des déformations

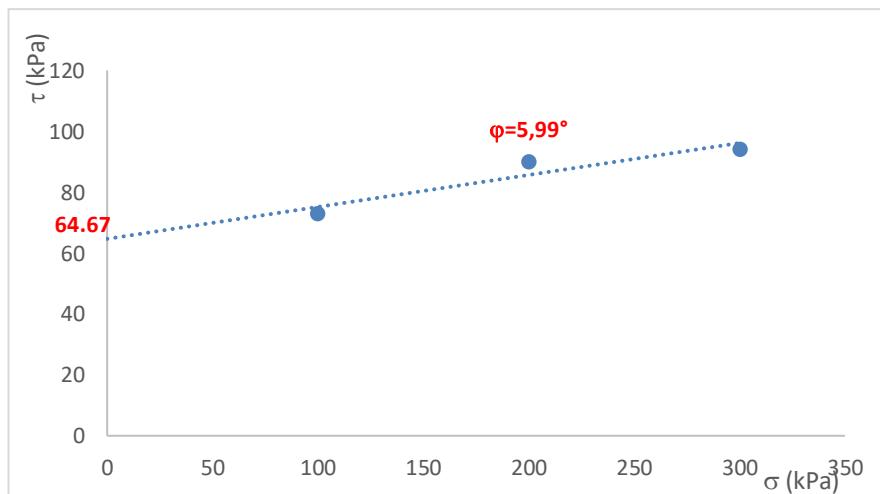


Figure 3.22 Courbe intrinsèque du sol

La figure 3.21 montre l'évolution des contraintes tangentielles en fonction des déformations pour chaque palier de contrainte normale. Les contraintes tangentielles augmentent en fonction des déformations jusqu'à atteindre une valeur stable. Ce comportement est typique des argiles remaniées. La figure 3.22 représente la courbe intrinsèque du sol étudié. La variation suit une droite linéaire passant par l'axe des ordonnées donnant ainsi la cohésion du sol. L'inclinaison de cette droite nous fournit l'angle de frottement du sol. L'angle de frottement du sol étudié est de 5,99 degrés et la cohésion de 64,67 kPa.

3.6.3 Essai de compressibilité à l'œdomètre (XP P 94-090-1)

3.6.3.1 Généralités

L'essai de compressibilité est un essai fondamental pour les sols fins à caractère gonflants afin de déterminer les paramètres de compressibilités.

L'essai s'effectue sur un échantillon de sol intacte ou reconstituée placée dans une enceinte cylindrique rigide de dimension ($d=50\text{mm}$ et $h=20\text{mm}$). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial verticale en assurent que l'éprouvette est maintenue saturée pendant l'essai (NF P 94-090-1) : Procédure sur sols gonflants.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissant et décroissants suivant un programme défini. Les variations de la hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

En fin, on représente l'évolution de l'indice des vides en fonction de la contrainte effective isotrope (échelle semi-logarithmique en $\sigma'v$).

3.6.3.2 Principe de l'essai

L'essai œdométrique consiste à soumettre l'échantillon à une série de pressions verticales et de suivre l'évolution des déformations verticales du matériau dans le temps, sous une surcharge donnée, à l'aide des comparateurs.

Les principaux paramètres pouvant être déduits de l'essai œdométrique réalisé sur des échantillons non remaniés sont :

- Les paramètres de compressibilité ;
- Le coefficient de consolidation ;
- La contrainte apparente de préconsolidation ou la résistance du matériau ;
- Le coefficient de consolidation secondaire ;
- Les paramètres de gonflement.

Et les principes de l'essai œdométrique à chargement par paliers sont les suivants :

- Le chemin de contraintes correspond à une déformation unidimensionnelle ;
- Le drainage est axial et unidimensionnel.

Les chemins de contraintes et les conditions de drainage sous des fondations sont généralement tridimensionnels et des différences peuvent apparaître au niveau des valeurs calculées pour le tassement ou pour sa vitesse.

Un tel type d'essai représente le tassement d'une couche de faible hauteur soumise à une surcharge de grande surface.

Dans le cas où la surcharge est ponctuelle, cet essai devient irréaliste, du fait que dans ce cas les déformations latérales du sol sont non négligeables.

Une méthode a été proposée par Skempton et Bjerrum pour le calcul du tassement à partir de l'essai œdométrique en tenant compte des déformations latérales dans ce cas.

L'analyse d'un essai de consolidation repose généralement sur l'hypothèse que le sol est saturé.

Dans le cas de sols non saturés, certains paramètres déduits de l'essai peuvent ne pas avoir de signification physique.



Figure 3.23 Appareil œdométrique

3.6.3.3 Appareillage

L'appareil décrit en figure 3.23 comporte essentiellement :

- Moule œdométrique ayant une paroi lisse indéformable.
- Bâti de chargement. Il comprend essentiellement un levier qui transmet les surcharges au piston.
- Disques de poids connus pour charger l'échantillon.
- Comparateur mécanique pour la mesure des tassements
- Deux pierres poreuses avec le papier filtre. Ce dernier sert à protéger les pierres du colmatage dû aux grains fins.
- Chronomètre donnant la seconde.

3.6.3.4 Paramètres de compressibilité

La contrainte effective de pré consolidation « σ'_{pc} » correspond à la contrainte effective verticale maximale supportée par l'échantillon au cours de son histoire. A partir de la courbe de compressibilité (e- log σ') on est en mesure de déterminer :

Le coefficient de compressibilité « Cc » représente la pente de la droite (e- log σ'_v) pour le cas du chargement, il est donc défini par :

$$Cc = - \Delta e / \Delta (\log \sigma'_v)$$

Le classement des sols selon leurs indices de compressibilités et l'indice des vides, est donné par Philipponnat et Hubert (1997).

Tableau 3.16. *Le classement des sols selon leurs indices de compressibilités et l'indice des vides.*

Paramètre	Classement
$C_c / (1+e_0) < 0,015$	Sol incompressible
$0,015 < C_c / (1+e_0) < 0,05$	Sol peu compressible
$0,05 < C_c / (1+e_0) < 0,2$	Sol moyennement compressible
$C_c / (1+e_0) > 0,2$	Sol très compressible

L'indice de recompression C_s pour déterminer σ_p et le coefficient de gonflement « C_g » qui représente la pente de la droite ($e - \log \sigma_v'$) pour le cas du déchargement; il est donc défini par :

$$C_g = \Delta e / \Delta (\log \sigma_v')$$

Le classement des sols selon leurs indices de gonflement, est donné par Philipponnat 1991.

Tableau 3.17. *Le classement des sols selon leurs indices de gonflement*

Paramètre	Classement
$C_g < 4\%$	Sol peu gonflant
$C_g \geq 4\%$	Sol gonflant

Les résultats de l'essai œdométrique réalisé sur le sol sont regroupés dans le tableau 3.18. La courbe œdométrique est représentée sur la figure 3.24. L'indice des vides diminue en fonction des contraintes appliquées. Deux pentes sont distinctes, la première représente l'indice de recompression C_s et la seconde l'indice de compression C_c . L'intersection des deux droites de pentes C_s et C_c nous fournit la contrainte de consolidation. Cette dernière est légèrement plus élevée que la contrainte en place (30kPa) ce qui nous permet de dire que l'argile étudiée est surconsolidée. Le coefficient C_c est de 0,123 ce qui traduit une compressibilité moyenne. Etant donné que le coefficient de compressibilité est de 0,123 et e_0 est de 0,63 donc le rapport $C_c/(1+e_0)$ est de 0,07, le coefficient de gonflement de 3% et selon le tableau 3.16 et 3.17 notre sol est moyennement compressible peu gonflant.

Tableau 3.18. *Paramètres de compressibilité du sol étudié*

Paramètre	C_c	C_s	C_g (%)	σ_p (kPa)	m_v (m^2/MN)	E (MPa)
Limons argileux	0,123	0,014	3	146	0,098	10,25

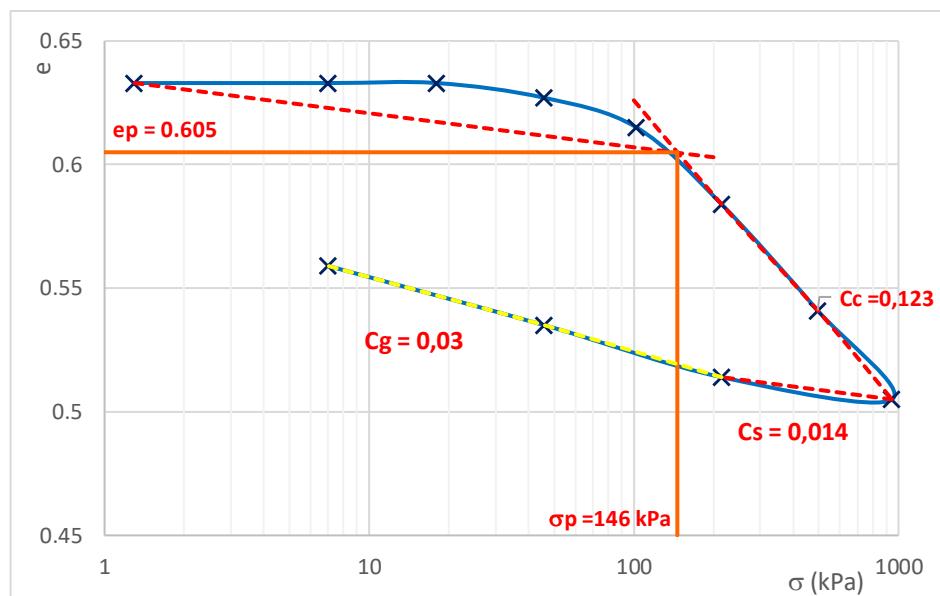


Figure 3.24 Courbe adométrique du sol étudié

3.7 CONCLUSION

En conclusion, l'étude détaillée de l'argile prélevée dans la zone Dhar Chih a permis de mettre en évidence ses caractéristiques physiques et chimiques distinctives. Les analyses ont révélé que ce sol, majoritairement composé d'éléments fins (95,42% inférieurs à 80 μm), appartient à la catégorie des sols argileux selon la classification LCPC, et est défini comme un limon argileux fin selon le triangle américain. Les divers essais réalisés, incluant ceux d'Atterberg et de Proctor, ont aidé à classer précisément ce sol et à évaluer son comportement sous différentes conditions.

Les indices de plasticité et les essais au bleu de Méthylène indiquent un potentiel de gonflement variant de moyen à élevé, ce qui nécessite une attention particulière dans les applications de génie civil pour prévenir les problèmes structurels dus à l'expansion de l'argile. La présence notable de Kaolinite et d'une quantité moindre d'Illite a été confirmée, influençant les propriétés de rétraction et de gonflement du sol.

Sur le plan mécanique, l'argile démontre une cohésion significative et un angle de frottement restreint, suggérant une prédominance de comportements plastiques et compressibles. Ces caractéristiques, combinées à une sensibilité moyenne à l'eau et une faible teneur en carbonates, confirment la nécessité d'adopter des stratégies de gestion et de stabilisation adaptées pour l'utilisation de ce matériau dans des projets de construction.

Cette étude contribue ainsi à une meilleure compréhension des propriétés géotechniques de l'argile de Dhar Chih, offrant une base solide pour de futurs travaux de recherche et d'application pratique dans le domaine de la géotechnique. Les résultats obtenus serviront également à affiner les modèles de prédiction du comportement des sols argileux, essentiels pour la planification et la réalisation de constructions durables dans des régions similaires.

Chapitre 4. Amélioration du sol

4.1 INTRODUCTION	62
4.2 LE BETON RECYCLEE.....	62
4.3 CONSTITUTION DES SOLS D'ESSAIS	63
4.4 EVOLUTION DE LA GRANULOMETRIE EN FONCTION DES AJOUTS.....	63
4.5 EVOLUTION DES LIMITES D'ATTERBERG EN FONCTION DES AJOUTS.....	65
4.6 EVOLUTION DU BLEU DE METHYLENE EN FONCTION DES AJOUTS.....	69
4.7 EVOLUTION DE LA TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM EN FONCTION DES AJOUTS	71
4.8 EVOLUTION DES PARAMETRES DE COMPRESSIBILITE EN FONCTION DES AJOUTS.....	72
4.9 EVOLUTION DE LA RESISTANCE DE CISAILLEMENT EN FONCTION DES AJOUTS	76
4.10 CONCLUSION.....	78

4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre explore les possibilités d'amélioration des propriétés géotechniques de l'argile de Dhar Chih par l'incorporation d'agrégats de béton recyclés. Face aux défis posés par le gonflement et la compressibilité de cette argile, des techniques de renforcement du sol sont nécessaires pour améliorer sa stabilité et sa capacité portante. L'ajout d'agrégats de béton recyclés, issus de débris de construction, présente une opportunité d'augmenter la durabilité et la résistance mécanique du sol tout en contribuant à une gestion efficace des déchets de construction.

Dans ce contexte, notre étude se concentre sur l'évaluation de l'impact de différents pourcentages d'agrégats de béton recyclés (5%, 10% et 20%) sur les caractéristiques physiques et mécaniques de l'argile. Les agrégats sont intégrés dans des échantillons de sol, et une série d'essais normalisés est menée pour analyser les changements dans le comportement du sol, notamment en termes de densité, de compressibilité, de résistance au cisaillement et de potentiel de gonflement.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer si l'ajout d'agrégats de béton recyclés peut effectivement réduire les problèmes liés au sol argileux et de quelle manière ces modifications influencent les applications pratiques en génie civil. Cette recherche contribue non seulement à l'amélioration de la gestion des sols argileux mais offre également une perspective sur l'utilisation durable des matériaux recyclés dans les projets de construction et de réhabilitation des terrains.

4.2 LE BETON RECYCLEE

Pour les expériences réalisées en laboratoire, nous avons utilisé des agrégats de béton recyclé provenant de déchets collectés suite à la démolition d'éléments porteurs sur un chantier (figure 4.1). Ces déchets ont été soigneusement broyés pour atteindre une granulométrie comprise entre 0,2 mm et 2 mm. Après le broyage, le matériau a été tamisé à travers un tamis de 2 mm pour garantir une uniformité de taille des particules. Ce processus permet de préparer les agrégats de béton recyclé de manière à répondre aux spécifications requises pour notre étude sur l'amélioration des propriétés de l'argile.



Figure 4.1. Déchets de béton recyclé

4.3 CONSTITUTION DES SOLS D'ESSAIS

Le sol est formé à partir d'un traitement de deux matériaux. D'abord, il est prélevé de la zone de DHAR CHEIH puis mélangé avec du béton recyclé suivant des proportions en poids indiquées sur le tableau suivant (tableau 4.1) :

Tableau 4.1. *Constitution des échantillons des sols expérimentés*

Traitement	Sol (%)	Béton recyclé (%)
Sol S0	100	0
Sol S1	95	5
Sol S2	90	10
Sol S3	80	20

4.4 EVOLUTION DE LA GRANULOMETRIE EN FONCTION DES AJOUTS

L'ensemble des essais sont réalisés selon la norme NF P 94-056 et NF P 94-057 sur les différents échantillons étudiés :

Tableau 4.2. *Résultats obtenus de l'analyse granulométrique des traitements des sols d'essais.*

Analyse granulométrique NF P 94-056							
Sol S0		Sol S1		Sol S2		Sol S3	
tamis (mm)	tamisat (%)	tamis (mm)	tamisat (%)	tamis (mm)	tamisat (%)	tamis (mm)	tamisat (%)
5.000	100.000	5.000	97.770	5.000	98.360	5.000	98.030
2.000	98.300	2.000	93.760	2.000	93.140	2.000	90.620
1.000	97.450	1.000	87.440	1.000	86.320	1.000	85.510
0.400	96.200	0.400	81.140	0.400	83.030	0.400	80.070
0.200	96.160	0.200	77.530	0.200	78.070	0.200	77.000
0.100	95.430	0.100	74.960	0.100	75.360	0.100	74.550

Analyse par sédimentométrie NF P 94-057							
Sol S0		Sol S1		Sol S2		Sol S3	
diamètre (µm)	tamisat (%)	diamètre (µm)	tamisat (%)	diamètre (µm)	tamisat (%)	diamètre (µm)	tamisat (%)
80.00	95.420	80.00	74.630	80.00	74.620	80.00	74.100
75.00	93.510	75.00	73.080	75.00	71.380	75.00	70.570
55.00	93.510	55.00	69.970	55.00	69.750	55.00	67.040
38.00	91.600	38.00	65.300	38.00	68.130	38.00	59.990
25.00	83.970	25.00	63.750	25.00	63.260	25.00	54.990
17.00	82.060	17.00	60.640	17.00	58.400	17.00	45.870
12.00	80.150	12.00	54.420	12.00	51.910	12.00	40.580
8.00	68.700	8.00	49.750	8.00	43.800	8.00	31.760
6.00	62.980	6.00	45.090	6.00	40.550	6.00	28.230
4.00	55.340	4.00	37.320	4.00	30.820	4.00	15.880
3.00	45.800	3.00	31.100	3.00	19.470	3.00	0
2.00	32.440	2.00	15.550	2.00	3.240	2.00	0

La figure 4.2 illustre les courbes granulométriques comparatives entre le sol original non traité et les échantillons de sol traités avec des ajouts d'agrégats de béton recyclé à des concentrations de 5%, 10% et 20%. L'analyse des courbes révèle que celles des sols reconstitués se situent systématiquement en dessous de la courbe représentant le sol original, indiquant ainsi une modification significative de leur composition granulométrique. Cette modification est caractérisée par une augmentation du contenu en sable dans chaque échantillon traité, accompagnée d'une diminution notable de la fraction argileuse, comme le montre la figure 4.3. Ces changements suggèrent une amélioration potentielle des propriétés physiques des sols, notamment en termes de drainage et de stabilité, due à l'intégration des agrégats de béton recyclé.

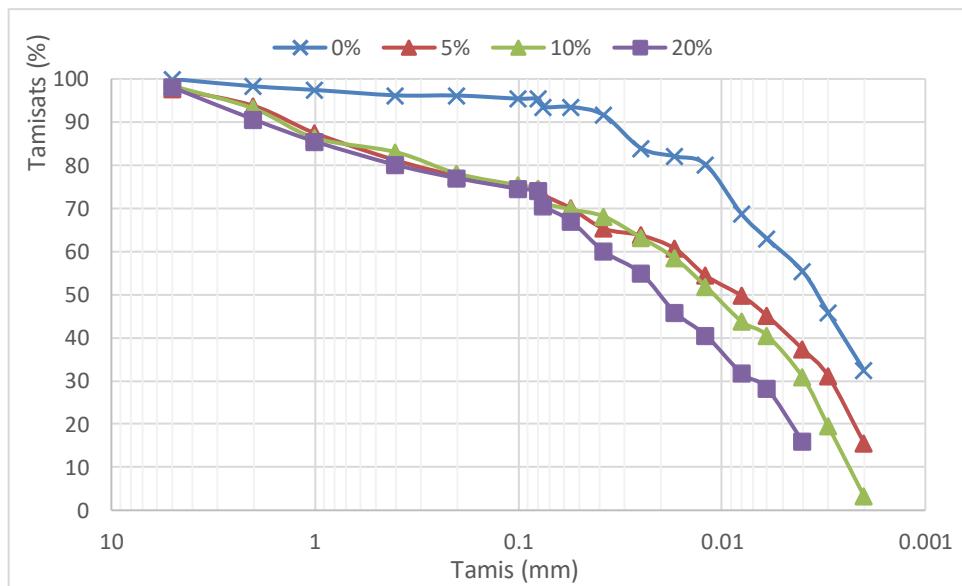


Figure 4.2. Courbes granulométriques des différents sols étudiés

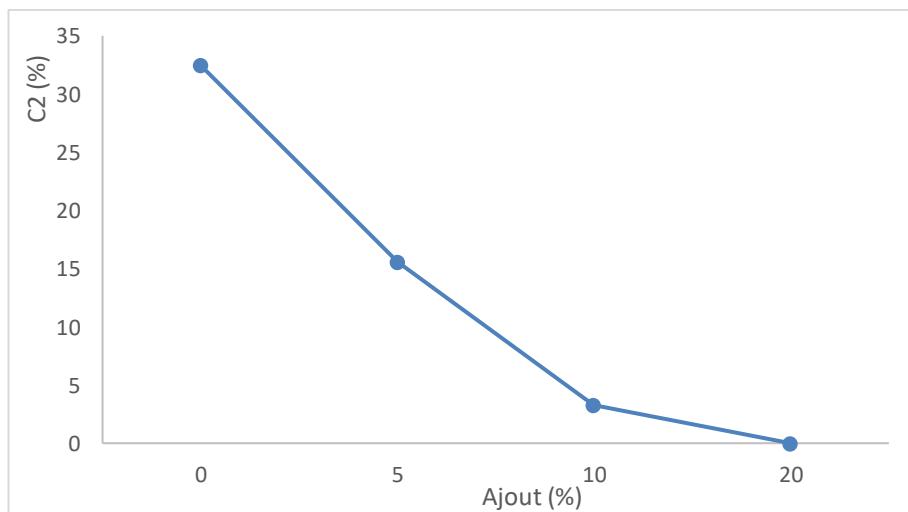


Figure 4.3. Evolution de la fraction argileuse en fonction des ajouts

4.5 ÉVOLUTION DES LIMITES D'ATTERBERG EN FONCTION DES AJOUTS

L'ensemble des essais sont réalisés selon la norme NF P 94-051 sur les différents traitements étudiés. Les tableaux 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 regroupent les résultats des essais réalisés sur les différentes variantes étudiées. Les figures (4.4, 4.5, 4.6) illustrent les différentes limites de liquidité des échantillons étudiés.

Tableau 4.3. Résultats de l'essai de la limite de liquidité pour un ajout de 5%

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Nombre de coups	15	20	25	30	35
Nº Tare	95	27	11	21	99
Poids sol humide + tare (g)	15.19	15.07	15.13	15.31	15.13
Poids sol sec + tare (g)	11.59	11.53	11.71	11.82	11.63
Poids de tare (g)	3.87	3.93	4.23	4.08	3.75
Poids de l'eau	3.60	3.54	3.42	3.49	3.50
Poids sol sec (g)	7.72	7.60	7.48	7.74	7.88
Teneur en eau (%)	46.63	46.58	45.72	45.09	44.42

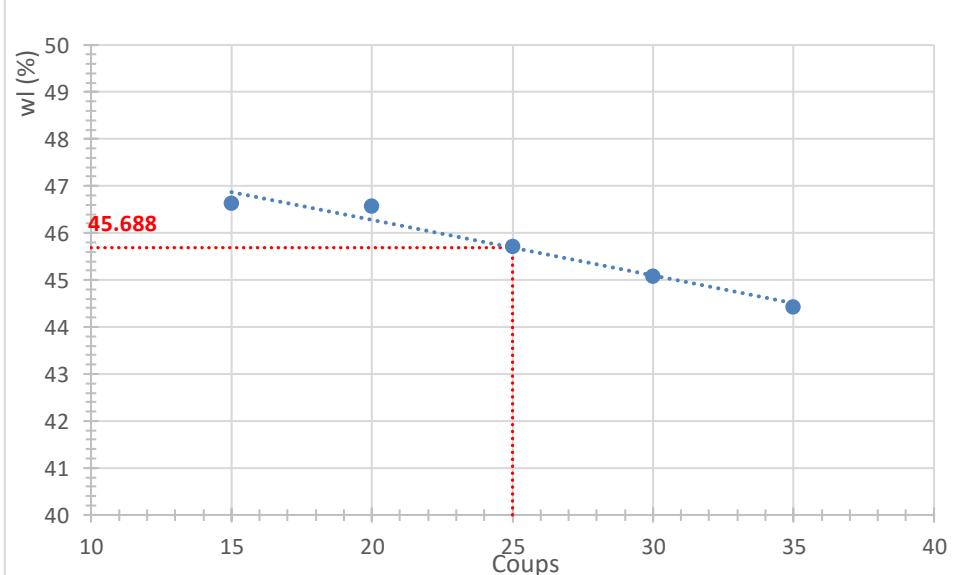


Figure 4.4. Courbe de détermination de la limite de liquidité pour un ajout de 5%

Tableau 4.4. Résultats de l'essai de l'essai de la limite de plasticité pour un ajout de 5%

	Essai 1	Essai 2
Nº de la tare	4	1
Poids total humide (g)	11.79	11.12
Poids total sec (g)	9.93	9.40
Poids de la tare (g)	3.79	3.49
Poids de l'eau	1.86	1.72
Poids du sol sec (g)	6.14	5.91
Teneur en eau (%)	30.29	29.10

Tableau 4.5. Résultats de l'essai de la limite de liquidité pour un ajout de 10%

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Nombre de coups	15	20	25	30	35
Nº Tare	95	27	11	21	99
Poids sol humide + tare (g)	15.22	15.16	15.18	15.41	15.16
Poids sol sec + tare (g)	11.81	11.82	11.97	12.11	11.85
Poids de tare (g)	3.87	3.93	4.23	4.08	3.75
Poids de l'eau	3.41	3.34	3.21	3.30	3.31
Poids sol sec (g)	7.94	7.89	7.74	8.03	8.10
Teneur en eau (%)	42.95	42.33	41.47	41.10	40.86

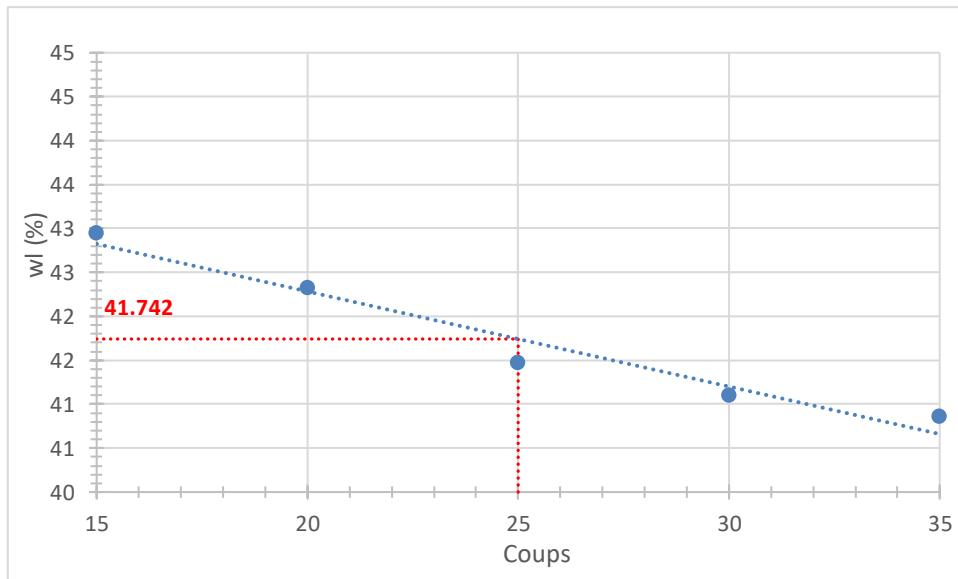


Figure 4.5. Courbe de détermination de la limite de liquidité pour un ajout de 10%

Tableau 4.6. Résultats de la limite de plasticité pour un traitement de 10 %

	Essai 1	Essai 2
Nº de la tare	9	2
Poids total humide (g)	12.31	12.01
Poids total sec (g)	10.38	10.09
Poids de la tare (g)	3.79	3.49
Poids de l'eau	1.93	1.92
Poids du sol sec (g)	6.59	6.60
Teneur en eau (%)	29.29	29.09

Tableau 4.7. Résultats de la limite de liquidité du traitement à 20 %

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Nombre de coups	15	20	25	30	35
Nº Tare	40	29	21	66	53
Poids sol humide + tare (g)	15.18	14.70	15.08	14.96	14.67
Poids sol sec + tare (g)	11.91	11.72	12.19	12.13	11.98
Poids de tare (g)	3.79	4.07	4.07	4.06	3.86
Poids de l'eau	3.27	2.98	2.89	2.83	2.69
Poids sol sec (g)	8.12	7.65	8.12	8.07	8.12
Teneur en eau (%)	40.27	38.95	35.59	35.07	33.13

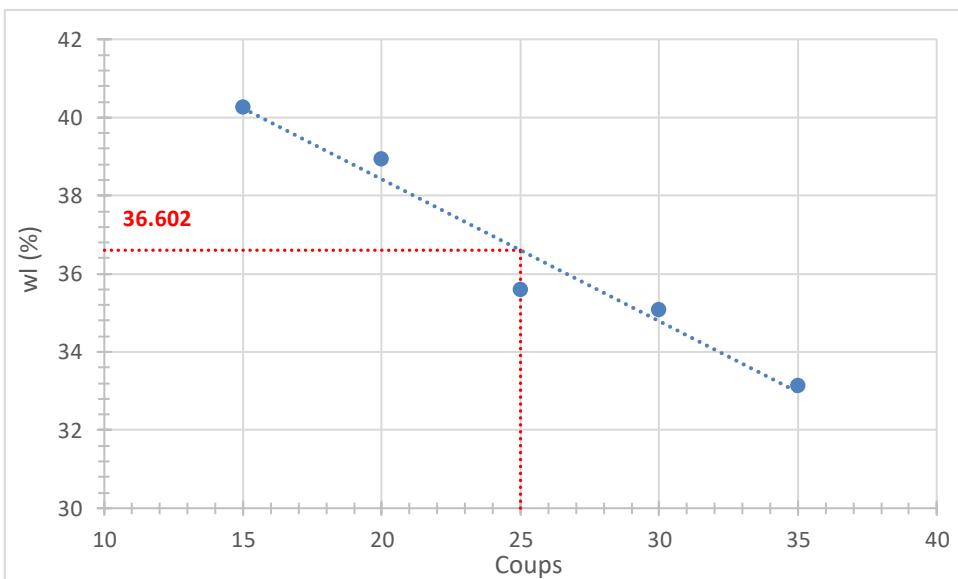


Figure 4.6. Courbe de la limite de liquidité du traitement à 20 %

Tableau 4.8. Résultats de la limite de plasticité pour un traitement de 20 %

	Essai 1	Essai 2
Nº de la tare	15	95
Poids total humide (g)	12.10	11.67
Poids total sec (g)	10.38	9.98
Poids de la tare (g)	3.79	3.49
Poids de l'eau	1.72	1.69
Poids du sol sec (g)	6.59	6.49
Teneur en eau (%)	26.10	26.04

Tableau 4.9. Résultats des limites d'Atterberg des différents mélanges

Type	W _L (%)	W _P (%)	I _P
Sol S0	55,37	31,81	23,56
Sol S1	45,69	29,7	15,99
Sol S2	41,742	29,19	12,552
Sol S3	36,602	26,07	10,532

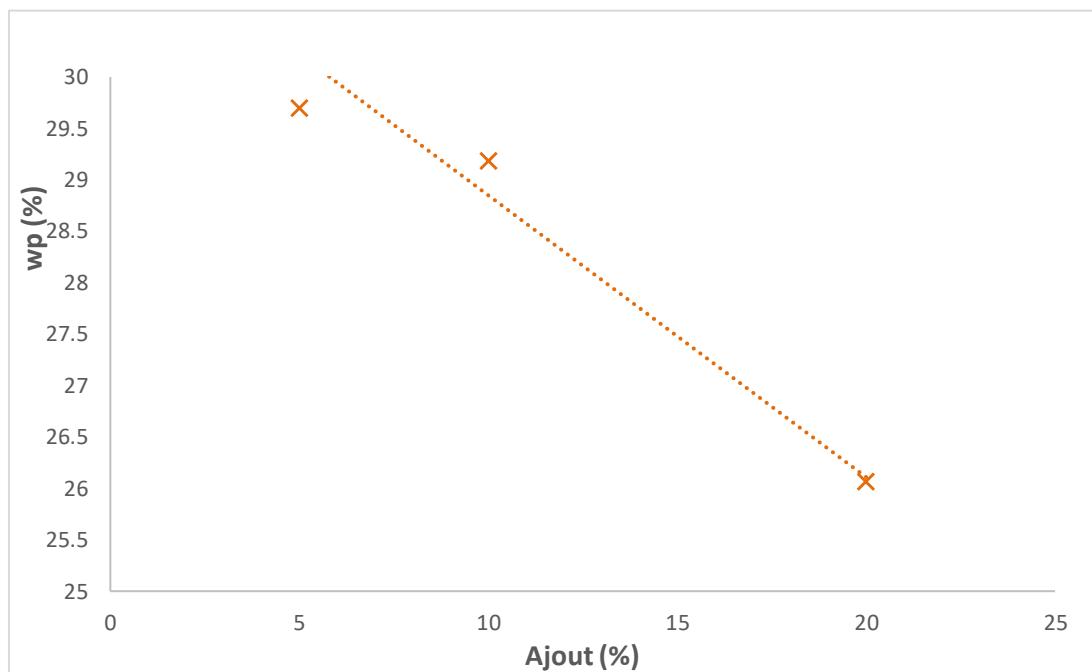


Figure 4.7. Evolution des limites de plasticité en fonction des ajouts

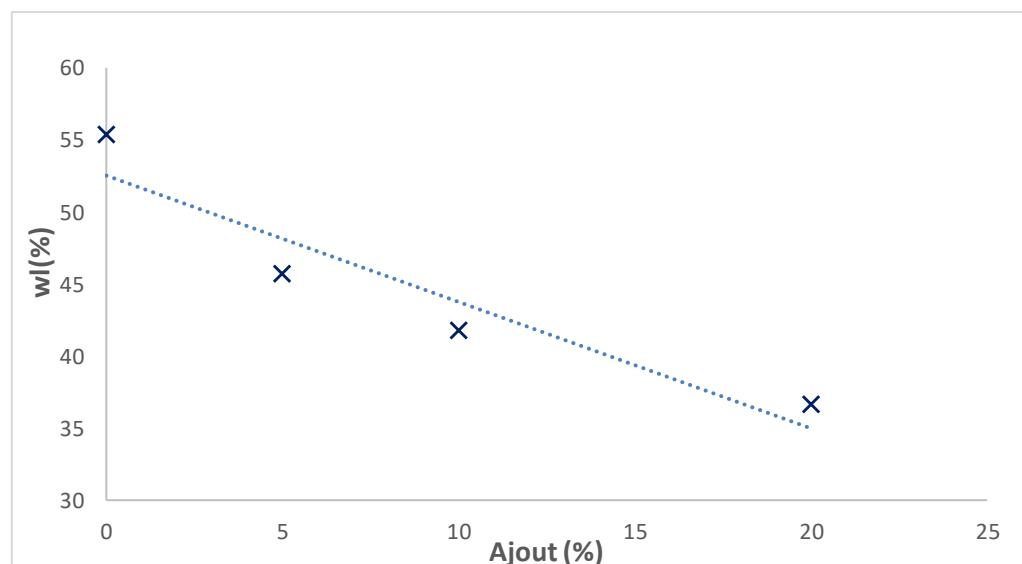


Figure 4.8. Evolution des limites de liquidité en fonction des ajouts

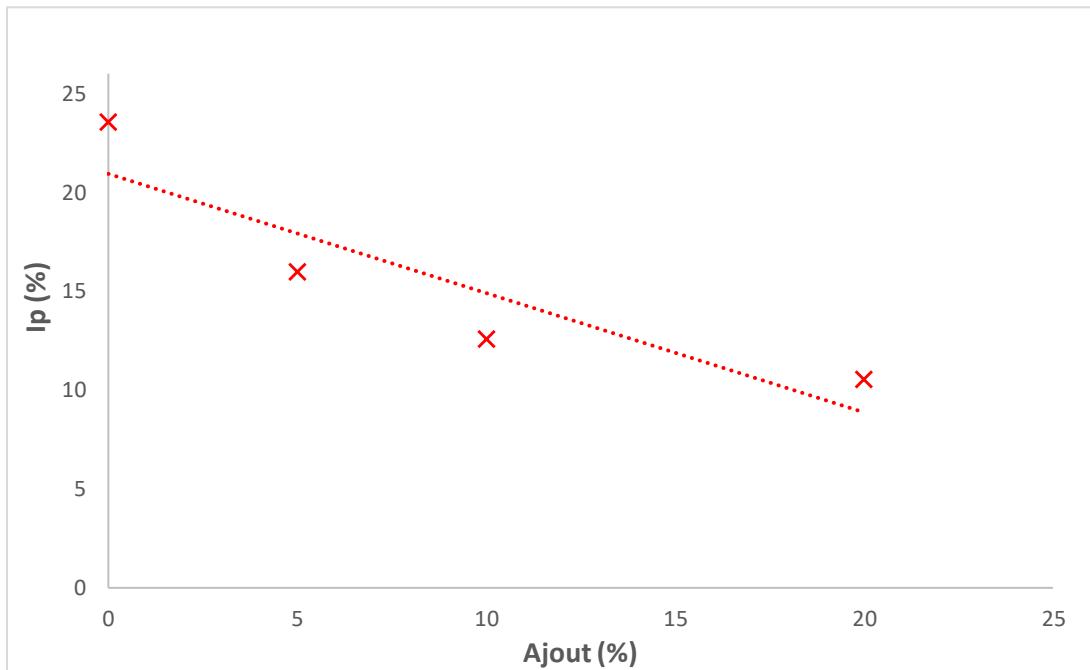


Figure 4.9. Évolution des indices de plasticité en fonction des ajouts

Les modifications observées dans les limites d'Atterberg des échantillons traités avec des agrégats de béton recyclé, telles que documentées dans le tableau 4.9 et illustrées sur la figure 4.8 révèlent une tendance claire et significative. La limite de liquidité, qui diminue de manière quasi linéaire de 17%, 25% à 34% avec des ajouts de 5%, 10% et 20% respectivement, indique une réduction de la capacité du sol à retenir l'eau. Cette baisse, accompagnée d'une diminution de la limite de plasticité (figure 4.7) de 7%, 8% et 18% pour les mêmes proportions d'ajout, suggère que le sol devient moins déformable et plus stable sous contraintes mécaniques. L'impact le plus notable est observé sur l'indice de plasticité (figure 4.9), qui connaît une réduction substantielle de 32%, 47% et 55%. Ces changements indiquent une amélioration notable de la réponse du sol, réduisant ainsi son potentiel de gonflement et augmentant sa stabilité. Cette amélioration pourrait être cruciale pour les applications de génie civil, car elle diminue les risques de défaillance structurelle liés aux mouvements du sol. En intégrant ces agrégats, non seulement nous valorisons des matériaux recyclés, mais nous contribuons également à une construction plus durable.

4.6 EVOLUTION DU BLEU DE MÉTHYLENE EN FONCTION DES AJOUTS

Les résultats des essais au bleu de méthylène, effectués sur les échantillons de sol traités avec différents pourcentages d'agrégats de béton recyclé, sont résumés dans le tableau 4.10 et visuellement représentés dans la figure 4.10. On observe une baisse linéaire remarquable des valeurs du bleu de méthylène de 11%, 47% et 79% pour les ajouts respectifs de 5%, 10% et 20%. Cette tendance décroissante est quantifiée par la relation linéaire :

$$VBS = -0,13A + 3,23$$

Où A représente le pourcentage d'ajout d'agrégats, avec un coefficient de corrélation élevé de 0,96.

Cette corrélation forte indique que la réduction de la valeur du bleu de méthylène est directement proportionnelle à l'augmentation du pourcentage d'agrégats ajoutés, soulignant l'efficacité de ce traitement dans la modification des propriétés du sol.

La diminution de la valeur du bleu de méthylène est également corrélée à une réduction de la surface spécifique du sol (figure 4.11), ce qui implique une moindre sensibilité à l'eau. Cette propriété est cruciale, car elle affecte directement le taux de gonflement du sol, un facteur important dans la stabilité des structures géotechniques. En réduisant la capacité du sol à absorber l'eau, les agrégats de béton recyclé améliorent considérablement la performance et la durabilité du sol dans des conditions humides, réduisant ainsi les risques associés à l'expansion et à la contraction du sol. Cette étude démontre clairement comment l'ajout d'agrégats de béton recyclé peut non seulement recycler des matériaux autrement considérés comme déchets, mais également améliorer les propriétés géotechniques du sol de manière significative.

Tableau 4.10. *Evolution de la valeur du bleu et de la surface spécifique en fonction des ajouts*

Type	VBS	SST	Interprétation
Sol S0	3,17	66,5	Sol argileux.
Sol S1	2,83	59,5	Sol argileux.
Sol S2	1,67	35	Sol limoneux de plasticité moyenne.
Sol S3	0,67	14	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux

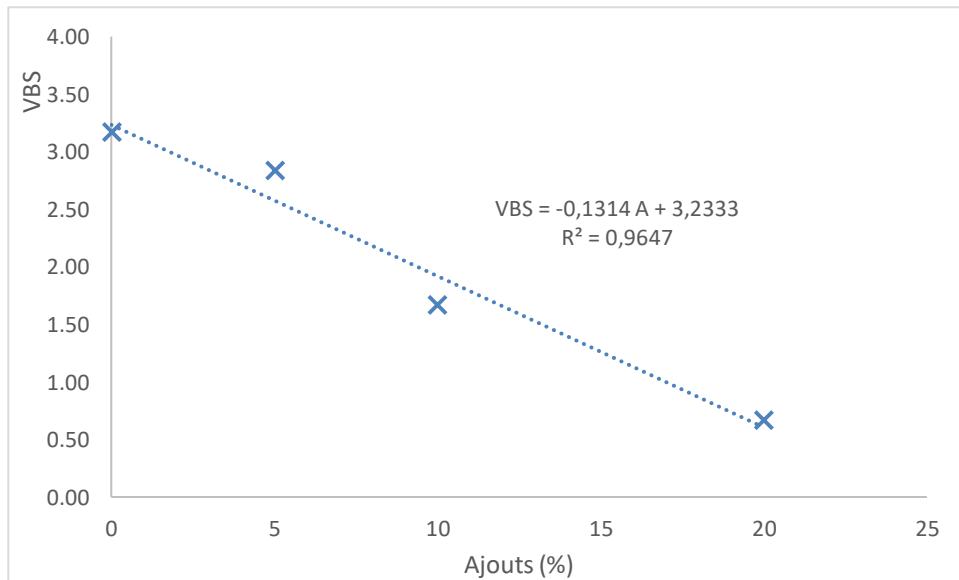


Figure 4.10. *Evolution des valeurs de bleu de Méthylène en fonction des ajouts*

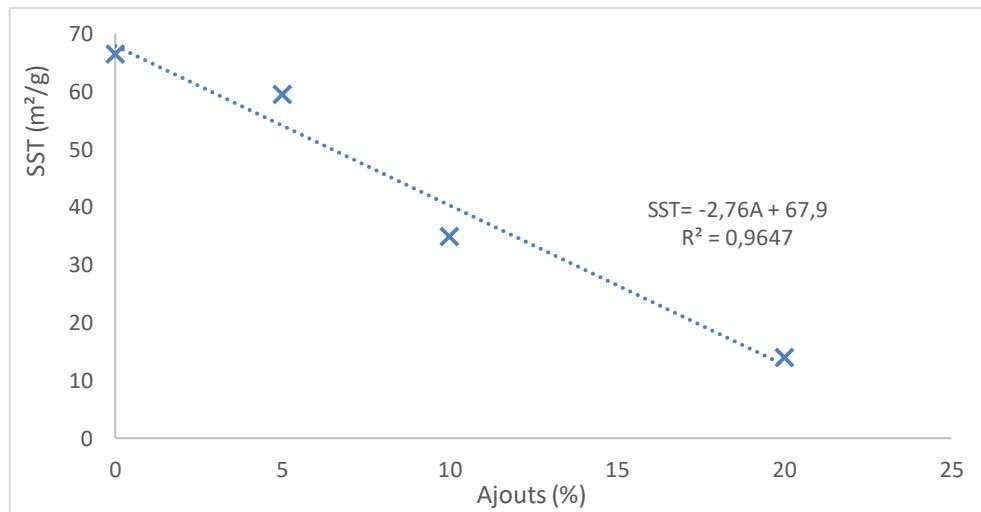


Figure 4.11. Evolution de la surface spécifique en fonction des ajouts

4.7 EVOLUTION DE LA TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM EN FONCTION DES AJOUTS

Une série d'essais au teneur en carbonate de calcium est réalisée sur les différents traitements. Le tableau 4.11 regroupe les différentes valeurs trouvées. On observe une augmentation du taux de carbonate de calcium en fonction des ajouts avec des taux de 22%, 83% et 133% pour les ajouts respectifs de 5%, 10% et 20%. Les sols traités deviennent plus calcaires et une attention particulière aux environnements acides doit être prise en compte dans le cas d'un traitement du sol.

Tableau 4.11. Variation de la teneur en CaCO_3 en fonction des ajouts

Type	CaCO_3	Interprétation
Sol S0	18	Peu calcaire
Sol S1	22	Peu calcaire
Sol S2	33	Moyennement calcaire
Sol S3	42	Moyennement calcaire

4.8 EVOLUTION DES PARAMETRES DE COMPRESSIBILITE EN FONCTION DES AJOUTS

Les courbes œdométriques illustrées par les figures 4.12 à 4.14 pour les traitements de l'argile avec 5%, 10%, et 20% d'agrégats de béton recyclé dévoilent des insights approfondis sur les modifications de la compressibilité des sols traités. Les données consolidées dans le tableau 4.12 et la figure 4.15 montrent des variations distinctes dans la contrainte de préconsolidation. Pour les ajouts de 5% et 10%, une réduction substantielle de 26% et 34% respectivement indique une diminution de la susceptibilité du sol à se compresser sous charge. Cependant, une augmentation de 3% est observée avec un ajout de 20% suggère une saturation ou une inefficacité des bénéfices à ce niveau d'ajout, où le sol ne répond plus de manière aussi bénéfique.

Le coefficient de compressibilité, comme le détaille la figure 4.16, suit une trajectoire similaire, avec des diminutions de 20%, 29%, et 54% pour des ajouts correspondants de 5%, 10% et 20%. Cette réduction reflète une amélioration dans la capacité du sol à résister à des changements de volume sous pression, augmentant ainsi sa stabilité structurelle. La figure 4.17 quant à elle, révèle une réduction considérable de l'indice de gonflement, diminuant de 64%, 100% et 71% pour les ajouts respectifs, avec une amélioration optimale à 10%. Ce phénomène indique une moindre expansion du sol en présence d'eau, ce qui est crucial pour prévenir les dommages structurels dus au gonflement du sol.

La relation entre le pourcentage d'ajout et le coefficient de gonflement est exprimée par la formule $C_g=10^{-3}A+0,028$ (figure 4.18), affirmant une décroissance linéaire avec un coefficient de corrélation robuste de 0,93. Cela montre que chaque pourcentage d'ajout contribue de manière prévisible à la réduction du potentiel de gonflement, ce qui facilite la planification et l'optimisation des mélanges de sols pour des applications spécifiques.

Enfin, l'augmentation substantielle du module œdométrique, notée dans la figure 4.19, avec des hausses de 39%, 59% et 105% pour des ajouts de 5%, 10% et 20%, souligne une amélioration marquée de la portance et de la résistance du sol. Ce module, qui augmente selon la formule $E_{oed}=518,84A+10902$, indique que l'ajout d'agrégats non seulement renforce le sol mais le rend également plus apte à supporter des charges lourdes, une qualité indispensable pour les infrastructures de génie civil où la fiabilité et la longévité sont primordiales. Ces résultats soutiennent la thèse selon laquelle l'utilisation d'agrégats de béton recyclé dans le traitement des sols argileux peut radicalement améliorer leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles.

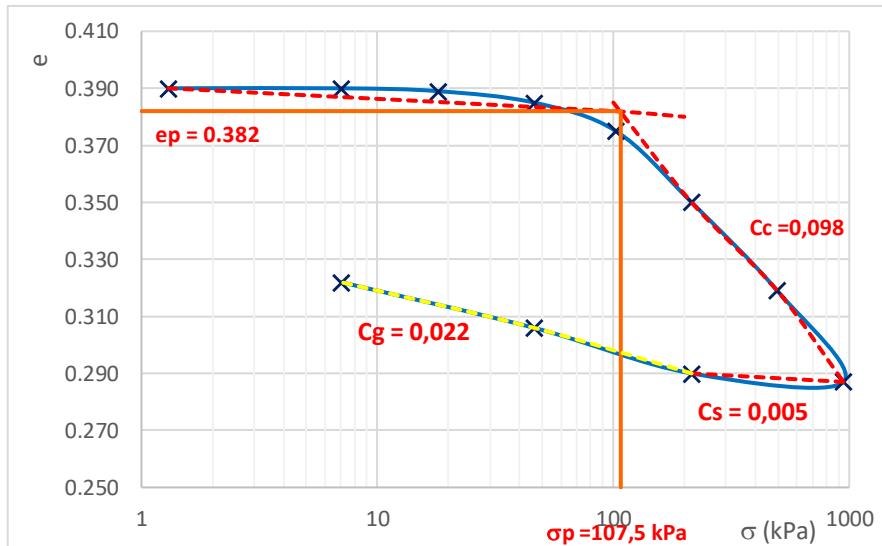


Figure 4.12. Courbe œdométrique du sol traité avec 5% d'ajout

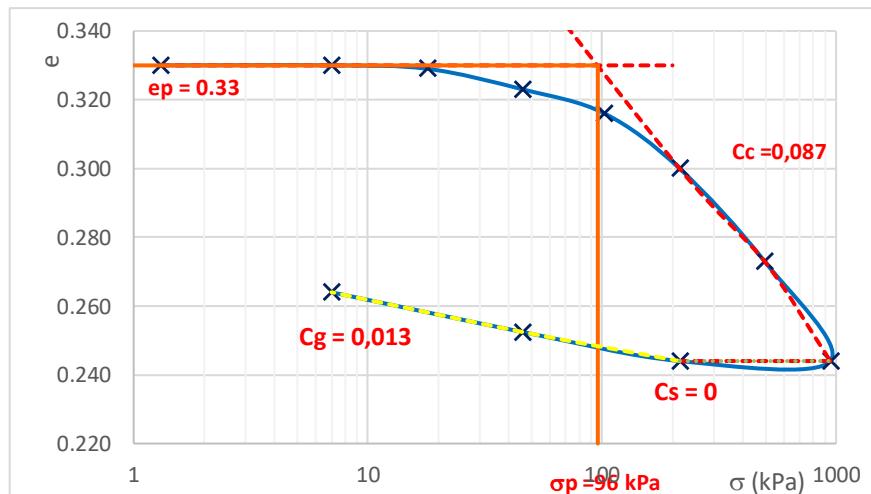


Figure 4.13. Courbe œdométrique du sol traité avec 10% d'ajout

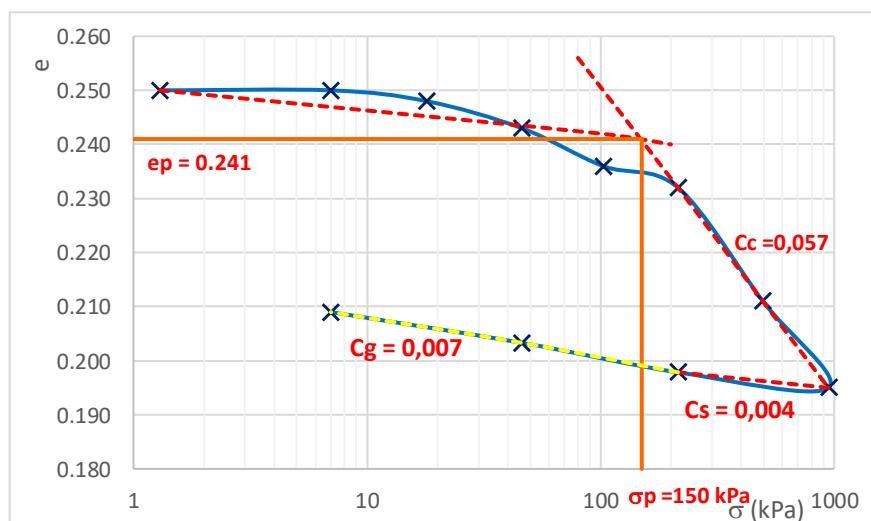
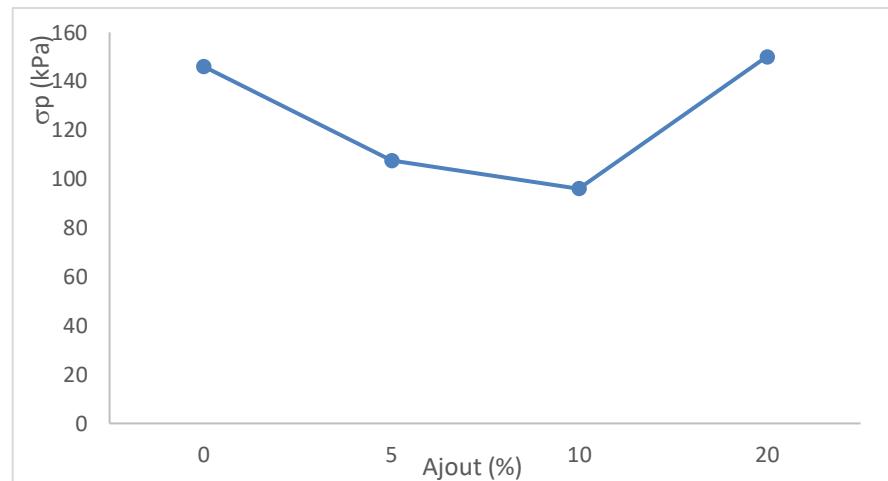
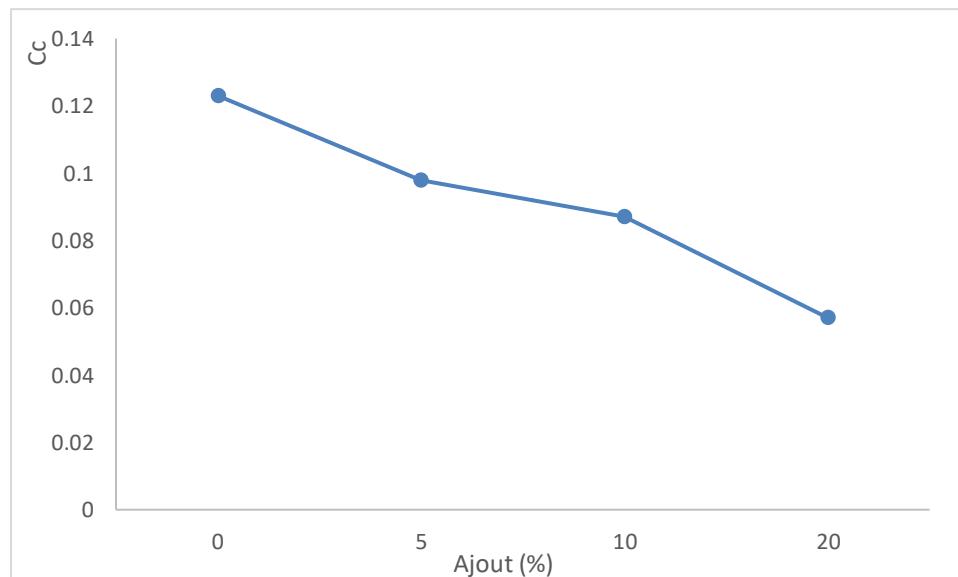


Figure 4.14. Courbe œdométrique du sol traité avec 20% d'ajout

Tableau 4.12. *Paramètres de compressibilité des sols traités*

Ajout (%)	σ_p (kPa)	Cc	Cs	Cg	E_{oed} (kPa)
0	146	0,123	0,014	0,03	10248
5	107,5	0,098	0,005	0,022	14215
10	96	0,087	0	0,013	16321
20	150	0,057	0,004	0,007	20984

Figure 4.15. *Evolution de la contrainte de préconsolidation en fonction des ajouts*Figure 4.16. *Evolution du coefficient de compressibilité des différents ajouts*

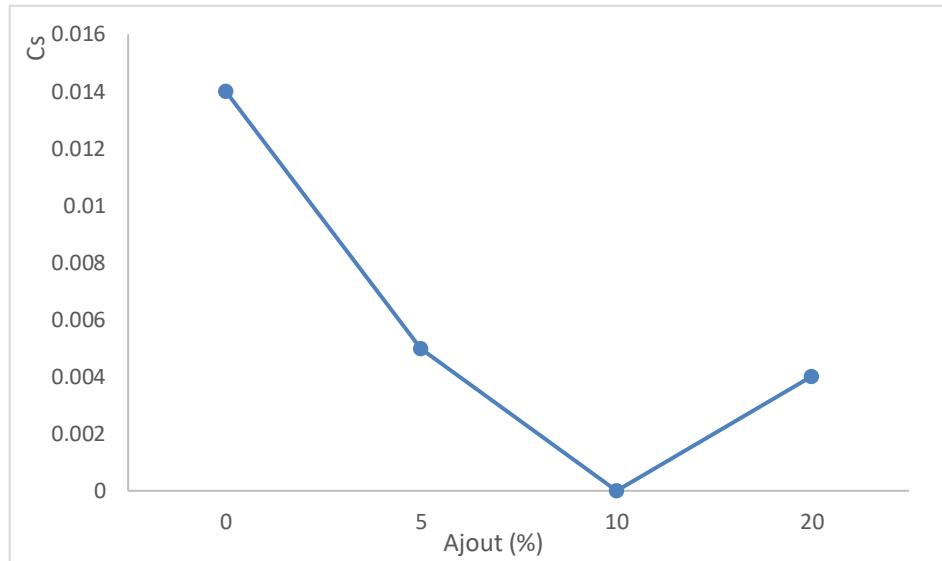


Figure 4.17. Evolution de l'indice de gonflement et du coefficient de gonflement des sols traités

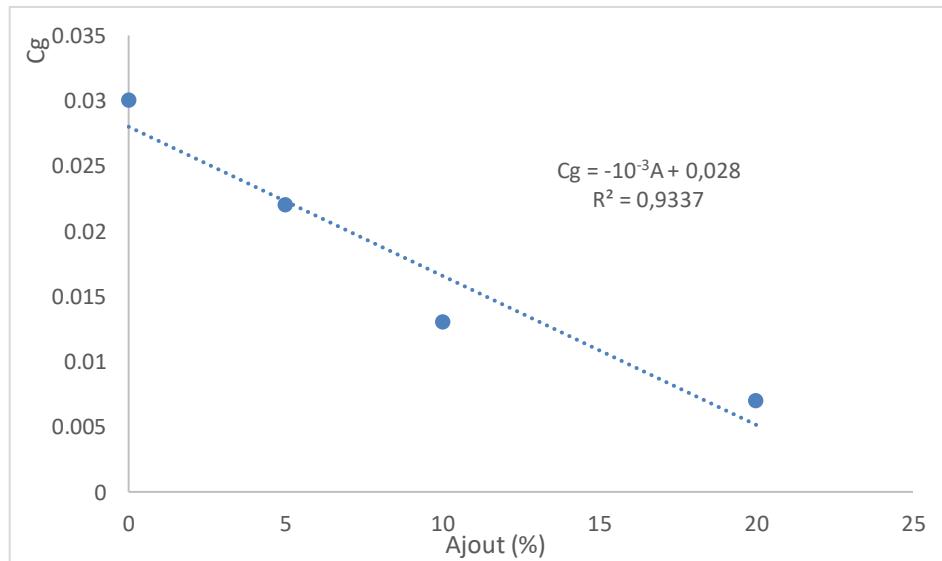


Figure 4.18. Evolution du coefficient de gonflement en fonction des ajouts

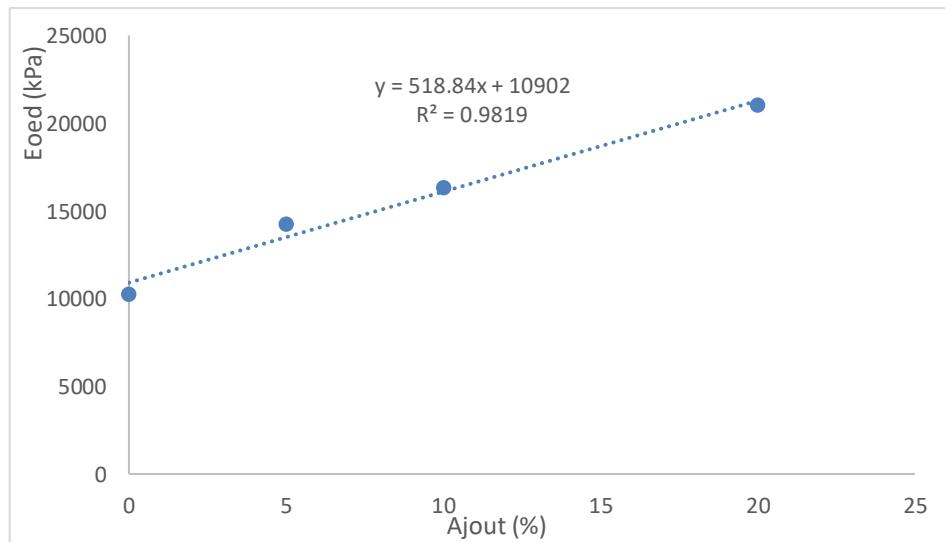


Figure 4.19. Evolution du module axéométrique en fonction des ajouts

4.9 EVOLUTION DE LA RESISTANCE DE CISAILLEMENT EN FONCTION DES AJOUTS

Les résultats des essais de cisaillement direct, effectués sur des sols traités avec 5%, 10% et 20% d'agrégats de béton recyclés, fournissent des insights cruciaux sur l'amélioration des propriétés mécaniques du sol, notamment en termes de résistance au cisaillement. La figure 4.20 montre que toutes les courbes de cisaillement pour les sols traités se positionnent au-dessus de celle du sol non traité, indiquant une augmentation significative de la résistance au cisaillement due à l'ajout d'agrégats. Ce phénomène peut être attribué à une meilleure interconnexion entre les particules de sol et les agrégats de béton, ce qui augmente la résistance globale du matériau composite formé.

L'analyse des résultats présentés dans la figure 4.21 révèle des augmentations notables de la cohésion. Particulièrement, l'ajout de 10% d'agrégats entraîne une hausse exceptionnelle de la cohésion de 219%, comparativement aux augmentations de 47% et 63% observées pour les ajouts de 5% et 20%, respectivement. Cette augmentation maximale à 10% pourrait suggérer une proportion optimale d'agrégats pour maximiser la cohésion du sol, probablement en raison d'une distribution et d'une densité de particules idéales qui favorisent une meilleure liaison et stabilité structurelle.

Quant à l'angle de frottement, illustré par la figure 4.22, les augmentations observées sont également impressionnantes, avec des taux de 410%, 344% et 468% pour les ajouts de 5%, 10% et 20% respectivement. L'accroissement spectaculaire de l'angle de frottement avec l'augmentation des pourcentages d'agrégats suggère une amélioration considérable de la rugosité et de l'interlock entre les particules, ce qui est essentiel pour la stabilité des pentes et des ouvrages de soutènement. Ces résultats indiquent que l'agrégation peut substantiellement augmenter la capacité du sol à résister à des forces de cisaillement sans subir de déformation, ce qui est crucial pour les applications en génie civil où la sécurité et la durabilité sont des priorités.

En conclusion, l'intégration d'agrégats de béton recyclés dans les traitements de sols argileux semble être une stratégie très prometteuse pour améliorer significativement leurs propriétés mécaniques. Ces résultats encouragent une exploration plus poussée de cette méthode comme solution écologique pour renforcer les sols dans des contextes géotechniques variés, offrant ainsi une avenue pour la réutilisation des matériaux de construction tout en améliorant la performance et la sécurité des infrastructures.

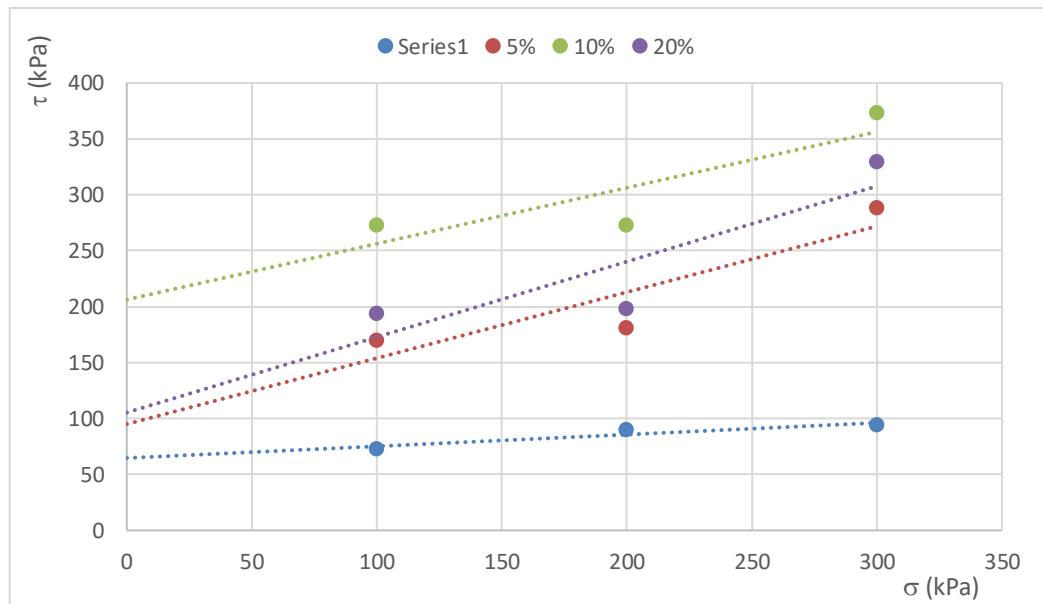


Figure 4.20. Courbes intrinsèques des mélanges étudiés

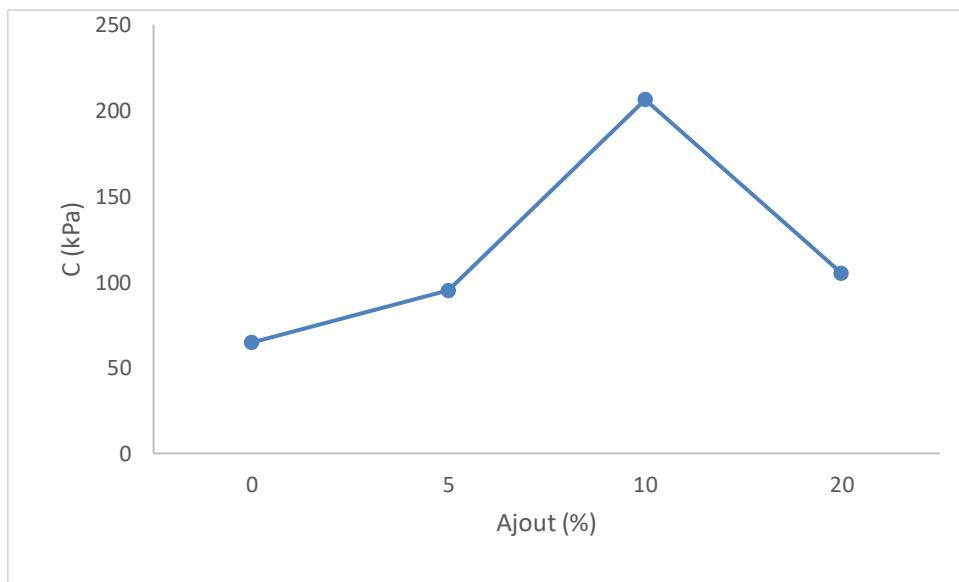


Figure 4.21. Evolution de la cohésion en fonction des ajouts

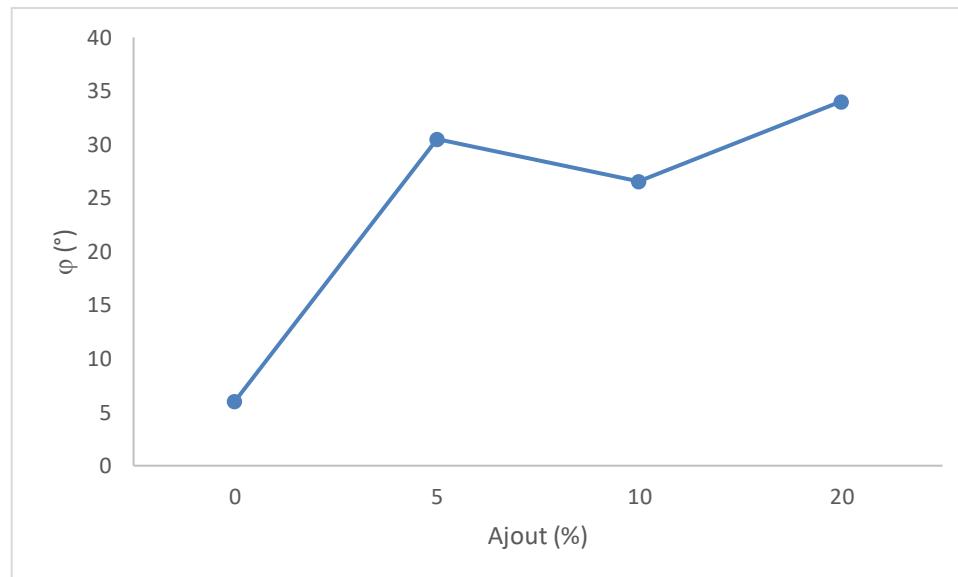


Figure 4.22. Evolution des angles de frottement en fonction des ajouts

4.10 CONCLUSION

Ce chapitre a approfondi l'étude de l'amélioration des sols argileux par l'ajout d'agrégats de béton recyclés, en se concentrant sur des dosages de 5%, 10% et 20%. Les résultats obtenus montrent des améliorations substantielles dans plusieurs propriétés géotechniques cruciales pour les applications de génie civil.

Les courbes granulométriques montrent une modification notable de la texture des sols, avec une augmentation du contenu en sable et une diminution de la fraction argileuse. Ces changements sont favorables à l'amélioration du drainage et de la stabilité des sols, réduisant ainsi les risques de tassement et de glissement. Les limites d'Atterberg ont également montré une diminution significative, reflétant une réduction de la plasticité et de la capacité des sols à retenir l'eau, ce qui diminue leur potentiel de gonflement et augmente leur stabilité sous charge.

L'analyse des résultats au bleu de méthylène confirme une baisse de la surface spécifique et une moindre sensibilité à l'eau, améliorant la durabilité des sols dans des conditions humides. Cela est essentiel pour assurer la fiabilité des structures fondées sur ces sols traités, particulièrement dans des zones sujettes à des variations hydriques.

Les essais de compressibilité et les courbes œdométriques indiquent une amélioration de la résistance du sol à la compression et une réduction de l'indice de gonflement. Le module œdométrique, qui a augmenté de manière significative, témoigne de l'amélioration de la portance du sol, ce qui est fondamental pour supporter des charges plus lourdes sans subir de déformation excessive.

Les essais de cisaillement direct ont révélé une augmentation notable de la résistance au cisaillement et de la cohésion, particulièrement marquée avec un ajout de 10% d'agrégats. Cette amélioration est

cruciale pour la stabilité des pentes et la résistance des ouvrages de soutènement, augmentant ainsi la sécurité des infrastructures.

Enfin, l'augmentation des taux de carbonate de calcium nécessite une attention particulière dans des environnements acides, où une gestion prudente du choix des matériaux est indispensable pour éviter la dégradation chimique des sols traités.

En conclusion, l'intégration d'agrégats de béton recyclés dans les sols argileux a non seulement démontré une capacité à améliorer significativement les propriétés géotechniques des sols, mais aussi à offrir une solution écologique pour la valorisation des déchets de construction. Cette méthode prometteuse pourrait transformer radicalement les pratiques de stabilisation des sols, favorisant des approches plus durables dans le domaine du génie civil.

CONCLUSION GENERALE

Les sols, éléments fondamentaux de l'environnement terrestre, sont constitués de particules minérales, de matières organiques, d'eau et d'air. Ils varient considérablement en termes de composition, de texture et de propriétés physiques et chimiques, influençant leur utilisation dans les projets de génie civil. La compréhension des sols, notamment les types argileux, limoneux et sableux, est essentielle pour évaluer leur comportement sous diverses conditions de charge et d'humidité.

Parallèlement, les déchets de démolition et de construction (DDC) représentent une part importante des déchets solides produits dans le monde. Composés principalement de béton, de briques, de tuiles et d'asphalte, ces déchets posent des défis environnementaux significatifs. Cependant, leur recyclage offre des opportunités précieuses. L'incorporation de ces matériaux recyclés dans les sols peut améliorer leurs propriétés géotechniques, comme la stabilité et la capacité portante, tout en contribuant à la réduction des déchets et à la conservation des ressources naturelles. Cette approche intégrée de gestion des sols et des DDC s'inscrit dans une perspective de développement durable et de construction écologique.

L'étude sur l'effet de l'incorporation des agrégats de béton recyclés sur les propriétés d'un sol argileux, notamment celui provenant de la zone Dhar Chih, a permis de mettre en évidence des améliorations significatives sur plusieurs propriétés géotechniques cruciales pour les applications de génie civil. Les résultats obtenus témoignent du potentiel des agrégats de béton recyclés à transformer les caractéristiques des sols argileux, favorisant des pratiques de stabilisation des sols plus durables et écologiques. Les principaux éléments clés sont :

L'incorporation des agrégats a modifié la texture du sol, augmentant le contenu en sable et diminuant la fraction argileuse. Ces changements améliorent le drainage et la stabilité des sols, réduisant les risques de tassement et de glissement.

Les limites d'Atterberg montrent une diminution significative, réduisant la plasticité et le potentiel de gonflement. La diminution de la plasticité est essentielle pour augmenter la stabilité des sols sous charge.

L'analyse au bleu de méthylène confirme une baisse de la surface spécifique et une moindre sensibilité à l'eau. Cette amélioration est cruciale pour la durabilité des structures fondées sur ces sols dans des conditions hydriques variées.

Les essais œdométriques indiquent une amélioration de la résistance à la compression et une réduction de l'indice de gonflement. Le module œdométrique, significativement augmenté, témoigne de l'amélioration de la portance du sol.

Les essais de cisaillement direct révèlent une augmentation notable de la résistance au cisaillement et de la cohésion, particulièrement avec 10% d'agrégats. Cette amélioration est cruciale pour la stabilité des pentes et la résistance des ouvrages de soutènement.

L'augmentation des taux de carbonate de calcium nécessite une attention particulière dans des environnements acides. Une gestion prudente est indispensable pour éviter la dégradation chimique des sols traités.

L'incorporation des agrégats de béton recyclés dans les sols argileux présente une méthode prometteuse pour améliorer les propriétés géotechniques des sols, tout en offrant une solution écologique pour la valorisation des déchets de construction. Cependant, il est essentiel de :

- Continuer à explorer les dosages optimaux pour différents types de sols et conditions environnementales.
- Évaluer la durabilité à long terme des sols traités, notamment dans des conditions climatiques extrêmes.
- Mettre en place des directives pour l'application pratique de cette technique dans le génie civil, assurant une adoption généralisée et sécurisée.

En conclusion, cette étude ouvre la voie à des pratiques de stabilisation des sols plus durables, répondant à la fois aux besoins techniques et environnementaux. L'usage des agrégats de béton recyclés dans le génie civil pourrait transformer radicalement les approches actuelles, favorisant une construction plus respectueuse de l'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Wikipédia est une encyclopédie en ligne collaborative et multilingue [en ligne] créée par Jimmy Wales et Larry Sanger [consulté le 15.01.2001]..disponible sur:
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Sol_\(gotechnique\)#Bibliographie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sol_(gotechnique)#Bibliographie)
- [2] HAOUARI Leila HANOUT Linda «contribution a la valorisation des sédiments du barrage de Gargar dans le domaine de génie civil » thèse de master, 2017
- [3] Abdelmalek. BEKKOUCHE , Zoheir Benyelles « Bases de la Mécanique des Sols » universite Aboubekr Belkaid telemcen , 2016 , See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/323430819>
- [4] www.aquaportal.com a été indexé [en ligne] par Google [consulté le 12.02.2010]. disponible sur:
<https://www.aquaportal.com/dictionnaire/definition/6724/limon>
- [5] DJMILI Med Rafik : «Modification Des Propriétés D'un Sol Argileux Par Ajouts De Déchets De Marbre» , 2021
- [6] WAKIM J : « Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses» thèse de doctorat. France,2005.
- [7] https://jardin-secrets.com/img/jardin-secrets.com/articles/12050/photo-sol-argileux_domaine-public.jpg.
- [8] B. Zeineb et A.B Nehla. Etude du comportement d'une marne argileuse traitée pour valorisation dans les projets routiers, l'Université 08 Mai 1945 de Guelma 2017.
- [9] A. Fouad et M. Mohamed. Effet de la durée de cure sur la plasticité et sur les paramètres de cisaillement d'un sol fin argileux amélioré par la chaux. Mémoire master, Université Hassiba Benbouali de chlef, 2015.
- [10] M. Rautureau. Conférence "Les plantes de la racine à la fleur, le rôle des argiles" (Grasse - Symposium International d'aromathérapie et de plantes médicinales). Docteur d'Etat ès Sciences Physiques, membre du GFA. 1er avril 2011.
- [11] Gridi Benneji Fayza, thèse de doctorat, université de Limoges, (2007).
- [12] Abir AZARA « Activation des argiles: modes et modifications structurales » these de master, 2016
- [13] <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>
- [14] Pédro, G., Les minéraux argileux dans Pédologie (2 - Constituants et propriétés du sol): Duchaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris 665p, p. 47-64, (1994).
- [15] https://amaco.org/wp-content/uploads/2020/06/RT-S-003-2-entete-5204_partie_2_p140-169.jpg
- [16] www.cerema.fr

- [17] <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/778143/affaissement-terrain-saskatoon-infrastructure-mauvais-etat>.
- [18] <https://www.algerie360.com/glisement-de-terrain-a-boumerdes-un-phenomene-naturel-a-prendre-en-charge/>.
- [19] Université Ferhat Abbas de Sétif , disponible sur https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/AleaEtRisquesNaturelsPartie_CH7Partie2.pdf
- [20] <http://afroandalou.over-blog.com/article-l-effondrement-d-un-forage-realise-par-total-en-1978-menace-de-polluer-les-eaux-de-ouargla-l-un-de-119241015.html>.
- [21] Wikipédia est une encyclopédie en ligne collaborative et multilingue créée par Jimmy Wales et Larry Sanger (consulté le 15 janvier 2001) ,« Soil Liquefaction Web Site [archive] », sur depts.washington.edu (consulté le 25 novembre 2017)
- [22] Wikipédia est une encyclopédie en ligne collaborative et multilingue créée par Jimmy Wales et Larry Sanger le 15 janvier 2001« Liquefaction [archive] », BRGM (consulté le 5 octobre 2012).
- [23] <http://www.cgs-dz.org/images/immeubles1.jpg>
- [24] Jean Pierre MAGNAN «Panorama des sols gonflants en géotechnique » 2013
- [25] SOUALMIA Takie Eddine, « Etude de stabilisation d'un remblai de grande hauteur Sur sol compressible cas de la chaussé , pour l'évitement de la ville de Boumerdès sur 10 km»,2019.
- [26] www.laterlite.fr
- [27] Gestion des déchets de chantier technique de l'ingénieur (consulté le 10/11/2021) disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-direction-de-chantier-43824210/gestion-des-dechets-de-chantier-tba236/>
- [28] Trivalor. (2002). Etude de scénarios pour le Plan départemental de gestion des déchets du BTP de l'Indre.
- [29] [https://upload.wikimedia.org .](https://upload.wikimedia.org)
- [30] <https://www.recyclageunifer.fr>
- [31] CHELABI , H., & TALEB , Z. (2017). Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre. BOUIRA: UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ.
- [32] <https://www.bigbagngo.com/guide-gestion-dechets-industriels/>
- [33] <https://www.ordif.fr>
- [34] ADDA.B , AZZOUZ.B , « Étude expérimentale d'un béton à hautes performances recyclé à base de fumée de silice (Granitex, Sika)», 2021.
- [35] «<https://www.infociments.fr/favoriser-leconomie-circulaire/le-beton-un-materiau-recyclableet-recycle>,» [En ligne].
- [36] Courard, Luc. Utilisation des matières-Problématique 15: Le cycle de vie des matières-matériaux de construction. DGRNE, 2006.

- [37] H. C. François DE LARRARD, *Le béton recyclé*, 2018
- [38] J. L. Gálvez-Martos, D. Styles, H. Schoenberger, and B. Zeschmar-Lahl, “Construction and demolition waste best management practice in Europe,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 136, no. April, pp. 166–178, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.04.016.
- [39] Federation Francaise du Batiment, “Etude de scénarii pour la mise en place d’une organisation permettant une gestion efficace des déchets du bâtiment dans le cadre d’une économie circulaire,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ffbatiment.fr/federationfrancaise-du-batiment/le-batiment-et-vous/construction-durable/la-gestion-des-dechetsde-chantier.html>.
- [40] Ministère de l’Économie et des Finances, “50 Mesures pour une économie % circulaire,” 2018.
- [41] IREX, “Recommandations RECYBETON. Comment recycler le béton dans le béton, 2018.
- [42] cerema graves de déconstruction 2014 pdf
- [43] M. Nedeljković, J. Visser, B. Šavija, S. Valcke, and E. Schlangen, “Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review,” *J. Build. Eng.*, vol. 38, no. January, p. 102196, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102196.
- [44] M. Nedeljković, J. Visser, T. G. Nijland, S. Valcke, and E. Schlangen, “Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121475.
- [45] A. Z. Bendimerad, E. Roziere, and A. Loukili, “Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 11, pp. 3557–3569, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0421-5.
- [46] M. Medevielle, "utilisation de la bioprécipitation de carbonates de calcium pour améliorer la qualité de granulats de béton recyclé, Ph.D . dissertation, MAST,", Nantes, 2019.
- [47] D.-T. Dao, “(Multi-) recyclage du béton hydraulique, Ph.D. dissertation,” Ecole centrale de Nantes, 2012.
- [48] C. Neno, J. De Brito, and R. Veiga, “Using fine recycled concrete aggregate for mortar production,” *Mater. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–177, 2014, doi: 10.1590/S1516-14392013005000164.
- [49] F. Rodrigues, L. Evangelista, and J. De Brito, “A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates,” *Mater. Res.*, vol. 16, no. 5, pp. 1045– 1051, 2013, doi: 10.1590/S1516-14392013005000074.
- [50] “NF EN 12620+A1 - Juin 2008.” <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en12620a1/granulats-pour-beton/article/702719/fa157250> (accessed Aug. 18, 2020).
- [51] T. Le, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz, D. Betrancourt, and S. Rémond, “Hardened behavior of mortar based on recycled aggregate: Influence of saturation state at macro- and microscopic scales,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 141, pp. 479–490, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.035.
- [52] T. Sedran, “Adaptation des méthodes de formulation au béton de granulats recyclés.,” in *Le béton recyclé*, F. Larrard and H. Colina, Eds. Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018, pp. 359– 378.

- [53] C. C. Fan, R. Huang, H. Hwang, and S. J. Chao, “The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of Mortar,” *Materials* (Basel)., vol. 8, no. 5, pp. 2658–2672, 2015, doi: 10.3390/ma8052658.
- [54] P. C. C. Gomes, C. Ulsen, F. A. Pereira, M. Quattrone, and S. C. Angulo, “Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates,” *Waste Manag.*, vol. 45, pp. 171–179, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.008.
- [55] S. V. Kumar and M. Santhanam, “Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review,” *Indian Concr. J.*, vol. 77, no. 9, pp. 1324– 1331, 2003.
- [56] A. Djerbi Tegguer, “Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 112–116, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018.
- [57] “Free Moisture and Absorption of Aggregates - Engineering things.” <https://enggthings.blogspot.com/2018/01/free-moisture-and-absorption-of.html> (accessed Jan. 29, 2021).
- [58] “Norme NF EN 1097-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption, d'eau, ICS : 91.100.15.,” pp. 18-650–6, Accessed: Jan. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en10976/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-desgra/fa163899/42536>
- [59] F. de. Larrard, “Concrete mixture proportioning : a scientific approach,” p. 421, 1999.
- [60] “Norme NF EN 206/CN, Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, ICS : 91.080.40 ; 91.100.30,” 2014. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-206-cn/beton-specificationperformance-production-et-conformite-complement-nationa/fa185553/1463> (accessed Jan. 24, 2022).
- [61] M. Sereng, “Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO₂ : étude de la faisabilité pré-industrielle, Ph.D. dissertation, MAST,” Université Paris-Est, 2020.
- [62] C. Horacio, D. E. L. François, and D. Brice, “Comment recycler le beton dans le beton.” 2018, [Online]. Available: https://www.pnrecybeton.fr/wpcontent/uploads/2018/11/RECYBETON_Recommandations_2018-11-26.pdf.
- [63] N. Tošić, J. M. Torrenti, T. Sedran, and I. Ignjatović, “Toward a codified design of recycled aggregate concrete structures: Background for the new fib Model Code 2020 and Eurocode 2,” *Struct. Concr.*, vol. 22, no. 5, pp. 2916–2938, Oct. 2021, doi: 10.1002/SUCO.202000512.
- [64] “Norme NF EN 1097-2, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation, ICS : 91.100.15.” p. P 18-650-2, Accessed: Jan. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10972/essais-pourdeterminer-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-de-gran/fa163871/35506>.
- [65] “Norme NF EN 1097-1, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 1 : Détermination de la résistance à l’usure (micro-Deval), ICS : 91.100.15.”

- p. P 18-650-1, Accessed: Jan. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10971/essais-pour-determiner-lescaracteristiques-mecaniques-et-physiques-des-gra/fa163865/37734>.
- [66] S. C. Angulo, C. Ulsen, V. M. John, H. Kahn, and M. A. Cincotto, “Chemicalmineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 721–730, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.07.009.
- [67] “Norme NF EN 933-11, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Partie 11 : Essai de classification des constituants de gravillons recyclés, ICS : 91.100.15.” p. P 18-622-11, Accessed: Jan. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-93311/essais-pour-determiner-lescaracteristiques-geometriques-des-granulats-part/fa160044/33401>.
- [68] “Norme NF P18-545, Granulats - Éléments de définition, conformité et codification, ICS : 91.100.15.” Accessed: Jan. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p18545/granulats-elements-dedefinition-conformite-et-codification/fa164857/37796>.
- [69] S. Devoie, Z. Zhao, F. Michel, and L. Courard, “Utilisation des sables et granulats recyclés dans le béton préfabriqué: comparaison des exigences réglementaires et echniques en Europe,” 2018, no. Conférence Internationale Francophone NoMaD.