

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-SKIKDA

جامعة 20 أوت 1955

Faculté de technologie

كلية التكنولوجيا

Département de génie civil

قسم الهندسة المدنية

Référence : D012123013D

المرجع : D012123013D



Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat L.M.D en génie civil

Option : Géotechnique

Comportement mécanique des sols compactés

Présentée par :

DIAF Nasreddine

Sous la direction du : Pr. HIDJEB Mustapha

Devant le jury compose de :

Président	MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur	HIDJEB Mustapha	Professeur	Université de Skikda
Examineur	BENSEBTI Salah	M.C classe A	Université de Constantine
Examineur	MENDJEL Djanette	M.C classe A	Université de Skikda

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Allah pour son aide dans l'accomplissement de ce travail. Je tiens à adresser mes plus vifs et sincères remerciements à Monsieur HIDJEB Mustapha, directeur de thèse et professeur à l'université de Skikda, pour avoir accepté de diriger ce travail de recherche. Merci de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, merci aussi pour vos encouragements à toujours faire mieux et pour la confiance que vous m'avez accordée tout au long de la période de thèse.

Je voudrais également adresser mes vifs remerciements au Président du Jury le Professeur MESSAST Salah de l'Université de Skikda qui a accepté de juger ce travail.

Je tiens également à remercier vivement tous les membres du jury, le Docteur MENDJEL Djanette et le Docteur BENSEBTI Salah, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour avoir accepté de participer au jury pour l'évaluation de cette thèse.

Merci aux mes collègues, collègues doctorants, post doctorants, pour toutes les expériences vécues ensemble au laboratoire et en dehors. Merci à Djamil, Hocine, Brahim, Hamza, Mohamed, Salah.

A mon épouse, mes enfants, ma sœur et mes frères, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance de m'avoir accordé une grande attention, amour, encouragement, et aide afin d'accomplir mes études

Enfin, pour leur soutien inconditionnel et très précieux de tous les instants, j'associe ce travail très particulièrement à mes parents, ma mère et mon père, la source d'affection et d'amour.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Résumé

Le laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS), coproduit de l'industrie sidérurgique, est devenu depuis quelque année de plus en plus recommandé comme matériau de stabilisation des sols en tant que liant hydraulique alternatif aux produits traditionnels tel le ciment (OPC). L'objectif principal dans le présent travail est d'étudier le comportement d'une argile limoneuse stabilisée avec respectivement 0, 3, 6, 9 et 12 % de GGBS (par poids de sol sec) et 1 % de chaux vive utilisée comme activant.

L'influence du composite (GGBS-chaux) sur le comportement immédiat du sol (Argile limoneuse) est étudiée en examinant les limites d'Atterberg, la masse volumique sèche maximale (ρ_{OPN}), la teneur en eau optimale (W_{opn}) et l'indice portant immédiat (CBR). L'évolution, à différentes périodes de cure (1, 7 et 28 jours), des caractéristiques mécaniques du sol traité, à savoir la résistance à la compression simple non confinée (USC), le module d'élasticité (E), la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (ϕ) est également étudiée.

Les résultats obtenus montrent que l'accroissement du GGBS, jusqu'à un dosage de 9 %, entraîne une augmentation, de la teneur en eau optimale (W_{opn}), de la résistance à la compression non confinée (UCS), du module d'élasticité (E) et des paramètres de résistance au cisaillement et paradoxalement une diminution de l'indice de plasticité (I_p) et de la masse volumique sèche maximale (ρ_{OPN}) a été observée.

Mots-clés : stabilisation, argile limoneuse, GGBS, chaux, plasticité, paramètres de résistance.

Abstract

Ground granulated blast furnace slag (GGBS), a co-product of the steel industry, has for some years become increasingly recommended as a soil stabilization material as an alternative hydraulic binder to traditional products such as cement (OPC). This work investigates the behavior of a silty clay stabilized with 3, 6, 9, and 12 % of ground granulated blast-furnace slag (GGBS), respectively, and 1 % of quicklime used as an activator.

The influence of the composite (Quicklime - GGBS) on the immediate behavior of the silty clay is studied by examining the Atterberg limits, the maximum dry density, the optimum moisture content, and the immediate bearing index.

The evolution, at different curing periods (1, 7, and 28 days), of the mechanical characteristics of the treated soil, namely unconfined compressive strength, cohesion, and internal angle of friction is also studied. The increase, up to a dosage of 9%, of the GGBS content, leads to an increase in the optimum moisture content, the immediate bearing index, the unconfined compressive strength, the modulus of elasticity (E) and shear strength parameters. Paradoxically, a decrease in the plasticity index and the maximum dry density was observed.

Keywords: Stabilization, silty clay, GGBS, quicklime, plasticity, strength parameters

ملخص:

خبث فرن الصهر المحبب المفتث، منتج مشترك في صناعة الصلب، أصبح موصى به بشكل متزايد لعدة سنوات كمواد لاستقرار التربة كونه رابطة هيدروليكية بديلة للمنتجات التقليدية مثل الاسمنت. الهدف الرئيسي في العمل الحالي هو دراسة سلوك الطين الغريني المستقر باستخدام 0، 3، 6، 9 و12٪ من خبث فرن الصهر (بوزن التربة الجافة) و1٪ من الجير الحي المستخدم كمنشط. تمت دراسة تأثير المركب (خبث فرن الصهر-الجير) على السلوك المباشر للتربة (الطين الغريني) من خلال فحص حدود Atterberg، وأقصى كثافة جافة، ومحتوى الماء الأمثل، وتحمل المؤشر الفوري. تطور الخصائص الميكانيكية للتربة المعالجة في فترات معالجة مختلفة (1 و7 و28 يوماً)، وهي مقاومة الضغط البسيطة غير المقيدة، ومعامل المرونة، والتماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي، تمت دراستها أيضاً.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الزيادة في خبث فرن الصهر المحبب المفتث، حتى الجرعة 9٪، تؤدي إلى زيادة في محتوى الماء الأمثل، في مقاومة الانضغاط غير المحصورة، في معامل المرونة واعدادات مقاومة القص في حين لوحظ انخفاض في مؤشر اللدونة وأقصى كثافة جافة.

الكلمات المفتاحية: الاستقرار، الطين الغريني، خبث فرن الصهر المحبب المفتث، الجير، اللدونة، اعدادات المقاومة.

Table des matières

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	4
ملخص.....	5
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	18
Notations et abréviations.....	19
Introduction générale.....	22

Chapitre 1 : Les sols argileux

1.1. Introduction.....	25
1.2. Composition du sol.....	25
1.3. Structure des minéraux argileux.....	26
1.4. Type des minéraux argileux.....	27
1.4.1. Groupe Kaolinite.....	28
1.4.2. Groupe Smectite.....	29
1.4.3. Groupe Illite.....	30
1.5. Caractéristiques des minéraux argileux.....	31
1.5.1. La chimie de surface.....	32
1.5.2. Capacité d'échange cationique (CEC).....	32
1.5.3. L'espace basal-d.....	33
1.6. Propriétés mécaniques des sols argileux.....	34
1.6.1. Plasticité et consistance.....	34
1.6.2. Compactage.....	35
1.6.3. Résistance au cisaillement.....	37
1.6.4. Gonflement.....	37
1.7. Conclusion.....	39

Chapitre 2 : Les applications du GGBS

2.1. Introduction.....	40
2.2. Production du GGBS.....	40

Table des matières

2.2.1. Génération du laitier granulé.....	40
2.2.2. Granulation.....	40
2.2.3. Processus de broyage.....	41
2.3. Caractérisations physico-chimiques du laitier granulé.....	42
2.3.1. Structure	42
2.3.2. Activité hydraulique.....	42
2.3.3. Compositions chimiques.....	42
2.4. Activation chimique du GGBS.....	43
2.4.1. L'activation calcique.....	44
2.4.2. L'activation par le ciment Portland (PC).....	45
2.4.3. L'activation alcaline.....	46
2.4.4. L'activation sulfatique.....	47
2.5. Mécanismes de réactions dans le système (Argile- Chaux- GGBS).....	47
2.5.1. Réaction Argile – Chaux	47
2.5.1.1. Flocculation des argiles.....	47
2.5.1.2. Modification le pH du milieu environnant.....	49
2.5.2. Réaction GGBS – Chaux	51
2.5.2.1. Activation du GGBS.....	51
2.5.2.2. Produits d'hydratation du GGBS.....	51
2.5.3. Réaction pouzzolanique dans le système Argile - Chaux – GGBS	53
2.6. Utilisations du GGBS avec les différents types de sols.....	56
2.6.1. Les sols gonflants.....	56
2.6.1.1. Effets du GGBS sur les propriétés des sols sulfatés stabilisés à la chaux.....	56
a) Effets du GGBS sur le gonflement.....	56
b) Effets du GGBS sur la résistance à la compression simple non confiné (USC)....	59

2.6.1.2. Effets du GGBS sur les propriétés des sols sulfatés acides (ASS) stabilisés à la chaux.....	60
a) Effet du GGBS sur l'évolution du pH environnant.....	61
b) Evolution de la résistance à la compression simple non confiné (USC).....	63
2.6.2 Les sols contaminés.....	67
2.6.2.1. Effet du GGBS sur la lixiviation des sols contaminés.....	68
2.6.2.2. Effet du GGBS sur l'UCS des sols contaminés.....	70
2.6.3. Les argiles molles.....	72
2.6.3.1.Effet du GGBS sur les propriétés microstructurales.....	72
2.6.3.2.Evolution de la résistance à la compression simple non confinée (UCS).....	75
2.6.4. Les sols inondés.....	78
2.6.4.1. Evolution de la durabilité et la résistance (UCS).....	79
2.6.4.2. Effet du GGBS sur la capacité d'absorption d'eau.....	80
2.7. Conclusion.....	82
Chapitre 3 : Matériaux et Méthodes	
3.1. Introduction.....	83
3.2. Matériaux.....	83
3.2.1. Le sol étudié.....	83
3.2.1.1. Analyse chimique.....	83
3.2.1.2. Classification minéralogique.....	83
a) Méthode de Casagrande.....	84
b) Méthode du coefficient d'Activité (A).....	84
3.2.1.3. Classification géotechniques.....	85
3.2.1.4. Classification selon le guide de terrassement routier (GTR).....	87
3.2.2. Laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS).....	87
3.2.3. L'activant (chaux vive).....	87

3.3. Méthodes.....	88
3.3.1 Limites d'Atterberg.....	88
3.3.1.1. Détermination la limite de liquidité (W_L).....	88
3.3.1.2. Détermination la limite de plasticité (W_p).....	88
3.3.1.3. Détermination l'indice de plasticité (I_p).....	89
3.3.1.4. Détermination l'indice de consistance (I_c).....	89
3.3.2. Caractéristiques de compactage.....	89
3.3.2.1. Préparation des échantillons.....	89
3.3.2.2. Exécution de l'essai.....	90
3.3.3. Indice portant immédiat (IPI).....	90
3.3.3.1. Préparation des éprouvettes.....	90
3.3.3.2. Exécution du poinçonnement.....	91
3.3.4. Résistance à la compression simple non confinée (UCS).....	91
3.3.4.1. Préparation des éprouvettes.....	91
3.3.4.2. Conservation des éprouvettes.....	92
3.3.4.3. Ecrasement des éprouvettes.....	92
3.3.5. Détermination les paramètres de résistance au cisaillement (C, \emptyset).....	92
3.3.5.1. Préparation des éprouvettes.....	92
3.3.5.2. Conservation des éprouvettes.....	93
3.3.5.3. Réalisation de l'essai.....	93
3.3.6. Désignation des sols testés.....	93
3.4. Conclusion.....	94

Chapitre 4 : Résultats et Interprétations

4.1. Introduction.....	95
4.2. Les limites d'Atterberg.....	95
4.3. Effet du GGBS sur le compactage.....	97
4.4. Effet du GGBS sur la portance.....	100
4.5. Evolution de la résistance à la compression non confinée.....	101
4.6. Evolution du module d'élasticité (E).....	105
4.7. Corrélation entre E et UCS.....	108

Table des matières

4.8. Evolution de la résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande.....	109
4.8.1. Evolution de la cohésion (C).....	112
4.8.2. Evolutions de l'angle de frottement interne (ϕ).....	113
4.9. Conclusion.....	114
Conclusion et perspectives.....	116
Références bibliographiques.....	119

Liste des figures

Figure 1.1 : Composants du sol dans une proportion idéale. (Kalev et Toor, 2018).....25

Figure 1.2 : La feuille tétraédrique. T, cations tétraédriques ; Oxa, atomes d'oxygène apicaux ; O_{xb}, atomes d'oxygène basaux (Brigatti et al. 2013).....26

Figure 1.3 : Structure de la feuille octaédrique (Schoonheydt et al. 2018).....27

Figure 1.4 : Modèles de structures 1: 1, association de feuilles T et O (Schoonheydt et al. 2018).....27

Figure 1.5 : Modèle de structure 2 :1, T, cations tétraédrique ; O, cations Octaédrique (Brigatti et al, 2013).....28

Figure 1.6 : Feuilles tétraédriques et octaédriques, couches de TO (Kaolinite) et particules de minéraux argileux (Tournassat et al, 2015).....28

Figure 1.7 : La figure présente deux couches de kaolinite. Les sphères blanche, rouge, violette et jaune représentent respectivement des atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'aluminium et de silicium (Hu et Michaelides, 2010).....29

Figure 1.8 : Structure de la smectite (Tournassat et al. 2015).....29

Figure 1.9 : Cations échangeables dans les minéraux argileux (Aboudi Mana et al, 2017).....30

Figure 1.10 : Vue de côté d'une smectite dioctaédrique à échange de Na⁺ avec substitution hétérovalente isomorphe dans la feuille octaédrique avec trois couches de molécules H₂O dans la région inter-lamellaire le long des cations échangeables environnants (Johnston, 2017).....30

Figure 1.11 : Structure des illites (Dayal, 2017).....31

Figure 1.12 : Surface hydroxyle et siloxane de la kaolinite (Schoonheydt et Johnston, 2013).....32

Figure 1.13 : Une particule de type smectite (Schoonheydt et Johnston, 2013).....33

Figure 1.14 : Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité d'après Casagrande (Wagner, 2013).....35

Figure 1.15 : Courbe d'essai standard de compactage Proctor pour un schiste marneux micacé (Proctor, 1933 cité par Das, 1998).....36

Figure 1.16 : Effet du compactage sur la structure des sols argileux (Lambe, 1958).....	36
Figure 1.17 : Courbes typiques de contrainte-déformation avec résistance maximale et résiduelle au cisaillement (Wagner, 2013).....	37
Figure 1.18 : Relation approximative entre la teneur en pourcentage massique de minéraux de smectite de la pression de gonflement pour une argile non perturbée mécaniquement avec un pourcentage élevé de particules de la taille de l'argile (Pusch et al, 1987).....	38
Figure 2.1 : Représentation schématique d'un haut fourneau (tiré de civil marin, cité par Salhi, 2007).....	41
Figure 2.2 : Obtention du laitier granulé par le procédé de granulation (Cherfa et al, 2011).....	41
Figure 2.3 : Diagramme de Keil (Rossi et al, 2014).....	43
Figure 2.4 : Domaine de stabilité du gel d'alumine (Lamberet et al, 2008 cité par Houzé, 2013).....	44
Figure 2.5 : Développement de la résistance à la compression des pâtes activées (Kim et al. 2013).....	45
Figure 2.6 : Variation du pH des pâtes durcies à l'eau avec le temps (Gu et al. 2014).....	45
Figure 2.7 : Développement d'UCS des pâtes activées (Jeong et al. 2016).....	46
Figure 2.8 : Développement de la résistance à la compression des pâtes de ciment Portland et de laitier activé par Na ₂ SO ₄ (Rashad et al. 2013).....	47
Figure 2.9 : Schéma démontrant l'échange de cations dans les sols, qui se produisent immédiatement lors de l'introduction d'un liant calcique (Sargent, 2015).....	48
Figure 2.10 : Observation à la loupe binoculaire de grumeaux formés à partir du limon de Meaux après chaulage à 1 % (Cabane, 2004).....	48
Figure 2.11 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive (GTS, 2000).....	49
Figure 2.12 : Variation du pH d'une solution de Ca(OH) ₂ dans l'eau en fonction de la teneur en chaux (Marrot, 2010 citée par Nguyen, 2015).....	49

Figure 2.13 : Valeurs de pH pour différentes teneurs en chaux (Kavak et Bilgen, 2016).....	50
Figure 2.14 : Diagramme des valeurs de pH des mélanges sol-GGBS-chaux (Rabbani et al. 2012).....	50
Figure 2.15 : Développement de la résistance à la compression des pâtes activées (Kim et al. 2013).....	51
Figure 2.16 : Grain de laitier avant et après l'hydratation (Veith, 2000).....	52
Figure 2.17 : Analyse au MEB effectuée sur le Kaolinite stabilisé Par le composite (OPC-GGBS) après 7 jours de traitement (Keramatikerman et al. 2018).....	53
Figure 2.18 : MEB d'un composite (GGBS-chaux-argile) durci à 28 jours montrant la formation de produits cristallins à base de ciment après les réactions pouzzolaniques (Keramatikerman et al. 2016).....	54
Figure 2.19 : Micrographies d'Engclay (85% de kaolin et 15% de bentonite en poids de sol sec) avec 10% de chaux et 10% de GGBS à 90 jours de durcissement (James et al. 2008).....	54
Figure 2.20 : Représentation schématique de la structure d'un sol fin solidifié au-delà de 90 jours de cure (Cabane, 2004).....	55
Figure 2.21 : Résultats des analyses XRD (Corrêa-Silva et al, 2020).....	56
Figure 2.22 : Image au MEB illustre la présence d'une petite quantité d'ettringite en forme d'aiguille (Obuzor et al. 2012).....	57
Figure 2.23 : L'influence du GGBS sur l'expansion linéaire d'une kaolinite stabilisé à la chaux, durcie à l'état humide pendant 28 jours et imbibée dans une solution de Na ₂ SO ₄ à 4,2 % (Wild et Tasong, 1999).....	58
Figure 2.24 : Potentiels de gonflement pour CS, CS + 5 L et CS + 5 L + 6S soumis à différentes concentrations de sulfate (Celik et Nalbantoglu. 2013).....	58
Figure 2.25 : UCS en fonction de la teneur en laitier pour les cylindres de composite (kaolinite-chaux-GGBS) avec et sans : (a) 1 ; (b) 2 ; (c) 3% équivalent SO ₃ de gypse et durci pendant 7 et 28 jours à 30 ° C et 100% d'humidité relative (Wild et al, 1998).....	59

Figure 2.26 : UCS en fonction de la teneur en GGBS pour des cylindres de composite (argile Kimmeridge-chaux-GGBS) contenant un dosage en stabilisant total (TS) (chaux + GGBS) de : (a) 5 ; (b) 6 ; (c) 8 ; (d) 10% en poids et durci pendant 7 et 28 jours à 30 ° C et 100% d'humidité relative (Wild et al. 1998).....	60
Figure 2.27 : pH de l'ASS synthétique traité avec 10% en poids de chaux et 0-25% en poids de GGBS durci dans divers environnements de durcissement pendant 180 jours (Islam et al. 2013).....	61
Figure 2.28 : pH de l'ASS synthétique de 0 à 7% en poids de pyrite traitée avec 10% en poids de chaux et de 0 à 25% en poids de GGBS à différentes périodes de durcissement (Islam et al. 2014).....	62
Figure 2.29 : Influence de la pyrite sur le développement de l'UCS après 3 mois de durcissement (Islam et al. 2012).....	63
Figure 2.30 : Variation de l'USC avec durcissement d'un ASS synthétique traité par 10% en poids de chaux et 0-25% en poids de GGBS durci dans divers environnements de durcissement (Islam et al, 2013).....	64
Figure 2.31 : USC d'ASS synthétique comprenant une teneur en pyrite de 0 à 7% en poids traitée avec 10% en poids de chaux et de 0 à 25% en poids de GGBS à différentes périodes de durcissement (Islam et al, 2014).....	65
Figure 2.32 : Modification d'USC avec durcissement pour l'ASS traité avec et différentes dosages de GGBS (L : chaux ; S : GGBS) et différentes teneurs en pyrite traitées (Islam et al, 2015).....	66
Figure 2.33 : Lixiviation du Cd et Ni dans 28 jours de cure dans des mélanges (chaux-GGBS) dosés à 10 % et 20 % (Kogbara et al. 2011).....	68
Figure 2.34 : Concentrations lessivées pour les boues d'argile contaminées au Zn traitées avec CaO-GGBS et MgO-GGBS par rapport à l'OPC (Zhang et al, 2021).....	69
Figure 2.35 : Valeurs UCS de la suspension d'argile contaminée au Zn traitée par MgO-GGBS par rapport à l'OPC (Zhang et al, 2021).....	70
Figure 2.36 : Effet de la teneur en GGBS sur le pic d'UCS de l'argile contaminée à 7% E10 après 28 jours de cure (Keramatikerman et al. 2018).....	71

Figure 2.37 : Variation de l'UCS du sol contaminé stabilisé par MgO seul et par MgO-GGBS (Jin et al, 2017).....	71
Figure 2.38 : Images MEB de 30 % d'argile stabilisée au GGBS avec un rapport C/G de 0,15 de 90 jours (Yi et al, 2014c).....	73
Figure 2.39 : Diffractogrammes DRX d'argile non stabilisée et d'argiles de 28 jours stabilisées par PC, CaO-GGBS et Ca(OH) ₂ – GGBS avec un rapport L/G de 0,20 (Yi et al, 2015b).....	73
Figure 2.40 : Micrographies électroniques à balayage typiques d'argiles stabilisées : (a) NaOH-GGBS de 90 jours ; (b) Na ₂ SO ₄ -CS-GGBS de 90 jours (Yi et al, 2014b).....	74
Figure 2.41 : Diffractogrammes DRX des argiles non stabilisées et stabilisées MgO-GGBS (Yi et al, 2016a).....	74
Figure 2.42 : UCS d'une suspension d'argile stabilisée contenant du liant (Li et al, 2022).....	75
Figure 2.43 : UCS des argiles stabilisées à 28 jours de durcissement (Yi et al, 2014c).....	76
Figure 2.44 : UCS des argiles stabilisées à 28 jours (Yi et Ni, 2018).....	76
Figure 2.45 : UCS des argiles stabilisées à 90 jours de durcissement (Yi et al, 2015a).....	76
Figure 2.46 : UCS de l'argile molle stabilisée par CaO-GGBS et par Ca(OH) ₂ – GGBS à 90 jours (Yi et al. 2015b).....	77
Figure 2.47 : UCS de l'argile molle stabilisée par MgO-GGBS à 90 jours (Yi et al. 2015b).....	77
Figure 2.48 : UCS de l'argile molle stabilisée par LS-GGBS avec une teneur en liant de 20 % (Xu et al, 2019).....	78
Figure 2.49 : UCS lors du trempage du LOC, stabilisé par 16% Chaux- 0% GGBS à 23% mc (Obuzor et al, 2011a).....	79
Figure 2.50 : UCS lors du trempage du LOC, stabilisé par 4% Chaux- 12% GGBS à 23% mc (Obuzor et al, 2011a).....	80
Figure 2.51 : Valeurs de l'indice de réduction de résistance (SRI) du LOC stabilisé après 4 jours de trempage complet dans l'eau (Obuzor et al, 2012).....	80

Figure 2.52 : Une comparaison de l'absorption d'eau dans les différentes compositions de mélanges de liants stabilisants à différentes teneurs en humidité de compactage (Obuzor et al, 2011b).....	81
Figure 2.53 : Image SEM des échantillons de test ; (c) formation de minéraux C-S-H, C-A-H et (D) formation de gel C-A-S-H (Khayat et al, 2019).....	81
Figure 3.1 : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Holtz, 1991).....	84
Figure 3.2 : Courbe granulométrique du sol étudié.....	86
Figure 3.3 : Courbe Proctor normale du sol étudié.....	86
Figure 4.1 : Effet de la teneur en GGBS sur les limites d'Atterberg.....	95
Figure 4.2 : Effet de la variation de la teneur en GGBS sur la masse volumique sèche.....	98
Figure 4.3 : Effet du laitier sur de la masse volumique sèche maximale.....	99
Figure 4.4 : Effet du dosage du GGBS sur la teneur en eau optimale.....	99
Figure 4.5 : Variation de l'effort de pénétration en fonction de l'enfoncement pour les différentes teneurs en GGBS.....	100
Figure 4.6 : Evolution de l'indice portant immédiat en fonction des teneurs en GGBS.....	101
Figure 4.7 : Effet de la teneur en GGBS sur la résistance à la compression non confinée du sol après 1 jour de cure.....	102
Figure 4.8 : Effet de la teneur en GGBS sur la résistance à la compression non confinée du sol après 7 jours de cure.....	102
Figure 4.9 : Effet de la teneur en GGBS sur la résistance à la compression non confinée du sol après 28 jours de cure.....	102
Figure 4.10 : Courbes de variation d'UCS du sol traité et non traité après différentes périodes de cure.....	103
Figure 4.11 : Effet de la teneur en GGBS sur le module d'élasticité (E) après 1 jour de cure.....	105

Figure 4.12 : Effet de la teneur en GGBS sur le module d'élasticité (E) après 7 jours de cure.....	106
Figure 4.13 : Effet de la teneur en GGBS sur le module d'élasticité (E) après 28 jours de cure.....	106
Figure 4.14 : Evolution du module d'élasticité (E) du sol traité et non traité après différentes périodes de cure.....	107
Figure 4.15 : Corrélation entre E et UCS du sol traité.....	108
Figure 4.16 : Enveloppe de Mohr-Coulomb du sol non-traité.....	109
Figure 4.17 : Courbes enveloppes de Mohr-Coulomb, pour les différentes teneurs en GGBS, après 1 jour de cure.....	109
Figure 4.18 : Courbes enveloppes de Mohr-Coulomb, pour les différentes teneurs en GGBS, après 7 jours de cure.....	110
Figure 4.19 : Courbes enveloppes de Mohr-Coulomb, pour les différentes teneurs en GGBS, après 28 jours de cure.....	111
Figure 4.20 : Évolutions de la cohésion (C) de sol non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.....	112
Figure 4.21 : Évolution de l'angle de frottement de sol non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.....	113

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Composition chimique du laitier granulé (NF EN 14227-2, 2005).....	42
Tableau 3.1 : Analyse chimique du sol étudié.....	83
Tableau 3.2 : Coefficient d'activité de différents minéraux.....	85
Tableau 3.3 : Propriétés physico-chimiques et mécaniques du sol étudié.....	86
Tableau 3.4 : Caractéristiques physico- chimique du GGBS.....	87
Tableau 3.5 : Caractéristiques physico- chimique de la chaux vive.....	88
Tableau 3.6 : Formulation des composites (Sol-GGBS-CaO-W) pour l'essai Proctor normal.....	90
Tableau 3.7 : Formulation des composites (sol-GGBS-CaO-W _{opn}) pour l'essai CBR.....	91
Tableau 3.8 : Formulation des composites (sol-GGBS-CaO-W _{OPN}) pour l'essai de compression simple non confinée.....	92
Tableau 3.9 : Formulation des composites (Sol-GGBS-CaO-W _{OPN}) pour l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.....	93
Tableau 3.10 : Désignation des sols testés.....	93
Tableau 4.1 : Résultats des essais des limites d'Atterberg.....	95
Tableau 4.2 : Taux de diminution de l'indice de plasticité (Ip) pour les différents paliers de variation d'ajouts de GGBS.....	96
Tableau 4.3 : Résultats des essais de compactage.....	97
Tableau 4.4 : Résultats des essais CBR.....	100
Tableau 4.5 : Valeurs d'UCS du sol traité et non-traité et à différentes teneurs en GGBS pour différentes périodes de cures.....	103
Tableau 4.6 : Valeurs des modules d'élasticités de sol traité et non-traité à différents dosages en GGBS pour les différentes périodes de cure.....	107
Tableau 4.7 : Valeurs de la cohésion de sol non-traité et traité (τ) en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.....	112
Tableau 4.8 : Valeurs de l'angle de frottement interne de sol non-traité et traité (τ) en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.....	113

Notations et abréviations

GGBS	«Ground Granulated Blast Slag » « Laitier de haut fourneau granulé broyé ».
CaO	Chaux vive
PC	Ciment Portland
OPC	Ciment Portland ordinaire
T	La feuille tétraédrique
O	La feuille octaédrique
TO	Couche de feuilles tétraédriques et octaédriques (type 1:1)
TOT	Couche de deux feuilles tétraédriques et une feuille octaédrique (type 2 :1)
O _{xa}	Atomes d'oxygène apicaux
O _{xb}	Atomes d'oxygène basaux
CEC	Capacité d'échange cationique
pH	Potentiel Hydrogène-Log10 (H ⁺ concentration)
H ₂ O	Molécules d'eau
CO ₂	Dioxyde de carbone
Ca(OH) ₂	La portlandite
OH ⁻	Ions d'hydroxydes
CaSO ₄ .2H ₂ O	Gypse
FeS ₂	Pyrite
NaOH	Hydroxydes de sodium
Na ₂ . nSiO ₂	Silicate de sodium
Na ₂ CO ₃	Carbonate de sodium
CaSO ₄	Le sulfate de calcium
Na ₂ SO ₄	Le sulfate de sodium
Na ⁺	Cations de Sodium
Si ⁺	Cations de Silicium
Ca ²⁺	Cations de Calcium
Li ⁺	Cations de Lithium
K ⁺ ,	Cations de Potassium
Fe ²⁺ ,	Cations de Fer
Al ⁺³	Cations d'Aluminium
Mg ⁺	Cations de Magnésium
-d	Espacement basal

Notations et abréviations

I_p	Indice de plasticité
I_c	Indice de consistance
W_n	Teneur en eau naturel
W_L	Limite de liquidité
W_P	Limite de plasticité
W_{opt}	Teneur en eau optimale
ρ_{OPN}	Densité sèche maximale
Kg	Kilogramme (Unité de poids)
mm	Millimètre (Unité de longueur)
μm	Micromètre (Unité de longueur)
$^{\circ}\text{C}$	Température
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C-A-H	Aluminate de calcium hydraté
C-A-S-H	Aluminosilicate de calcium hydraté
AFm	Monosulfate d'alumino-ferrite
UCS	Résistance à la compression simple non confinée
MEB	Microscope électronique à balayage
DRX	Analyses de diffraction des rayons X
ppm	La partie par million
ASS	Sols sulfatés acides
Zn	Zinc
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
Cd	Cadmium
Ni	Nickel
Pb	Plomb
S/S	Solidification/Stabilisation
As	Un oligo-élément d'origine naturelle
MgO	Magnésium réactive
E10	Essence Ethanolique
CS	Laitier de carbure
LS	Laitier de poche
LOC	Argile Lower Oxford
A	Coefficient d'Activité

Notations et abréviations

CBR	California Bearing Ratio
VBs	Valeur au bleu de méthylène
IPI	Indice portant immédiat
SC	Silty Clay « Argile Limoneuse »
I_b	Indice de basicité
L	Longueur
C	Cohésion
\emptyset	Angle de frottement interne
D	Diamètre
Dmax	Dimension maximale
τ	Contrainte de cisaillement
Δh	Déplacement horizontal
UU	Cisaillement direct non consolidé-non drainé
E	Module d'élasticité

Introduction générale

La volonté d'aménagement du territoire conduit au développement des infrastructures telles que routes, autoroutes, voies de chemins de fer ou plates-formes industrielles dont l'implantation requiert des travaux de terrassement. Compte tenu de la nature des terrains rencontrés, ces structures sont fréquemment réalisées de plus en plus à partir de sols argileux, qui sont souvent le siège de déformations verticales et horizontales engendrant parfois de sérieux problèmes de stabilité et de tassement et entraînant ainsi des préjudices économiques très importants.

Pour éviter les contraintes associées au transport de matériaux sur de longues distances, c'est-à-dire une augmentation des coûts et des empreintes carbone, et pour répondre aux caractéristiques mécaniques demandées des sols à faible portance, la technique de stabilisation des sols s'est avérée être une option rentable et plus que nécessaire.

La stabilisation des sols argileux, par ajout de liants hydrauliques traditionnels tel le ciment, la chaux et les cendres volantes, est une pratique assez ancienne. Cependant, la production de ces matériaux soulève des préoccupations environnementales majeures compte tenu de leur consommation d'énergie, de l'épuisement des ressources et des niveaux d'émission de dioxyde de carbone (CO₂).

A cet égard, il existe une tendance croissante à remplacer les stabilisateurs traditionnels par des matériaux de sous-produits industriels ou autres à utiliser dans le traitement des sols, soit pour des considérations de coût, soit pour la préservation de l'environnement, soit pour l'amélioration des propriétés d'ingénierie des matériaux. L'un de ces matériaux est le laitier de haut fourneau granulé broyé GGBS (Ground Granulated Blast Furnace Slag), un sous-produit de l'industrie sidérurgique.

Aujourd'hui, la demande croissante en GGBS n'est pas seulement due à des raisons économiques et techniques, mais également due à des soucis environnementaux associés à sa production. Des études comparatives entre les impacts environnementaux associés à la production de GGBS et ceux associés à la production de ciment portland ont montré que la production d'une tonne de GGBS pour une consommation d'énergie de 1300 MJ donne 0,07 tonne d'émissions de CO₂ seulement tandis que la production d'une tonne de ciment Portland engendre 0.95 tonne d'émissions de CO₂ et une consommation élevée d'énergie de 5000 MJ.

En géotechnique routière, l'application de laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) est à ce jour peu utilisée. Cependant, l'utilisation du GGBS en tant que composant principal du ciment activé par des alcalis ou en remplacement partiel du ciment Portland, est largement pratiquée.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de promouvoir l'utilisation du GGBS dans le domaine du génie civil et des travaux publics, ce qui réduira l'utilisation des liants traditionnels comme le ciment et la chaux. En terme technique, l'objectif est également d'évaluer la puissance hydraulique du GGBS et de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre les actions chimiques et l'évolution des paramètres physiques et mécaniques de l'argile limoneuse dans les ouvrages routiers et les remblais.

La thèse est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre donne un aperçu des connaissances actuelles sur les sols argileux. Ce chapitre rappelle succinctement les trois grands groupes de minéraux argileux (kaolinite, illite, smectite) ainsi que quelques autres minéraux de cette famille. Ce chapitre résume les types, la chimie structurale et les caractéristiques de divers minéraux argileux. Enfin, certaines propriétés mécaniques des sols argileux, notamment leur consistance, leur compactage, leur résistance au cisaillement et leur gonflement, sont également présentés.

Le deuxième chapitre a consacré à la présentation de l'état des connaissances sur le comportement physico-chimique et mécanique des sols argileux traités au GGBS avant, pendant, et après exposition à une humidification à court, à moyen et à long terme. Dans une première partie, les principales caractéristiques physico-chimiques du laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) en tant que liant hydraulique routier sont présentées. La deuxième partie de ce chapitre rappelle les principaux mécanismes physico-chimiques à l'origine de l'amélioration des sols traités au composite chaux-GGBS ainsi que leur influence sur leurs propriétés géotechniques et microstructurales. Enfin, dans une troisième partie, une synthèse bibliographique détaillée sur les applications du GGBS avec différents types de sols est également présentée.

Le troisième chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux utilisés pour l'étude, ainsi que la démarche expérimentale suivie lors de ce travail. Ce chapitre procède, d'une part, à des séries d'essais expérimentaux chimiques, physiques et mécaniques, et d'autre part, à la présentation des différents modes de préparation des éprouvettes ainsi qu'à leur formulation.

Enfin, le dernier chapitre vise à analyser les résultats obtenus à partir de séries d'essais expérimentaux. L'influence du dosage des liants ajoutés (chaux-GGBS) sur le comportement du sol à court terme est étudiée en examinant les limites d'Atterberg, la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, l'indice portant immédiat. L'évolution, à différentes périodes de cure (1, 7 et 28 jours), des caractéristiques mécaniques du sol traité, à savoir la résistance à la compression simple non confiné (UCS), le module d'élasticité (E), la résistance au cisaillement, la cohésion (c) et l'angle de frottement, est également étudiée.

Chapitre 1

Les sols argileux

1.1. Introduction

Les sols argileux sont souvent le siège de déformations verticales et horizontales engendrant parfois comme dans le cas de barrages, de remblais et de routes ...etc, de sérieux problèmes de stabilité et de tassement entraînant des préjudices économiques très importants. Ainsi, la recherche sur les minéraux argileux a reçu une attention considérable en raison de leur prévalence naturelle, de leur réactivité, de leur faible coût, de leur nature non dangereuse lors de la manipulation.

Dans ce chapitre, on rappellera succinctement les trois grands groupes de minéraux argileux (kaolinite, illite , smectite) ainsi que quelques autres minéraux de cette famille. Ce chapitre résume les types, la chimie structurale et les caractéristiques de divers minéraux argileux. Enfin, dans une dernière partie, on présentera certaines propriétés mécaniques des sols argileux.

1.2. Composition du sol

Le sol est constitué d'un mélange de roches érodées, d'éléments nutritifs, d'organismes vivants, de matières organiques, d'eau, et d'air (Kalev et Toor, 2018). Un sol en parfait état contient environ 45% de matière solide, 5% de matière organique et 50% d'espaces interstitiels, lesquels occupent une proportion égale d'eau et d'air (Figure 1.1).

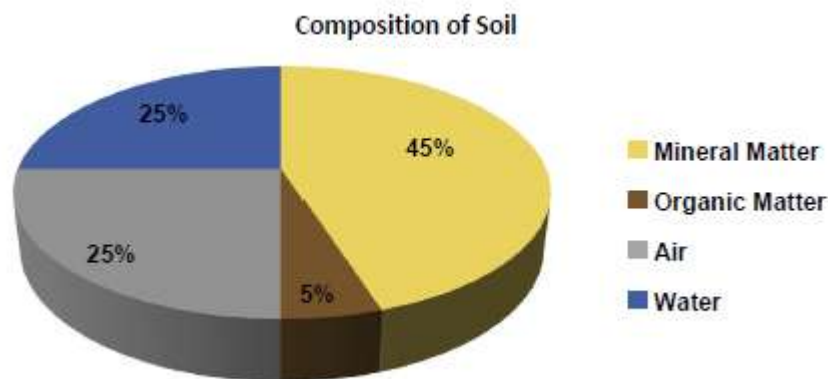


Figure 1.1 : Composants du sol dans une proportion idéale (Kalev et Toor, 2018).

D'une façon générale, le sol est constitué de quatre composants principaux : la matière minérale, la matière organique, l'air et l'eau. Les propriétés géotechniques et hydromécaniques du sol sont principalement déterminées par la proportion de différents paramètres tel, la texture, la porosité et les pores (Le Runigo, 2015).

Les minéraux silicatés tels que les argiles, le quartz, les micas et les feldspaths, représentent 95% des constituants de l'écorce terrestre (Mehenni, 2015). Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme de grains polygonaux, de lamelles pour les argiles et d'agrégats correspondant à des fragments de roches (Cabane, 2004). En revanche, les argiles et les micas, se caractérisant par leur structure en feuillets, appartiennent à la famille des phyllosilicates (Le borgne, 2010).

1.3. Structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux, substances cristallines très petites, sont des aluminosilicates en couches formés par l'altération chimique d'autres minéraux silicatés présents à la surface de la terre (Holtz et Kovacks, 1991).

Les particules minérales individuelles d'argile ressemblent à de minuscules plaques, composées de nombreuses feuilles de cristal, ayant une structure atomique répétitive (Ismadji et al. 2015). La structure atomique est constituée de feuilles octaédriques (ou alumines) et de feuilles tétraédriques (ou silice).

Une feuille tétraédrique (T) est une combinaison d'unités tétraédriques de silice, où chaque unité se compose d'un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène aux coins (Figure 1.2).

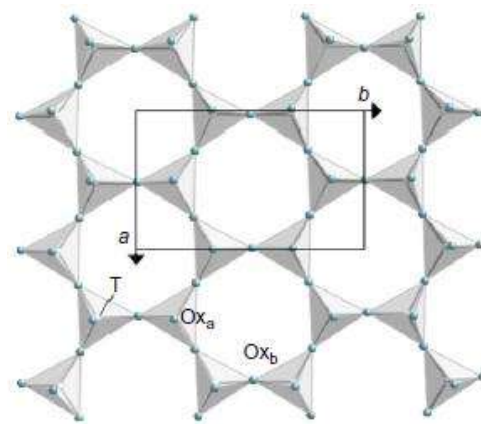


Figure 1.2 : La feuille tétraédrique. T, cations tétraédriques ;
O_{xa}, atomes d'oxygène apicaux ; O_{xb}, atomes
D'oxygènes basaux (Brigatti et al. 2013).

La feuille octaédrique (O) est une combinaison d'unités octaédriques dans laquelle chaque unité se compose de six oxygène ou hydroxyles renfermant un aluminium, un magnésium, ou un autre atome (Figure 1.3).

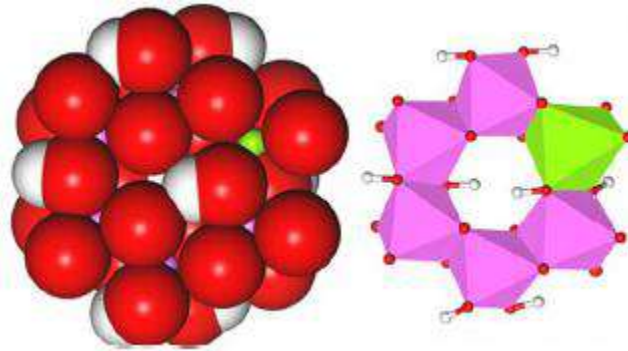


Figure 1.3 : Structure de la feuille octaédrique (Schoonheydt et al. 2018).

1.4. Types des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont constitués de deux feuillets de base empilés d'une façon caractéristique portant certains cations à la surface des feuillets. L'association d'une feuille octaédrique et d'une ou deux feuilles tétraédres forment une couche minérale d'argile.

De plus, les modes d'empilement des feuillets de base (tétraèdre-octaédrique, T-O) sont à l'origine de douzaine de minéraux argileux (Bibi et al. 2016 ; Cygan et al. 2012 ; Balan et al. 2014 ; Detellier et Schoonheydt, 2014). Les couches avec une seule feuille tétraédrique forment le type de couche 1: 1 ou TO (Figure 1.4), et les couches avec deux feuilles tétraédriques (de chaque côté de la feuille octaédrique) forment le type de couche 2: 1 (Figure 1.5) ou TOT (Tournassat et al. 2015 ; Theng, 2012).

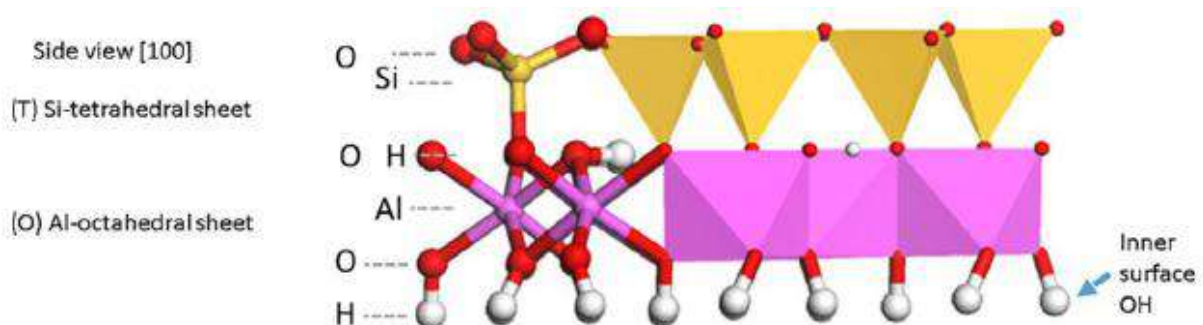


Figure 1.4 : Modèles de structures 1: 1, association de feuilles T et O (Schoonheydt et al. 2018)

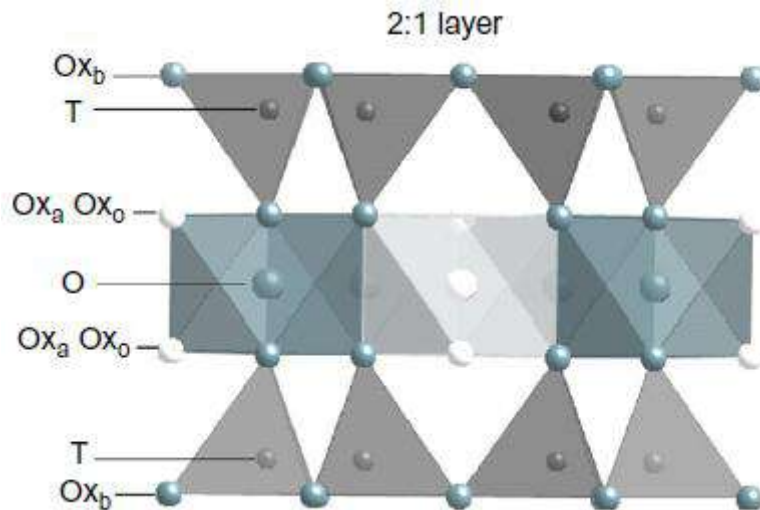


Figure 1.5 : Modèles de structures 2: 1, T, cations tétraédriques ;
O, cations octaédriques (Brigatti et al. 2013).

La kaolinite, la smectite et l'illite sont les grands groupes minéralogiques fréquemment retrouvés chez les argiles :

1.4.1. Groupe Kaolinite

Les minéraux de kaolin sont formés d'une succession d'unités alternées de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite) (Figure 1.6). Ils sont considérés comme des minéraux de type 1 :1 ou TO (Bibi et al. 2016 ; Tournassat et al. 2015 ; Detellier et Schoonheydt, 2014 ; Bentabol et al. 2007). Ils présentent différents types : kaolinite, dickite, nacrite et halloysite (Madejova et al. 2017).

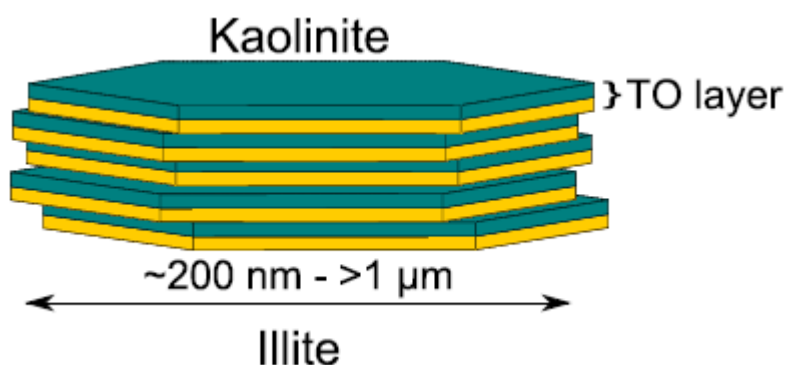


Figure 1.6 : Feuilles tétraédriques et octaédriques, couches de TO (Kaolinite)
et particules de minéraux argileux (Tournassat et al. 2015).

Les liens d'hydrogène rattachant les hydroxyles d'octaèdre avec les oxygènes de tétraèdre (Figure 1.7) permettent de maintenir sur l'ensemble des couches de base successives (Hu et Michaelides, 2010 ; Balan et al. 2014).

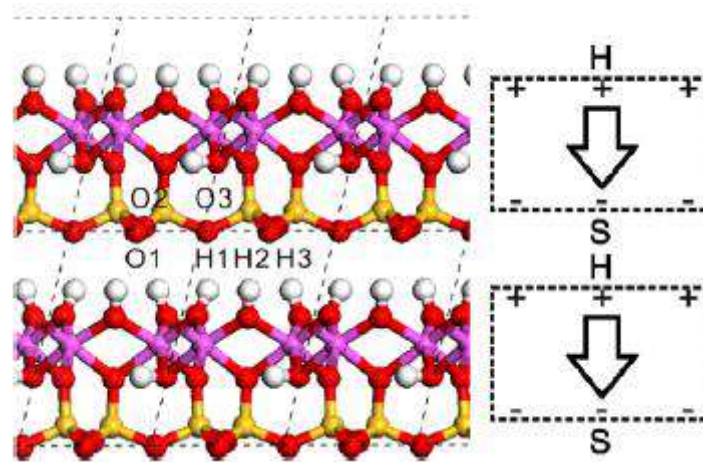


Figure 1.7 : La figure présente deux couches de kaolinite. Les sphères blanche, rouge, violette et jaune représentent respectivement des atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'aluminium et de silicium (Hu et Michaelides, 2010).

1.4.2. Groupe Smectite

Les minéraux argileux les plus étudiés du type 2: 1 sont les smectites. Ils ont des propriétés physiques et chimiques pratiquement opposées aux kaolinites (Ismadji et al. 2015). L'unité structurale de base de l'argile smectite (Figure 1.8) est une couche constituée de deux feuilles tétraédriques orientées vers l'intérieur avec une feuille octaédrique centrale en alumine (Dutta, 2018 ; Huggett, 2015). Ce groupe a la capacité de s'étendre et de contracter avec l'ajout ou la perte (par chauffage) d'eau et de certaines molécules organiques (Huggett, 2015 ; Emmerich, 2013).

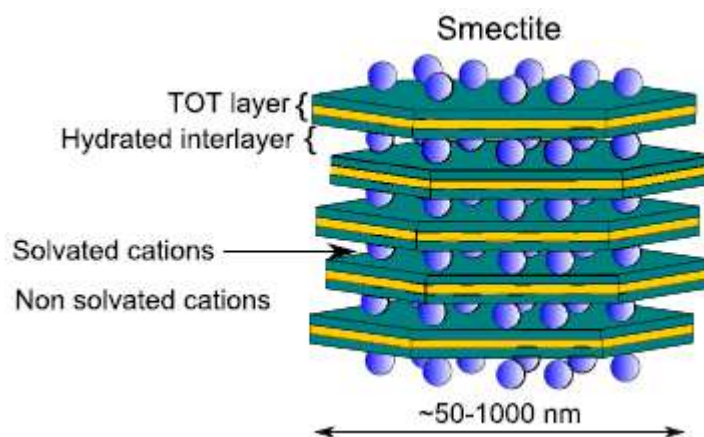


Figure 1.8 : Structure de la smectite (Tournassat et al. 2015).

En revanche, les smectites sont constitués de couches chargées négativement c'est-à-dire, la substitution isomorphe au sein des feuilles tétraédriques et octaédriques génère sur les

couches une charge négative qui est équilibrée par des cations échangeables hydratés (Figure 1.9) dans les espaces inter-couches (Figure 1.10) ou sur les surfaces minérales extérieures (Dutta, 2018 ; Aboudi Mana et al. 2017 ; Madejova et al. 2017).

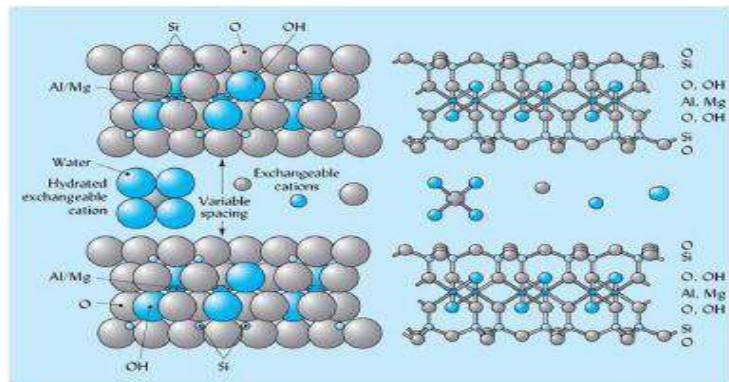


Figure 1.9 : Cations échangeables dans les minéraux argileux (Aboudi Mana et al. 2017).

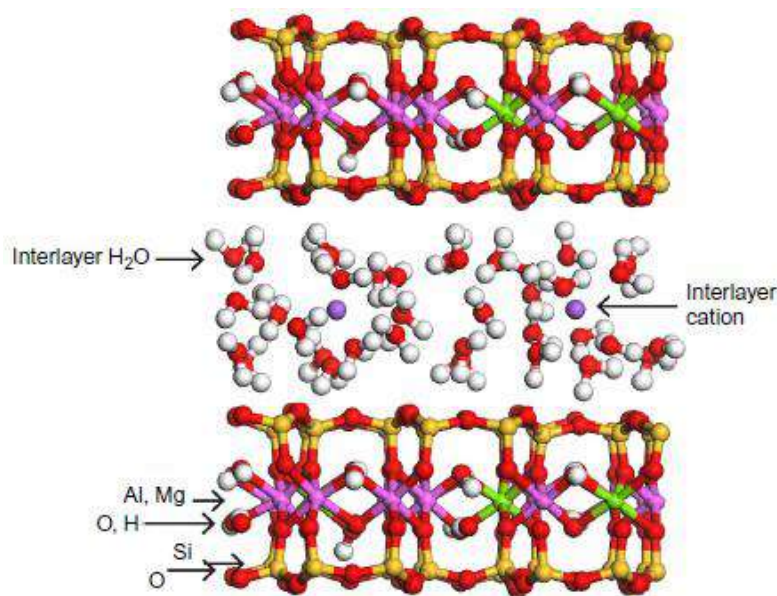


Figure 1.10 : Vue de côté d'une smectite dioctaédrique à échange de Na⁺ avec substitution hétérovalente isomorphe dans la feuille octaédrique avec trois couches de molécules H₂O dans la région inter-lamellaire le long des cations échangeables environnants (Johnston, 2017).

1.4.3. Groupe Illite

Le groupe illite comprend les micas hydratés, la phengite, la brammalite, la céladonite et la glauconite (sable d'argile verte), formé par la décomposition de certains micas et feldspaths (Ismadji et al. 2015). La structure fondamentale de minérales illites (Madejova et al. 2017 ;

Bibi et al. 2016 ; Thomas, 2001) est constituée de deux feuilles tétraédriques (T) avec une feuille octaédrique (O) prise en sandwich entre elles pour former un composite T-O-T, structure de type 2 :1 (Figure 1.11).

Les minéraux du groupe illite ont une structure similaire à celle de la montmorillonite, à l'exception du fait que les espaces entre les couches des illites sont reliées par un atome de potassium K^+ (Madejova et al. 2017 ; Mukherjee, 2013). Ainsi, les argiles Illite sont des argiles non extensibles en raison de la présence de cations inter-couches de K^+ (ou parfois de Ca^{+2} et de Mg) qui empêchent l'intrusion de molécules d'eau dans la structure de l'argile (Madejova et al. 2017 ; Mukherjee, 2013 ; S´rodon, 2013).

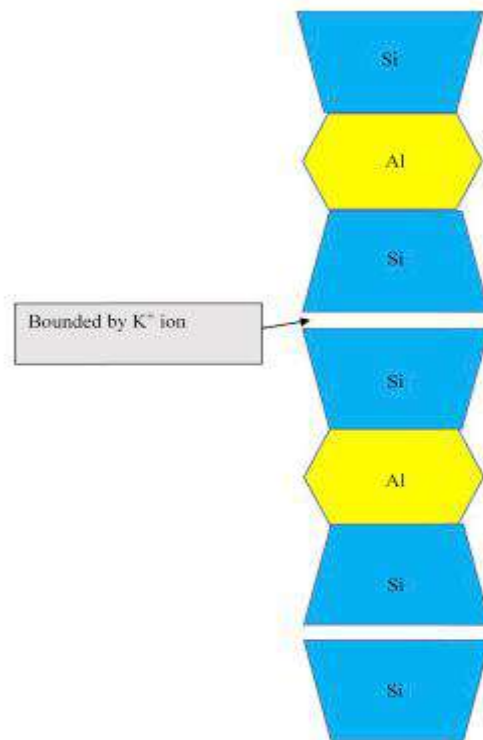


Figure 1.11 : Structure des illites (Dayal, 2017).

1.5. Caractéristiques des minéraux argileux

Les propriétés des minéraux argileux dépendent de la composition chimique et de la nature des atomes de surface, de l'étendue et du type de sites de défauts, de la charge de la couche et du type de cations échangeables. Le comportement et le rôle du minéral argileux dans toutes ses applications sont principalement dus à ses propriétés de surface, qui comprennent la chimie de surface, l'espacement-d (où d est la distance entre les deux surfaces) et la capacité d'échange de cations (Schoonheydt and Johnston, 2006).

1.5.1. La chimie de surface

La chimie de surface des minéraux argileux est en fonction de la surface siloxane et de la surface hydroxyle (Figure 1.12). La surface du siloxane est composée des atomes d'oxygène basaux du Si-tétraédrique. Elle est la surface principale des minéraux argileux 2: 1, tels que les smectites, tandis que la surface des minéraux argileux 1:1 comprend la surface du siloxane et la surface hydroxyle d'Al-octaédres (Ugochukwu, 2019).

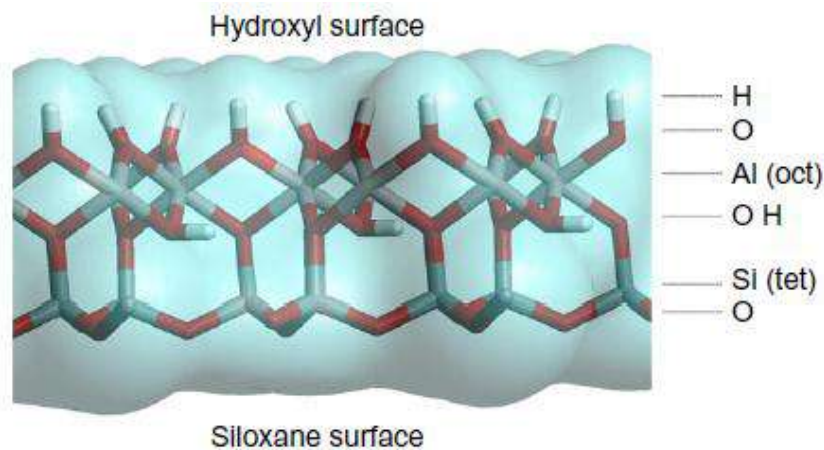


Figure 1.12 : Surface hydroxyle et siloxane de la kaolinite
(Schoonheydt et Johnston, 2013).

1.5.2. Capacité d'échange cationique (CEC)

L'échange de cations est la substitution des cations échangeables présents à l'origine à la surface d'un minéral argileux par d'autres types de cations en solution. Ainsi, la capacité d'échange cationique (CEC) est la quantité des cations qui peuvent être échangées par des autres cations à la surface d'un minéral argileux à un pH donné (Bergaya et al, 2013). En d'autres termes, la quantité spécifique totale de charge équilibrée par les cations échangeables est appelée CEC du minéral argileux (Tournassat et al, 2015).

Les minéraux argileux présentent deux types d'échanges cationiques :

- Des cations inter-foliaires : Ces échanges concernent plus particulièrement des minéraux argileux TOT (cas des smectites et illites). Elles sont caractérisées par les substitutions pouvant intervenir au sein des couches octaédriques et tétraédriques. En effet, le déséquilibre électrostatique résultant de ces substituants est compensé par une adsorption de cations inter-foliaires tels que Na^+ , Ca^{2+} , Li^+ , K^+ , Fe^{2+} , Al^{+3} (Le Runigo, 2008 ; Khattab, 2002 ; Lasledj, 2009).

- Des cations de bordure : Ces échanges concernent plus particulièrement des minéraux argileux T-O-T (cas des smectites et illites). Les sites d'échanges de ces cations dépendent du pH sont associés à la charge variable existant à la surface des argiles en fonction du pH du milieu environnant (Le Runigo, 2008).

Par ailleurs, la cinétique d'échange des cations dépend de la nature de l'argile, des concentrations d'ions, de la température, pH,...etc (Le Runigo, 2008). La capacité d'échange cationique (CEC) varierait selon le type d'argile : - Pour la Kaolinite la CEC est entre 0,05 et 0,1 meq/g ; - Pour l'illite la CEC est entre 0,2 et 0,5 meq/g ; - Pour la montmorillonite la CEC est de l'ordre de 1 meq/g (Lasledj, 2009).

En outre, la capacité des argiles à libérer (ou changer) leurs cations dépend de la valence et de la masse atomique du cation présent dans la solution, selon l'ordre croissant suivant : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$ (Mitchell, 1993 ; Holtz et Kovacks, 1991).

1.5.3. L'espace basal-d

L'espace basal des minéraux argileux (également connu sous le nom de distance intercouche) est en fonction de la charge de la couche, du cation intercouche et de l'état hydrique de minéral l'argile (Schoonheydt et Johnston, 2013). De plus, en l'absence d'eau, la distance intercouche des smectites (Figure 1.13) dépend de la taille du cation intercouche. Cependant, la présence d'eau augmente la distance intercouche car le cation intercouche est hydraté par l'eau (Ugochukwu, 2019).

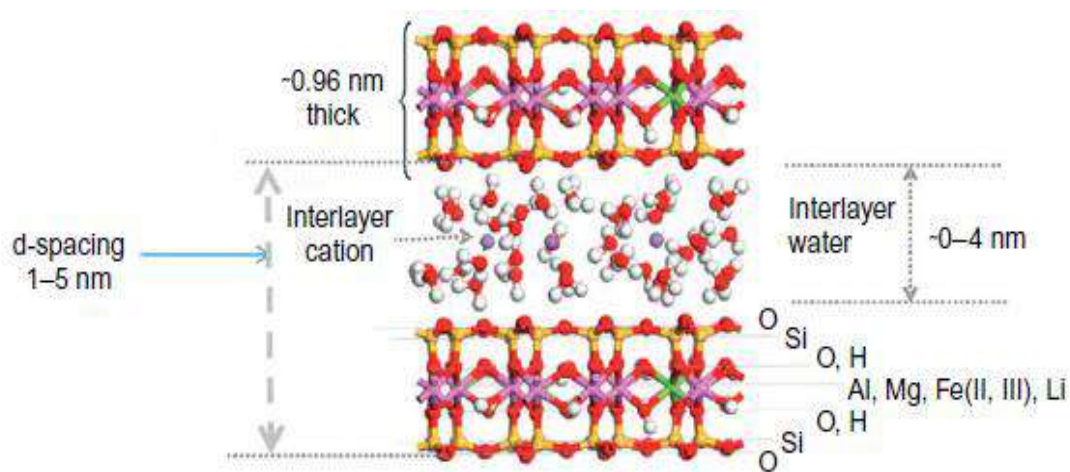


Figure 1.13 : Une particule de type smectite (Schoonheydt et Johnston, 2013).

1.6. Propriétés mécaniques des sols argileux

En génie civil, la relation entre le comportement mécanique des argiles et les propriétés des minéraux argileux est bien connue. L'argile sèche a l'apparence d'un matériau solide tandis qu'avec l'ajout d'eau, il se ramollit jusqu'à ce qu'il devienne liquide. Il est évident que l'argile sèche et l'argile très humide auront des propriétés mécaniques différentes. En mécanique des sols, de grandes différences existent entre les sols cohésifs et non cohésifs en ce qui concerne la consistance et la résistance comme nous l'expliquerons ci-dessous.

1.6.1. Plasticité et consistance

En ce qui concerne le comportement mécanique, la consistance est la caractéristique la plus importante des sols cohérents. Il fait référence à la force, à la résistance et à la pénétration du sol dans des conditions in situ. Les paramètres utilisés pour décrire la réponse des sols cohésifs à la contrainte ou à la pression sont respectivement la consistance et les limites d'Atterberg (limite de plasticité et limite de liquidité) et l'indice de plasticité (Wagner, 2013).

Au fur et à mesure que de l'eau est ajoutée à un sol argileux, la consistance passe de solide à semi-solide à plastique et enfin à liquide. La limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau à laquelle le mélange sol-eau passe d'un état liquide à un état plastique. Lorsque la teneur en eau diminue, le sol passe à un état semi-solide à la limite plastique (W_P). En outre, la différence de teneur en eau entre la limite de plasticité et la limite de liquidité est appelée indice de plasticité $I_P = W_L - W_P$. Un autre indice couramment utilisé est le indice ou nombre de cohérence $I_C = (W_n - W_P) / I_P$. Casagrande (1932 cité par Das, 1998) a étudié la relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour une grande variété de sols naturels (Figure 1.14).

Par ailleurs, une limite de liquidité élevée (W_L) indique une compressibilité élevée et un potentiel de retrait/gonflement élevé. Un indice de plasticité (I_P) élevé se traduit généralement par une faible résistance au cisaillement. Un faible (I_P) signifie qu'un sol utilisé comme fondation changera considérablement de consistance même avec un petit changement dans la teneur en eau. Cependant, plus la plasticité est grande, plus le retrait au séchage est important (Mitchell et Soga, 2005). La connaissance des limites d'Atterberg et de la plasticité est souvent utilisée pour déterminer la quantité de limon et d'argile dans un sol à grains fins, car la plasticité augmente généralement avec une teneur en argile plus élevée (Wagner, 2013).

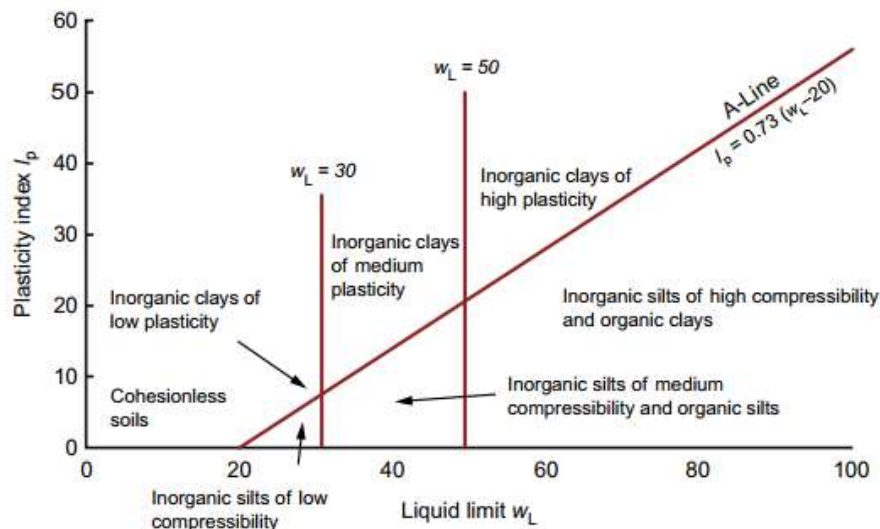


Figure 1.14 : Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité d'après Casagrande (Wagner, 2013).

1.6.2. Compactage

Le compactage permet la densification des sols par application d'énergie mécanique qui conduit à la diminution de la porosité et à des modifications de la structure des sols (Mehenni, 2015). En outre, Le compactage du sol augmente généralement sa résistance au cisaillement et diminue sa compressibilité et sa perméabilité, comme l'a déclaré Proctor en 1933. La granulométrie, la morphologie des particules du sol, l'abrasivité et la teneur en argile, ont une influence sur le comportement du sol lors du compactage. En raison de leur petite taille (quelques microns), les particules d'argiles permettent d'augmenter la densité sèche du sol en comblant sa porosité (Cabane, 2004).

Les caractéristiques optimales de compactage du sol, c'est-à-dire la teneur en eau optimale (W_{OPN}) et la masse volumique sèche maximale (ρ_{OPN}), sont déterminées par l'essai Proctor en laboratoire (NF P 94-093, 1999).

D'après Proctor, (1933), pour un sol et une teneur en eau donnés, le meilleur compactage possible est représenté par la courbe des vides d'air nuls (Figure 1.15). La courbe de compactage réelle sera toujours inférieure à cette courbe. Par ailleurs, le compactage du côté sec de l'optimum conduit à une structure dite "floculée", alors que le compactage du côté humide de l'optimum conduit à une structure dite "dispersée" (Figure 1.16).

De plus, la comparaison des courbes de compactage pour différents sols compactés avec le même effort de compactage a montré que les sols à grains fins ont besoin de plus d'eau pour atteindre un compactage optimal que les sols à grains grossiers (GTS, 2000).

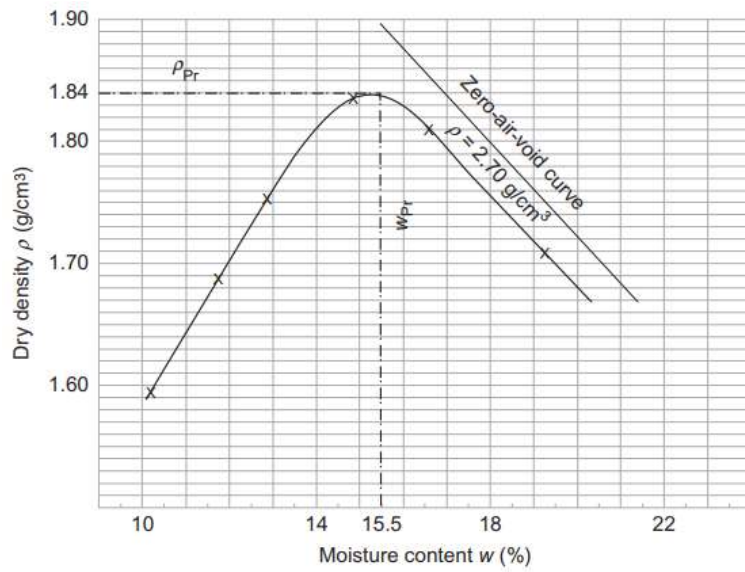


Figure 1.15 : Courbe d'essai standard de compactage Proctor pour un schiste marneux micacé (Proctor, 1933 cité par Das, 1998)

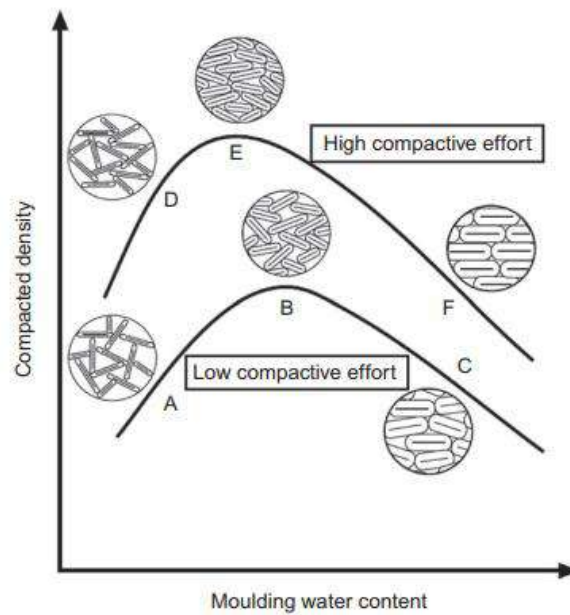


Figure 1.16 : Effet du compactage sur la structure des sols argileux (Lambe, 1958)

1.6.3. Résistance au cisaillement

Il est généralement admis que les paramètres de résistance totale au cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) d'un sol argileux dépendent principalement de son degré de saturation, de sa minéralogie et des conditions d'essai (Veith, 2000). En outre, si la résistance au cisaillement d'un sol est dépassée, des déplacements le long des surfaces de cisaillement ont lieu (Figure 1.17). De plus, la résistance au cisaillement des sols sans cohésion est limitée à la composante de frottement. En revanche, les sols cohésifs, tels que l'argile, ou les sols à forte teneur en argile présentent une cohésion effective significative et de faibles angles de frottement effectifs (Mitchell and Soga, 2005).

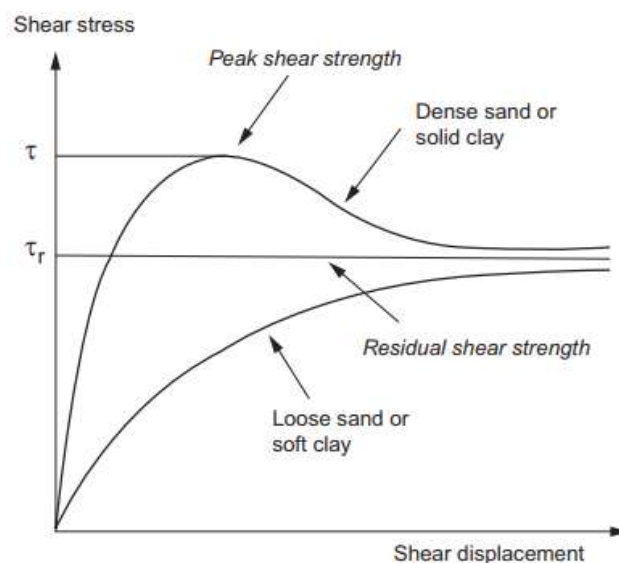


Figure 1.17 : Courbes typiques de contrainte-déformation avec résistance maximale et résiduelle au cisaillement (Wagner, 2013).

Par ailleurs, d'après un certain nombre d'études citées dans Mitchell et Soga, (2005), la résistance totale d'une argile était composée de deux parties distinctes : une partie de cohésion dépendant uniquement de l'indice des vides ou de la teneur en eau, et une contribution de frottement dépendant uniquement de contrainte effectif normal.

1.6.4. Gonflement

Le gonflement est l'augmentation spontanée de la distance inter-couche des particules minérales argileuses, due à l'adsorption de molécules dans l'espace inter-couche. En d'autres termes, le gonflement se produit lorsque les forces d'attraction entre les cations échangeables et les molécules absorbantes surmontent les forces d'attraction entre la densité de charge négative des couches minérales argileuses et les cations échangeables (Schoonheydt et al,

2018). Ainsi, Les argiles smectiques donnent une image claire de la performance physique des minéraux argileux.

L'expansibilité de l'argile s'exprime mieux en termes de pression de gonflement (Figure 1.18), qui dépend fortement de la densité, de la salinité et du type majeur de cation échangeable (Puch, 2006). En outre, la chimie de l'eau interstitielle et le type de cation ont également une influence déterminante sur le gonflement des minéraux argileux expansifs (Abdullah et al, 1999).

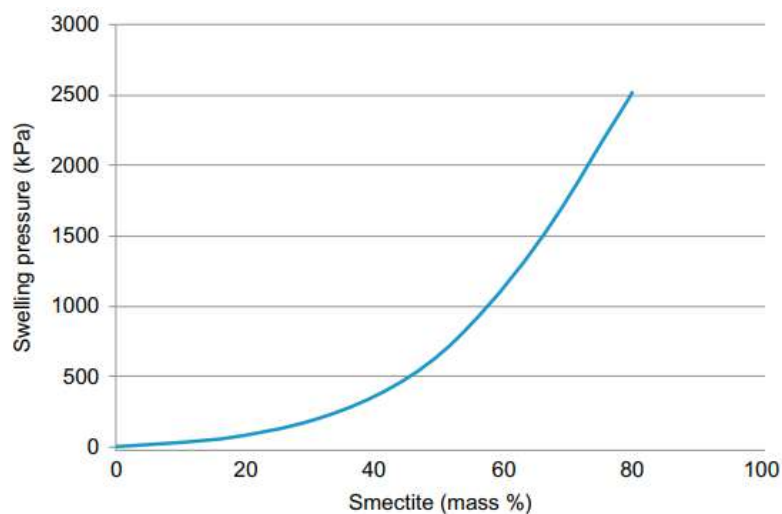


Figure 1.18 : Relation approximative entre la teneur en pourcentage massique de minéraux de smectite et la pression de gonflement pour une argile naturelle non perturbée mécaniquement avec un pourcentage élevé de particules de la taille de l'argile (Pusch et al, 1987).

L'étendue des processus de gonflement dépend de la quantité et du type de minéraux argileux gonflants, de leur structure et des conditions de contrainte, ainsi que de la perméabilité (Prinz et Strauß, 2006). La smectite et la vermiculite subissent des changements de volume plus importants lors du mouillage et du séchage que la kaolinite et l'illite. En général, les propriétés de gonflement et des minéraux argileux suivent le même schéma que leurs propriétés de plasticité, c'est-à-dire que, plus les minéraux sont plastiques, plus le potentiel de gonflement est élevé (Mitchell and Soga, 2005). De plus, la présence de certains minéraux dans les sols et les schistes, tels que la pyrite et le gypse, ainsi que des facteurs géochimiques et microbiologiques, peut entraîner des quantités importantes de gonflement (Mitchell and Soga, 2005 ; Burkart et al, 1999).

1.7. Conclusion

Ce premier chapitre a tout d'abord permis de passer en revue les principales caractéristiques des sols argileux utilisés dans le domaine géotechnique routière. Ces types de sols possèdent des comportements différents suivant leur état hydrique.

Ainsi, les sols argileux à l'état humide sont sensibles et difficiles à mettre en œuvre en raison de leurs faibles caractéristiques. C'est la raison pour laquelle une solution préconisée est de traiter ces sols aux liants hydrauliques. Dans le chapitre suivant, le traitement des sols argileux au laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) en tant que liant hydraulique, va être précisément décrit.

Chapitre 2

Les applications du GGBS

2.1. Introduction

La synthèse bibliographique, qui occupe ce deuxième chapitre, est présentée comme une introduction nécessaire à la compréhension du travail expérimental qui a été préparé au cours des troisième et quatrième chapitres. L'objectif de ce chapitre est de présenter l'état des connaissances sur le comportement physico-chimique, minéralogique et mécanique des sols argileux stabilisés au GGBS avant, pendant, et après exposition à une humidification à court, à moyen et à long terme.

Pour ce faire, on rappellera succinctement, dans une première partie, les principales caractéristiques physico-chimiques du laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) en tant que liant hydraulique routier. On donnera ensuite, dans une seconde partie, les principaux mécanismes physico-chimiques à l'origine de l'amélioration des sols traités au chaux-GGBS ainsi que leur influence sur leurs propriétés géotechniques et microstructurales. Enfin, dans une troisième partie, on présentera une synthèse bibliographique détaillée sur les applications du GGBS avec différents types de sols.

2.2. Production du GGBS

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon le mode de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux types : le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent à l'air, et le laitier granulé, obtenu par un refroidissement rapide à l'eau sous pression. La production du laitier granulé broyé nécessite des différents procédés :

2.2.1. Génération du laitier granulé

Le minerai de fer, combiné à du coke comme combustible et à de la chaux comme fondant, alimente un haut fourneau (four vertical à la base duquel est soufflé de l'air chaud) (Figure 2.1). Ensuite, le fer extrait du minerai par fusion s'accumule au fond du haut fourneau sous forme de fonte par gravité. Il est recouvert par une couche de résidus plus légère : le laitier, dont chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 à 300 Kg de laitier (Rossi et al, 2014).

2.2.2. Granulation

Après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier est conduit vers des fosses où il va subir un arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) destiné à le vitrifier (Jacquemot, 2014). Le produit obtenu se présente sous la forme d'un sable de couleur claire appelé laitier granulé (Figure 2.2).

2.2.3. Processus de broyage

Le laitier granulé est finalement moulu dans un broyeur pour permettre son utilisation dans les ciments, les bétons, ou dans le domaine de traitement de sols en tant que liant hydraulique routier. De plus, le broyage du laitier granulé permet à accroître la proportion de matériau plus fin que 0.063 mm.

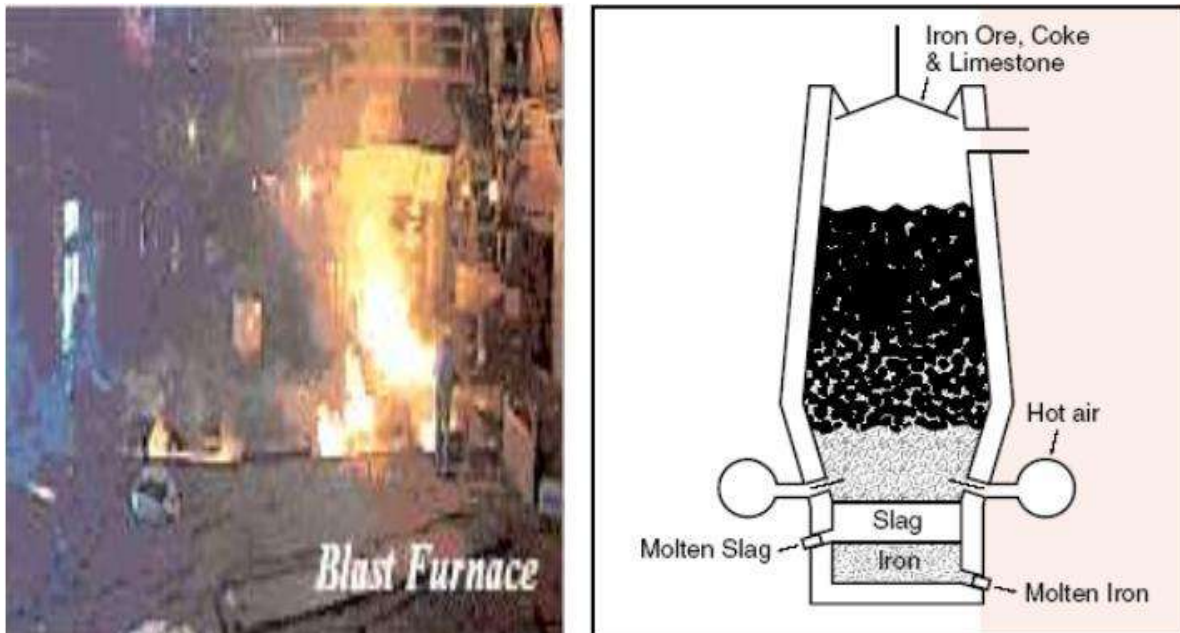


Figure 2.1 : Représentation schématique d'un haut fourneau (tiré de civil marin, cité par Salhi, 2007)

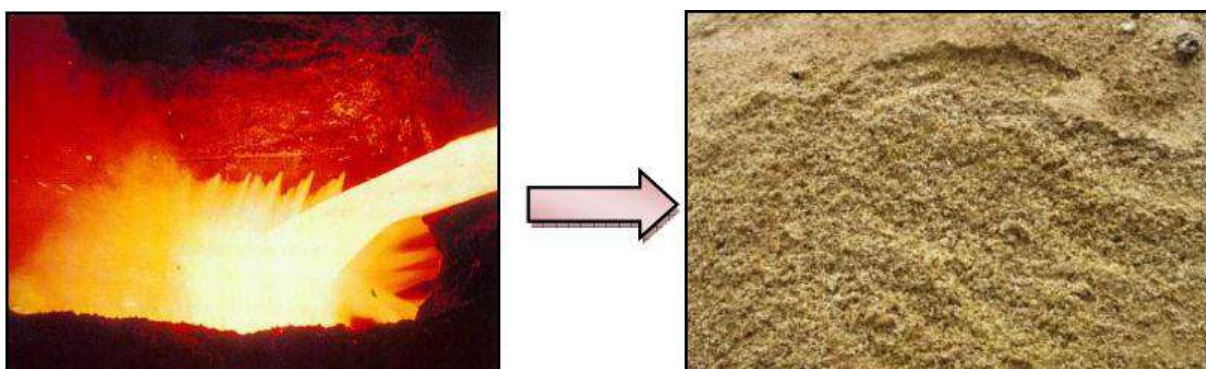


Figure 2.2 : Obtention du laitier granulé par le procédé de granulation (Cherfa et al, 2011)

2.3. Caractérisations physico-chimiques du laitier granulé

2.3.1. Structure

Le laitier vitrifié granulé correspond à un sable à prise hydraulique (0/5 à 0/6 mm). Il présente une structure vitreuse, irrégulière et riche en énergie. Il est sous forme de verre, mais un verre instable, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'arrangement atomique (Abdo, 2012). En outre, la réactivité du laitier dépend du degré de désordre du verre (Jacquemot, 2014).

2.3.2. Activité hydraulique

L'activité hydraulique du laitier de haut fourneau granulé dépend de sa teneur en fines, de sa composition chimique et des activants (NF EN 14227-2, 2005). A titre d'exemple, en matière de composition chimique, le produit C.A, où C est la teneur en CaO et A, la teneur en Al_2O_3 , est un facteur important dans lequel, plus le produit C.A est élevé, plus le laitier est réactif.

2.3.3. Compositions chimiques

Le GGBS est composé chimiquement de quatre oxydes principaux : la chaux (CaO), la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et la magnésie (MgO), contenant les mêmes oxydes majeurs que le ciment Portland ordinaire (Kim et al, 2013 ; Sekhar et al, 2017). D'après la norme NF EN 14227-2, le laitier de haut fourneau granulé doit avoir la composition en masse suivante (Tableau 2.1), exprimée en pourcentage du matériau sec totale :

Tableau 2.1 : Composition chimique du laitier granulé (NF EN 14227-2, 2005)

Composition	Laitier granulé (%)
La chaux (CaO)	30 % à 50 %
La silice (SiO_2)	27 % à 41 %
L'alumine (Al_2O_3)	7 % à 20 %
La magnésie (MgO)	< 20 %

Diagramme de Keil, diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine (Figure 2.3). Ce diagramme permet de situer le laitier de haut fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routières. Il montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland (Rossi et al, 2014).

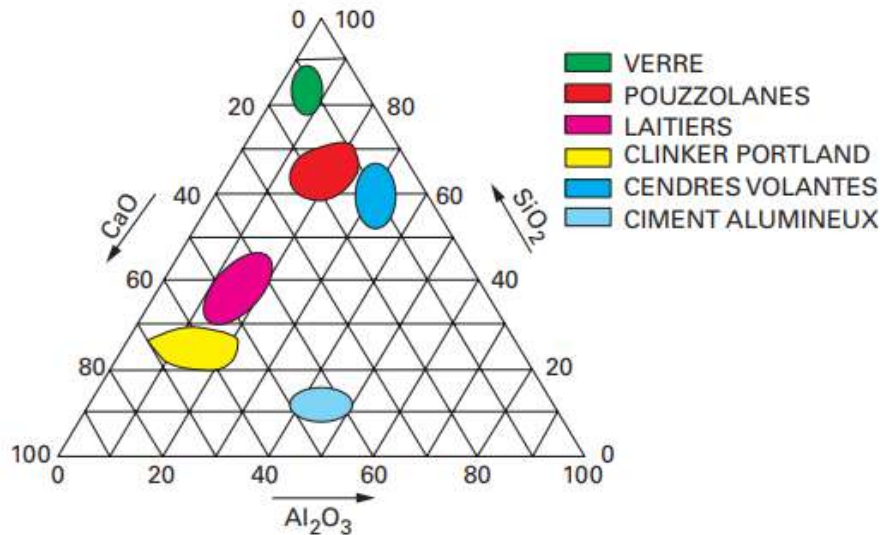


Figure 2.3 : Diagramme de Keil (Rossi et al, 2014)

2.4. Activation chimique du GGBS

À l'inverse du laitier cristallisé, le refroidissement rapide donne au GGBS des propriétés hydrauliques latentes qui se permettent des réactions d'hydratation lorsque le laitier granulé réagit avec l'eau. Cependant, la vitesse d'hydratation du GGBS est très lente par rapport à celle du ciment Portland (Bellmann, 2009) c'est-à-dire, d'après Hakkinen (1993), une fois les grains du laitier viennent en contact avec l'eau, une couche gélifiante de faible basicité, se produisant à la polymérisation des radicaux siliciques hydratés, est formée autour des grains prévenant la dissolution de ces derniers et conduisant ainsi à ralentir la cinétique d'hydratation.

Par ailleurs, d'après Houzé (2013), le contact entre le laitier et l'eau aboutit à se produire un gel d'alumine $Al(OH)_3$ qui est en fait le résultat de réaction entre le calcium et l'alumine. Ce gel se forme entre un pH de 4 jusqu'à un pH compris entre 8.5 et 10 comme indiqué sur la Figure 2.4. Ce qui conduit à bloquer la poursuite de la dissolution du laitier et donc de son hydratation. Donc, le laitier granulé a besoin d'un activateur pour s'hydrater, c'est-à-dire l'activateur permet de jouer un rôle pour dissoudre la couche qui recouvre les grains de laitier.

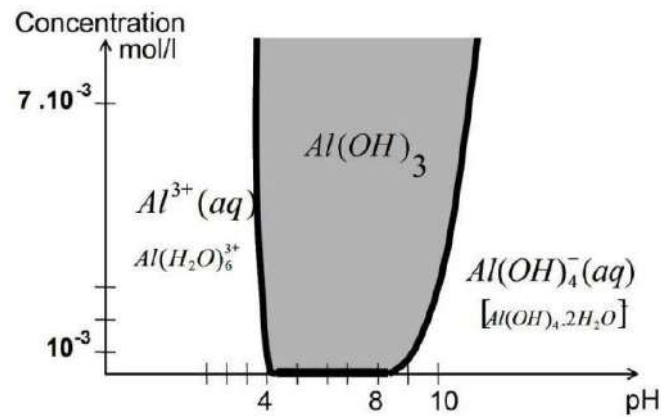
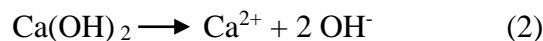


Figure 2.4 : Domaine de stabilité du gel d'alumine
(Lamberet et al, 2008 cité par Houzé, 2013)

L'activation chimique du GGBS est habituellement réalisée soit à l'aide de l'activation calcique (Yum et al, 2017 ; Jeong et al, 2016 ; Gu et al, 2014) ou de l'activation alcaline (Tashima et al, 2017 ; Ben Haha et al, 2012 ; Ben Haha et al, 2011 ; Song et al, 2000) ou de l'activation par le ciment Portland (Angulo-Ramírez et al, 2017 ; Jeong et al, 2016 ; Kim et al, 2013) et finalement de l'activation sulfatique (Rashad et al, 2013).

2.4.1. L'activation calcique

L'activation calcique, c'est-à-dire l'activation par la chaux, est la première activation a été pratiquée sur le laitier de haut fourneau. En présence d'eau, l'hydratation de la chaux produit la portlandite (Ca(OH)_2) qui fournit, après le processus d'ionisation (équation 2), les cations de calcium (Ca^{+2}) et les ions d'hydroxyles (OH^-). Ces derniers sont responsables de l'augmentation du pH du milieu à une valeur supérieure à 12 (Sekhar et Nayak, 2017), et ce qui favorise la dissolution de laitier. De plus, la chaux contribue également à la formation d'hydrates en apportant des ions de calcium.



Kim et al. (2013) ont fait une étude comparative entre CaO et Ca(OH)_2 en tant qu'activateurs potentiels pour produire un liant non cimentaire à base de GGBFS avec une résistance mécanique comparable. L'étude a montré que l'utilisation de CaO produisait une résistance mécanique plus élevée que Ca(OH)_2 (Figure 2.5) et générait une chaleur d'hydratation initiale plus élevée.

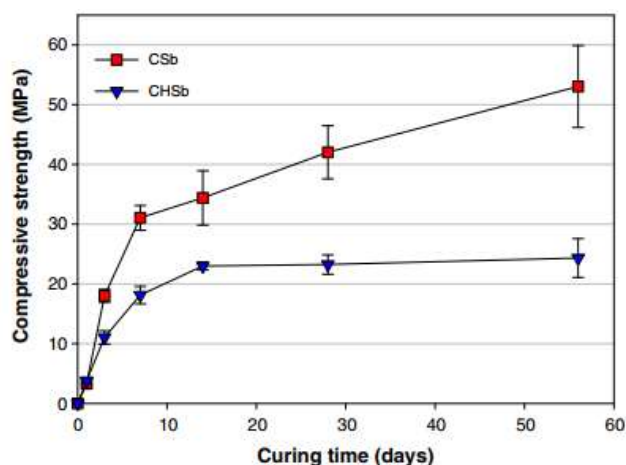


Figure 2.5 : Développement de la résistance à la compression des pâtes activées (Kim et al. 2013).

Ainsi, Gu et al. (2014) ont observé également que l'utilisation de CaO peut augmenter l'hydratation du GGBS activé par MgO dans lequel l'ajout d'une petite quantité de CaO peut considérablement accélérer l'hydratation des laitiers à un âge précoce augmentant le pH de la solution interstitielle (Figure 2.6).

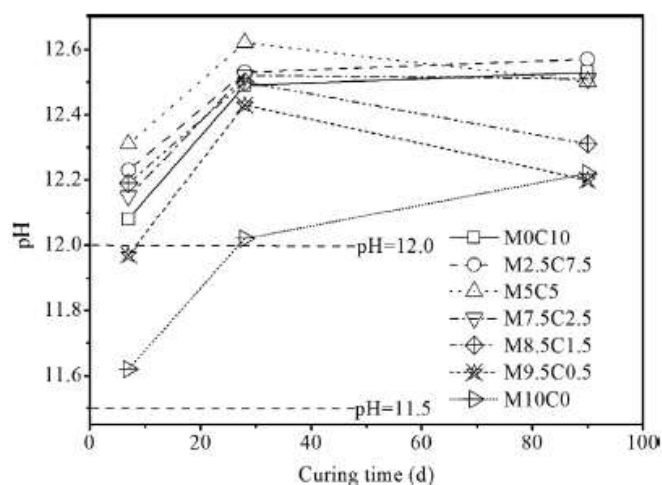


Figure 2.6 : Variation du pH des pâtes durcies à l'eau avec le temps (Gu et al. 2014).

2.4.2. L'activation par le ciment Portland (PC)

En présence de ciment Portland, la forte teneur en Portlandite produite et la présence de calcium comme régulateur de prise sont en effet responsables du déclenchement simultané de deux types d'activation, l'activation calcique et l'activation sulfatique. Ainsi, la cinétique de

prise de laitier hydraté en présence de ciment Portland demeure inférieure à celle du ciment Portland seul (Angulo-Ramírez et al, 2017).

2.4.3. L'activation alcaline

Les activateurs alcalins les plus utilisés sont les hydroxydes de sodium (NaOH), silicate de sodium (Na_2nSiO_2) et carbonate de sodium (Na_2CO_3). La cinétique hydraulique et les produits d'hydratation du laitier dépendent de la nature de l'activateur ajouté où, C-S-H, C-A-H, C-A-S-H produisent dans le cas d'une activation par les hydroxydes de sodium (Tashima et al, 2017 ; Ben Haha et al, 2012 ; Song et al, 2000) tandis que les hydrates C-S-H et C-A-H produisent dans le cas d'une activation par les silicates de sodium (Jeong et al. 2016 ; Ben Haha et al, 2012 ; Haha et al. 2011) et par les carbonates de sodium (Jeong et al. 2016).

Jeong et al. (2016) ont étudié l'effet de quatre activateurs alcalins (NaOH, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sur le GGBS activé par la chaux hydratée [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. Ils ont montré que les additifs à base de Na (NaOH, Na_2SO_4 et Na_2CO_3) étaient moins souhaitables que ceux à base de Ca ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et $\text{Ca}(\text{OH})_2$) car les additifs à base de Na avaient tendance à produire des résistances inférieures après 28 jours de cure (Figure 2.7).

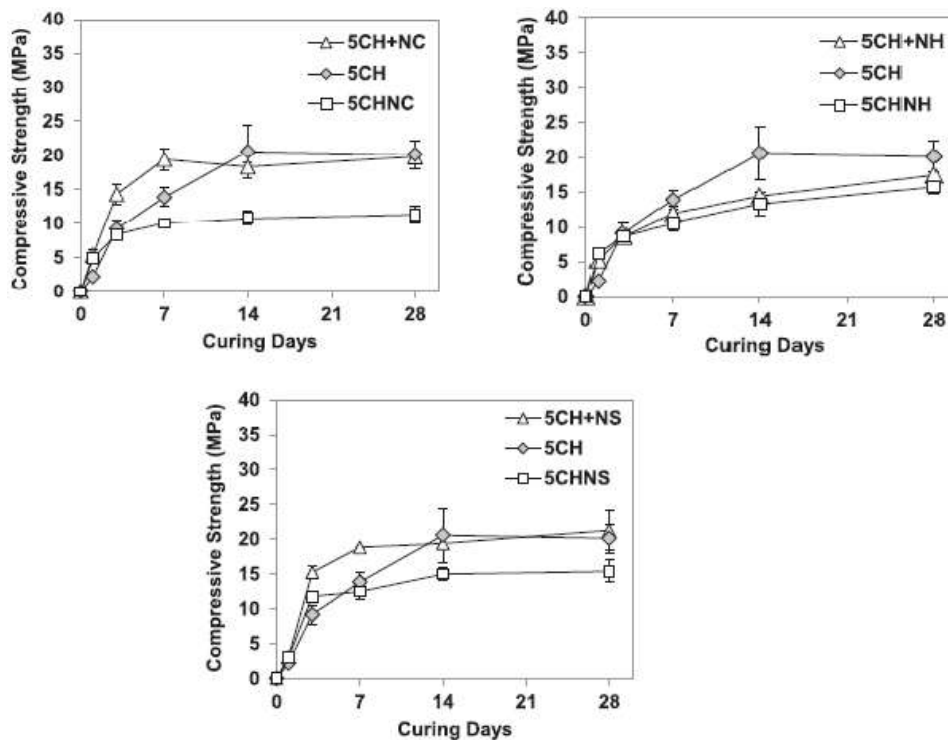


Figure 2.7 : Développement d'UCS des pâtes activées (Jeong et al. 2016).

2.4.4. L'activation sulfatique

Le sulfate de calcium (CaSO_4) et le sulfate de sodium (Na_2SO_4) sont les activateurs les plus courants pour l'activation de laitier. Les travaux réalisés par plusieurs auteurs ont montré que les principaux produits d'hydratation du GGBS activé par les sulfates sont le C-S-H et l'ettringite (Rashad et al, 2013). De plus, l'augmentation à la fois de la finesse des laitiers et de la concentration des sulfates peut augmenter la résistance à la compression des pâtes activées (Figure 2.8).

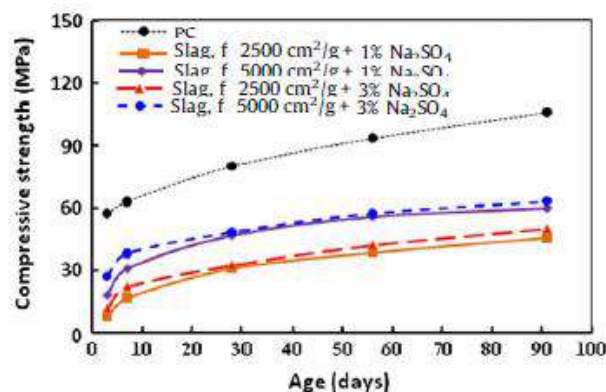


Figure 2.8 : Développement de la résistance à la compression des pâtes de ciment Portland et de laitier activé par Na_2SO_4 (Rashad et al. 2013)

2.5. Mécanismes de réactions dans le système (Argile- Chaux- GGBS)

L'incorporation du composite (chaux - GGBS) dans le sol argileux entraîne des modifications remarquables dans la microstructure de l'argile à mesure que de nouveaux minéraux argileux se forment. Ces derniers sont en fait le résultat de réactions d'hydratation ainsi que de réactions pouzzolanique qui se sont déclenchées au fil du temps. Le mécanisme de diverses réactions se développe séquentiellement à travers les processus physico-chimiques suivants :

2.5.1. Réaction Argile – Chaux

2.5.1.1. Flocculation des argiles

L'ajout de la chaux aux sols argileux humides se déclenche immédiatement des réactions d'hydratation (équation 1) fournissant, après le processus d'ionisation (équation 2), une quantité importante des ions d'hydroxyles (OH^-) et des cations de calcium (Ca^{+2}). Les cations de calcium (Ca^{+2}) réagissent avec la surface des minéraux argileux conduisant, par le

processus d'échange cationique (CEC), à former des ponts entre les particules (Figure 2.9) et menant ainsi à la floculation de ces derniers sous forme des grumeaux peu sensibles à l'eau de taille millimétrique à l'échelle du laboratoire (Figure 2.10) et centimétrique voire décimétrique à l'échelle du chantier (Cabane, 2004).

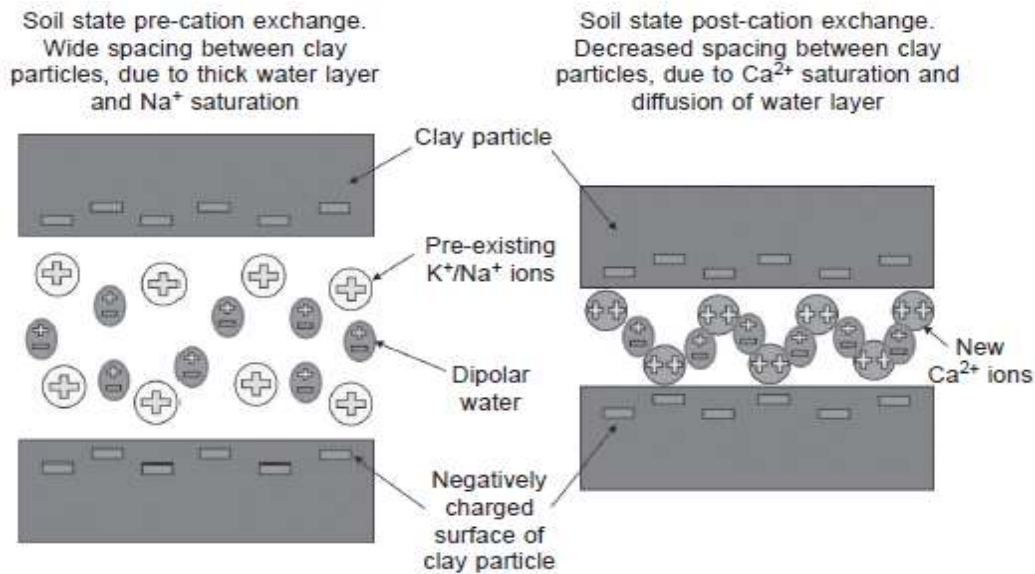
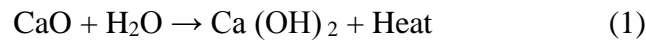


Figure 2.9 : Schéma démontrant l'échange de cations dans les sols, qui se produisent Immédiatement lors de l'introduction d'un liant calcique (Sargent, 2015).

Le phénomène de la floculation des particules se traduit géotechniquement par une modification significative de la consistance des argiles (Figure 2.11) dont la structure passe de l'état plastique à l'état grumeleuse stable (Saussaye, 2012).

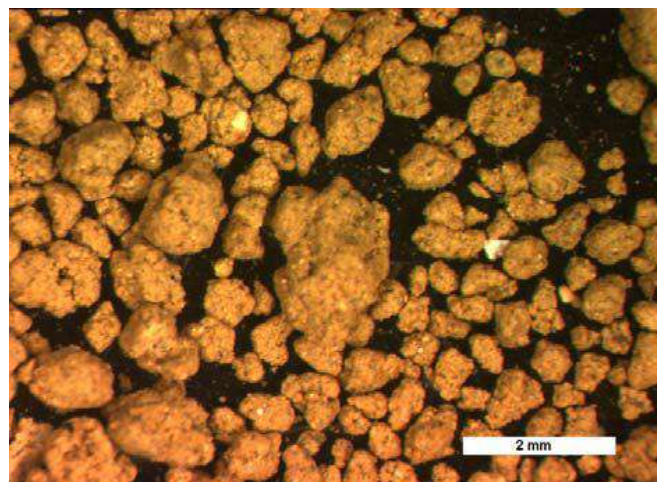


Figure 2.10 : Observation à la loupe binoculaire de grumeaux

formés à partir du limon de Meaux après chaulage
à 1 % (Cabane, 2004).

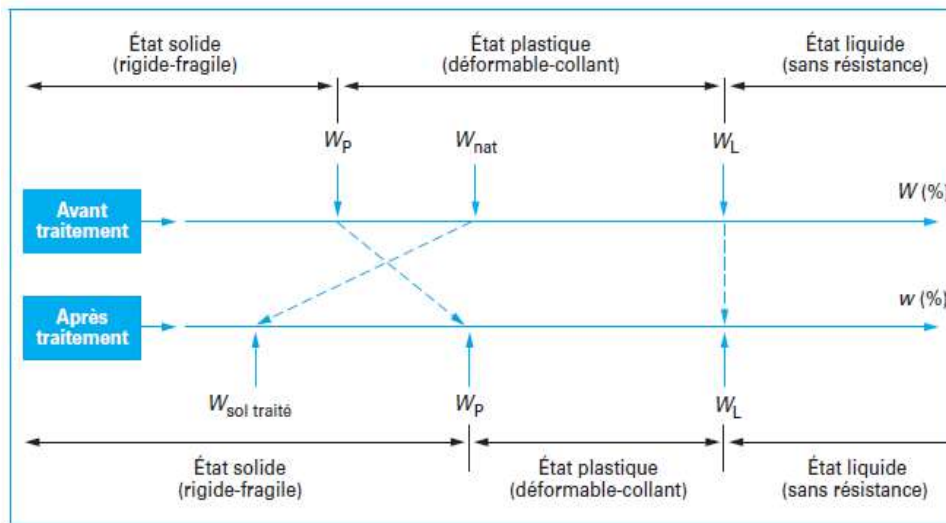


Figure 2.11 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive (GTS, 2000)

2.5.1.2. Modification le pH du milieu environnant

La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se produisant lors de l'hydratation de la chaux (équations 1), n'affecte seulement sur les surfaces des minéraux argileux mais contribue également à l'augmentation de pH du milieu environnant (Figure 2.12). Ce dernier paramètre physico-chimique gouvernerait les fronts de dissolution et de précipitation au cours de la formation des hydrates cimentaires (C-S-H ; C-A-H ; C-A-S-H).

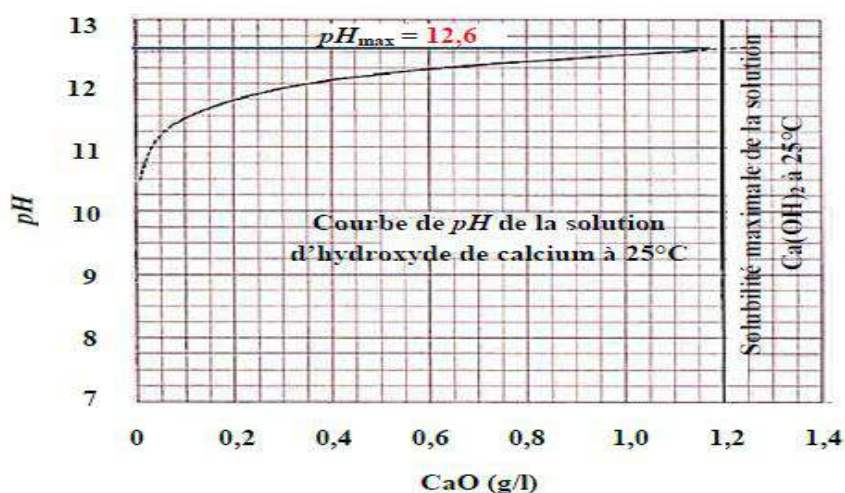


Figure 2. 12 : Variation du pH d'une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'eau en fonction de la teneur en chaux (Marrot, 2010 citée par Nguyen, 2015).

Le seuil de pH, fixé à 12.4 par Eades et Grim (1966), correspond à une saturation initiale du sol en chaux dont la teneur en chaux permet d'atteindre cette valeur de pH est connue sous le nom de « lime fixation point ». Kavak et Bilgen (2016) ont montré qu'une argile limoneuse (36 % < 2 μ m) atteindrait son point de fixation à 5 % de teneur en chaux (Figure 2.13).

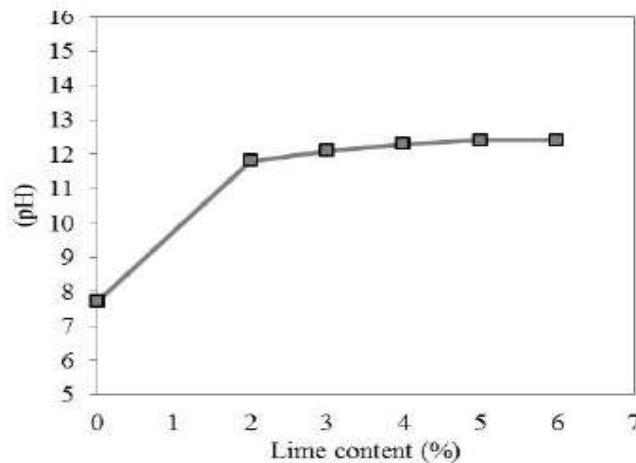


Figure 2.13 : Valeurs de pH pour différentes teneurs en chaux (Kavak et Bilgen. 2016).

Par ailleurs, les tests effectués par Rabbani et al. (2012) sur les mélanges de sol-chaux et de sol-GGBFS-chaux ont indiqué que les valeurs maximales de pH ont été trouvées dans des échantillons serait 4% de chaux avec les différents pourcentages de GGBS (Figure 2.14).

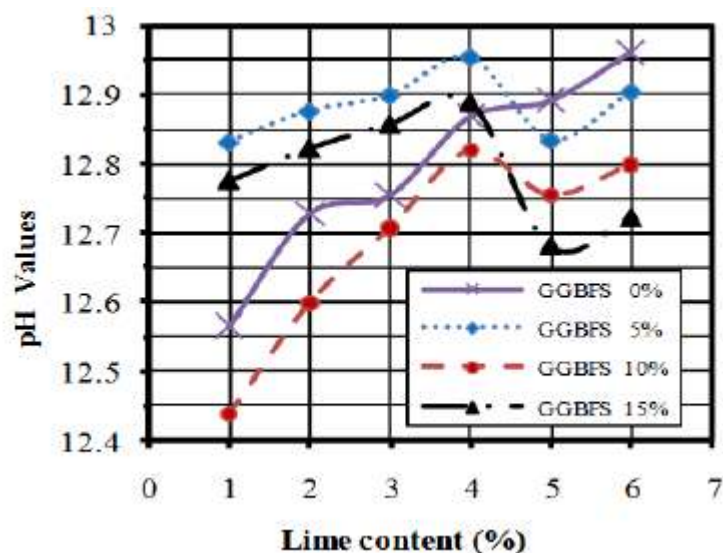


Figure 2.14 : Diagramme des valeurs de pH des mélanges sol-GGBS-chaux (Rabbani et al. 2012)

2.5.2. Réaction GGBS – Chaux

2.5.2.1. Activation du GGBS

Durant le processus d'hydratation du GGBS, une couche gélifiante de faible basicité, se produisant à la polymérisation des radicaux siliciques hydratés, est formée autour des grains prévenant la dissolution de ces derniers et conduisant ainsi à ralentir la cinétique d'hydratation (Hakkinen, 1993). Les ions d'hydroxyles (OH^-) produites de l'hydratation de la chaux (équation 2) sont responsables de fournir un environnement alcalin requis ($\text{pH} > 12$) pour l'activation du GGBS et ce qui permet de dissoudre la couche qui recouvre les grains et par conséquence favorise la dissolution du GGBS (Sekhar et Nayak. 2017).

Par ailleurs, le potentiel d'activation du GGBS ainsi que la résistance de la pâte (GGBS – chaux) varieraient selon le type de la chaux ajoutée. Kim et al. (2013) ont effectué une étude comparative entre le potentiel de la chaux vive (CaO) et le potentiel de la chaux hydraté [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] pour l'activation de GGBS. ils ont montré, sur la base de la résistance à la compression non confinée (Figure 2.15), que la chaux vive (CaO) a un meilleur potentiel comparé à celui de la chaux hydraté [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] pour l'activation du GGBS.

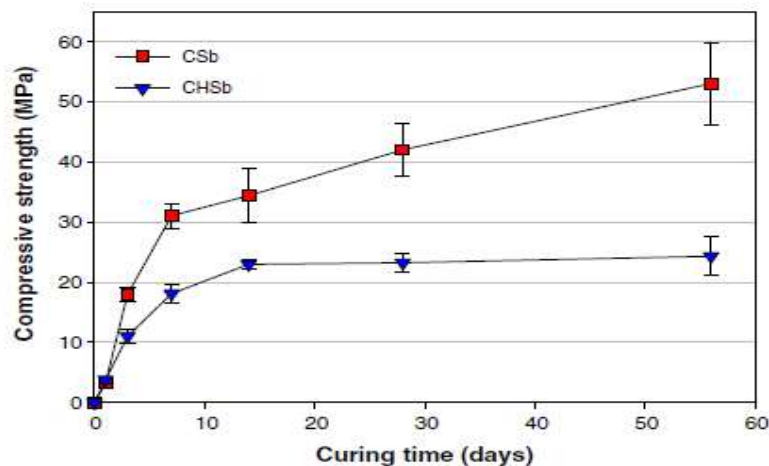


Figure 2.15 : Développement de la résistance à la compression des pâtes activées (Kim et al. 2013).

2.5.2.2. Produits d'hydratation du GGBS

L'efficacité de l'hydratation du GGBS dépend principalement de nombreux facteurs qui ce sont plus particulièrement la composition chimique du GGBS, concentration alcaline du

système réactif, finesse du GGBS, teneur en verre du GGBS, température et temps de durcissement (Thomas, 2001).

De plus, le GGBS apporte aux mélanges (argile-chaux) des quantités supplémentaires d'alumine, de calcium, de silice et de magnésie conduisant à modifier les produits de la réaction (argile-chaux). Donc, l'hydratation du GGBS, grâce à sa teneur élevée en CaO (30-45%) (NF EN 14227-2, 2005), produit rapidement des hydrates cimentaires calciques similaires à ceux formés pendant l'hydratation du ciment Portland ordinaire (OPC) dans un composite argile-OPC (Sekhar et al. 2017). Ainsi, certains auteurs (Tasong et al. 1999 ; Wild et Tasong. 1999 ; Wild et al. 1998) ont signalé que la réaction d'hydratation des GGBS activée par la chaux était plus rapide que la réaction pouzzolanique de la chaux avec l'argile.

Les hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et les hydrates de l'aluminate de calcium (C-A-H) sont les principaux produits cimentaires dus à l'hydratation de GGBS (Keramatikerman et al. 2016 ; Yi et al. 2015b; Rabbani et al. 2012 ; Higgins et al., 1998). Ces produits cimentaires représentent en fait la première génération d'hydrates calciques sous forme de gels enrobant les grumeaux (figure. 2.16) qui durant le compactage favorisent les liaisons entre ces derniers (Obuzor et al. 2011a ; James et al. 2008 ; Veith, 2000). Le durcissement du gel dans le temps conduit à la formation d'une coque rigide (Figure 2.16) et ceci se traduit géotechniquement par une augmentation de la résistance du sol traité dans le temps (Keramatikerman et al. 2016 ; James et al. 2008 ; Veith, 2000).

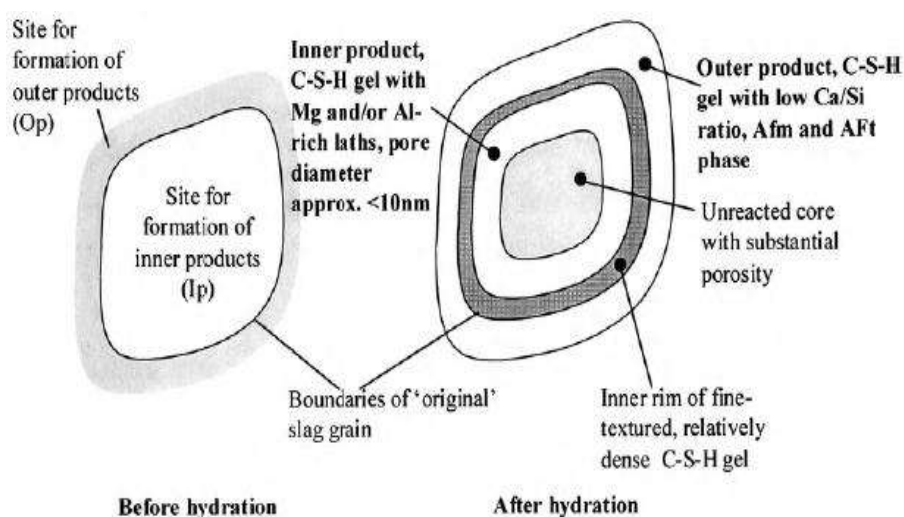


Figure 2.16 : Grain de laitier avant et après l'hydratation (Veith, 2000).

Par ailleurs, les principaux produits d'hydratation dans le système (argile-OPC-GGBS) sont relativement similaires à ceux observés dans le système (argile-chaux-GGBS). A titre d'exemple, Keramatikerman et al. (2018) ont illustré, à travers aux observations au

microscope électronique à balayage (MEB), que les principaux produits d'hydratations du système (Kaolinite-OPC-GGBS) après 7 jours de traitement sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) les aluminates de calcium hydratés, (C-A-H) (Figure 2.17).

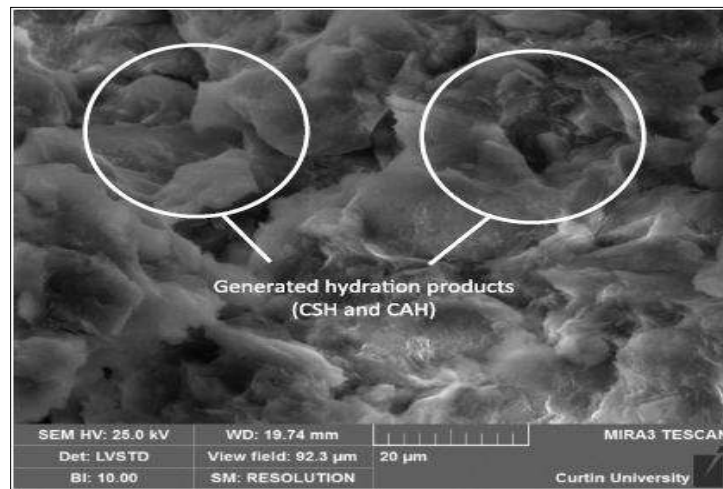


Figure 2.17 : Analyse au MEB effectuée sur le Kaolinite stabilisé Par le composite (OPC- GGBS) après 7 jours de traitement (Keramatikerman et al. 2018).

2.5.3. Réaction pouzzolanique dans le système (Argile-Chaux-GGBS)

Les réactions pouzzolanique sont des réactions d'hydratation secondaire de stabilisation du sol pouvant se déclencher après quelques semaines voire plusieurs mois après le début de l'hydratation (GTS, 2000). Ainsi, les réactions pouzzolaniques dans un mélange ternaire (argile - chaux – GGBS) sont différentes et plus complexes que les réactions argile – chaux (Nidzam et Kinuthia, 2010) tandis que, des réactions relativement similaires à celles observées dans le système (argile – OPC) ont été détectées (Yi et al. 2015b ; Nidzam et Kinuthia, 2010).

Le mécanisme principal implique le transport de l'excès de calcium apportés par les liants ajoutés dans le sol via l'eau pour se combiner avec les minéraux argileux qui, dans un environnement de pH fort (soit environ 12,4), se dissolvent et libèrent la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) les constituant (Sargent, 2015 ; Cabane, 2004 ; Saussaye, 2012).

Ce processus conduit à la formation des nouveaux hydrates cimentaires calciques insolubles (C-S-H ; C-A-H ; C-A-S-H) de même nature à ceux formés dans la première génération des hydrates (Figure 2.18).

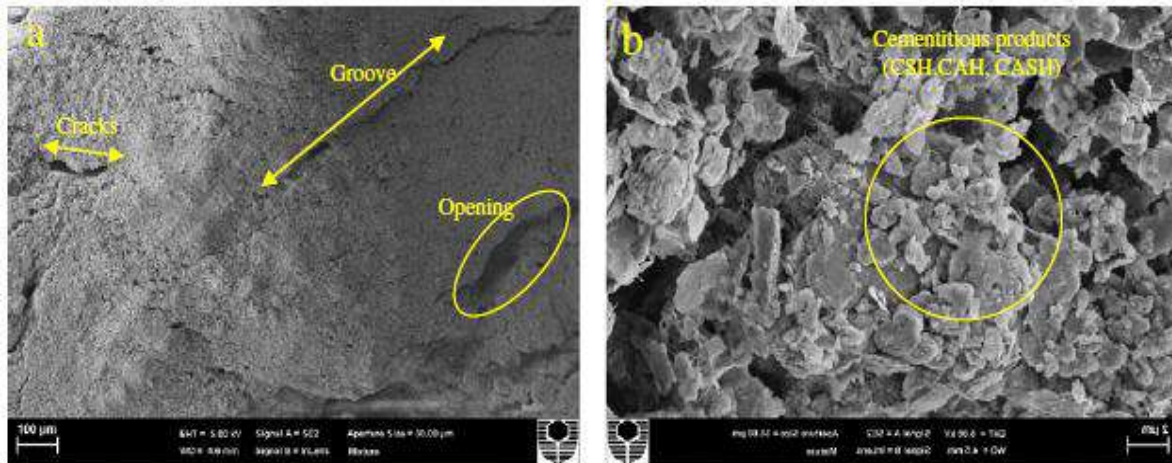


Figure 2.18 : MEB d'un composite (GGBS-chaux-argile) durci à 28 jours montrant la formation de produits cristallins à base de ciment après les réactions pouzzolaniques (Keramatikerman et al. 2016).

De plus, les hydrates cimentaires formés au cours les réactions pouzzolaniques contribuent à la rigidification interne des grumeaux (Figure 2.19) ainsi qu'à figer la structure grumeleuse (Figure 2.20) et ceci s'explique la raison de l'augmentation des propriétés mécaniques des composites traités avec le temps (Sharma and Sivapullaiah 2016 ; Keramatikerman et al. 2016 ; Yi et al. 2015b ; Obuzor et al. 2012 ; Nidzam et Kinuthia, 2010 ; James et al. 2008 ; Higgins, 2005).

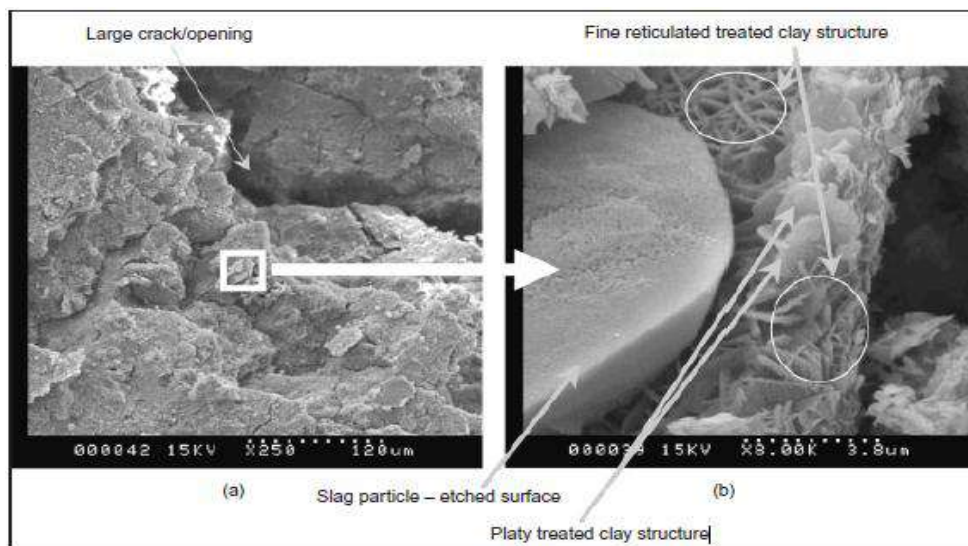


Figure 2.19 : Micrographies d'Engclay (85% de kaolin et 15% de bentonite en poids de sol sec) avec 10% de chaux et 10% de GGBS à 90 jours de durcissement (James et al. 2008).

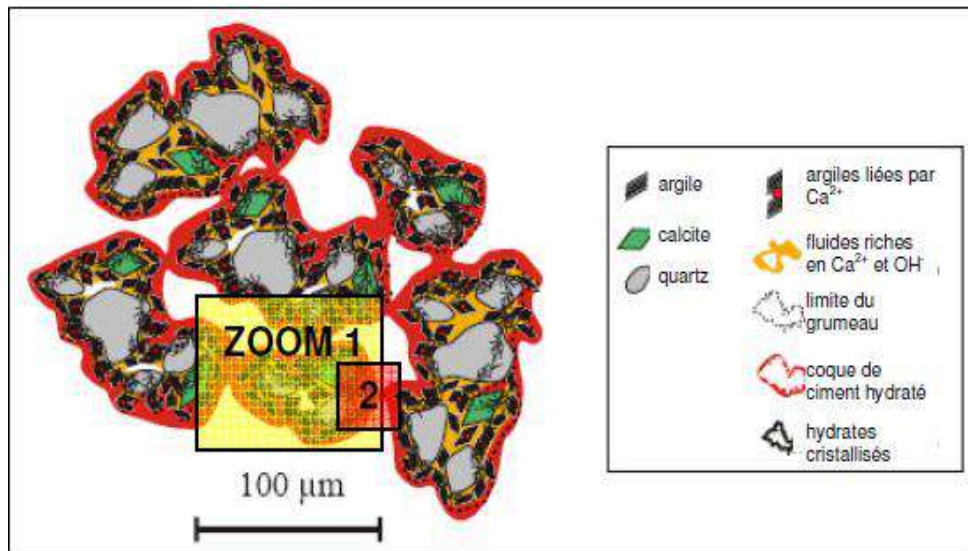


Figure 2.20 : Représentation schématique de la structure d'un sol fin solidifié au-delà de 90 jours de cure (Cabane, 2004).

Par ailleurs, la cristallisation, la précipitation et la nature des produits de la réaction pouzzolanique varieraient en fonction du type d'argile, de la température, de la teneur en chaux et de la période de durcissement (Nidzam et Kinuthia, 2010). D'après Bell. (1996), la cinétique de réaction hydraulique s'interrompt dès que la température du milieu est inférieure à environ 4°C. En outre, les résultats des analyses de diffraction des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré que le type d'argile traitée et le type d'activant ajouté au composite (GGBS-Argile) affecte fortement sur la nature des hydrates cimentaires produites de réactions pouzzolanique (Estabragh et al, 2022 ; Corrêa-Silva et al, 2020 ; Caselles, 2020 ; Sargent, 2020; Chowdary et al, 2020 ; He et al, 2020 ; Keramatikerman et al. 2016).

Dans ce contexte, Corrêa-Silva et al, (2020) ont présenté une étude sur le comportement mécanique d'un sol meuble stabilisé par un liant alcalin durable (NaOH) incorporant du laitier granulé broyé de hauts fourneaux (GGBS), à court (28 jours) - et à long terme (90 jours). Les analyses microstructurales (DRX et MEB) ont montré que la détection de Si, Ca et Al suggère la formation de C-A-S-H (Figure 2.21). En revanche, pour une kaolinite d'argile ($W_L = 58\%$, $W_P = 31\%$, $I_P = 27$) stabilisée par le mélange (chaux-GGBS), seulement les hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et les aluminates de calcium (C-A-H) ont été observés (Keramatikerman et al. 2016).

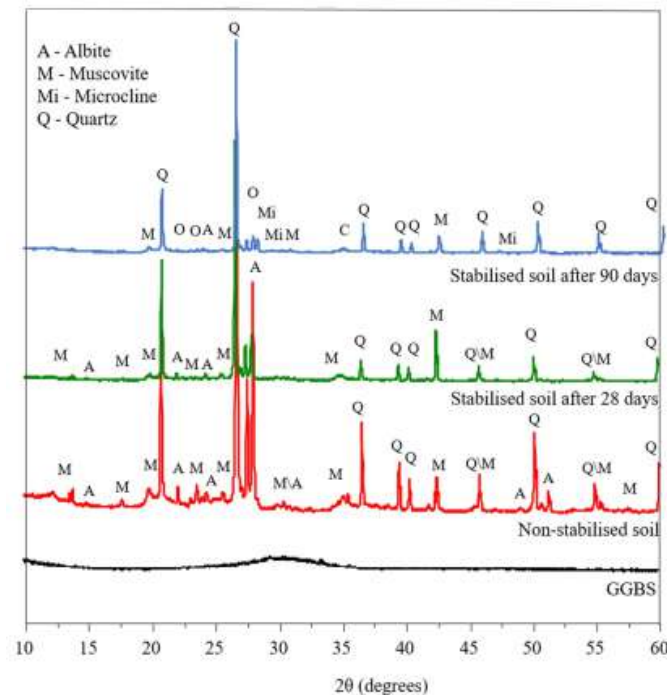


Figure 2.21 : Résultats des analyses XRD (Corrêa-Silva et al, 2020)

2.6. Utilisations du GGBS avec les différents types de sols

2.6.1. Les sols gonflants

Lors de la stabilisation des sols argileux, la formation de minéraux expansifs, tels que l'ettringite et la thaumasite, fait principalement référence au résultat de la réaction des sulfates et des sulfures présents dans le sol sous forme de gypse et de pyrite (GTS 2000). L'effet du GGBS sur les sols sulfatés (contenant du gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et les sols sulfatés acides (contenant de la pyrite, FeS_2) sera discuté ci-dessous.

2.6.1.1. Effets du GGBS sur les propriétés des sols sulfatés stabilisés à la chaux

a) Effets du GGBS sur le gonflement

Les sols argileux stabilisés à la chaux présentent une perturbation sévère lorsqu'ils sont exposés à une solution de sulfate, et cette perturbation est associée à la formation de cristaux d'ettringite (Figure 2.22) à la surface des particules d'argile (Wild et al. 1993 ; Abdi et Wild. 1993 ; Hunter, 1988).

L'effet du laitier granulé de haut fourneau (GGBS) sur les propriétés de gonflement des sols argileux sulfaté était l'objet de plusieurs études (Ehwailat et al, 2021 ; Seco et al, 2020 ; Li et al, 2020 ; Yu et al, 2016 ; Celik et Nalbantoglu, 2013 ; Nidzam et Kinuthia, 2010 ;

Higgins, 2005 ; Tasong et al, 1999 ; Wild et al, 1996, 1998, 1999a, 1999b ; Higgins et al, 1998). Ces études ont montré que la substitution partielle du GGBS par la chaux dans les sols sulfatés entraînait des améliorations significatives du développement de la résistance et le gonflement était bien inférieur à celui des sols stabilisés par la chaux uniquement.

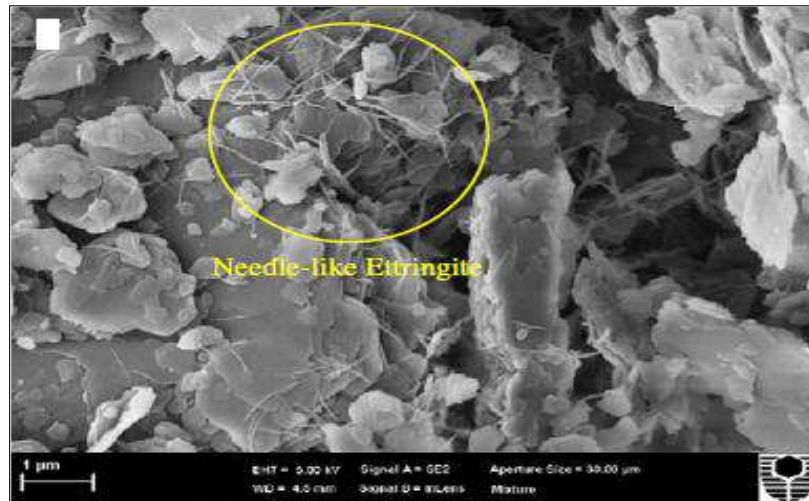


Figure 2.22 : Image au MEB illustre la présence d'une petite quantité d'ettringite en forme d'aiguille (Obuzor et al. 2012).

De plus, pour réduire sensiblement ou éliminer les problèmes d'expansion des sulfates, il est recommandé de remplacer partiellement la chaux de stabilisation par 60 à 80 % de GGBS (Wild et al. 1999).

En utilisant des tests de dilatation linéaire et les analyses de MEB et de DRX, Wild et Tasong, (1999) ont étudié l'influence du laitier granulé de haut fourneau broyé (GGBS) sur l'expansion de la kaolinite stabilisée à la chaux dans une solution de Na_2SO_4 à 4,2 %. Les résultats obtenus ont montré qu'au dosage de 1 % chaux + 5 % GGBS, l'expansion linéaire est réduite de 10% à 0,4% (Figure 2.23) et aucune ettringite n'a été observée. L'absence de l'ettringite au dosage de 1 % chaux + 5 % GGBS a également été observée dans une étude microstructurale similaire effectuée par Tasong et al. (1999).

En outre, Celik et Nalbantoglu (2013) ont rapporté qu'en présence de 6 % de GGBS, le potentiel de gonflement du sol traité à la chaux avec une concentration de sulfate de 10 000 ppm diminuait de 8 % à 1 %. (Figure 2.24).

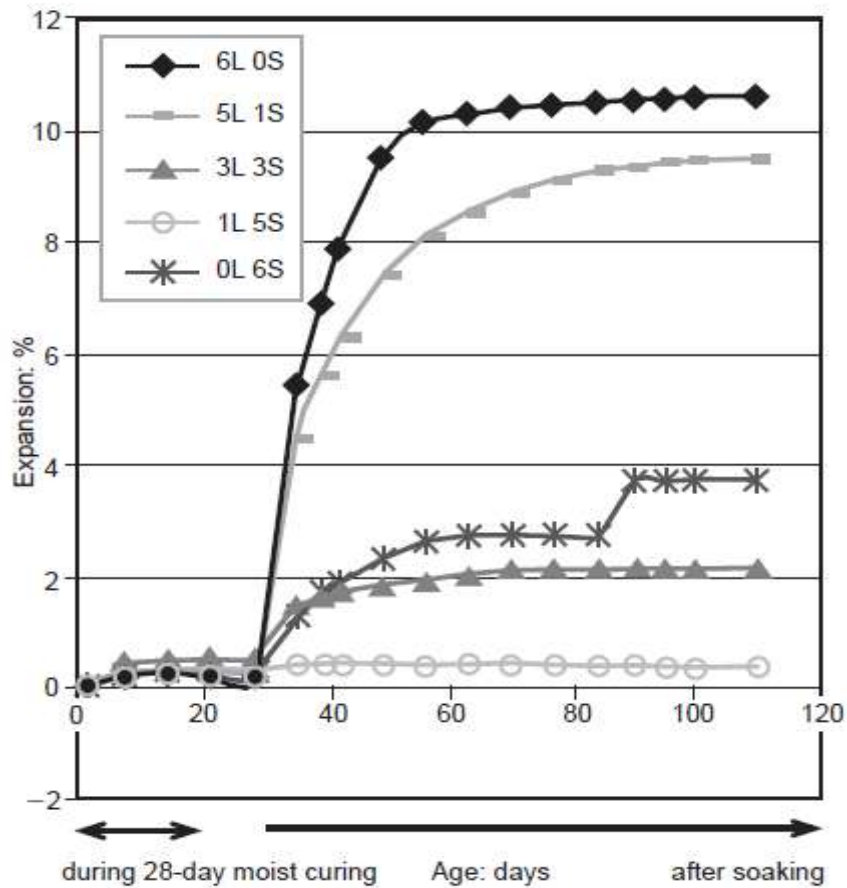


Figure 2.23 : L'influence du GGBS sur l'expansion linéaire d'une kaolinite stabilisée à la chaux, durcie à l'état humide pendant 28 jours et imbibée dans une solution de Na_2SO_4 à 4,2 % (Wild et Tasong, 1999)

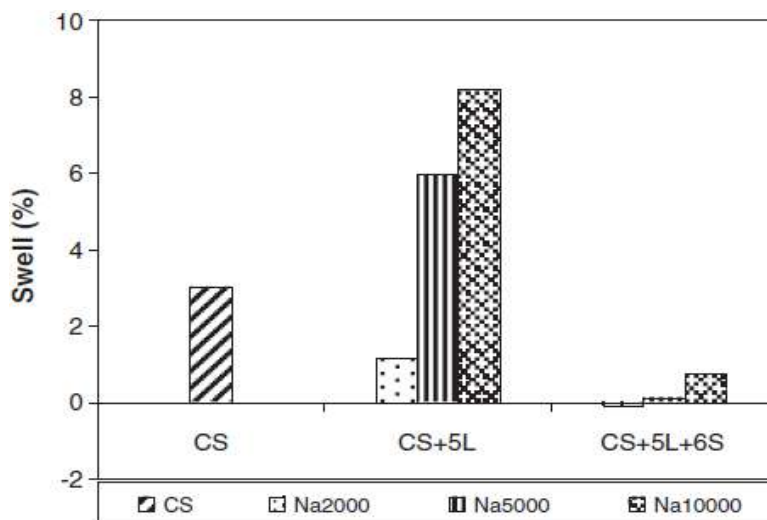


Figure 2.24 : Potentiels de gonflement pour CS, CS + 5 L et CS + 5 L + 6S soumis à différentes concentrations de sulfate (Celik et Nalbantoglu, 2013).

b) Effets du GGBS sur la résistance à la compression simple non confiné (USC)

Les résultats obtenus, par Wild et al. (1998), ont montré qu'en présence du sulfate, la substitution partielle de la chaux par le GGBS donne des résistances (USC) améliorées à 7 jours et à 28 jours de la kaolinite ($\% < 2 \mu\text{m} = 70 \%$, $W_L = 61\%$, $W_P = 32\%$, $I_P = 29\%$) (Figure 2.25) et de l'argile de Kimmeridge ($W_L = 65\%$, $W_P = 33\%$, $I_P = 32\%$) (Figure 2.26). Cette augmentation de la résistance (USC) est interprétée par la formation d'un plus grand nombre des hydrates de calcium C-S-H, qui sont en fait le résultat de l'hydratation de GGBS (Wild et Tasong, 1999). Un comportement similaire de résistance de la kaolinite et de l'argile de Kimmeridge a également été observé par Higgins et al. (1998).

Veith (2000) a mené une étude visant à stabiliser le kaolin en ajoutant de la chaux et du GGBS mélangés à différentes teneurs en sulfate (gypse : 2-6 % en poids). L'étude a montré une augmentation significative de la résistance lorsque le rapport GGBS/chaux était élevé ($\geq 2:1$).

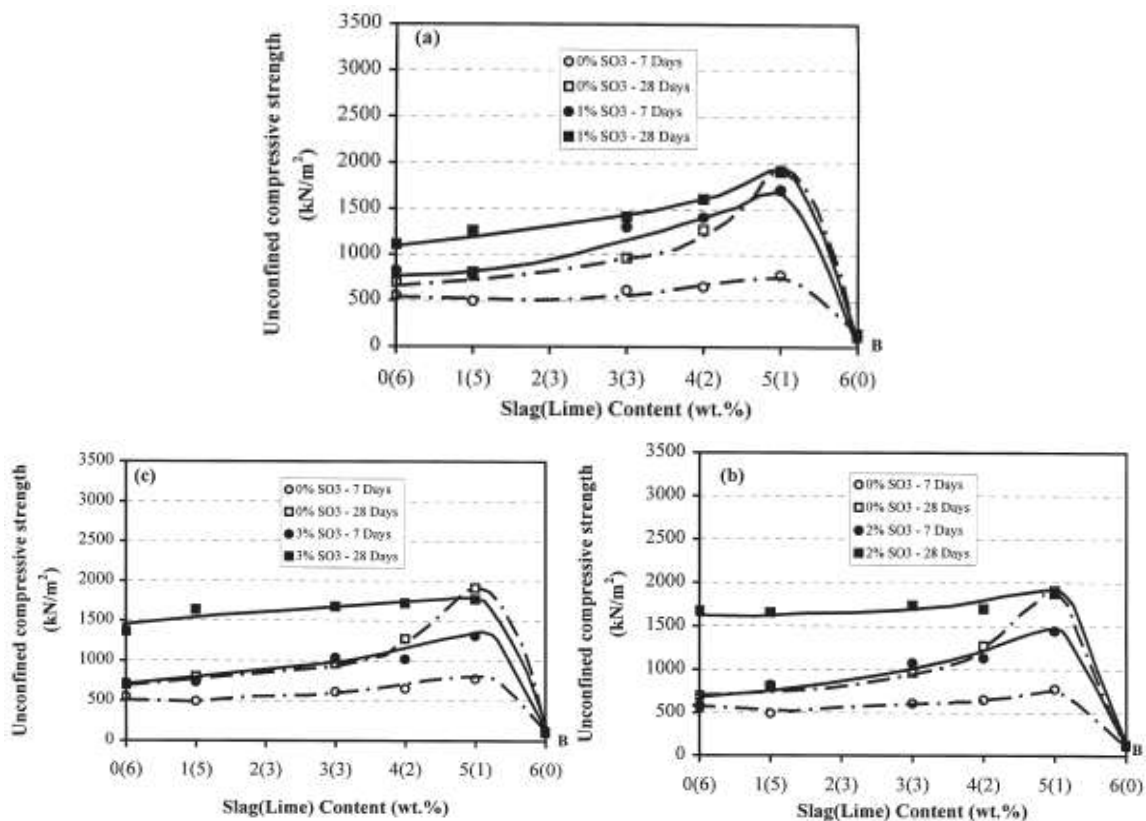


Figure 2.25 : UCS en fonction de la teneur en laitier pour les cylindres de composite (kaolinite-chaux-GGBS) avec et sans : (a) 1 ; (b) 2 ; (c) 3% équivalent SO₃ de gypse et durci pendant 7 et 28 jours à 30 ° C et 100% d'humidité relative (Wild et al. 1998).

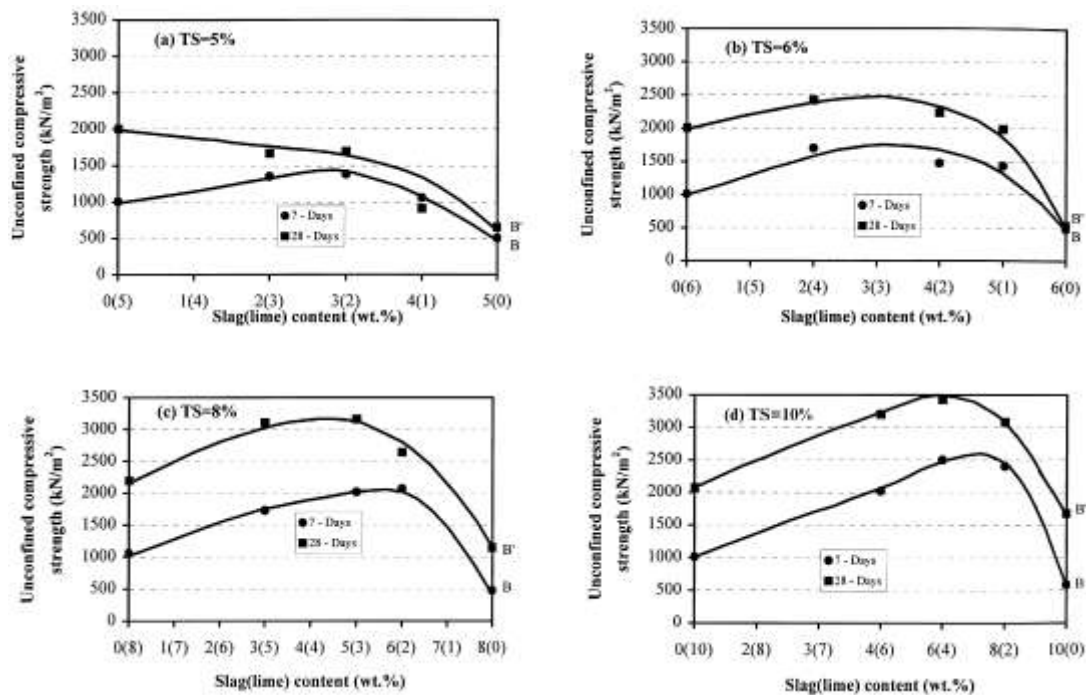


Figure 2.26 : UCS en fonction de la teneur en GGBS pour des cylindres de composite (argile Kimmeridge-chaux-GGBS) contenant un dosage en stabilisant total (TS) (chaux + GGBS) de: (a) 5; (b) 6; (c) 8; (d) 10% en poids et durci pendant 7 et 28 jours à 30 ° C et 100% d'humidité relative (Wild et al. 1998).

2.6.1.2. Effets du GGBS sur les propriétés des sols sulfatés acides (ASS) stabilisés à la chaux

Les sols contenant de la pyrite (FeS_2) sont appelés sols sulfatés-acides (ASS). En Australie, l'ASS occupe une superficie estimée à 95 000 km², où vit la majorité de la population australienne (Fitzpatrick et al. 2002).

De plus, les sous-structures à base d'ASS subissent souvent des changements minéralogiques délicats au fil du temps en raison de la formation de minéraux sulfatés, tels que l'ettringite [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$] et la thaumasite [$\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$]. Ces derniers sont en effet responsables de l'augmentation du volume du sol et de la dégradation de la résistance mécanique (Islam et al. 2014).

L'effet de la teneur en pyrite (FeS_2) sur le comportement de résistance d'EngClay (une argile artificielle préparée en mélangeant 85 % de kaolin et 15 % de bentonite) à l'aide de GGBS activé par la chaux a été étudié par plusieurs auteurs (Islam et al. 2016, 2015, 2014, 2013, 2012 ; Islam, 2014 ; Thomas, 2001 ; Veith, 2000). Les résultats ont indiqué que l'impact négatif de la pyrite (FeS_2) pouvait être réduit dans les sols sulfatés acides (ASS) en utilisant

du GGBS activé par la chaux, et la formation de thomasite-etteringite, un minéral nuisible, serait responsable de la dégradation de résistance du sol traité.

a) Effet du GGBS sur l'évolution du pH environnant

Le pH est un facteur clé pour la promotion et la durabilité des réactions pouzzolanique dans les sols stabilisés avec des ajouts cimentaires. Une valeur de pH élevée (supérieure à 12) indique un environnement de réaction dans lequel la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) dans les sols deviennent solubles et sont souhaitables pour une stabilisation efficace des sols (Little et al, 2010). Les variations de pH avec les périodes de durcissement pour divers ASS traités par le GGBS étaient l'objet de nombreuses études (Islam et al, 2014 ; Islam et al, 2013 ; Thomas, 2001). L'étude réalisée par Islam et al. (2013) montre les changements dépendant du temps du pH du sol traité avec diverses proportions de GGBS pour différentes conditions de durcissement. Une chute rapide du pH à partir de sa valeur initiale est observée (Figure 2.27). La chute rapide du pH pourrait être liée à une plus grande vitesse d'oxydation de la pyrite, qui génère de l'acide, où la consommation rapide d'ions OH^- lors des réactions cimentaires du composite (ASS-Chaux-GGBS). Les valeurs de pH pour tous les échantillons testés dans cette étude étaient supérieures à 12 pendant jusqu'à 180 jours de durcissement (Figure 2.27), indiquant des environnements de réaction cimentaires favorables en présence de GGBS.

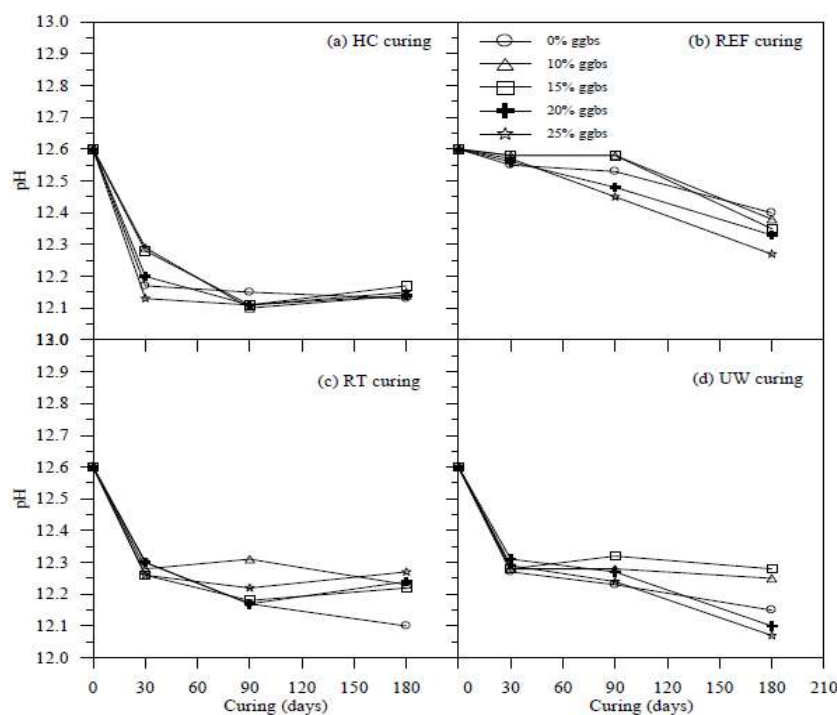


Figure 2.27 : a, b, c, d, pH de l'ASS synthétique traité avec 10% en poids de chaux et 0-25% en poids de GGBS durci dans divers environnements de durcissement pendant 180 jours (Islam et al. 2013).

Ainsi, Islam et al. (2014) ont étudié les variations de pH avec les périodes de durcissement pour divers sols (ASS) traités par différents dosages de GGBS (0-25 %). Les résultats obtenus montrent de manière générale que les valeurs de pH pour toutes les combinaisons d'additifs (chaux et GGBS) maintiennent une valeur bien supérieure à 12 (Figure 2.28), et ce qui attribue à un environnement de réaction cimentaire favorable.

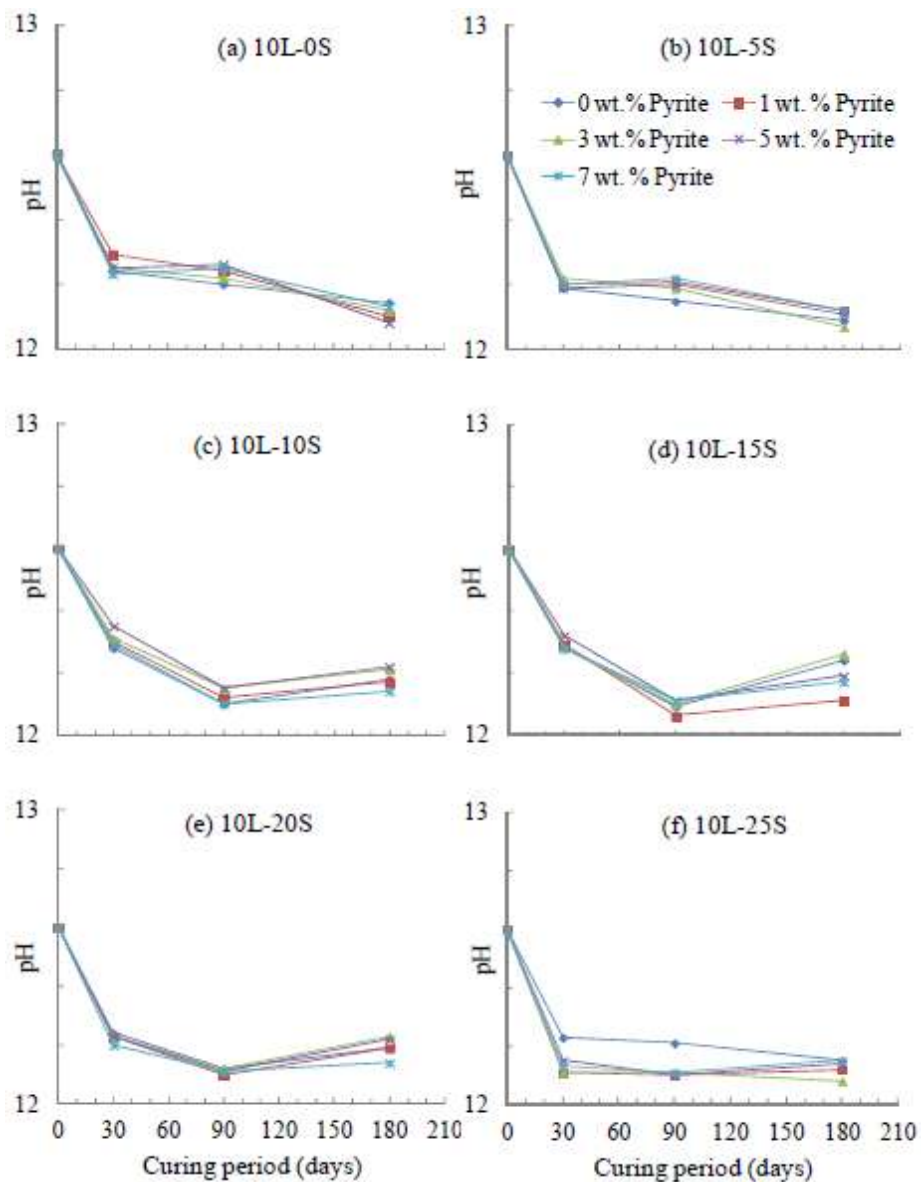


Figure 2.28 : a, b, c, d, e, f, pH de l'ASS synthétique de 0 à 7% en poids de pyrite traitée avec 10 % en poids de chaux et de 0 à 25% en poids de GGBS à différentes périodes de durcissement (Islam et al. 2014).

b) Evolution de la résistance à la compression simple non confiné (USC)

L'étude des variations de la pyrite sur la résistance (USC) d'ASS (EngClay : est une argile artificielle préparée en mélangeant 85 % de kaolin et 15 % de bentonite) traité par les additifs chaux- GGBS a été prise en compte par plusieurs chercheurs (Islam et al, 2015 ; Islam et al, 2014 ; Islam et al, 2013 ; Islam et al, 2012 ; Islam, 2014 ; Thomas, 2001 ; Stanley et al. 2011).

Islam et al. (2012) ont découvert qu'une teneur élevée en pyrite peut même contribuer à un développement de résistance plus élevé d'ASS lorsqu'une teneur en GGBS ≥ 20 % a été utilisée en combinaison avec une teneur en chaux au-dessus du point de saturation en chaux (Figure 2.29).

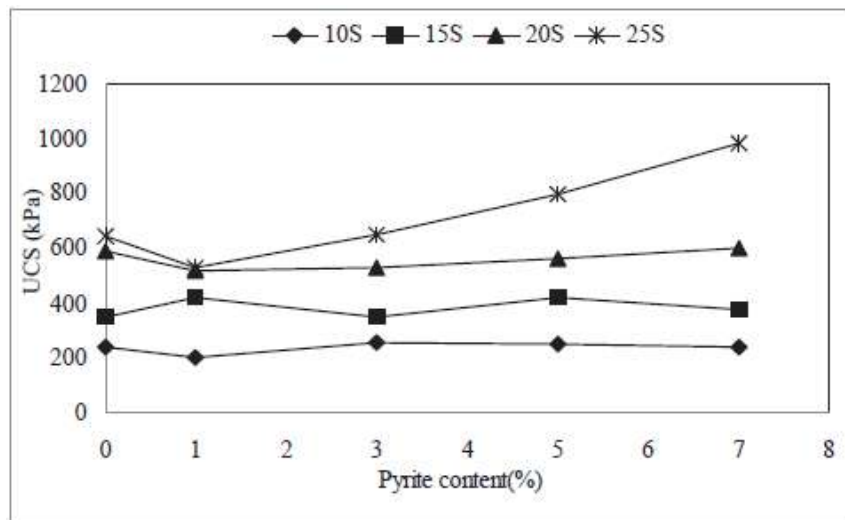


Figure 2.29 : Influence de la pyrite sur le développement de l'USC après 3 mois de durcissement (Islam et al. 2012)

De plus, Islam et al. (2013) ont montré qu'une teneur en GGBS de 15 % en poids, représentant un rapport GGBS sur chaux de 1.5, est optimale pour un développement durable de l'USC de l'ASS traité durci à des températures allant de 19 à 22 °C et une humidité allant de 45 à 100 % (Figure 2.30). Ils ont constaté que la résistance (USC) des ASS traités chutait après 180 jours de durcissement (figure 2.30), ce qui pourrait être attribué à la formation de minéraux d'ettringite et de thaumasite dans les sols traités (Islam, 2014).

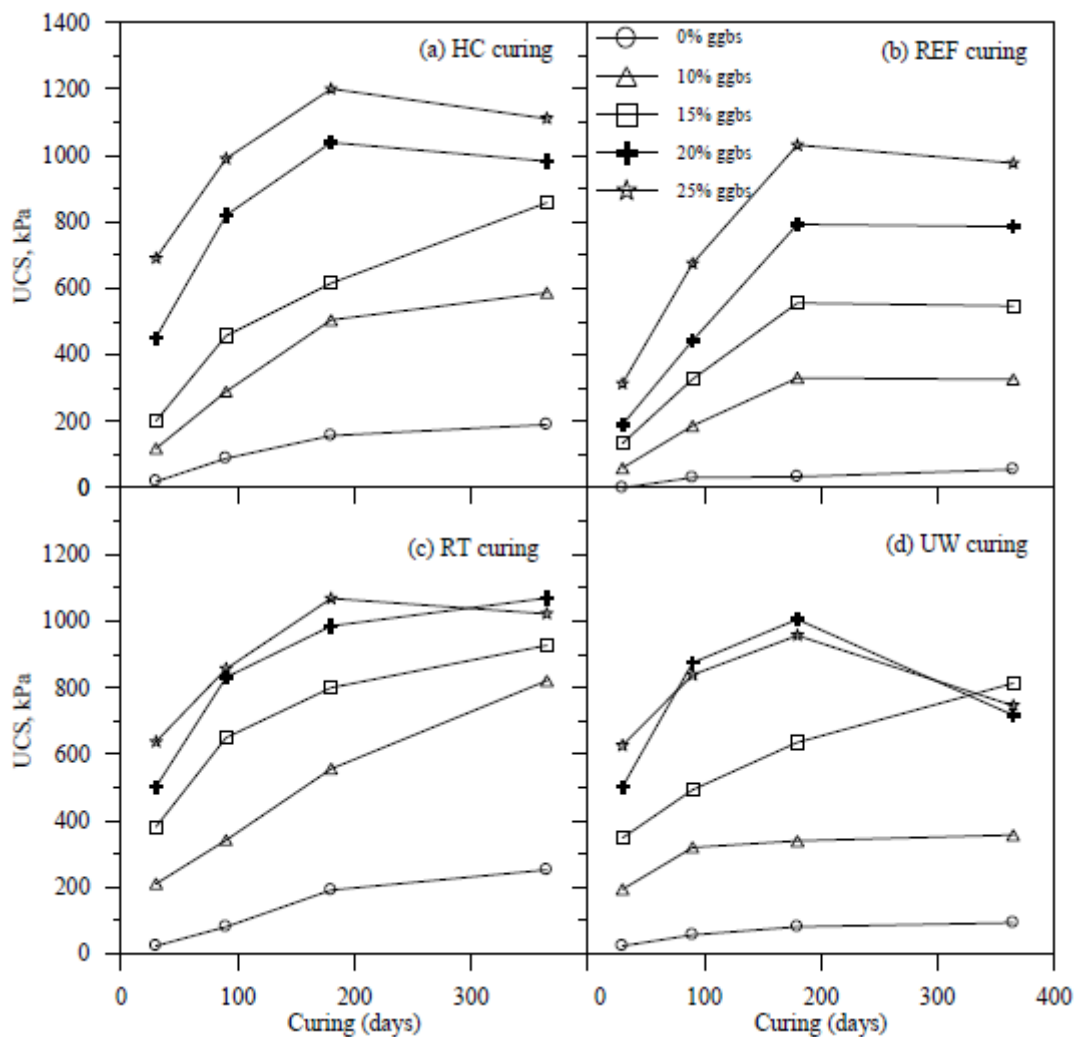


Figure 2.30 : a, b, c, d, Variation de l'USC avec durcissement d'un ASS synthétique traité par 10% en poids de chaux et 0-25% en poids de GGBS durci dans divers environnements de durcissement (Islam et al, 2013).

Islam et al. (2014) ont constaté qu'une teneur en GGBS supérieure à 10 % augmente considérablement la résistance de l'ASS traité pendant les périodes de cure de 365 jours étudiées (Figure 2.31).

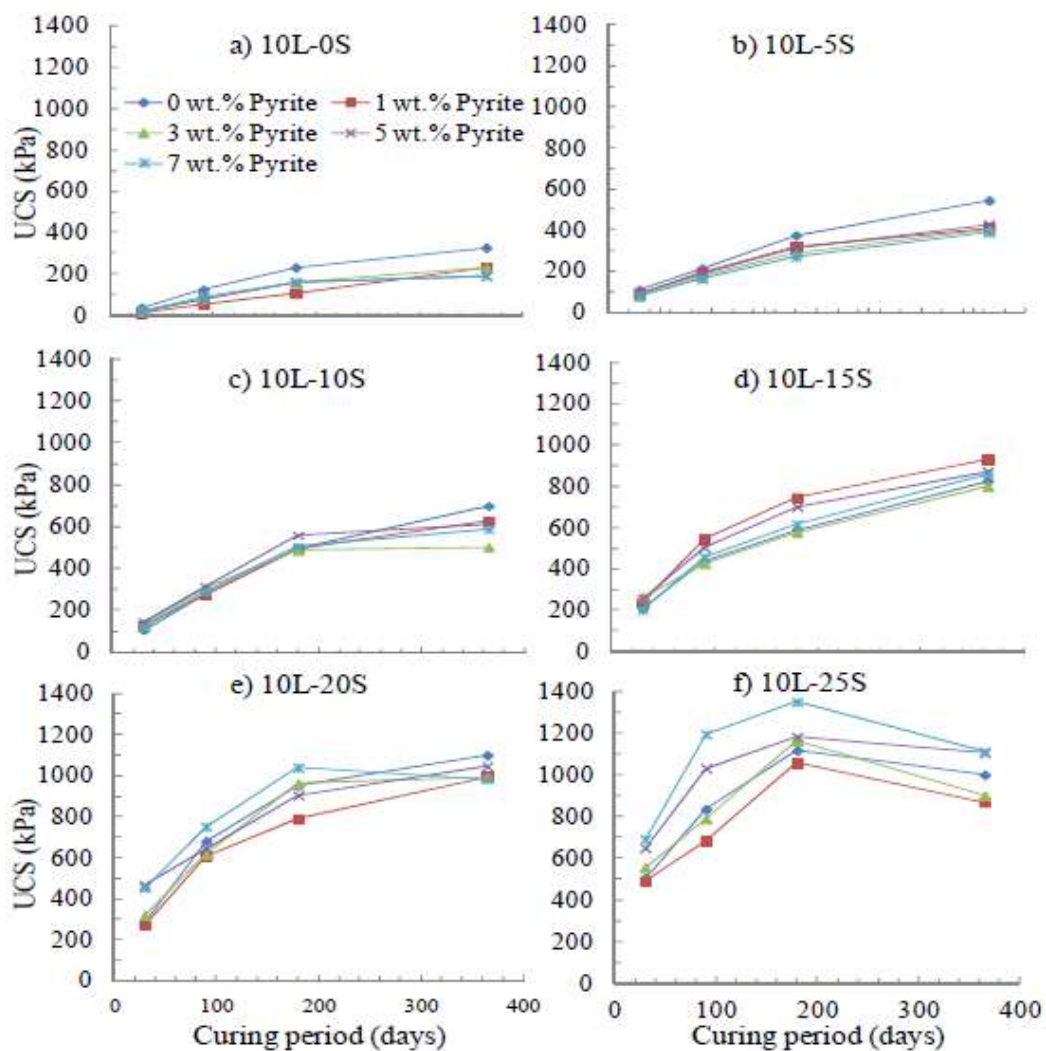


Figure 2.31 : a, b, c, d, e, f, USC d'ASS synthétique comprenant une teneur en pyrite de 0 à 7% en poids traitée avec 10% en poids de chaux et de 0 à 25% en poids de GGBS à différentes périodes de durcissement (Islam et al, 2014).

Islam et al. (2015) ont montré une diminution des valeurs UCS après 180 jours de cure pour l'ASS contenant 4 % en poids de pyrite supplémentaire et traité avec 20 % en poids de GGBS (Figure 2.32).

Par ailleurs, les résultats des analyses DRX et SEM (Islam et al, 2015) ont suggéré qu'un déclin de l'abondance des phases minérales cimentées après 180 jours de durcissement coïncide avec la formation possible de thaumasite-étringite notamment pour un ASS contenant 4% en poids de pyrite supplémentaire et traité avec 20% en poids de GGBS, et ce qui a été interprété comme étant responsable de la dégradation de l'UCS (Figure 2.32).

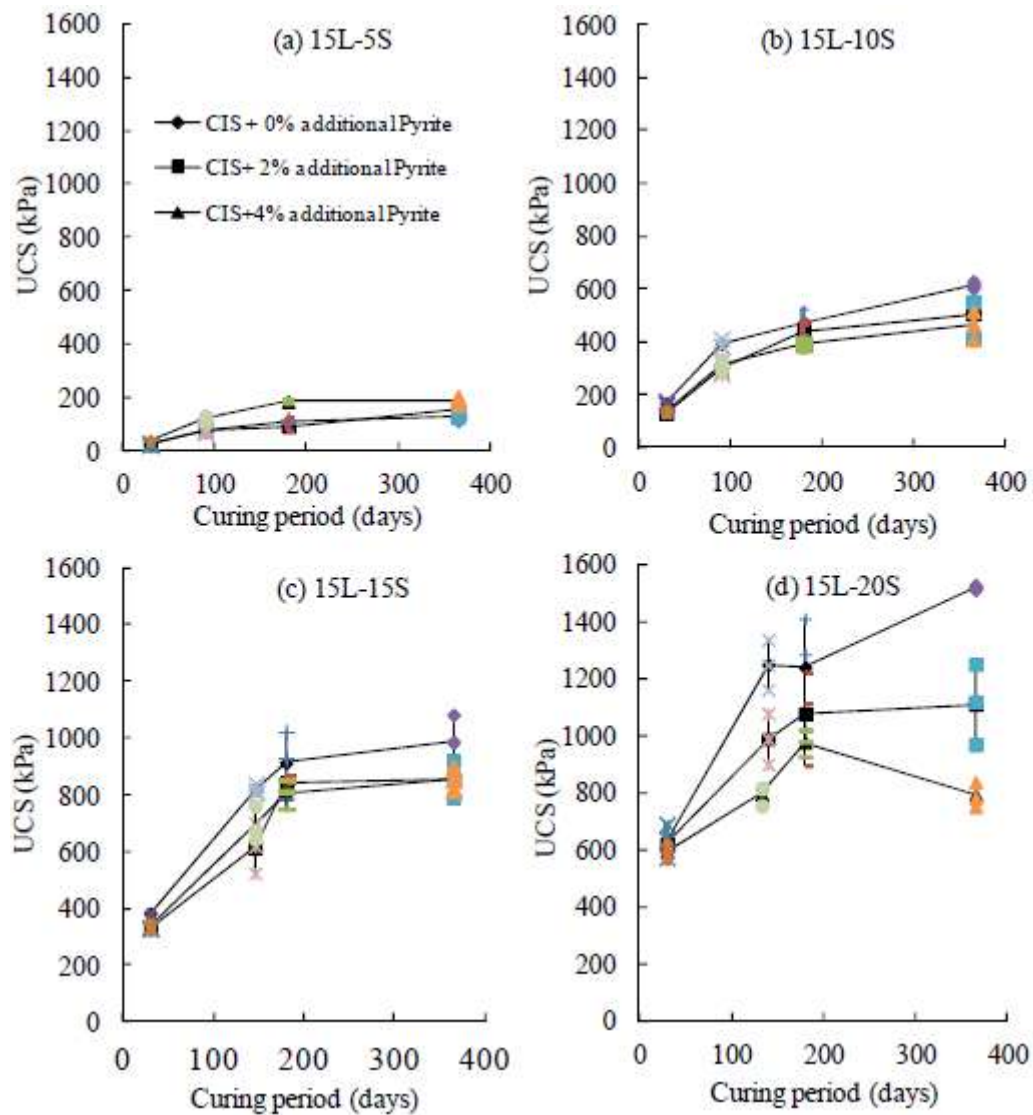


Figure 2.32 : a, b, c, d, Modification d'USC avec durcissement pour l'ASS traité avec et différentes dosages de GGBS (L : chaux ; S : GGBS) et différentes teneurs en pyrite traitées (Islam et al, 2015).

2.6.2 Les sols contaminés

La contamination des sols par les matières organiques tels que les hydrocarbures pétroliers, et les métaux lourds tels que le zinc (Zn), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd), le nickel (Ni) et le plomb (Pb), est un problème mondial affectant de nombreux pays. Elle est causée par le rejet de déchets miniers, industriels et agricoles, l'utilisation non scientifique d'engrais et de pesticides et l'utilisation de l'irrigation par les eaux usées (Liu et al, 2018). De plus, les métaux lourds hautement toxiques présentent de graves risques écologiques pour le sol et l'eau, même à de faibles concentrations (Song et al, 2018).

De nombreuses technologies de remédiation ont été progressivement développées et utilisées pour réduire les dommages graves causés par la pollution des sols par les métaux lourds et les matières organiques (Jiang et al, 2022). Actuellement, la technologie d'assainissement des sols contaminés par les métaux lourds la plus utilisée est la technique de solidification/stabilisation (Du et Jiang, 2022 ; Khalid et al, 2017). Cette technique pourrait atteindre les objectifs de remédiation plus rapidement à des coûts relativement inférieurs.

La solidification/stabilisation (S/S) implique le processus physique d'enfermement ou de liaison des contaminants de métaux lourds dans une matrice de sol stabilisée (solidification) et le processus chimique de réactions entre les contaminants et les liants qui réduisent leur mobilité (stabilisation) (Du et Jiang, 2022).

L'immobilisation des métaux à l'aide de résidus industriels recyclés est attrayante et très pratique ces dernières années, car elle est rentable et compatible avec l'environnement (Venegas et al, 2016 ; Xu et al, 2016). Le laitier granulé de haut fourneau broyé (GGBS), un sous-produit de l'industrie sidérurgique, attire de plus en plus l'attention de la recherche en raison de ses faibles coûts et de ses avantages environnementaux (Chen et al, 2018).

L'utilisation de GGBS pour le traitement S/S des sols contaminés présente de nombreux avantages économiques et environnementaux, et des recherches approfondies ont été menées à cet égard (Zhang et al, 2022, 2020 ; He et al, 2021 ; Ng et al, 2021 ; Li et al, 2021 ; Du et al, 2020 ; Keramatikerman et al 2018, Wu et al 2018, Bougharraf et al 2018, Wang et al 2021, 2018, 2016, 2015, Goodarzi et Movahedrad, 2017, Jin et al 2016, Kogbara, 2014 ; Kogbara et al, 2011, Kogbara et Al. Tabbaa, 2011).

La performance des sols contaminés traités par liants (Chaux-GGBS ; Ciment-GGBS ; MgO-GGBS) en terme de propriétés mécaniques et lixiviation, incluant la résistance de compression non confinée (UCS) et la lixivabilité, est évaluée par nombreux chercheurs

(Kogbara, 2014). La comparaison des différents liants au regard de ces paramètres de performance a également été présentée.

2.6.2.1. Effet du GGBS sur la lixiviation des sols contaminés

La plupart des études utilisant un liant hydraulique pour le traitement des sols contaminés se sont concentrées sur l'utilisation de la chaux, car il s'agit d'un agent stabilisant primaire comme le ciment. Les principaux contaminants fréquemment traités par la chaux-GGBS sont le Plomb (Pb), Nickel (Ni) et le Cadmium (Cd) (Kogbara, 2014).

Plusieurs études ont montré que le GGBS activé par la chaux pouvait réduire efficacement la lixiviation des contaminants étudiés (Figure 2.33) dans les sols contaminés (Kogbara, 2014 ; Kogbara et Al. Tabbaa, 2011 ; Kogbara et al. 2011). Les résultats obtenus par Kogbara et al. (2011), suggèrent qu'un dosage supérieur à 20 % de chaux-GGBS était nécessaire pour atteindre un équilibre entre des propriétés mécaniques et de lixiviation acceptables dans le traitement d'un sol sableux contaminé par le cadmium et le nickel.

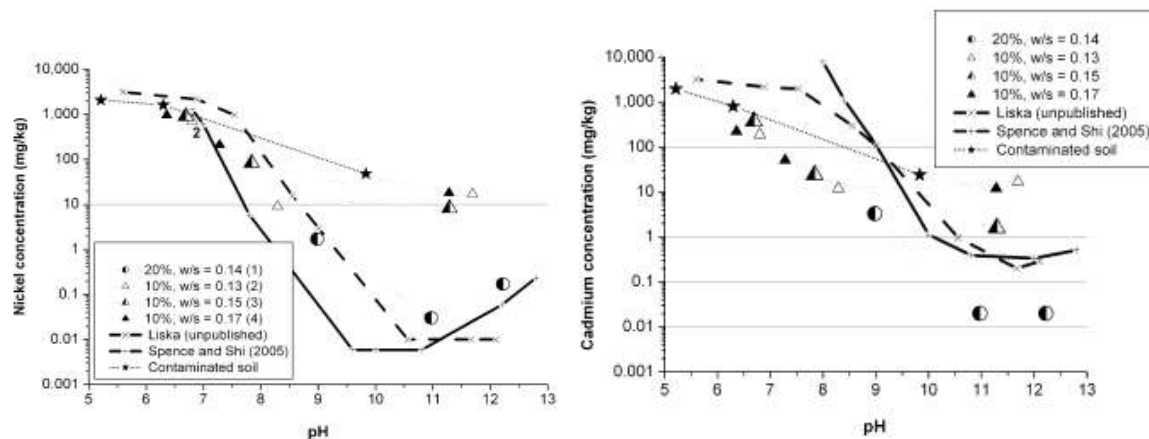


Figure 2.33 : Lixiviation du Cd et Ni dans 28 jours de cure dans des mélanges (chaux-GGBS) dosés à 10 % et 20 % (Kogbara et al. 2011).

De plus, les études suggèrent qu'avec une proportion plus faible de GGBS dans le mélange ciment-GGBS, le liant (ciment-GGBS) est susceptible de mieux performer que la chaux - GGBS au fil du temps en termes de lixiviation (Kogbara et al. 2011). En outre, Li et al, (2021) ont signalé que l'utilisation excessive de GGBS cause des effets négatifs sur la lixiviation de l'arsenic (As, est un oligo-élément d'origine naturelle). Par rapport au OPC, le pourcentage de remplacement recommandé de l'OPC par le GGBS doit être limité à 25 % dans le processus S/S des sols contenant de l'As (Li et al, 2021).

Dans une autre étude, Bougharraf et al. (2018) ont montré que 10% (OPC + GGBS) + 10% de bentonite amélioreraient l'immobilisation des éléments métalliques et des hydrocarbures et ceci explique la réduction discernable de lixiviation des contaminants.

En revanche, Zhang et al, (2022) ont montré que l'application du MgO-GGBS (10 %GGBS- 0 % à 3 % MgO) avait des effets positifs sur la lixiviation du Zn dans l'argile contaminée tandis que le CaO-GGBS a eu un effet négatif et la situation s'est encore aggravée à un dosage plus élevée de CaO (Figure 2.34).

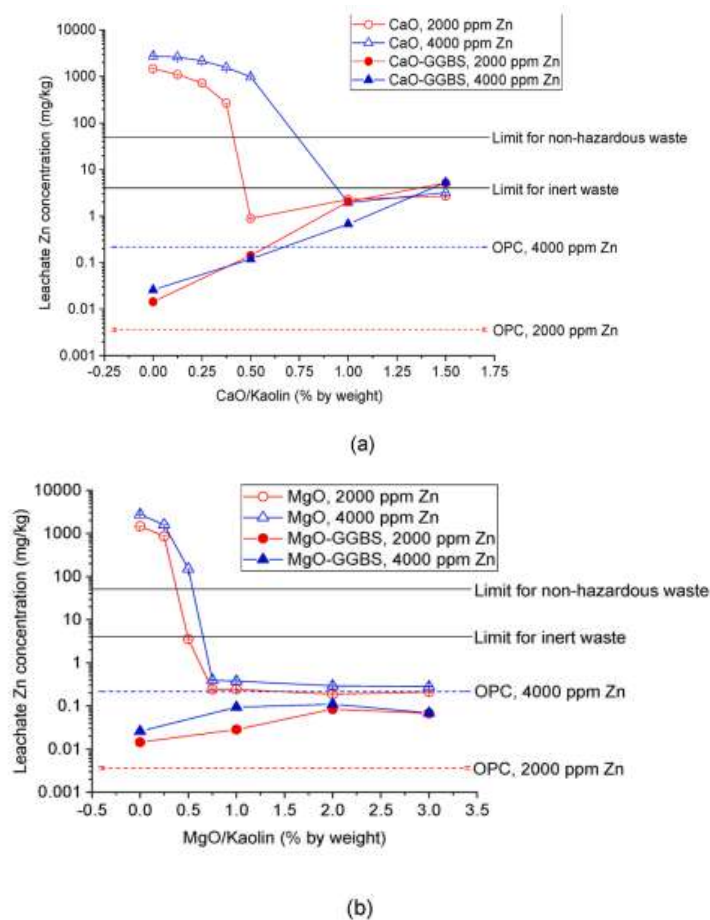


Figure 2.34 : Concentrations lessivées pour les boues d'argile contaminées au Zn traitées avec CaO-GGBS et MgO-GGBS par rapport à l'OPC (Zhang et al, 2021)

En comparaison, les mélanges de MgO-GGBS se sont avérés capables de fournir une moindre lixiviation des contaminants par rapport aux mélanges de ciment Portland (PC) uniquement dans les sols contaminés traités (Zhang et al, 2022 ; Wang et al 2021, 2018, 2016, 2015 ; Jin et al 2016).

2.6.2.2. Effet du GGBS sur l'UCS des sols contaminés

L'efficacité du GGBS sur l'UCS en utilisant différents types d'activateurs dans le traitement des sols contaminés par les hydrocarbures pétroliers (essence éthanol, diesel, etc) et les métaux lourds (plomb, zinc, cuivre, cadmium, nickel, etc), a fait l'objet de nombreuses études (Zhang et al, 2021 ; man et al, 2018 ; Wu et al, 2018 ; Bougharraf et al, 2018 ; Wang et al, 2018 ; Goodarzi et Movahedrad, 2017 . 2, 2020 ; He et al, 2021 ; Ng et al, 2021 ; Li et al, 2021). Ces études ont montré que le GGBS activé par différents liants (Chaux, PC, MgO, etc) améliorait de manière significative la résistance mécanique des sols contaminés en utilisant la technologie de stabilisation/solidification (S/S).

Zhang et al, (2021) ont rapporté qu'en comparant avec l'OPC, l'application de MgO-GGBS a produit une résistance (UCS) plus élevée des sédiments contaminés dragués (Figure 2.35) et celle de CaO-GGBS était la plus faible.

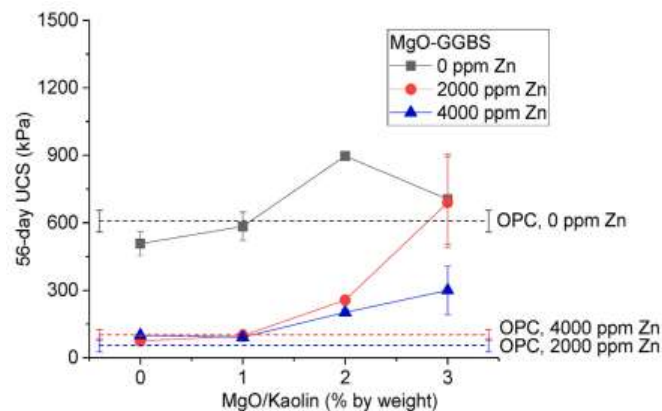


Figure 2.35 : Valeurs UCS de la suspension d'argile contaminée au Zn traitée par MgO-GGBS par rapport à l'OPC (Zhang et al, 2021).

De plus, Du et al, (2020) ont étudié l'effet des pluies acides sur la résistance des sols contaminés par les métaux lourds stabilisés au GGBS-MgO. Les résultats obtenus montrent que l'UCS des sols solidifiés/stabilisés augmente avec l'augmentation de la teneur en GGBS-MgO. Ainsi, Keramatikerman et al. (2018) ont examiné l'effet du GGBS sur les caractéristiques mécaniques de l'argile contaminée par l'essence Ethanolique (E10). Ils ont indiqué qu'une augmentation d'E10 réduisait les valeurs maximales de la résistance UCS, mais que l'addition du GGBS et du temps de durcissement étaient efficaces pour améliorer les valeurs maximales (Figure 2.36).

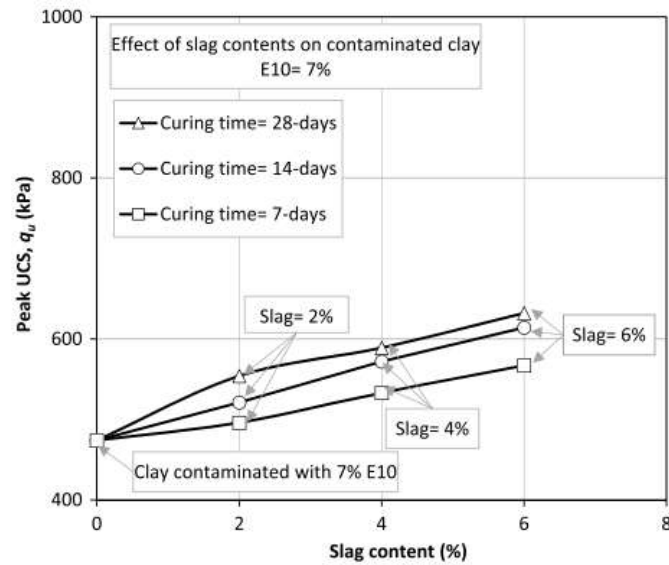


Figure 2.36 : Effet de la teneur en GGBS sur le pic d'UCS de l'argile contaminée à 7% E10 après 28 jours de cure (Keramatikerman et al. 2018).

Par ailleurs, Jin et al. (2016) ont conclu que le MgO seul a fourni une résistance négligeable au sol contaminé ($W_p = 24\%$; $W_L = 30\%$) tandis que le remplacement de MgO par 90% de GGBS a augmenté la résistance, atteignant $> 3,5$ MPa (Figure 2.37).

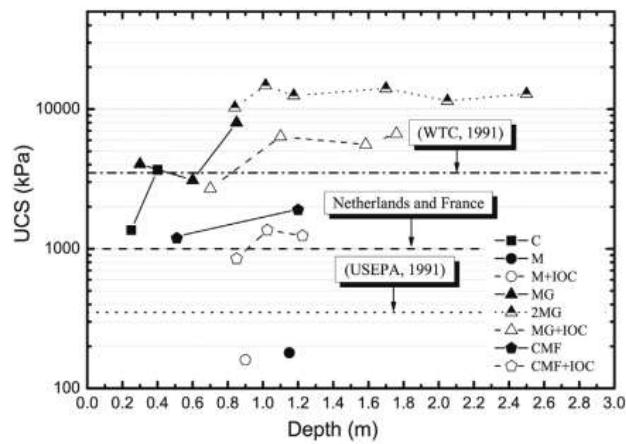


Figure 2.37 : Variation de l'UCS du sol contaminé stabilisé par MgO seul et par MgO-GGBS (Jin et al, 2016).

2.6.3. Les argiles molles

La stabilisation d'argile molle par le ciment Portland (PC) est largement utilisée dans le monde entier (Kitazume et Terash, 2013 ; Terash et Kitazume, 2011 ; Al-Tabbaa et al, 2011). Cependant, la production de PC associée a des impacts environnementaux significatifs, tels que des émissions élevées de CO₂, une consommation d'énergie et des ressources non renouvelables.

De plus, une étude comparative entre les impacts environnementaux associés à la production de GGBS et ceux associés à la production de ciment portland (Higgins, 2007) a montré que la production d'une tonne de GGBS pour une consommation d'énergie de 1300 MJ donne 0,07 tonne d'émissions de CO₂ seulement tandis que la production d'une tonne de ciment Portland engendre 0.95 tonne d'émissions de CO₂ et une consommation élevée d'énergie de 5000 MJ. Ainsi, l'utilisation de sous-produits industriels-déchets, tel que le GGBS, en remplacement du ciment portland pour la stabilisation des argiles molles a été encouragée.

Pour réduire l'utilisation de PC dans le domaine de stabilisation des argiles molles, de nombreuses études ont examiné l'efficacité de stabilisation chaux-GGBS, du laitier de carbure (CS)-GGBS et de l'alcali-GGBS pour l'argile molle, par rapport à celle du ciment Portland. (Li et al, 2022 ; Estabragh et al, 2022 ; Corrêa-Silva et al, 2020 ; Caselles, 2020 ; Sargent, 2020 ; Chowdary et al, 2020 ; He et al, 2019 ; Xu et Yi, 2019 ; Yi et Ni, 2018 ; Al-Khafaji et al, 2017 ; Yi et al. 2016 ; Yi et al. 2015a, 2015b, 2015c, Yi et al. 2014a, 2014b, 2014c, 2014d).

2.6.3.1. Effet du GGBS sur les propriétés microstructurales

Les analyses microstructurales des argiles molles sont habituellement étudiés a partir les tests de diffraction des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB). Les analyses microstructurales ont montré que les principaux produits d'hydratation détectés pour les argiles molles stabilisées par CS-GGBS comprenaient des hydrates (Figure 2.38) de silicate de calcium (C-S-H), des hydrates d'aluminate de calcium (C-A-H) et du monosulfate d'alumino-ferrite (AFm) (Li et al, 2022 ; Yi et Ni, 2018 ; Yi et al. 2015a ; Yi et al. 2014b, 2014c, 2014d).

Par ailleurs, l'utilisation de GGBS activé par la chaux vive et par la chaux hydratée a été comparée au ciment portland (PC) pour la stabilisation de l'argile molle marine (Yi et al. 2015b). Les résultats DRX et MEB ont indiqué que les principaux produits d'hydratation pour

les argiles stabilisées par GGBS activé par la chaux étaient CSH, CAH, CASH et AFm. L'étude a également montré que les produits d'hydratation de la chaux-GGBS et du PC sont similaires (Figure 2.39).

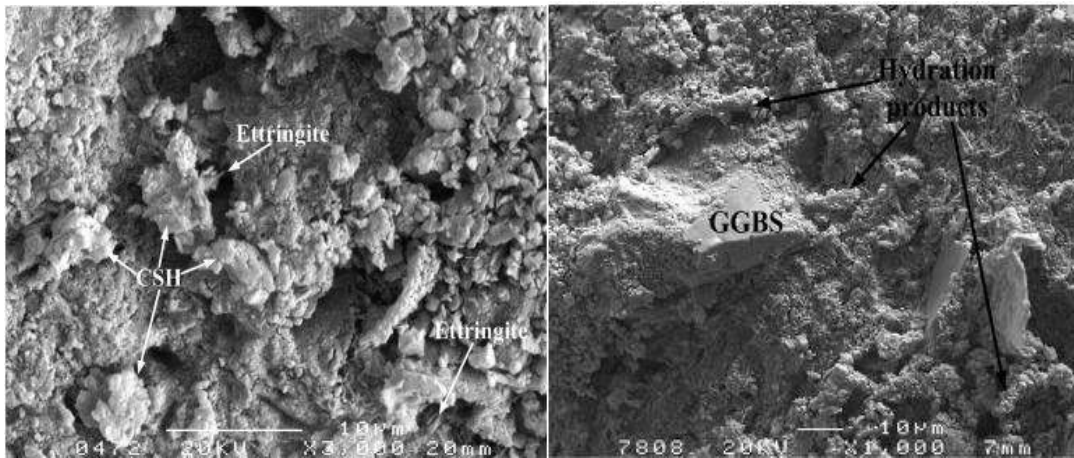


Figure 2.38 : Images MEB de 30 % d'argile stabilisée au GGBS avec un rapport C/G de 0,15 de 90 jours (Yi et al, 2014c).

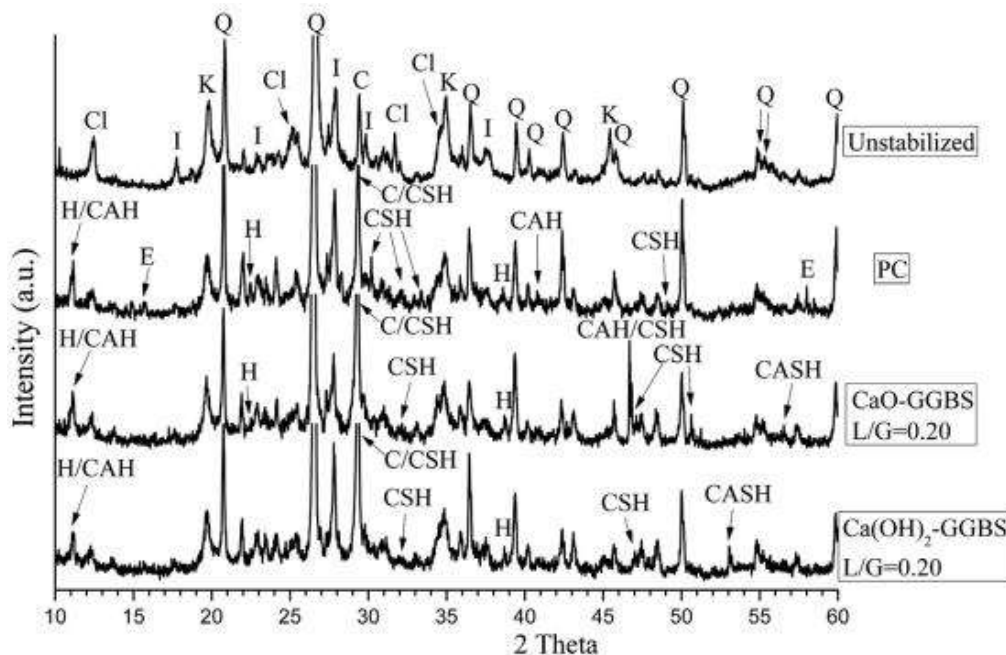


Figure 2.39 : Diffractogrammes DRX d'argile non stabilisée et d'argiles de 28 jours stabilisées par PC, CaO-GGBS et Ca(OH)_2 – GGBS avec un rapport L/G de 0,20 (Yi et al, 2015b)

De plus, l'influence des activateurs alcalins, y compris NaOH et Na_2SO_4 , sur l'efficacité de la stabilisation de l'argile molle, a également été étudiée (Corrêa-Silva et al, 2020 ; Sargent, 2020 ; Chowdary et al, 2020 ; Yi et al, 2014b). Le seul produit d'hydratation a été détecté

dans toutes les argiles stabilisées par le composite (alcalin-GGBS) est de type C-S-H (figure 2.40). Les études ont également indiqué que le principal produit d'hydratation de GGBS activé par un alcali était similaire à celui du PC (Estabragh et al, 2022 ; Caselles, 2020).

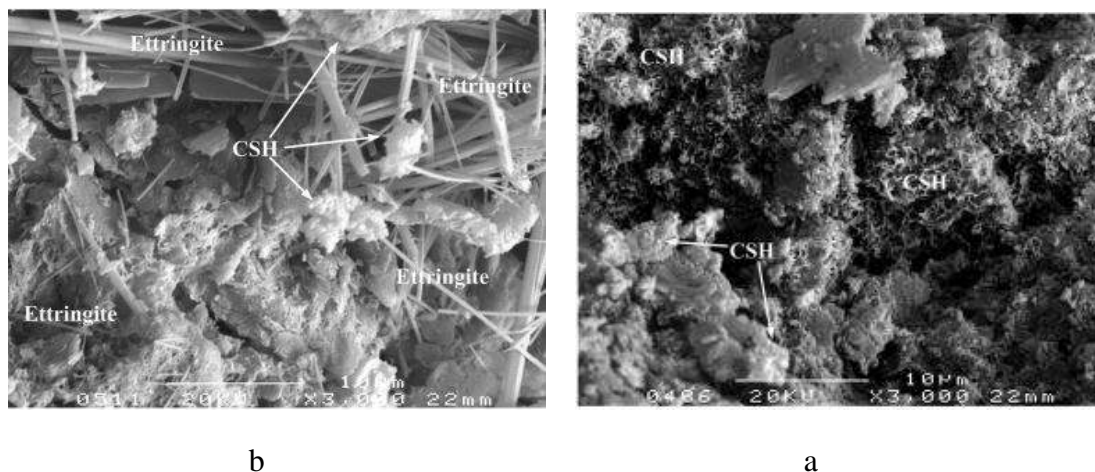


Figure 2.40 : Micrographies électroniques à balayage typiques d'argiles stabilisées : (a) NaOH-GGBS de 90 jours ; (b) Na₂SO₄-CS-GGBS de 90 jours (Yi et al, 2014b).

Comme étant alternative aux activateurs traditionnel, la magnésie réactive MgO s'est également avérée être un activateur efficace pour la stabilisation des argiles molles marines à l'aide de GGBS (Estabragh et al, 2022 ; Yi et al, 2016a ; 2016b ; Yi et al, 2015a ; Yi et al, 2014d). Les analyses microstructurales XRD et MEB ont montré que seuls les hydrates de calcique de type C-S-H ont été détectés (Figure 2.41).

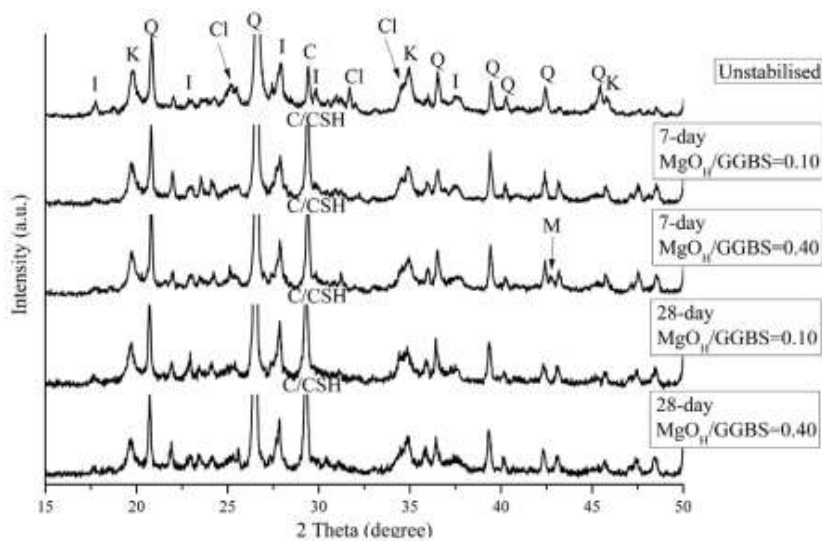


Figure 2.41 : Diffractogrammes DRX des argiles non stabilisées et stabilisées MgO-GGBS (Yi et al, 2016a).

2.6.3.2. Evolution de la résistance à la compression simple non confinée (UCS)

La résistance à la compression simple non confinée (UCS) est le paramètre clé de stabilisation pour les argiles molles, ainsi qu'un indicateur directe de l'efficacité d'activateurs sur le GGBS. Plusieurs recherches ont confirmé que la résistance (UCS) de l'argile stabilisée au CS-GGBS inférieure à celle des argiles stabilisées au MgO-GGBS, mais supérieure à celle des argiles stabilisées au ciment Portland (Li et al, 2022 ; Yi et al, 2015a ; Yi et al, 2014c, 2014d).

L'étude expérimentale, réalisée par Li et al, (2022), a examiné l'utilisation de sous-produits industriels combinés, de boues de laitier (CS) et de laitier granulé de haut fourneau broyé (GGBS), pour remplacer le ciment Portland ordinaire (OPC) pour la stabilisation d'une argile molle. Les résultats indiquent que le composite CS-GGBS a donné une résistance plus élevée que le ciment Portland (PC) dans la suspension d'argile molle (Figure 2.42).

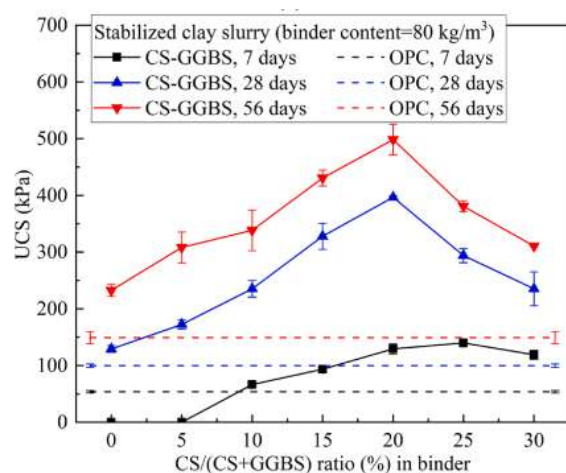


Figure 2.42 : UCS d'une suspension d'argile stabilisée contenant du liant (Li et al, 2022)

En outre, Yi et al. (2014c) ont montré que la résistance de la compression (UCS) optimale de argile stabilisée par CS-GGBS était supérieure plus du double à celle de l'argile stabilisée par ciment Portland (PC) (Figure 2.43). Yi et Ni, (2018) ont révélé que la résistance la plus élevée de l'argile stabilisée par CS-GGBS était de 1,5 à 3 fois supérieure à celle mesurée pour l'argile stabilisée par PC (Figure 2.44). Ainsi, le rapport massique optimal CS/GGBS variait de 0,2 à 0,3 pour l'argile stabilisée à différents âges de cure et teneurs en GGBS. Un comportement similaire a également été observé par Yi et al, (2014b).

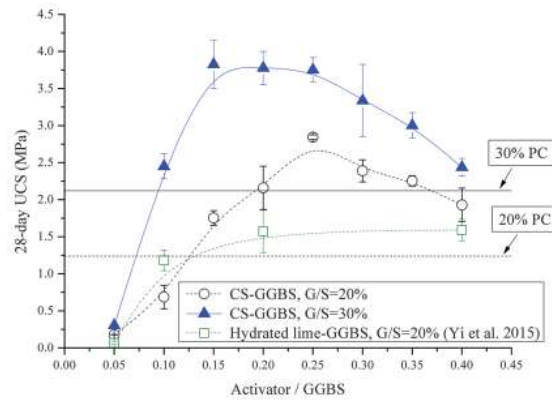


Figure 2.43 : UCS des argiles stabilisées à 28 jours de durcissement (Yi et al, 2014c).

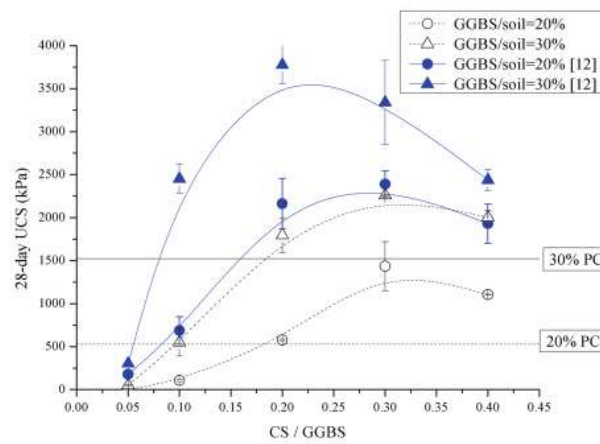


Figure 2.44 : UCS des argiles stabilisées à 28 jours (Yi et Ni, 2018)

Ainsi, Yi et al, (2015a) ont observé que la résistance de compression (UCS) optimale à 90 jours des argiles stabilisées par MgO-GGBS et par CS-GGBS était supérieure de 3,0 à 3,2 fois à celle de l'argile stabilisée par le ciment portland (PC), respectivement (Figure 2.45).

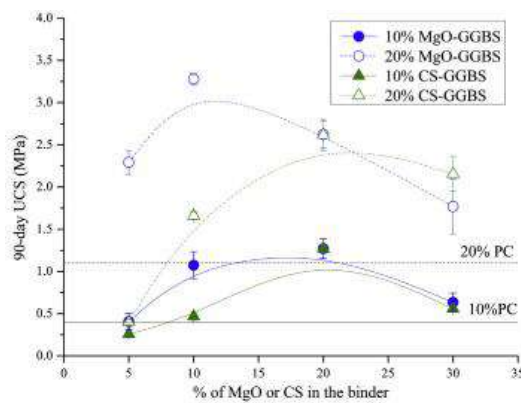


Figure 2.45 : UCS des argiles stabilisées à 90 jours de durcissement (Yi et al, 2015a).

Par ailleurs, Yi et al. (2015b) ont constaté que l'UCS optimal à 90 jours, avec un rapport chaux/GGBS de 0,10, était supérieure de 1,7 fois à celle de l'argile stabilisée par le PC (Figure 2.46). En outre, Yi et al. (2016) ont révélé que le MgO à haute réactivité avait une efficacité d'activation élevée pour le GGBS et accélérât ainsi le taux de développement de la résistance de compression simple non confinée (UCS) de l'argile molle stabilisée (Figure 2.47).

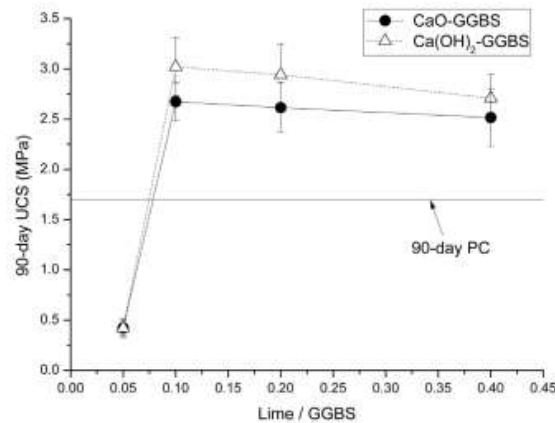


Figure 2.46 : UCS de l'argile molle stabilisée par CaO-GGBS et par Ca(OH)₂ - GGBS à 90 jours (Yi et al. 2015b).

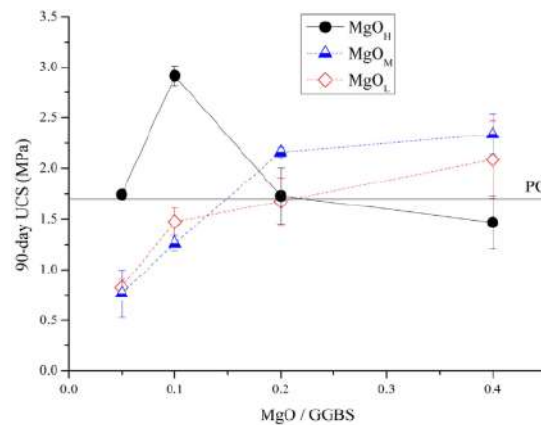


Figure 2.47 : UCS de l'argile molle stabilisée par MgO-GGBS à 90 jours (Yi et al. 2015b).

Dans une autre application du GGBS avec les argiles molles, Xu et al, (2019) tentent d'utiliser le laitier de poche (LS) pour activer le laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) pour la stabilisation de l'argile molle. Les résultats obtenus ont montré qu'avec un rapport LS : GGBS de 2 : 8 - 5 : 5, et après 56 jours, les argiles stabilisées par LS-

GGBS pourraient atteindre une résistance à la compression non confinée (UCS) similaire ou supérieure (Figure 2.48) à celle de l'argile stabilisée par le ciment Portland ordinaire (OPC).

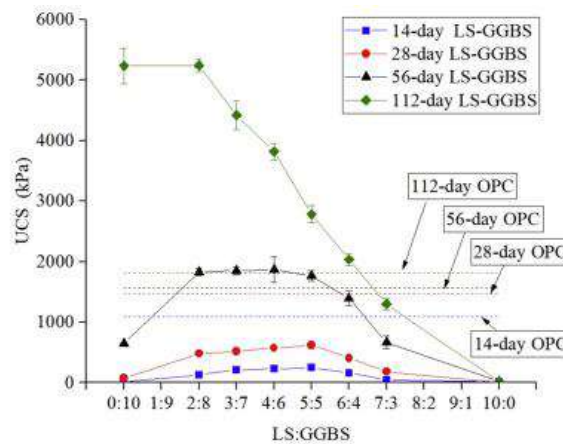


Figure 2.48 : UCS de l'argile molle stabilisée par LS-GGBS avec une teneur en liant de 20 % (Xu et al, 2019).

2.6.4. Les sols inondés

L'effet de la vapeur d'eau en tant que contributeur majeur au réchauffement climatique est exacerbé par l'augmentation des processus industriels au fil des ans. Cela a le potentiel d'augmenter la fréquence et l'intensité des précipitations entraînant des inondations (Kilsby et al, 2009).

Les inondations ont un impact négatif sur le développement car les eaux de crue qui restent longtemps pourraient être nocives pour les couches structurelles des routes et les composants matériels des bâtiments et affecter leur durabilité (Obuzor et al, 2011b). Pour les solutions de conception impliquant des sols à faible portance, la stabilisation du sol a été utilisée en vue d'améliorer la capacité portante du sol.

Dans ce contexte, il est nécessaire d'explorer la possibilité d'atteindre un degré de stabilisation significativement élevé, de manière à résister aux effets des inondations, et d'évaluer la durabilité de la stabilisation des sols sensibles aux inondations en remplaçant partiellement la quantité de chaux traditionnellement utilisée par le GGBS.

Bien qu'il existe un nombre important de recherches sur le sujet de la stabilisation des sols, il existe peu de littérature (Khayat et al, 2021 ; Obuzor et al, 2012 ; Obuzor et al, 2011a,

2011b) sur la stabilisation des sols à faible capacité portante en vue d'atténuer les effets des inondations.

Compte tenu l'objet, des événements d'inondation ont été simulés en laboratoire et des éprouvettes cylindriques composées de différents mélanges à différentes teneurs en humidité de compactage ont été examinées (Obuzor et al, 2012 ; Obuzor et al, 2011a, 2011b). L'évaluation de la résistance, la durabilité et la capacité d'absorption d'eau des sols étudiés, étaient également l'intérêt des chercheurs.

2.6.4.1. Evolution de la durabilité et la résistance (UCS)

Pour simuler les effets de l'inondation sur les couches routières en termes de résistance et de durabilité, des essais en laboratoire de compression simple non confinée (UCS) ont été effectués (Khayat et al, 2021 ; Obuzor et al, 2012 ; Obuzor et al, 2011a).

Les résultats du test UCS de l'argile Lower Oxford (LOC) stabilisé à 16 % d'ajout de liant (Chaux-GGBS) montrent qu'en remplaçant la teneur en chaux par 12 % du GGBS, pour atteindre un rapport de 1: 3 (4 % de chaux-12 % GGBS) une tendance optimale (Figure 2.49, et 2.50) à l'augmentation de la résistance même dans un environnement trempé (Obuzor et al, 2011a). L'étude a également signalé que l'effet du trempage sur l'argile stabilisée à une teneur en humidité de 23 % a été considérablement atténué.

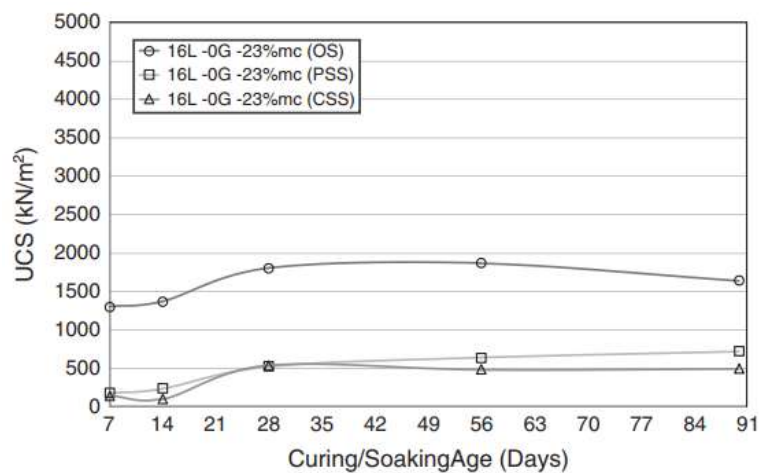


Figure 2.49 : UCS lors du trempage du LOC, stabilisé par 16% Chaux- 0% GGBS à 23% mc (Obuzor et al, 2011a)

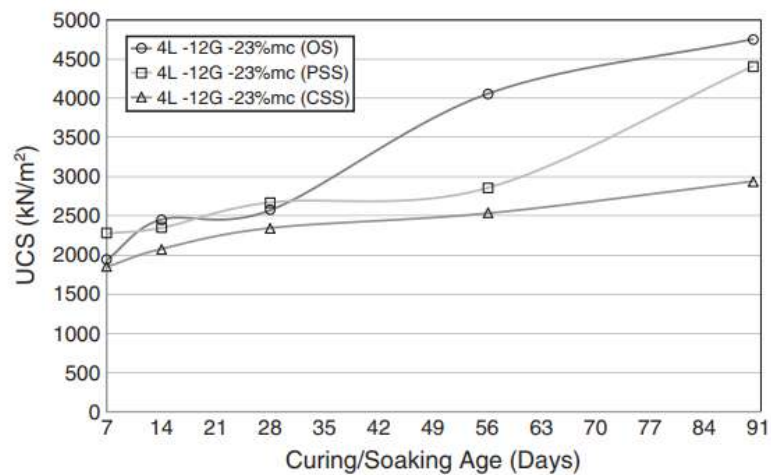


Figure 2.50 : UCS lors du trempage du LOC, stabilisé par 4% Chaux- 12% GGBS à 23% mc (Obuzor et al, 2011a).

Une étude similaire effectuée par Obuzor et al, (2012) a montré qu'à 4% Chaux - 12% GGBS et 33% de teneur en humidité, la durabilité était la plus élevée (Figure 2.51), bien qu'en termes de résistance, il a été observé qu'elle diminuait avec l'augmentation de l'humidité au-delà d'un optimum.

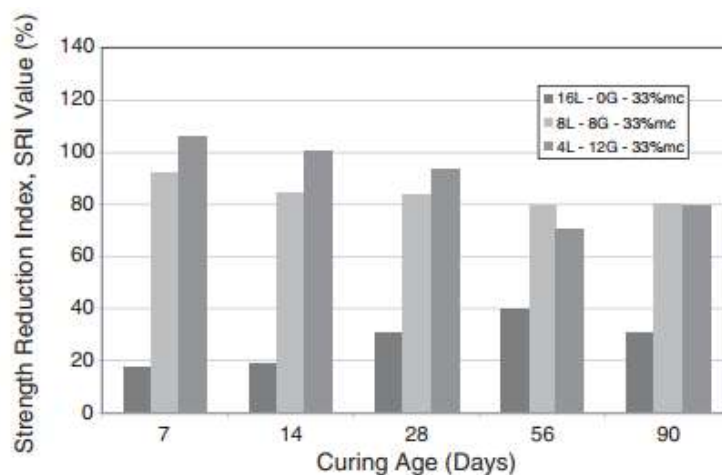


Figure 2.51 : Valeurs de l'indice de réduction de résistance (SRI) du LOC stabilisé après 4 jours de trempage complet dans l'eau (Obuzor et al, 2012).

2.6.4.2. Effet du GGBS sur la capacité d'absorption d'eau

Le compactage à une teneur en humidité plus faible a augmenté le frottement inter-particules et en partie par la formation incomplète de produits d'hydratation par rapport à la situation qui prévaut à une teneur en humidité de compactage plus élevée. Cela s'explique par le fait que les spécimens d'essais avec une teneur en humidité de compactage plus faible ont

absorbé plus d'eau lors d'un trempage complet dans l'eau par rapport aux spécimens compactés à une teneur en humidité relativement plus élevée (Obuzor et al, 2011b).

Dans ce contexte, les études d'Obuzor et al, (2011b) et Khayat et al, (2019), respectivement, ont montré que l'absorption d'eau a été réduite avec l'ajout de GGBS et l'augmentation de l'âge de durcissement (Figure 2.52). Cette réduction pourrait être s'expliquer par la formation des gels cimentaires (C-S-H ; C-A-H ; C-A-S-H) dans un processus dépendant du temps (Figure 2.53). Ces derniers sont en effet responsables d'améliorer à la fois la résistance et la densification du système (Argile-Chaux-GGBS) pour réduire l'infiltration d'eau (Khayat et al, 2019 ; d'Obuzor et al, 2011b).

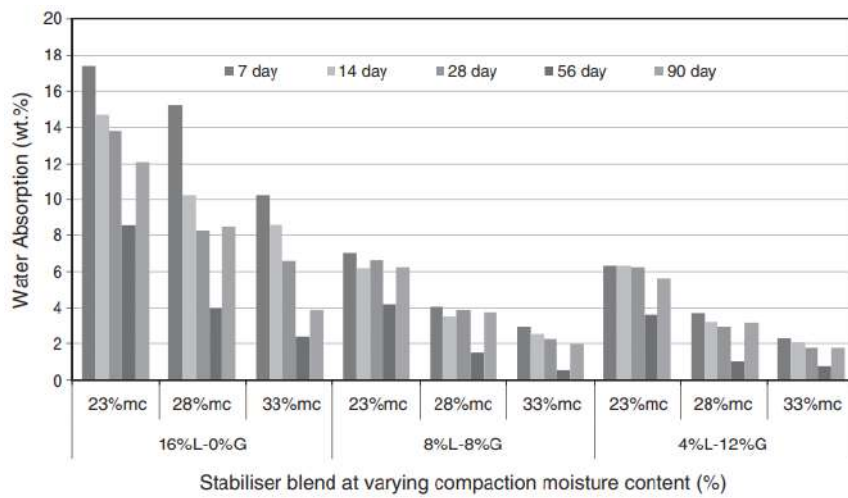


Figure 2.52 : Une comparaison de l'absorption d'eau dans les différentes compositions de mélanges de liants stabilisants à différentes teneurs en humidité de compactage (Obuzor et al, 2011b).

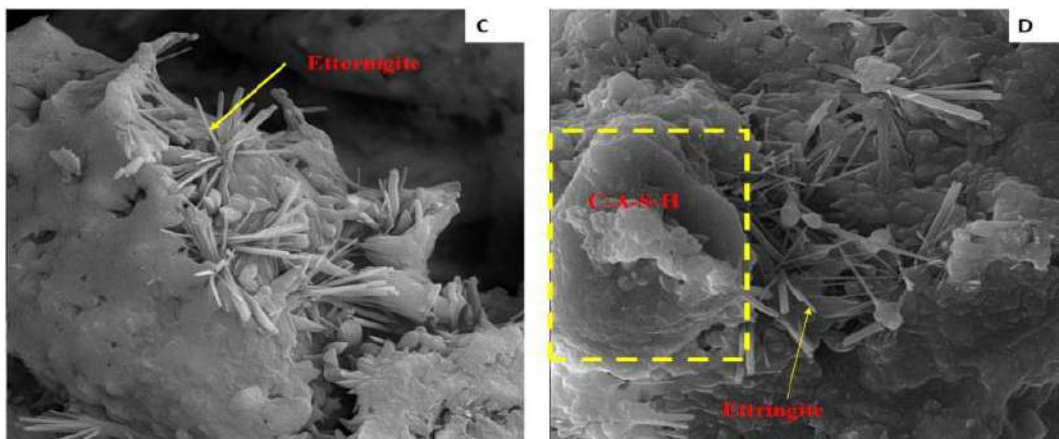


Figure 2.53 : Image SEM des échantillons de test ; (c) formation de minéraux C-S-H, C-A-H et (D) formation de gel C-A-S-H (Khayat et al, 2019).

2.7. Conclusion

Les principales utilisations actuelles des produits non traditionnels dans le domaine de traitement des sols argileux étaient l'objet de plusieurs recherches. Ainsi, les performances de nombreux sous-produits ou déchets industriels ont été testées pour limiter la fréquence de traitement, c'est-à-dire, limiter le coût et l'impact environnemental lors de la réalisation des ouvrages routiers. Parmi les produits non traditionnels disponibles, le laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS). Donc, il est nécessaire de caractériser et quantifier leur action sur les sols.

Ce chapitre a tout d'abord passé en revue le contexte général du traitement au GGBS dans le domaine géotechnique. Les mécanismes physico-chimiques engendrés par l'ajout du GGBS dans des sols ont été présentés. Ensuite, les connaissances actuelles sur les effets de GGBS à court terme, à moyen et à long terme sur les caractéristiques des différents types de sols ont été synthétisées.

Cependant, l'évolution de la microstructure et l'analyse du couplage entre la microstructure et les comportements mécaniques des sols traités par l'ajout du GGBS restent peu étudiés. L'objectif de la partie suivante (expérimentale) de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre les actions chimiques et l'évolution des paramètres physique et mécanique d'un sol traité par ajout du GGBS, soit indépendamment, soit avec des données d'essais de la littérature pour atteindre l'objectif mentionné.

Chapitre 3

Matériaux et Méthodes

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, on procédera, d'une part, à l'identification des matériaux étudiés dans le présent travail en procédant à des séries d'essais expérimentaux minéralogiques, chimiques, physiques et mécaniques, et d'autre part, à la présentation des différents modes de préparation des éprouvettes ainsi qu'à leurs formulation.

3.2. Matériaux

3.2.1. Le sol étudié

Le sol étudié, provenant d'un gisement se trouvant au lieu-dit Laghdir, situé à environ 30 km à l'est de la ville de Skikda (Algérie), est utilisé pour la réalisation d'un tronçon de l'autoroute Est-Ouest. Le sol a été prélevé à une profondeur d'environ 2 m. Après son extraction et une fois recueilli dans des sachets en plastique pour éviter la dessiccation, l'échantillon de sol a été subi en laboratoire des séries d'essais d'identification physico-chimique et mécaniques.

3.2.1.1. Analyse chimique

L'analyse chimique du sol a été réalisée au laboratoire central de la société des ciments de HADJAR ESSOUD (Annaba). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Analyse chimique du sol étudié.

Désignation	Pourcentage (%)
CaO	4,79
AL ₂ O ₃	17,72
Fe ₂ O ₃	6,8
SiO ₂	51,65
MgO	2,12
Na ₂ O	0,68
K ₂ O	2,4
CL-	0,017
SO ₃	0,18
PAF	9,3
TOTALE	95,65

3.2.1.2. Classification minéralogique

Pour déterminer la minéralogie du sol étudié, deux méthodes expérimentales approximatives sont utilisées :

a) Méthode de Casagrande

Casagrande a suggéré une démarche basée sur les limites d'Atterberg, connaissant la limite de liquidité (W_L) et l'indice de plasticité (I_p). A partir de l'abaque de plasticité de Casagrande (Figure 3.1), on place sur le graphique (W_L - I_p) les points correspondant à l'échantillon étudié et on va comparer sa position avec les minéraux connus (Holtz, 1991). La position des points de sol étudié est située bien près de la ligne A au-dessus (Figure 3.1). À partir de cette position, on peut dire que la portion argileuse du sol étudié est en majorité composée de l'illite comme le minéral argileux actif.

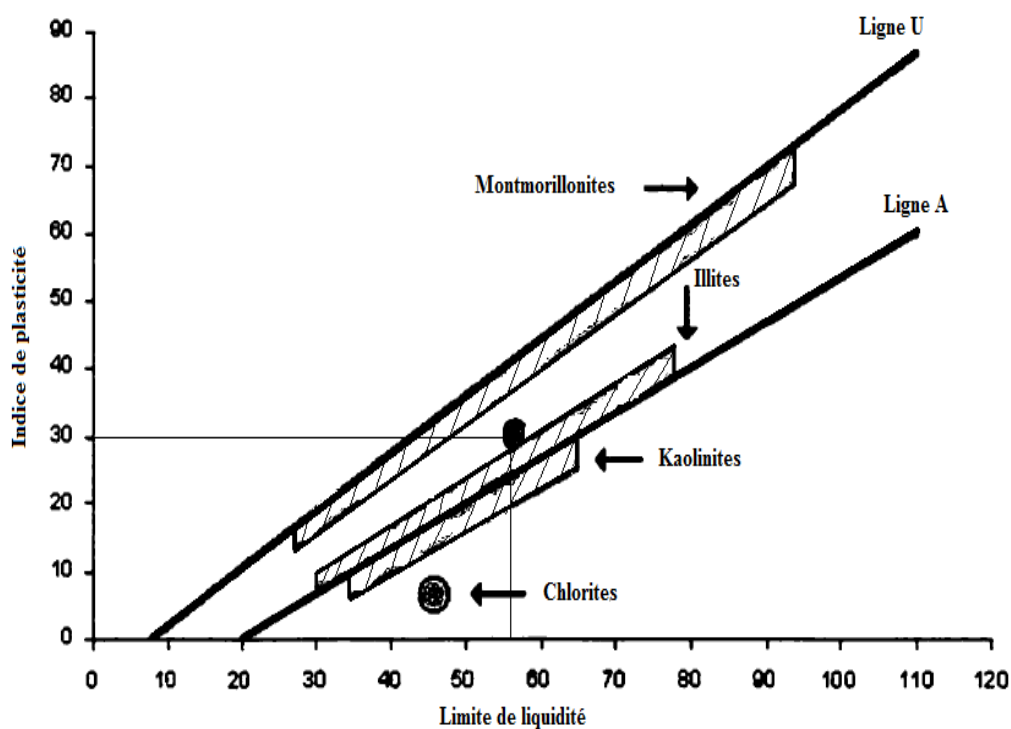


Figure 3.1 : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Holtz, 1991).

b) Méthode du coefficient d'Activité (A)

Cette méthode consiste à calculer le coefficient d'activité (A) en utilisant l'expression suivante :

$$A = \frac{IP}{\% \text{ argile}} \quad (\text{Holtz, 1991})$$

Où : A = Coefficient d'activité

I_p = Indice de plasticité

% argile = portion de sol inférieure à 2 μm (Skempton, 1953).

Selon Skempton (1953) et Mitchell (1976), il y a une bonne corrélation entre l'activité et le type de minérale argileux (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Coefficient d'activité de différents minéraux (Skempton, 1953 ; Mitchell, 1976)

Minéral	Activité
Montmorillonite de sodium	4 - 7
Montmorillonite de calcium	1.5
Illite	0.5 - 1.3
Kaolinite	0.3 - 0.5
Halloysite (déshydratée)	0.5
Halloysite (hydraté)	0.1
Attapulgite	0.5 – 1.2
Allophane	0.5 – 1.2
Mica (muscovite)	0.2
Calcite	0.2
Quartz	0

On a : $I_p = 30\%$ et le pourcentage d'argile inférieure à 2 μm est 40 %

Alors l'Activité (A) = 0.75, cette valeur est comprise entre 0.5 – 1.3 (Tableau 3.2)

Sur la base de ce résultat, et d'après la classification de Skempton (1953) et Mitchell (1976), le minéral prédominant dans l'argile étudié est surtout composé de l'illite comme le minéral argileux actif.

3.2.1.3. Classification géotechniques

L'étude s'est déroulée en plusieurs étapes au niveau de plusieurs laboratoires. Une série d'essais d'identification physico-chimiques et mécaniques du sol étudié est effectuée conformément aux normes françaises (AFNOR). Les paramètres de nature sont déterminés à partir des essais de l'analyse granulométrique (NF P94 056, NF P94-057), des limites d'Atterberg (NF P94-051) et de l'essai au bleu de méthylène (NF P94-068). Les paramètres d'états sont déterminés à partir de la teneur en eau naturelle W_{nat} (NF P94-050), de l'essai de Proctor normal (NF P94-093) et de l'essai CBR (Clifornia Bearing Ratio, NF P94-078). Les propriétés physico-chimiques et mécaniques du sol étudié sont présentées dans le Tableau 3.3. La courbe granulométrique et la courbe Proctor normale du sol étudié sont illustrées dans les Figures 3.2 et Figure 3.3 respectivement.

Tableau 3.3 : Propriétés physico-chimiques et mécaniques du sol étudié.

Désignations	Résultats
Teneur en eau naturelle W_n (%)	19.55
Portion de sol inférieure à 80 μm (%)	67
Portion de sol inférieure à 2 μm (%)	40
Limite de liquidité W_L (%)	56.54
Limite de plasticité W_P (%)	26.36
Indice de plasticité I_p (%)	30.18
Indice de consistance I_c	01.22
Valeur au bleu de méthylène VB_s (cm^3)	07.01
La densité sèche maximale ρ_d (g/cm^3)	01.69
Teneur en eau optimale W_{opn} (%)	17.55
Indice portant immédiat IPI (%)	03
Matière organique (%)	01.80
Activité (A)	0.75

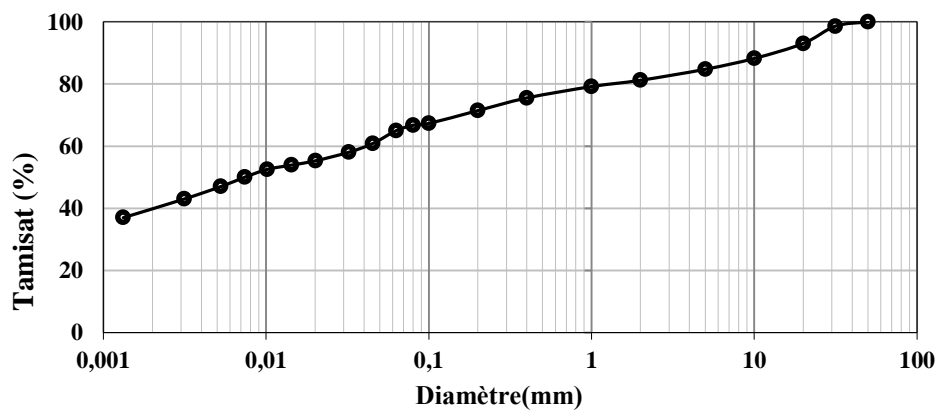


Figure 3.2 : Courbe granulométrique du sol étudié.

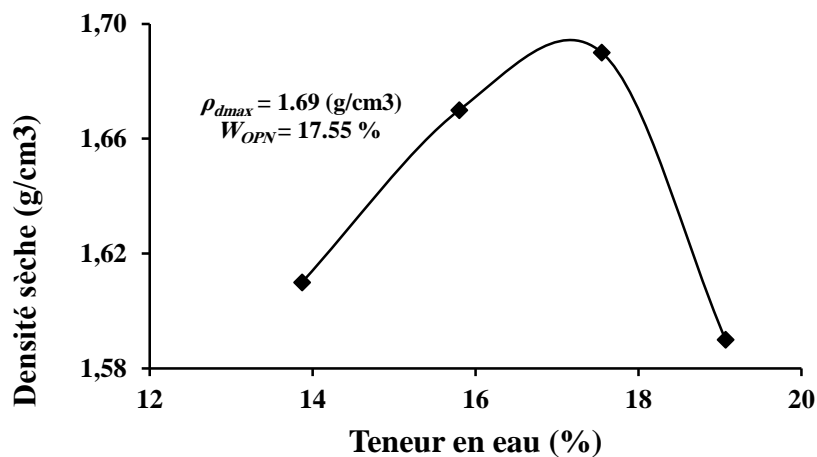


Figure 3.3 : Courbe Proctor normale du sol étudié.

3.2.1.4. Classification selon GTR (Guide de terrassement routier)

Selon le classement du GTR 2000 (Guide de terrassement routier, réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 2000), le sol prélevé d'une profondeur d'environ 2 m est une argile limoneuse (SC) de la classe A₃ se caractérisant par une importante plasticité qui se traduit par une très forte cohérence à teneur en eau moyenne et faible, le sol devient collant et glissant à l'état humide. Ce type des sols pose une difficulté de manipulation en laboratoire et de mise en œuvre sur chantier. Il pose ainsi des problèmes délicats pour le réemploi en l'état naturel à la construction routière.

3.2.2. Laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS)

Le laitier de haut fourneau granulé (GGBS) est de couleur grise verdoyante. Il a été fourni gracieusement par complexe sidérurgique d'El Hadjar d'Annaba (Algérie). Il a été broyé à l'aide d'un broyeur à boulets pour augmenter la surface spécifique et d'accroître ainsi le pouvoir hydraulique du laitier. La valeur de l'indice de basicité étant supérieure à l'unité ($I_b = 1.22 > 1$), le GGBS utilisé est donc de nature basique selon la norme NF EN 14227 (2005). Les propriétés physico-chimiques du GGBS sont présentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Caractéristiques physico- chimique du GGBS.

Désignations	Résultats
Passant < 80 µm (%)	98
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4100
Indice de basicité (I _b)	1.22
Le produit A.C	439.91
CaO (%)	45.92
Al ₂ O ₃ (%)	9.58
Fe ₂ O ₃ (%)	5.45
SiO ₂ (%)	37.58
MgO (%)	6.62
Na ₂ O (%)	2.32
K ₂ O (%)	0.44
Cl ⁻ (%)	0,00
SO ₃ (%)	0.34

3.2.3. L'activant (chaux vive)

L'activant utilisé dans la présente étude est une chaux vive provenant de l'usine "SODEPAC" de Saida (Algérie) et dont les propriétés physico-chimiques sont présentées dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Caractéristiques physico- chimique de la chaux vive.

Désignations	Résultats
Aspect	Poudre sèche
Couleur	blanche
Passant < 80 μm (%)	95
CaO %	> 83.5
Al ₂ O ₃ (%)	< 1.5
MgO (%)	< 0.5
SiO ₂ (%)	< 2.5

3.3. Méthodes

3.3.1 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ont été déterminées à partir des essais de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande et de la limite de plasticité au rouleau selon la norme NF P94-051. Les essais des limites d'Atterberg s'appliquent aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 μm . Une fois le sol séché, les tamisats des cinq échantillons sont mélangés avec respectivement 0, 3, 6, 9 et 12 % de GGBS et 1 % de la chaux vive (CaO) utilisé comme activant. Le composite obtenu (sol-GGBS-CaO) est humidifié et malaxé afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.

3.3.1.1. Détermination de la limite de liquidité (W_L)

La limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau d'un sol au point de transition entre l'état liquide et plastique. Expérimentalement, un sol atteint cette limite lorsque celui-ci possède une teneur en eau correspondant à une fermeture d'une rainure sur 1 cm pratiquée dans l'échantillon placé dans une coupelle (Casagrande) de caractéristiques imposées sous l'effet des chocs répétés et mentionnés par la norme (25 chocs).

3.3.1.2. Détermination de la limite de plasticité (W_p)

La limite de plasticité (W_p) est la teneur en eau d'un sol au point de transition entre les états plastique et solide. L'essai consiste à déterminer la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol confectionné manuellement de dimension fixée (un diamètre de 3 mm doit avoir 10 cm de longueur) se fissure et commence à se fragmenter.

3.3.1.3. Détermination de l'indice de plasticité (I_p)

L'indice de plasticité est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p = W_L - W_p$$

3.3.1.4. Détermination de l'indice de consistance (I_c)

L'indice de consistance est le rapport défini par la formule suivante :

$$I_c = \frac{W_L - W_n}{I_p}$$

Où : W_n est la teneur en eau du sol dans son état naturel et ne comportant pas d'éléments supérieurs à 400 μm .

3.3.2. Caractéristiques de compactage

L'essai Proctor normal a été effectué conformément à la norme NF P94-093. Il a été réalisé afin de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau en déterminant la teneur en eau optimale (W_{OPN}) et la masse volumique sèche maximale (ρ_d).

3.3.2.1. Préparation des échantillons

L'essai Proctor normal s'applique aux sols dont la dimension des plus gros éléments (D_{max}) ne dépasse pas 20 mm. Un moule métallique (moule Proctor), ayant diamètre intérieur de 101.5 mm et hauteur de 117 mm, a été utilisé pour confectionner les éprouvettes du sol non traité et traité. La préparation des éprouvettes commence par le séchage du sol à l'état naturel. Une fois le sol séché et tamisé, une masse de sol de 2500 g est mélangée, à chaque fois, avec des différents dosages en GGBS (0, 3, 6, 9 et 12 %) et 1 % de la chaux vive (Tableau 3.6). Le composite obtenu est humidifié, homogénéisé puis divisé en trois couches égales et conservé une heure avant l'exécution de l'essai de compactage pour parfaire la diffusion de l'eau et des liants. La formulation des composites, pour chaque condition d'état considéré, est présentée dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Formulation des composites (Sol-GGBS-CaO-W) pour l'essai Proctor normal.

Désignation	Sol (g)	GGBS (%)	CaO (%)	W (%)
SGGBS ₀	2500	0	0	14
				16
				18
				20
SGGBS ₃	2500	3	1	14
				16
				18
				20
SGGBS ₆	2500	6	1	16
				18
				20
				22
SGGBS ₉	2500	9	1	16
				18
				20
				22
SGGBS ₁₂	2500	12	1	18
				20
				22
				24

3.3.2.2. Exécution de l'essai

Les couches du composite préparé dans chaque essai sont successivement introduites dans le moule Proctor d'où, chaque couche est compactée à l'aide d'une dame Proctor normale en appliquant respectivement 25 coups. Après le compactage de la dernière couche, un échantillon représentatif est extrait pour déterminer la teneur en eau et la masse volumique sèche et ce qui permet de tracer la courbe Proctor normal en reliant la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau. La procédure d'exécution pour chaque teneur en GGBS ajoutée est elle-même.

3.3.3. Indice portant immédiat (IPI)

L'indice portant immédiat (IPI) est obtenue à partir de l'essai CBR conformément à la norme NF P94-078. Il est une grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol à supporter la circulation des engins de chantier.

3.3.3.1. Préparation des éprouvettes

L'essai CBR s'applique aux sols dont la dimension maximale (Dmax) des éléments du sol inférieure à 20 mm. Un moule CBR ayant un diamètre intérieur de 152 mm et une hauteur de 152 mm est utilisé afin de confectionner les éprouvettes du sol non traité et traité. Pour chaque

condition d'état considéré (Tableau 3.7), les composites préparés (sol-GGBS-CaO) sont humidifiés par une teneur en eau optimale (W_{OPN}) déterminée à l'essai Proctor normal. Les éprouvettes sont compactées dans le moule CBR suivant les modalités décrites à l'essai Proctor normal (NF P94-093).

Tableau 3.7 : Formulation des composites (sol-GGBS-CaO- W_{opn}) pour l'essai CBR.

Désignation	Sol (g)	GGBS (%)	Activant (%)	W_{OPN} (%)
SGGBS ₀	5500	0	0	17.55
SGGBS ₃	5500	3	1	18.70
SGGBS ₆	5500	6	1	19.95
SGGBS ₉	5500	9	1	21.10
SGGBS ₁₂	5500	12	1	21.25

3.3.3.2. Exécution du poinçonnement

En vue de déterminer l'indice portant immédiat (IPI), l'ensemble (embase, moule et éprouvette) sans surcharge est placé sur la presse CBR en position centré par rapport au piston de poinçonnement. Le poinçonnement est exécuté en fixant la vitesse de pénétration à 1.27 mm/min \pm 0.1 mm/min. A travers les dispositifs de mesure, la courbe effort-déformation correspondant aux enfoncements de 1.25 mm, 2 mm, 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm est établie. L'indice (IPI) recherché est défini conventionnellement étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage de deux rapports calculés ci-dessous :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)}}{13.35} * 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (KN)}}{19.93} * 100$$

3.3.4. Résistance à la compression simple non confinée (UCS)

3.3.4.1. Préparation des éprouvettes

On procède à la préparation du sol et à la confection des éprouvettes suivant les modalités décrites dans la section 3.3.2. Les éprouvettes confectionnées ($D = 101.5$ mm, $L = 116.5$ mm) sont composées suivant les formulations présentées dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Formulation des composites (sol – GGBS – CaO - W_{OPN}) pour l'essai de compression simple non confinée.

Désignation	Sol (g)	GGBS (%)	Activant (%)	$W_{OPN}(\%)$
SGGBS ₀	2500	0	0	17.55
SGGBS ₃	2500	3	1	18.70
SGGBS ₆	2500	6	1	19.95
SGGBS ₉	2500	9	1	21.10
SGGBS ₁₂	2500	12	1	21.25

3.3.4.2. Conservation des éprouvettes

Pour étudier l'effet de cure sur la résistance à la compression simple du composite préparés, 15 éprouvettes ont été fabriquées et conservées à l'air libre à l'intérieur du laboratoire ($25^{\circ}\text{C}\pm 2$) pour les trois durées de cures (1, 7 et 28 jours).

3.3.4.3. Ecrasement des éprouvettes

L'écrasement des éprouvettes a été effectué suivant la norme NF P 94 077. Les éprouvettes confectionnées ont été testées sur une presse d'une capacité de 50 kN et d'une gamme métrique de vitesse de 0.00001 à 9.99999 mm/min, équipée d'un poinçon monté sur un anneau dynamométrique de 28 kN. L'écrasement a été réalisé à une vitesse constante de déplacement du plateau inférieure de 0.1 mm/min. Une fois la presse actionnée, les mesures de force axiale et déplacement axial sont prises simultanément. L'essai est arrêté lorsque la rupture atteint d'où, une force maximale a été observée. Ce qui permet de tracer les courbes contrainte/déformation pour chacune des éprouvettes testées.

3.3.5. Détermination des paramètres de résistance au cisaillement (C, ϕ)

Les paramètres de résistance (C, ϕ) ont été déterminées à partir l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande selon la norme NF P 94 071-1.

3.3.5.1. Préparation des éprouvettes

L'essai de cisaillement direct à la boîte s'applique aux sols dont la dimension maximale (D_{max}) des éléments du sol inférieure à 2 mm. Quarante-cinq (45) éprouvettes de composite (Sol-GGBS-CaO), ayant une section droite carrée de 60 mm * 60 mm et d'une hauteur de 30 mm, sont préparées. La préparation des éprouvettes commence par le séchage du sol étudié dans une étuve réglée à 105°C . Ensuite, les tamisats des échantillons (Tableau 3.9) sont mélangés avec respectivement 0, 3, 6, 9 et 12 % de GGBS et 1 % de chaux vive (CaO) utilisé comme activant. Les échantillons de composites préparés (sol-GGBS-CaO) sont humidifiés à

une teneur en eau optimale (W_{OPN}) déterminée à l'essai Proctor normal. Les différentes formulations utilisées sont présentées dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Formulation des composites (Sol-GGBS-CaO- W_{OPN}) pour l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.

Désignation	Sol (g)	GGBS (%)	CaO (%)	W_{OPN} (%)
SGGBS₀	400	0	0	17.55
SGGBS₃	400	3	1	18.70
SGGBS₆	400	6	1	19.95
SGGBS₉	400	9	1	21.10
SGGBS₁₂	400	12	1	21.25

3.3.5.2. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes confectionnées sont conservées à l'air libre à l'intérieur du laboratoire sous une humidité moyenne d'environ 65% et une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, durant des périodes de cures différentes (1, 7 et 28 jours, respectivement).

3.3.5.3. Réalisation de l'essai

Tous les tests réalisés concernant l'essai de cisaillement direct sont de types non consolidé-non drainé (UU). L'essai de cisaillement direct comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparés dans les mêmes conditions, cisailé à la même vitesse (0.9 mm/min) mais soumises à des contraintes verticales différentes appliquées (50KPa, 100KPa et 150KPa) sur la partie supérieure du piston. Une fois la demi-boîte supérieure déplacée horizontalement, les lectures du déplacement horizontal (Δh) en fonction du temps (t) sont mesurées. Ce qui permet de tracer la courbe de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (Δh).

3.3.6. Désignation des sols testés

Tableau 3.10 : Désignation des sols testés.

GGBS	Ground granulated blast furnace slag "Laitier de haut fourneau granule broyé"
SGGBS ₀	Sol témoin sans ajout les fines du GGBS
SGGBS ₃	Composite (Sol + 3 % GGBS + activant)
SGGBS ₆	Composite (Sol + 6 % GGBS + activant)
SGGBS ₉	Composite (Sol + 9 % GGBS + activant)
SGGBS ₁₂	Composite (Sol + 12 % GGBS + activant)

3.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de donner une vision globale des différents matériaux utilisés et des différentes procédures expérimentales et techniques d'analyses employées au cours de ce travail. Les caractérisations géotechniques de sol traité ont été réalisées. Une argile limoneuse (SC) de la classe A₃ se caractérisant par une importante plasticité qui se traduit par une très forte cohérence à teneur en eau moyenne et faible. Le minéral prédominant dans l'argile étudié est surtout composé de l'illite comme le minéral argileux actif. Ce type des argiles pose une difficulté de manipulation en laboratoire et de mise en œuvre sur chantier.

Ensuite, le sol étudié a été traité avec le laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) activé par la chaux vive, conforme aux exigences des normes françaises (AFNOR). Quatre dosages ont été appliqués afin de répondre aux deux objectifs suivants : Amélioration et stabilisation. Pour suivre la stabilisation à différentes périodes de cure, trois temps ont été choisis : 1 jour, 7 jours et 28 jours.

Ce chapitre consiste ainsi en une synthèse des principaux points expérimentaux qui sont présentés en détail dans le chapitre suivant (Analyse des résultats et leur interprétation).

Chapitre 4
Résultats et Interprétations

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on procédera à l'analyse des résultats obtenus à partir de séries d'essais expérimentaux. Ces séries regroupent les échantillons selon leur mode de préparation présentés en détail au chapitre 3. L'influence du dosage des liants ajoutés (chaux-GGBS) sur le comportement du sol à court terme est étudiée en examinant les limites d'Atterberg, la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, l'indice portant immédiat. L'évolution, à différentes périodes de cure (1, 7 et 28 jours), des caractéristiques mécaniques du sol traité, à savoir la résistance à la compression simple, le module d'élasticité, la résistance au cisaillement, la cohésion et l'angle de frottement, est également étudiée.

4.2. Les limites d'Atterberg

Les résultats des essais expérimentaux concernant la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité du sol, traité par ajout du GGBS, pour les différents pourcentages d'ajout (0, 3, 6, 9 et 12 %,) sont présentés dans le Tableau 4.1. La Figure 4.1 montre l'influence du dosage du GGBS sur les limites d'Atterberg.

Tableau 4.1 : Résultats des essais des limites d'Atterberg.

Désignation	Limite de Liquidité (WL)	Limite de Plasticité (WP)	Indice de Plasticité (Ip)	Indice de consistance Ic
SGGBS ₀	56.54	26.36	30.18	1.22
SGGBS ₃	57.12	31.77	25.35	1.48
SGGBS ₆	58.44	36.90	21.54	1.80
SGGBS ₉	60.15	42.44	17.71	2.29
SGGBS ₁₂	60.10	42.35	17.75	2.28

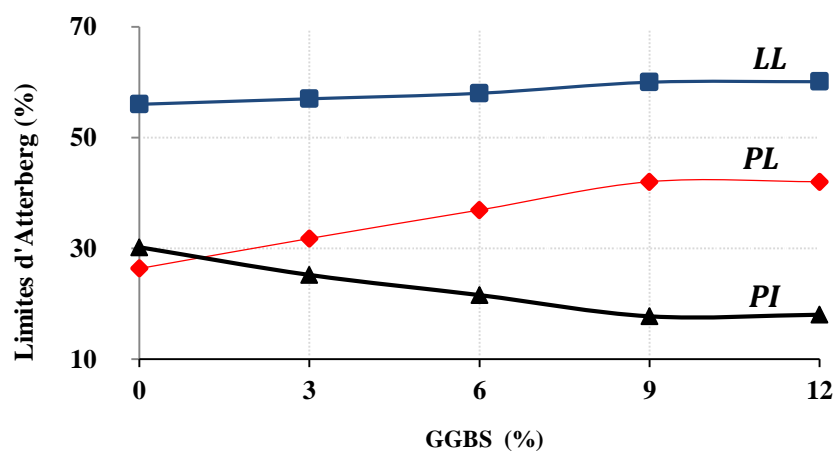


Figure 4.1 : Effet de la teneur en GGBS sur les limites d'Atterberg

On remarque que l'accroissement du dosage du GGBS entraîne une modification de la consistance de l'argile limoneuse étudiée. Cette modification se manifeste par une augmentation de la limite de plasticité sans modification significative de la limite de liquidité. D'où, une réduction du domaine de plasticité (I_p) est observée. Ces observations concordent totalement avec les observations rapportées par plusieurs auteurs sur des argiles traités par ajout du GGBS (Thomas et al. 2018 ; Dayalan, 2016).

Pour un dosage de 3 % de GGBS, on observe une diminution d'une valeur de (I_p) de 17 %. Pour des dosages plus élevés (6 et 9 %), les réductions de (I_p) sont de 27 % et 41 % respectivement.

Malgré les nettes réductions de l'indice de plasticité observées, 10 % à 6 % (GGBS) et 26 % à 9 % (GGBS) comparés, aux échantillons de teneur en GGBS de 3 % (Tableau 4.2), et par soucis d'économie de matériaux, on se limite à utiliser une teneur de GGBS de 3 %.

En effet, une variation de 3 à 9 %, c'est-à-dire une augmentation de 6 % de GGBS ne produit que 10 % de réduction de l' I_p . Néanmoins, l'importance de l'effet de cette variation sera confirmée ou infirmée par l'étude de l'effet du GGBS sur l'IPI.

Tableau 4.2 : Taux de diminution de l'indice de plasticité (I_p) pour les différents paliers de variation d'ajouts de GGBS.

GGBS (%)	Taux diminution d' I_p (%)
0 à 3	17
0 à 6	27
0 à 9	41
3 à 6	10
3 à 9	24

On observe qu'à l'état naturel, la limite de liquidité (W_L) = 56.5 % et passe à 60.1 % pour 12 % de teneur en GGBS. Cette modeste variation s'expliquerait par la rétention de l'eau par les poudres de GGBS due à l'augmentation de la surface de l'illite (argile limoneuse). Ce phénomène engendre une augmentation de la capacité d'échange cationique qui à son tour provoque une augmentation de la capacité d'adsorption d'eau. En revanche, une réduction de la limite de liquidité avec l'augmentation du pourcentage du GGBS est rapportée par plusieurs travaux (Singh et al. 2017; Krishna and Seetharamaiah, 2017; Rani et al. 2017 ; Sravanthi and Peera, 2017 ; Sharma et Sivapullaiah, 2016).

Les modifications immédiates, se produisant, lors de l'incorporation du GGBS dans le sol (argile limoneuse), pourraient être expliquées par le processus chimique d'hydratation de la

chaux vive (CaO) contenue dans le GGBS et la chaux vive utilisée comme activant basique. Ce processus donnerait naissance à des cations de calcium Ca^{+2} responsables des liaisons des couches de minéraux argileux appelé phénomène de floculation (Sharma et Sivapullaiah, 2016 ; Goodarzi et Salimi, 2015). La floculation, apparaissant après malaxage, conduit à l'apparition de grumeaux insensibles à l'eau (Sargent, 2015 ; Al-Rawas, 2002 ; Cokca et al, 2009).

On constate, Figure 4.1, qu'à partir de 9 % de GGBS, aucune variation sensible des limites d'Atterberg n'est observée. Ce qui pourrait probablement s'expliquer par le fait que le sol (argile limoneuse) ait atteint son point optimal de fixation de la chaux défini par la condition :

pH = 12.4 correspond à une solution saturée en chaux (Al-Mukhtar et al, 2010).

L'ajout de 9 % du GGBS serait donc largement suffisant pour améliorer la consistance à court terme de l'argile limoneuse. Bell (1996) a montré qu'une kaolinite atteindrait son point de fixation à 6 % de teneur en chaux. Par ailleurs, pour Bell (1996), le taux de fixation pour la montmorillonite serait à 4 % de chaux.

Donc, le passage d'un sol argileux d'un état plastique (déformable, collant, difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable, beaucoup plus facile à travailler) pourrait être obtenu par un ajout du GGBS activé par la chaux vive.

4.3. Effet du GGBS sur le compactage

Les résultats des essais expérimentaux de compactage du sol (argile limoneuse) traité par ajout de GGBS sont présentés au Tableau 4.3. La Figure 4.2 montre l'influence du dosage du GGBS sur la compacité du sol.

Tableau 4.3 : Résultats des essais de compactage.

Désignations	Masse volumique sèche maximale ρ_{dmax} (g/cm ³)	Teneur en eau optimale W_{OPN} (%)
SGGBS ₀	1.69	17.55
SGGBS ₃	1.63	18.70
SGGBS ₆	1.56	19.95
SGGBS ₉	1.50	21.10
SGGBS ₁₂	1.49	21.25

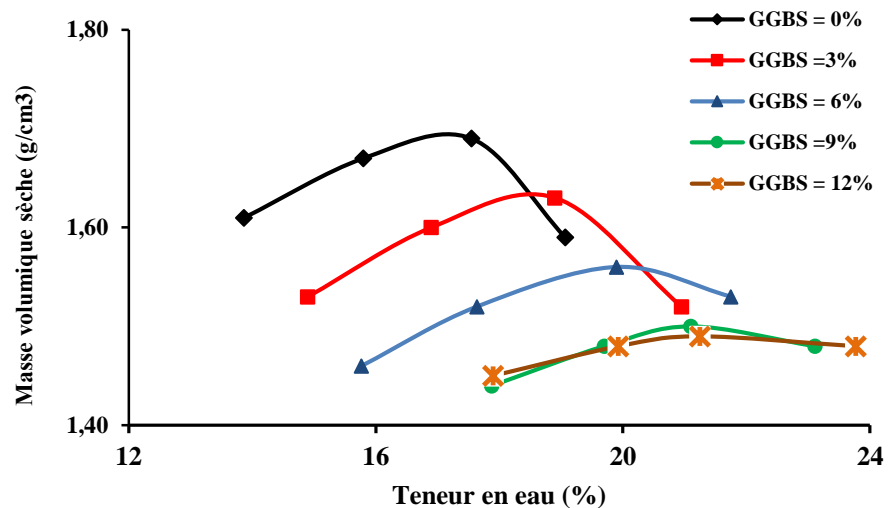


Figure 4.2 : Effet de la variation de la teneur en GGBS sur la masse volumique sèche.

De la figure 4.2, la courbe de compactage du sol à l'état naturel (non traité) présente une importante concavité, ce qui se traduit géotechniquement par une grande sensibilité du sol à l'eau manifestant ainsi, en terme mathématique, une pente importante de la tangente par rapport à celle du sol traité.

Par contre, l'ajout de GGBS (3, 6, 9 et 12 %) conduit à une réduction progressive de la sensibilité du sol à l'eau, ce qui se traduit par l'aplatissement des courbes de compactage des composites étudiés, et par conséquent, une diminution graduelle de la pente.

Par ailleurs, on constate que les courbes de compactage des éprouvettes traitées au GGBS sont situées en dessous et décalées à droite par rapport à la courbe Proctor du sol non traité. Donc, le traitement au GGBS a permis de réduire la valeur maximale de la masse volumique sèche et d'augmenter la valeur de la teneur en eau optimale. Ces observations concordent avec les observations rapportées par plusieurs auteurs sur des sols argileux traités par ajout du GGBS (Thomas et al. 2018 ; Duyu et al. 2017 ; Pramanik et al. 2016 ; Sridevi and Sreerama Rao, 2014).

L'histogramme ci-dessous (Figure 4.3), illustre l'évolution de la masse volumique sèche optimale en fonction de la variation de la teneur en GGBS. En effet, les variations de la teneur en GGBS de 3, 6, 9 et 12 % entraînent des réductions de la masse volumique sèche maximale de 3,5, 8, 11 et 12 % respectivement.

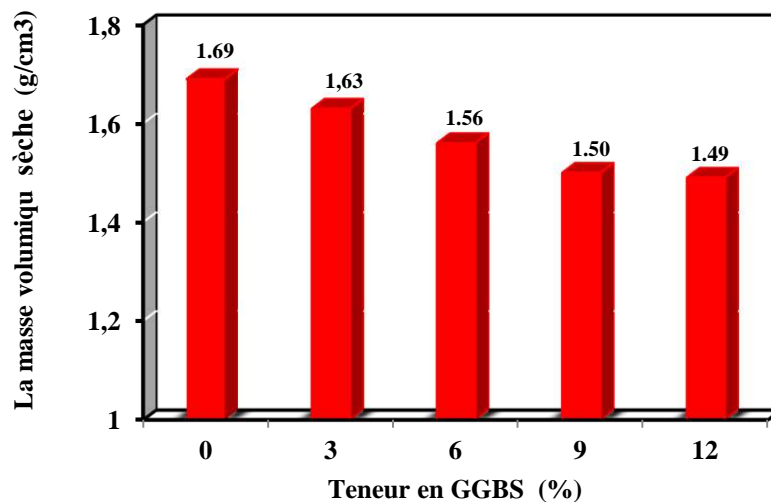


Figure 4.3 : Effet du laitier sur de la masse volumique sèche maximale

La réduction de la masse volumique sèche maximale du sol traité peut, éventuellement, s'expliquée comme étant le résultat du phénomène suivant :

- La modification granulométrique par la floculation des particules due à l'action immédiate de la chaux vive contenue dans le GGBS et de l'adjuvant, dans ce cas la chaux vive, permet, aux grumeaux de sol formés, d'occuper un plus grand espace, conduisant ainsi à une augmentation du volume de la structure du sol.
- Le faible poids volumique du GGBS concourt également à la réduction de la masse volumique maximale du composite.

En revanche, pour 3, 6, 9 et 12 % de teneur en GGBS (Figure 4.4), la teneur en eau optimale augmente respectivement de 18.70, 19.95, 21.10 et 21.25 %.

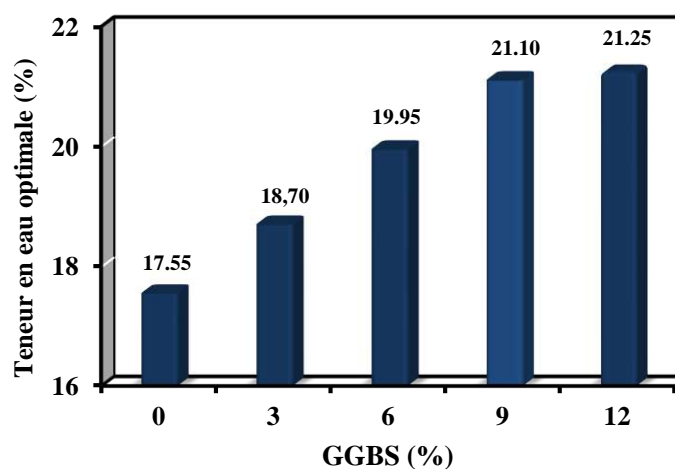


Figure 4.4 : Effet du dosage du GGBS sur la teneur en eau optimale

L'augmentation de la teneur en eau optimale est justifiée par l'accroissement de la surface spécifique totale du sol dû à l'ajout des poudres du GGBS. Ce qui se traduit, par conséquent, par l'augmentation de la capacité d'adsorption d'eau.

4.4. Effet du GGBS sur la portance

Pour évaluer l'aptitude du sol traité à supporter la circulation des engins de chantier, des essais CBR appliqués à la recherche de l'indice portant immédiat (IPI) ont été effectués.

La Figure 4.5 illustre la variation de l'effort de pénétration d'un poinçon en fonction de l'enfoncement pour les différents teneurs en GGBS.

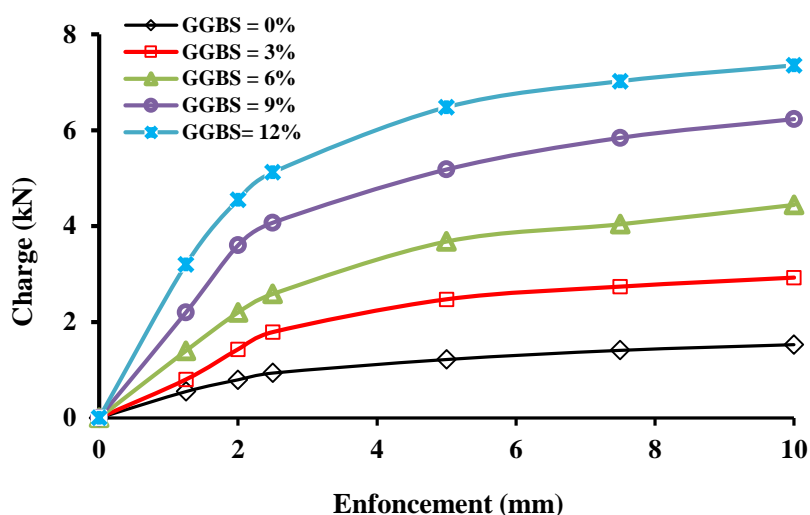


Figure 4.5 : Variation de l'effort de pénétration en fonction de l'enfoncement pour les différents teneurs en GGBS.

On remarque que l'augmentation de l'effort de pénétration en fonction de l'enfoncement est proportionnelle à la teneur en GGBS (Figure 4.5). Les résultats obtenus permettent la détermination des indices portant immédiats (IPI) respectif (Tableau 4.4).

Tableau 4.4 : Résultats des essais CBR.

GGBS (%)	IPI (%)
0	3
3	13
6	21
9	31
12	33

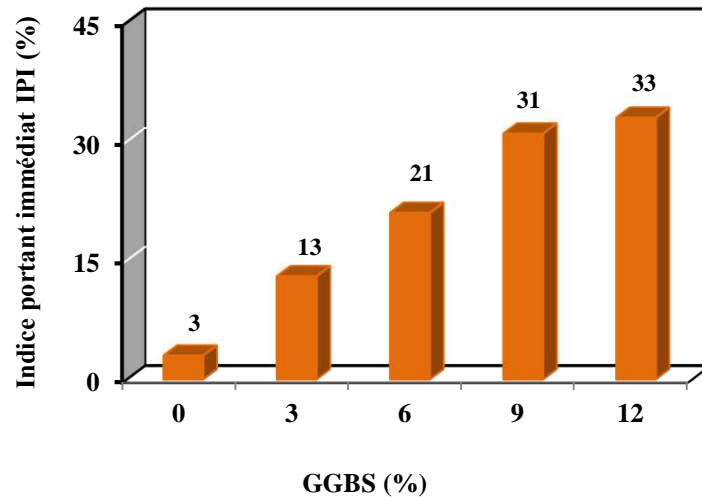


Figure 4.6 : Evolution de l'indice portant immédiat en fonction des teneurs en GGBS.

On remarque, Figure 4.6, que l'indice portant immédiat (IPI) du sol non traité est faible (IPI = 3 %), alors que l'accroissement de la teneur en GGBS (3, 6, 9 et 12%) entraîne une importante augmentation de l'indice portant immédiat (13, 21, 31 et 33 % respectivement). Pour un dosage en GGBS de 3%, le sol (classe A₃) présente un IPI de 13 ce qui satisfait le critère de mise en œuvre du remblai ($5 < \text{IPI} < 10$ selon le GTS, 2000). Cette valeur de l'IPI = 13 est également suffisante pour la mise en œuvre de la couche de forme qui selon le GTS (2000) doit être supérieure à ($\text{IPI} > 10$). D'où, une teneur en GGBS, même inférieure à 3 %, peut assurer la bonne mise en œuvre du remblai ce qui gouverna le choix d'utiliser 3 % de GGBS dans la formulation du composite sol-GGBS-chaux vive.

L'augmentation de la capacité portante du sol est, principalement, due aux réactions chimiques immédiates dont, les échanges cationiques et de floculation. Ces dernières conduisent à la réorganisation et à une meilleure distribution des particules. Ces observations sont en bon accord avec les résultats, précédemment obtenus, avec des sols argileux traités par ajout du GGBS (Bekki et al, 2015).

4.5. Evolution de la résistance à la compression non confinée (UCS)

L'évolution des contraintes en fonction des déformations du sol traité et non-traité à différentes teneurs en GGBS, pour différentes périodes de cure, est présentée par les courbes des Figures 4.7, 4.8 et 4.9.

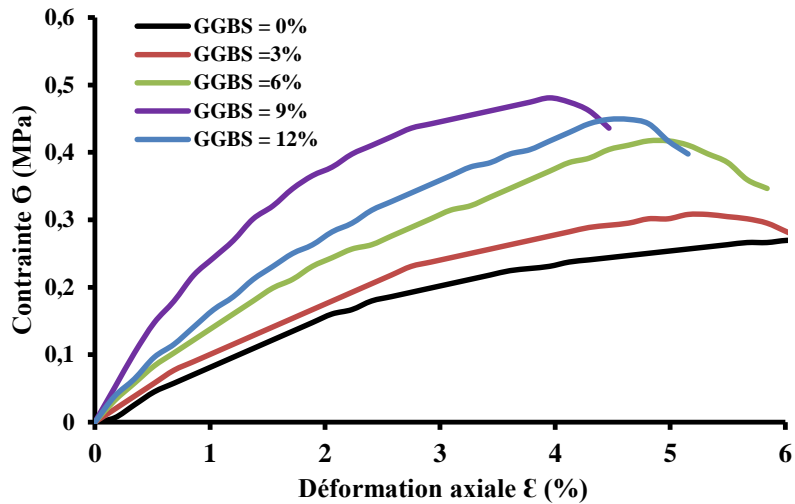


Figure 4.7 : Effet de la teneur en GGBS sur la résistance à la compression non confinée du sol après 1 jour de cure.

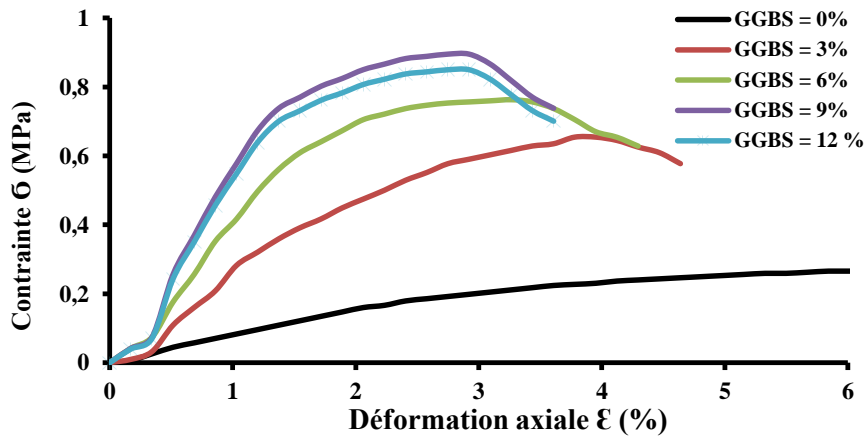


Figure 4.8 : Effet de la teneur en GGBS sur la résistance à la compression non confinée du sol après 7 jours de cure.

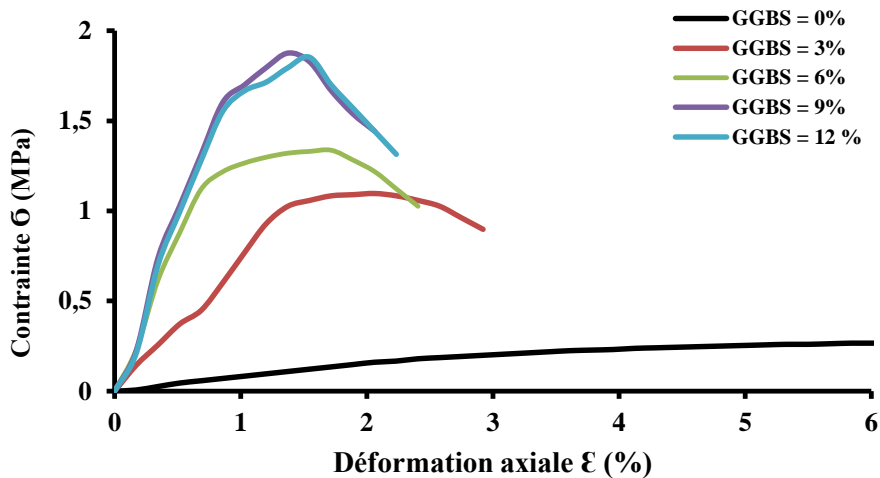


Figure 4.9 : Effet de la teneur en GGBS sur la résistance à la compression non confinée du sol après 28 jours de cure.

Les résultats des essais de compression non confinée (UCS) sur des éprouvettes de sol traité et non-traité à différentes teneurs en GGBS et après différentes périodes de cure, sont illustrés par des courbes (Figure 4.10) et dont les valeurs d'UCS à la rupture sont présentés dans le Tableau 4.5 .

Tableau 4.5 : Valeurs d'UCS du sol traité et non-traité et à différentes teneurs en GGBS pour différentes périodes de cures.

La période de cure (jours) \ GGBS (%)	UCS (MPa)				
	SGGBS ₀	SGGBS ₃	SGGBS ₆	SGGBS ₉	SGGBS ₁₂
1	0.269	0,307	0,416	0,481	0,448
7	0.269	0.654	0.765	0.895	0.85
28	0,269	1.09	1.33	1.87	1.85

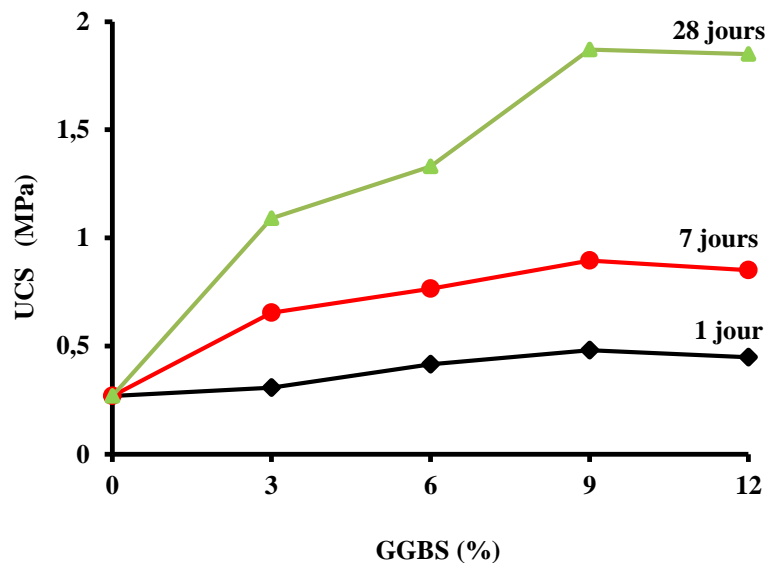


Figure 4.10 : Courbes de variation d'UCS du sol traité et non traité après différentes périodes de cure.

On remarque, que jusqu'à 9 % de teneur en GGBS, la résistance UCS augmente progressivement avec l'âge de maturation du composite sol-chaux-GGBS (figure 4.10). Le gain de résistance à la compression non confinée à 28 jours est plus important comparé à celui obtenu à 1 et 7 jours. Le dosage de GGBS de 3% donne une augmentation de la résistance à la compression de 113 % à 7 jours et 255 % à 28 jours. Pour un dosage de 9 %,

on observe un taux d'augmentation de la résistance à la compression de 86 % à 7 jours et 280 % à 28 jours. Cependant, pour un dosage en GGBS de 3 % à 28 jours d'âge, on constate que le critère de circulation pour la couche de forme est vérifié ($UCS = 1.09 \geq 1$ MPa, GTS 2000), ce qui confirme le choix de 3 % de GGBS dans la formulation du composite sol-GGBS- CaO.

Le passage de 9 à 12 % de GGBS n'apporte aucun gain de résistance supplémentaire pour les différentes périodes de cure, ce qui confirme que l'argile limoneuse a probablement atteint son point de fixation de la chaux à 9 % de GGBS. Ainsi, à 28 jours, un dosage en GGBS de 9 % permet au composite d'atteindre 10 % de la résistance à la compression à 28 jours du béton de ciment de laitier (Salhi, 2007).

Le gain de résistance à la compression non confinée du sol traité peut, éventuellement, s'expliquer comme étant le résultat des phénomènes chimiques suivants :

- Les actions immédiates des cations de calcium Ca^{+2} permettent de flocculer les particules d'argiles sous forme des grumeaux insensible à l'eau (Sharma et Sivapullaiah, 2016 ; Goodarzi et Salimi, 2015 ; Sargent, 2015 ; Cokca et al, 2009 ; Al-Rawas, 2002). Ce qui conduit à la réorganisation et à la redistribution des particules de sol, et par conséquent, abouti à l'amélioration de sa résistance mécanique.
- La réaction hydraulique entre les fines de GGBS et l'eau, conduit à l'apparition de la première génération d'hydrates calciques (C-S-H, C-A-H et C-S-A-H) sous forme de gels enrobant les grumeaux qui durant le compactage favorisent les liaisons entre ces derniers (Vakili et al. 2016 ; Keramatikerman et al. 2016 ; Obuzor et al.2012 ; Rabbani et al. 2012 ; James et al. 2008 ; Obuzor et al.2011). Le durcissement du gel dans le temps conduit à la formation d'une coque rigide (Obuzor et al.2012 ; Rabbani et al. 2012 ; Wild et al. 1998). Ce phénomène pourrait, éventuellement, expliquer l'augmentation de la résistance à la compression dans temps (7 et 28 jours).
- La réaction pouzzolanique : la chaux contenue dans le GGBS et celle ajoutée sous forme d'activant est à l'origine de l'augmentation du PH du milieu grâce aux ions d'hydroxyde (OH^-) (Sekhar and Nayak, 2017). Un niveau élevé de pH favorise la dissolution de la silice et de l'alumine contenue dans les particules d'argile. Ces particules en solution réagissent ensuite avec l'excès de calcium apporté par le laitier et également par l'activant conduisant à former des hydrates calciques insolubles qui précipitent et cristallisent en

présence d'eau créant ainsi des liaisons de même nature que celles de la première génération (Vindula et al. 2017 ; Sekhar and Nayak, 2017 ; Vakili et al. 2016 ; Sharma and Sivapullaiah, 2016 ; Keramatikerman et al, 2016 ; Yi et al, 2015a ; Obuzor et al. 2012 ; Rabbani et al. 2012 ; James et al. 2008). L'apparition de ces types d'hydrates de la deuxième génération dépend de la température, du pH du milieu et de la nature des minéraux argileux (Al-Mukhtar et al, 2010).

4.6. Evolution du module d'élasticité (E)

L'évolution du module d'élasticité du sol traité et non-traité à différentes teneurs en GGBS, pour différentes périodes de cure, est présentée par les courbes des Figures 4.11, 4.12 et 4.13.

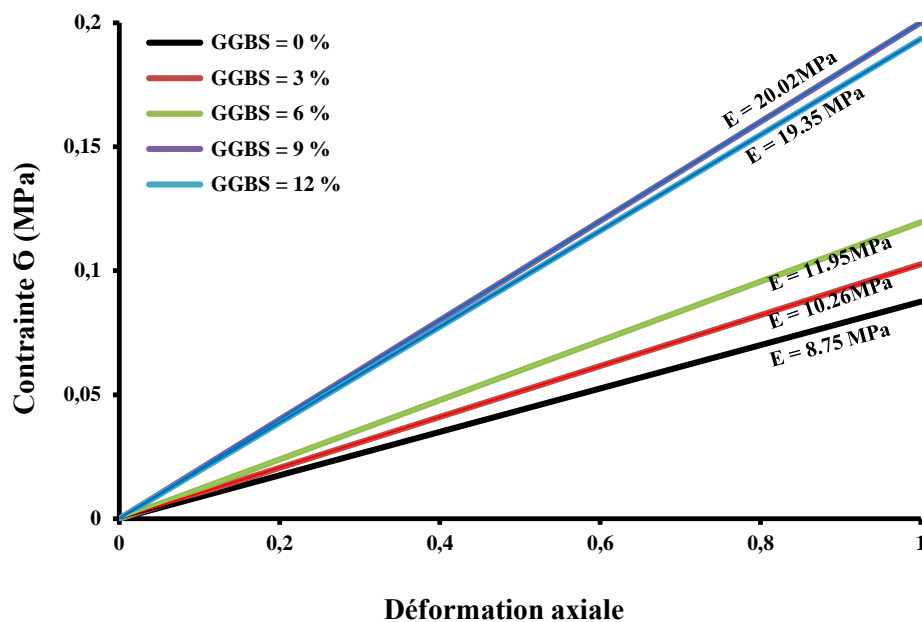


Figure 4.11 : Effet de la teneur en GGBS sur le module d'élasticité (E) après 1 jour de cure

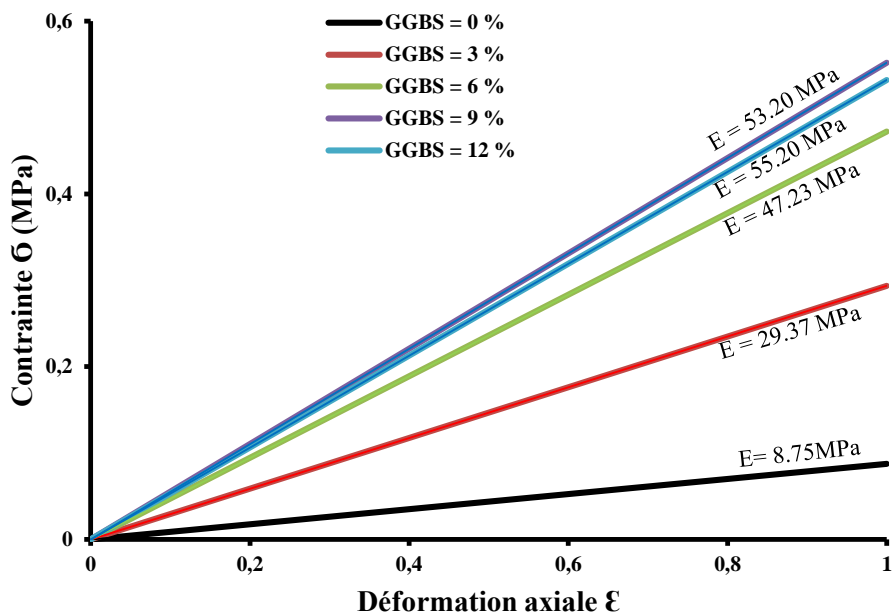


Figure 4.12 : Effet de la teneur en GGBS sur le module d'élasticité (E) après 7 jours de cure.

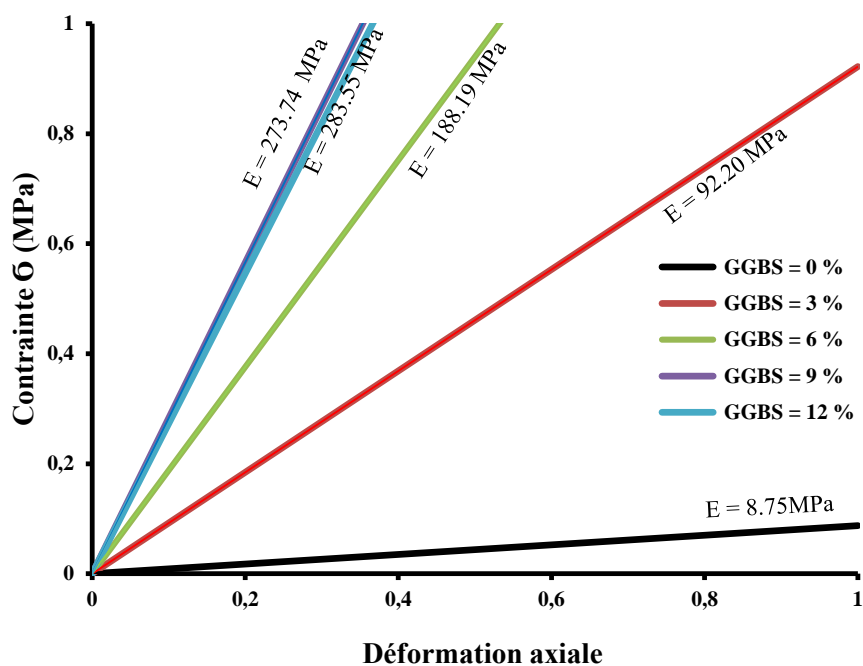


Figure 4.13 : Effet de la teneur en GGBS sur le module d'élasticité (E) après 28 jours de cure.

Les valeurs du module d'élasticité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents périodes de cure sont présentées dans le tableau 4.6 et illustrées par la figure 4.14.

Tableau 4.6 : Valeurs des modules d'élasticités de sol traité et non-traité à différents dosages en GGBS pour les différentes périodes de cure.

Période de cure (jours)	Teneur en GGBS (%)				
	0	3	6	9	12
1	8.75	10.26	11.95	20.02	19.35
7	8.75	29.37	47.23	55.20	53.20
28	8.75	92.20	188.19	283.55	273.74

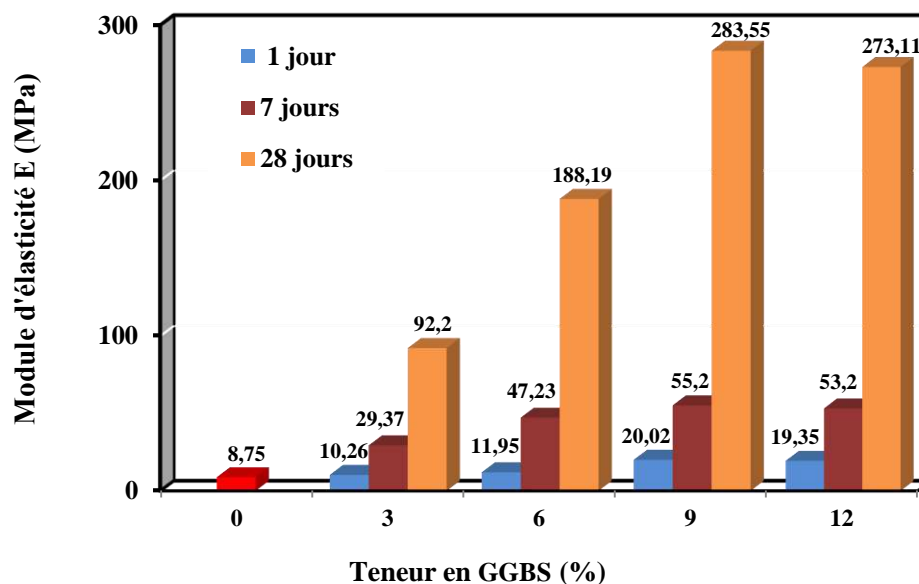


Figure 4.14 : Evolution du module d'élasticité (E) du sol traité et non traité après différentes périodes de cure.

Le critère d'évaluation de la rigidité du sol, retenu dans le présent travail, est le module d'élasticité (E). Ainsi, l'évolution du module d'élasticité (E) en fonction du temps (Figure 4.14) montre que, les valeurs du module (E) des sols traités sont plus grandes que celles des sols non-traités d'où, le module d'élasticité (E) voit sa valeur multipliée par 7 après 28 jours pour une teneur en GGBS de 3 % . Pour un dosage en GGBS de 9 %, on observe, qu'à 28 jours d'âge, le module d'élasticité (E) croît jusqu'à 14 fois par rapport la valeur mesuré après 1 jour.

L'augmentation de la rigidité dans le temps est justifiée, chimiquement, par la précipitation et la cristallisation des produits cimentaires (C-S-H, C-A-H et C-S-A-H) qui sont formés par deux mécanismes de réaction différents :

- Le premier découle directement du durcissement du gel formé par la réaction d'hydratation entre les fines du GGBS et l'eau (Vakili et al. 2016 ; Keramatikerman et al. 2016 ; Obuzor et al.2012 ; Rabbani et al. 2012 ; James et al. 2008 ; Obuzor et al.2012 ; Rabbani et al. 2012 ; Wild et al. 1998).
- Le second apparait grâce à la réaction pouzzolanique entre les minéraux argileux et l'excès de calcium apporté par le GGBS et par l'activant CaO (Vindula et al. 2017 ; Sekhar and Nayak, 2017 ; Vakili et al. 2016 ; Sharma and Sivapullaiah, 2016 ; Keramatikerman et al, 2016 ; Yi et al, 2015a)

4.7. Corrélation entre E et UCS

La Figure 4.15 montre la corrélation entre le module d'élasticité E et la résistance à la compression non confinée (UCS).

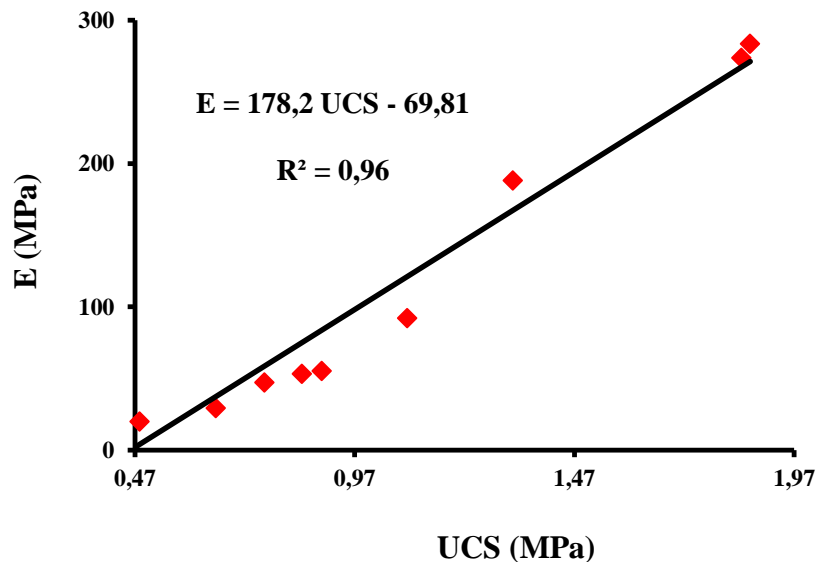


Figure 4.15 : Corrélation entre E et UCS du sol traité.

Malgré que, une certaine dispersion, les résultats mettent en évidence de relation linéaire entre la résistance à la compression (UCS) et la rigidité (E). Cette relation linéaire suit l'équation :

$$E = 178.2 \text{ UCS} - 69.81 \text{ avec } R^2 = 0.96.$$

D'où, le coefficient de corrélation ($R^2 = 0.96$ près de 1) soutient l'idée qu'il y a une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la rigidité.

4.8. Evolution de la résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande

L'évolution des contraintes au cisaillement en fonction des contraintes normales du sol traité et non-traité, à différentes teneurs en GGBS, pour différentes périodes de cure, est présentée par les courbes des figures 4.16, 4.17, 4.18 et 4.19.

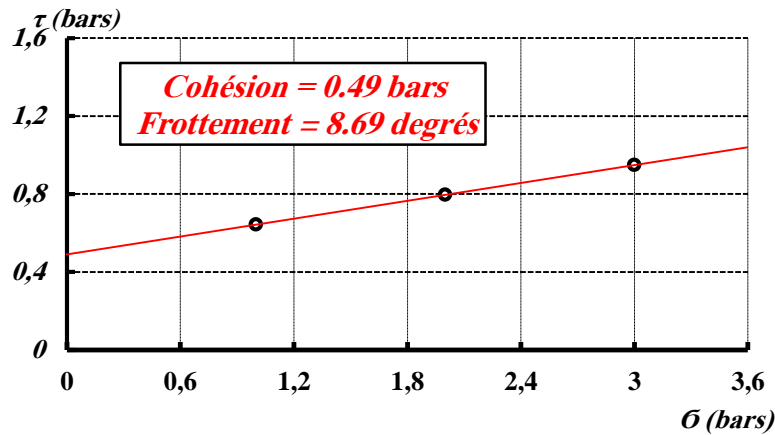


Figure 4.16 : Enveloppe de Mohr-Coulomb du sol non-traité.

La Figure 4.17 montre les courbes enveloppes (Mohr-Coulomb), après 1 jour de cure, pour le sol traité avec différents pourcentages de GGBS (3, 6, 9 et 12 %).

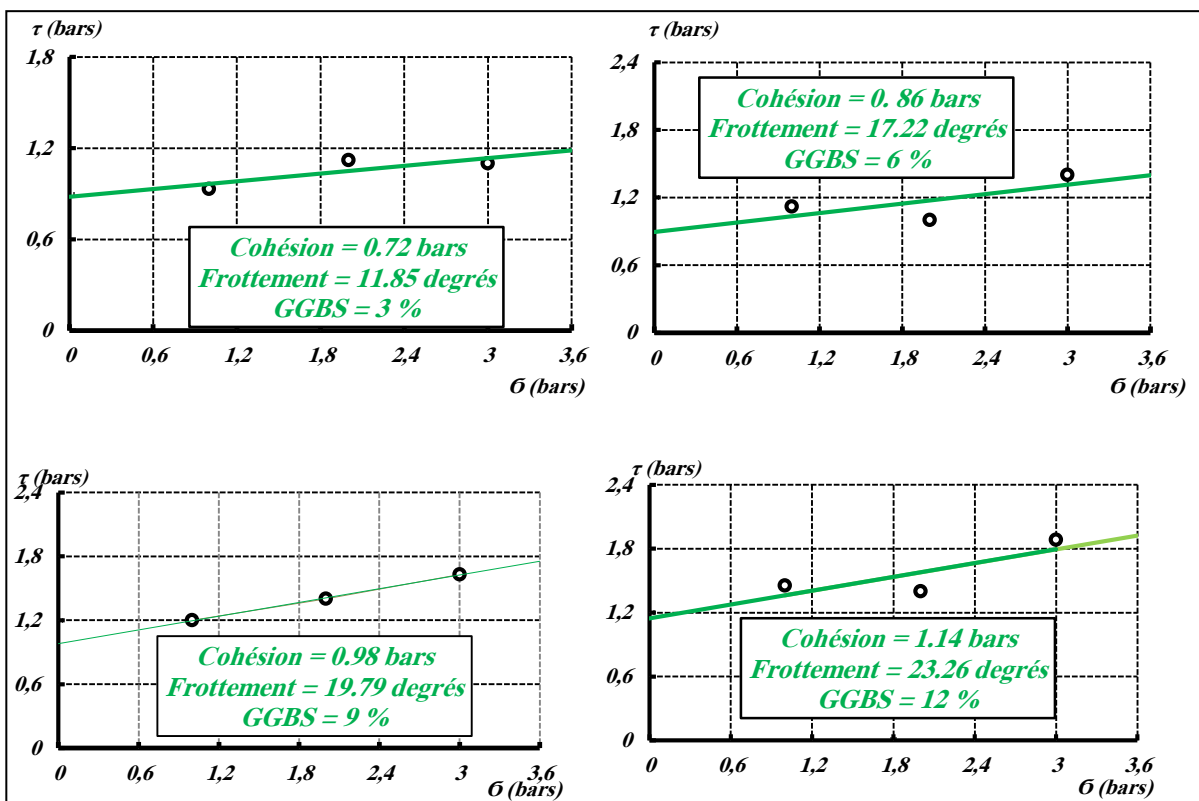


Figure 4.17 : Courbes enveloppes de Mohr-Coulomb, pour les différents teneurs en GGBS, après 1 jour de cure.

La Figure 4.18 montre les courbes enveloppes (Mohr-Coulomb), après 7 jours de cure, pour le sol traité avec différents pourcentages de GGBS (3, 6, 9 et 12 %).

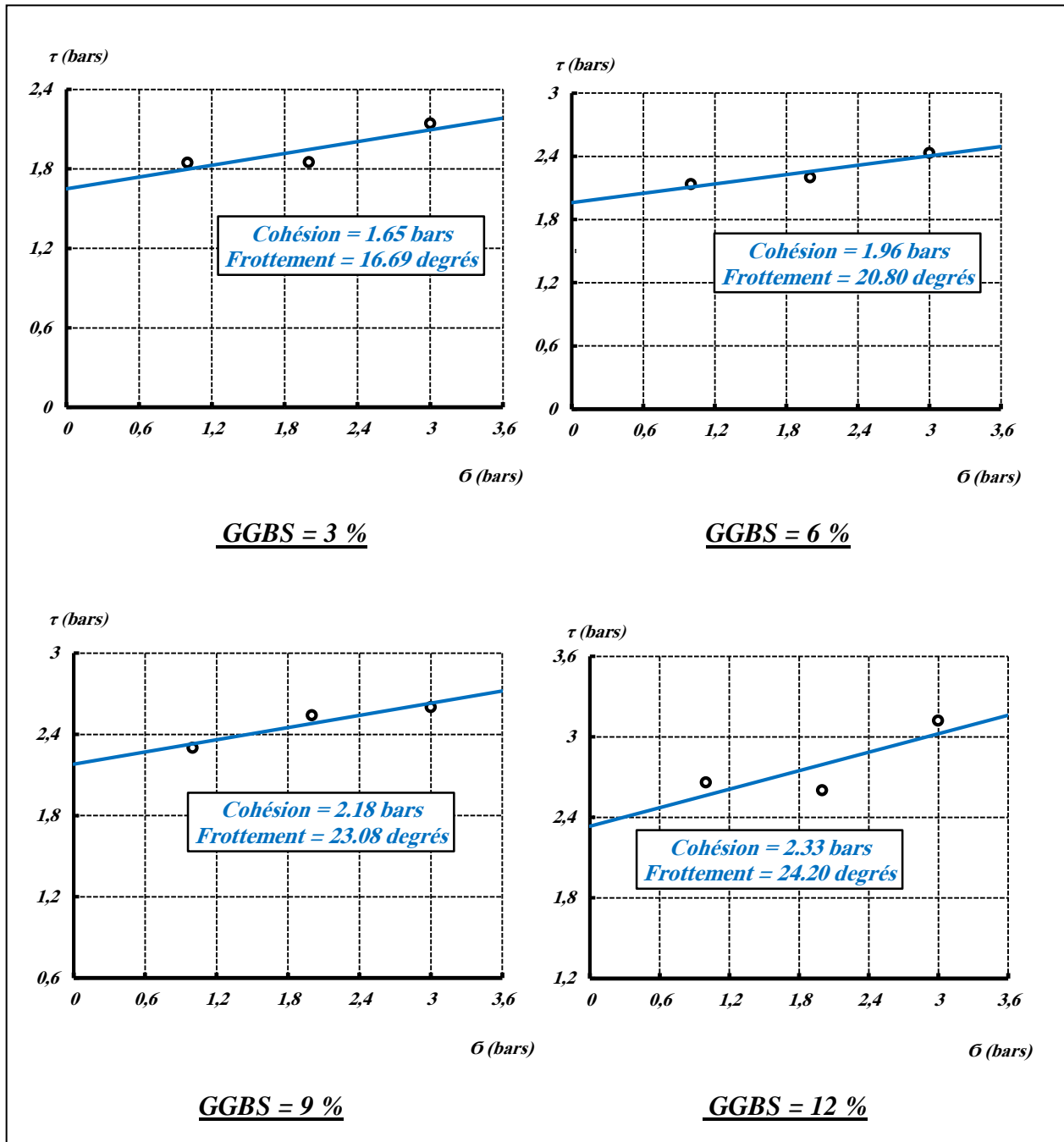


Figure 4.18 : Courbes enveloppes de Mohr-Coulomb, pour les différentes teneurs en GGBS, après 7 jours de cure.

La Figure 4.19 montre les courbes enveloppes (Mohr-Coulomb), après 28 jours de cure, pour le sol traité avec différents pourcentages de GGBS (3, 6, 9 et 12 %).

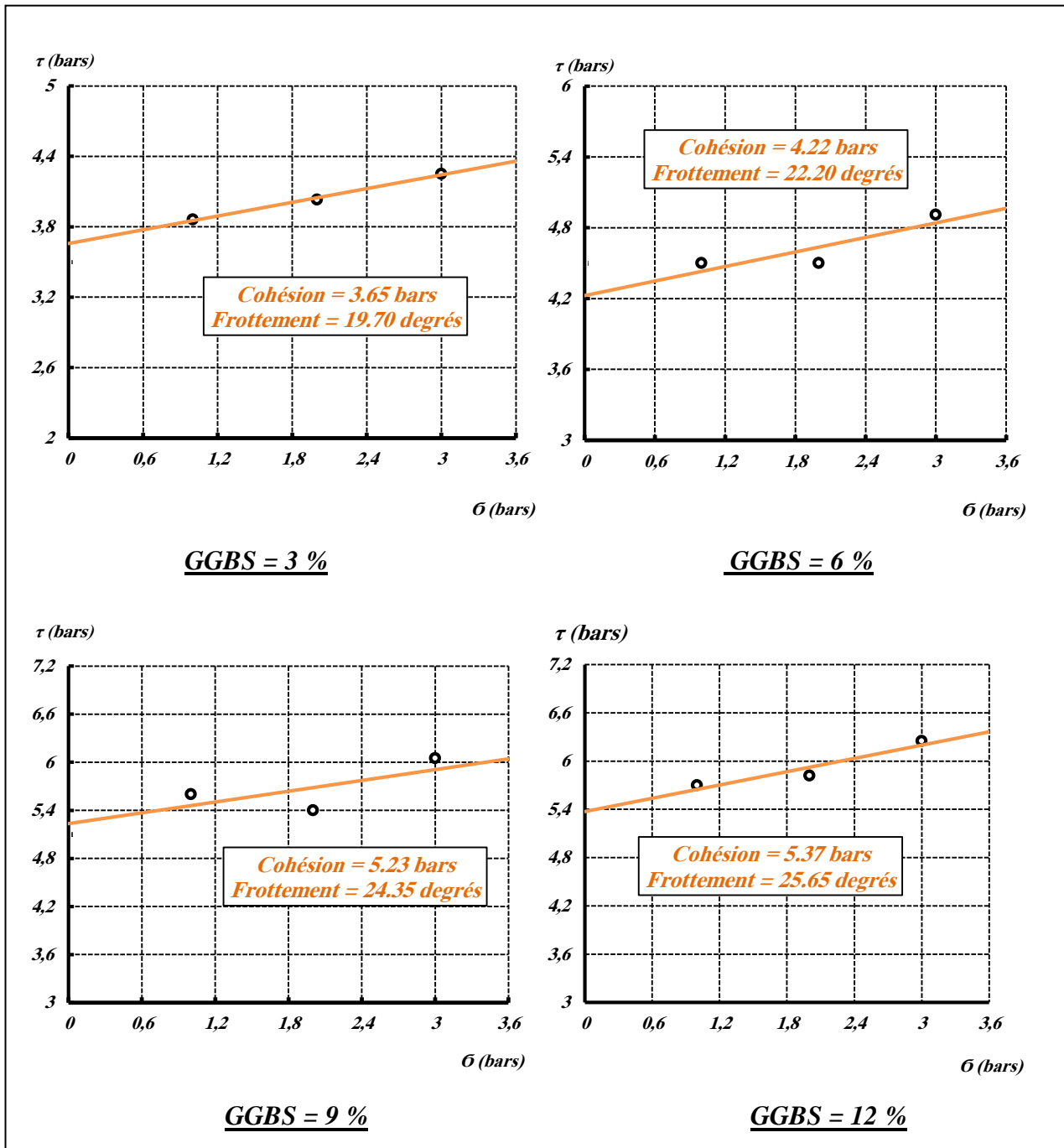


Figure 4.19 : Courbes enveloppes de Mohr-Coulomb, pour les différentes teneurs en GGBS, après 28 jours de cure.

4.8.1. Evolution de la cohésion (C)

Les résultats de la cohésion (C) de sol non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges sont présentés au Tableau 4.7. La Figure 4.20 montre l'évolution de la cohésion (C) de sol non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.

Tableau 4.7 : Valeurs de la cohésion de sol non-traité et traité (C) en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.

Période de cure (jours)	Cohésion (MPa)				
	SGGBS ₀	SGGBS ₃	SGGBS ₆	SGGBS ₉	SGGBS ₁₂
1	0.049	0.072	0.086	0.098	0.114
7	0.049	0.165	0.196	0.218	0.233
28	0.049	0.355	0.422	0.523	0.537

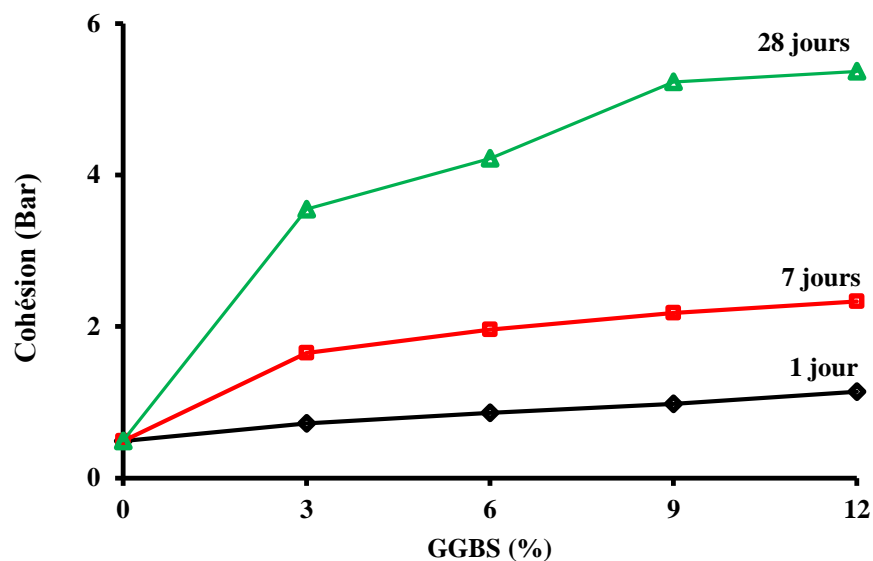


Figure 4.20 : Évolutions de la cohésion (C) de sol non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.

On constate que la cohésion du sol (argile limoneuse) croît lentement, dans les 7 premiers jours, ensuite plus rapidement, à un taux plus important, après 28 jours. Ces variations, dans le temps, reflètent le développement des ajouts cimentaires de liaison, formés lors, d'une part, des réactions d'hydratations, entre les fines du GGBS et l'eau, et d'autre part, des réactions

pouzzolanique entre les minéraux argileux et l'excès de calcium apporté par le GGBS et l'activant (chaux vive). Ceci, soutient l'idée que les produits de cimentation dus à la réaction entre la chaux et l'argile sont formés dans un premier temps dès que la floculation est terminée. Ce comportement également été observé par certains chercheurs (Sekhar and Nayak, 2017 ; Vakili et al. 2016).

4.8.2. Evolutions de l'angle de frottement interne (ϕ)

Les valeurs d'angles de frottement (ϕ) obtenues pour le sol, non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS, pour les différents âges, sont présentés au Tableau 4.8 et illustrés par la Figure 4.21.

Tableau 4.8 : Valeurs de l'angle de frottement interne de sol non-traité et traité (τ) en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.

Période de cure (jours)	Angle de frottement ϕ (degré)				
	SGGBS ₀	SGGBS ₃	SGGBS ₆	SGGBS ₉	SGGBS ₁₂
1	8,69	11,85	17,22	19,79	23,26
7	8,69	16,69	20,8	23,08	24,40
28	8,69	19,70	22,20	24,35	25,65

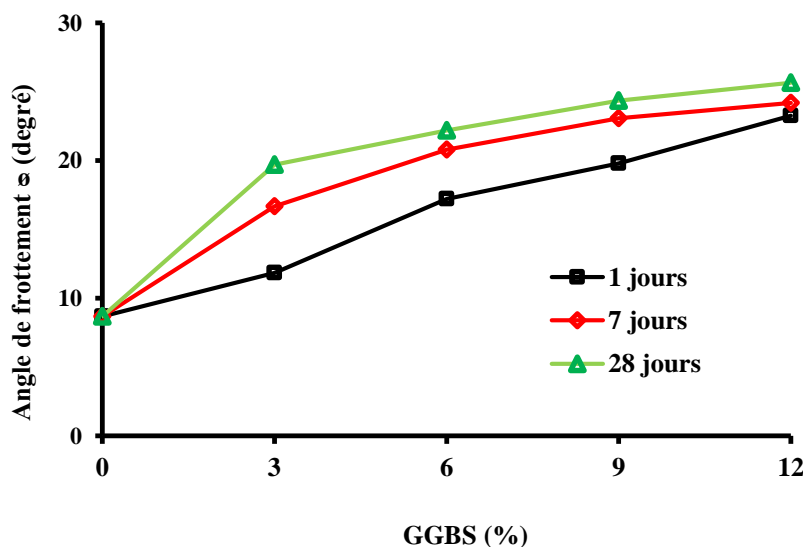


Figure 4.21 : Évolution de l'angle de frottement de sol non-traité et traité en fonction de la teneur en GGBS pour les différents âges.

La Figure 4.21 montre que l'angle de frottement interne d'argile limoneuse étudiée croît assez rapidement, notamment les 7 jours premiers de cure, ensuite plus lentement, à un taux plus faible à 28 jours. Cette augmentation de l'angle de frottement serait probablement due au phénomène de floculation des particules, responsable de la transformation de l'argile en structure grumeleuse. Ceci soutient l'idée que le phénomène de floculation, qui apparaît, après environ deux heures de cure, est très important, commence, ensuite à s'atténuer également, très rapidement, pour devenir presque insignifiant après 7 jours et bien sûr après 28 jours. Ces constats ont également été observés par certains chercheurs (Sekhar and Nayak, 2017 ; Rasool and Kapoor, 2017 ; Pathak et al. 2014).

4.9. Conclusion

Le présent travail est une tentative d'évaluation du pouvoir hydraulique du GGBS et éventuellement de mettre en évidence une corrélation entre les actions chimiques et le développement de ces paramètres physiques et mécaniques. L'analyse des résultats des travaux expérimentaux effectués permet de tirer les conclusions suivantes :

- 1- Les modifications immédiates, dues aux cations de calcium Ca^{+2} résultant de l'hydratation de la chaux vive (CaO), lors de l'incorporation du GGBS dans le sol, provoquent la floculation de l'argile et l'apparition d'une structure grumeleuse. Ce phénomène pourrait être éventuellement confirmé par des essais de caractérisation physiques et mécaniques tel que, l'essai de plasticité de Casagrande, l'essai Proctor normale et l'essai CBR.
- Pour une variation du taux de GGBS de 0 à 9 %, le domaine de plasticité diminue alors que la consistance (I_c) du composite (argile-GGBS- CaO) augmente.
- La modification granulométrique, due à la floculation des particules, permet, aux grumeaux de sol, d'occuper un plus grand espace, entraînant ainsi une augmentation de volume de la structure du composite, ce qui expliquerait la variation des paramètres de compactages. Le traitement par ajout de GGBS a permis de réduire la valeur maximale de la masse volumique sèche et d'augmenter la valeur de la teneur en eau optimale du composite.
- L'accroissement de la teneur en GGBS entraîne une importante augmentation de l'indice portant immédiat du composite (sol-GGBS-CaO) vérifiant ainsi le critère de traficabilité en premier jour ($IPI = 13$) pour un dosage en GGBS de 3%.

- 2- Les hydrates cimentaires (C-S-H, C-A-H et C-S-A-H), se produisant dans le temps (7 et 28 jours), sont en fait le résultat de deux mécanismes de réaction différents. Le premier découle directement de la réaction d'hydratation entre les fines de GGBS et l'eau, qui conduit à l'apparition de la première génération d'hydrates calciques, sous forme de gels enrobant les grumeaux. Le second mécanisme apparaît grâce à la réaction pouzzolanique entre les minéraux argileux et l'excès de calcium apporté par le GGBS et l'activant (chaux vive), produisant la deuxième génération d'hydrates calciques. Le développement des hydrates cimentaires est confirmé par la réponse des paramètres de résistance suivants :
- La résistance à la compression UCS augmente progressivement avec l'âge de maturation du composite (argile + 3 % GGBS + 1 % CaO) vérifiant le critère de traficabilité (1MPa à 28 jours).
 - La rigidité (module d'élasticité) augmente, progressivement avec l'âge de maturation du composite (argile + 3 % GGBS + 1 % CaO), atteignant à 28 jours, une valeur de 14 fois la rigidité à un jour.
 - La variation de la cohésion du composite (argile - GGBS - CaO), après 7 jours, demeure faible mais devient très importante après 28 jours.
 - La variation de l'angle de frottement interne du composite (argile - GGBS - CaO) croît assez rapidement, notamment après 7 jours de cure, mais plus lentement à 28 jours.

Conclusion et perspective

Les acteurs du secteur des travaux publics sont actuellement confrontés aux problématiques du développement durable. Les entreprises doivent garantir les aspects techniques, économiques et également environnementaux des projets, c'est-à-dire, elles doivent proposer des solutions techniques pour réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets afin de limiter les emprunts extérieurs et la mise en dépôt des sols non utilisés.

Dans le domaine des ouvrages en terre, les défis visant à réduire l'impact environnemental des ouvrages nécessite d'optimiser la valorisation des sols extraits dans l'emprise des chantiers y compris ceux n'ayant pas les propriétés mécaniques requises. Dans ce contexte, le traitement des sols par l'ajout d'un produit de traitement se distingue comme une solution intéressante sur le plan technique, économique et environnemental.

Les produits de traitement traditionnels comme la chaux ou les ciments sont issus de la transformation de matières premières minérales non renouvelables. Cette particularité les différencie des produits non traditionnels dérivant de la transformation de matières premières renouvelables. Aujourd'hui, la demande croissante des produits non traditionnels n'est pas seulement due à des raisons économiques et techniques, mais également due à des soucis environnementaux associés à sa production. Dans le cadre de cette étude, l'intérêt s'est principalement porté sur les produits de traitement non traditionnels. L'un de ces produits, le laitier de haut fourneau granulé (GGBS), sous-produit de l'industrie de fer.

L'objectif de recherche engagée dans cette thèse était d'étudier l'efficacité du traitement au laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS), activé par la chaux vive, pour une argile limoneuse et de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre les actions chimiques et l'évolution des paramètres physiques et mécaniques de l'argile limoneuse dans les ouvrages routiers et les remblais.

Dans le premier chapitre, l'étude bibliographique a présenté les principales caractéristiques des sols argileux utilisés en géotechnique routière, ainsi que les différentes familles d'argiles telles que la smectite, la kaolinite et l'illite. Elle a montré que les sols argileux à l'état humide sont sensibles et difficiles à mettre en œuvre en raison de ses caractéristiques mécaniques faible.

Le processus physico-chimique de la réaction chaux-GGBS- argile et de ses effets texturaux et minéralogiques grâce aux techniques de la diffraction des rayons X (DRX) et microscopie électronique à balayage (MEB), a été présenté dans le deuxième chapitre de la partie bibliographique. Cette dernière a montré que les hydrates cimentaires de calcium (C-S-H, C-A-H et C-S-A-H), se produisant dans le temps, sont en fait responsables de la modification des propriétés physiques et mécaniques des sols argileux à court, à moyen et à long terme.

En ce qui concerne la partie expérimentale, une argile limoneuse plastique de la classe A₃ (Selon le classement du GTR) a été utilisée pour l'étude. Diverses expériences ont été menées sur l'argile limoneuse traitée avec du GGBS, et les résultats ont été utilisés soit indépendamment, soit avec des données des tests minéralogiques de la littérature pour atteindre l'objectif susmentionné.

Les résultats obtenus des essais géotechniques en laboratoire sont concordants avec les résultats antérieurs et référencés dans la littérature. Les principales conclusions de cette étude de recherche sont les suivantes :

- 1- Les modifications immédiates, dues aux effets du composite chaux-GGBS, provoquent la floculation de l'argile et l'apparition d'une structure grumeleuse. Ce phénomène induirait une amélioration à court terme des caractéristiques physiques et mécaniques des sols traités par rapport à celles des sols non-traités :
 - Diminution de la plasticité et augmentation de la consistance en même temps,
 - Augmentation de la teneur en eau optimale de la courbe de compactage Proctor normal, en même temps une diminution de la masse volumique sèche maximale,
 - Amélioration de l'Indice Portant Immédiat.
- 2- Les hydrates cimentaires se produisant dans le temps (7 et 28 jours), sont en fait le résultat de deux mécanismes de réaction différents. Le premier découle directement de la réaction d'hydratation entre les fines de GGBS et l'eau, qui conduit à l'apparition de la première génération d'hydrates calciques, sous forme de gels enrobant les grumeaux. Le second mécanisme apparaît grâce à la réaction pouzzolanique entre les minéraux argileux et l'excès de calcium apporté par le GGBS et l'activant (chaux vive), produisant la deuxième génération d'hydrates calciques. Le développement des hydrates cimentaires est confirmé par la réponse des paramètres de résistance suivants :

- La résistance à la compression UCS augmente progressivement avec l'âge de maturation du composite vérifiant le critère de traficabilité ($>1\text{MPa}$ à 28 jours selon GTR).
- La rigidité (module d'élasticité) augmente, progressivement avec l'âge de maturation du composite (chaux-GGBS-argile).
- La cohésion augmente progressivement avec l'âge de maturation du composite (chaux-GGBS-argile).
- L'angle de frottement interne du composite (argile - GGBS - CaO) croît progressivement avec l'âge de maturation du composite.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses :

- Malgré les études réalisées, le sujet demeure riche en sujets de recherche et en applications pratiques. En laboratoire, en ce qui concerne l'étude minéralogique, il serait intéressant de poursuivre l'étude en se focalisant sur l'étude de la microstructure par le Microscope Electronique à Balayage (MEB) et l'analyse au Diffraction des Rayons X (DRX) des éprouvettes de sols non traités et traités au laitier granulé broyé activé et ce qui nous donne une caractérisation plus complète et une meilleure compréhension du comportement des sols argileux à faible portance.
- Les sols argileux constituent de la grande variété des minéraux. Il apparaît donc nécessaire d'étudier plus approfondie l'inefficacité du traitement chimique qui est parfois attribuée à des éléments perturbateurs de prise tels que Chlorures, Sulfates, Nitrates et Phosphates.
- L'Algérie est un pays pétrolier, qui malgré les avantages économiques de l'industrialisation et du raffinage, souffre beaucoup d'impacts environnementaux tel que la pollution de la nappe phréatique. Cela nous incite, sur la base de cette étude, à rechercher des solutions géotechniques, parmi lesquelles nous citerons l'utilisation du GGBS comme le traitement chimique des sols contaminés en appliquant la technologie solidification/stabilisation (S/S) pour réduire l'effet des contaminants (Les métaux lourds)

Références bibliographiques

- Abdi, M. R., & Wild, S. (1993).** Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: I. Physical characteristics. *Clay Minerals*, 28(4), 555-567.
- Abdo, J. (2012).** Liants hydraulique routiers. *Technique de l'ingénieur C921*.
- Abdullah, W.S., Alshibli, K.A., Al-Zou'bi, M.S. (1999).** Influence of pore water chemistry on the swelling behaviour of compacted clays. *Appl. Clay Sci.* 15, 447–462.
- Aboudi Mana, S. C., Hanafiah, M. M., & Chowdhury, A. J. K. (2017).** Environmental characteristics of clay and clay-based minerals. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(3), 155-161.
- AFNOR NF P 94-057. (1992).** Sols. Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation.
- AFNOR NF P 94-068. (1998).** Sols « reconnaissance et essais – Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche ».
- AFNOR NF P 94-056. (1996).** Sols. Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.
- AFNOR NF P 94-093 (1999).** Sols : reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor Normal – Essai Proctor modifié.
- AFNOR NF P 94-051. (1993).** Soils 'Reconnaissance and tests – Determination of the Atterberg limits – Liquid limit to the couple - Plasticity limit to the roller.
- AFNOR NF P 94-078. (1997).** Soils 'Reconnaissance and tests - CBR index after immersion - Immediate CBR index - Immediate bearing index - Measurement on sample compacted in the CBR mould.
- AFNOR NF P 94-077. (1997).** Soils 'Reconnaissance and tests – Uniaxial compression tests.
- AFNOR NF P 94-071-1. (1997).** Soils 'Reconnaissance and tests – Box straight shear tests – Part 1: Direct shear.
- AFNOR NF 14227 - 2. (2005).** Mélanges traités aux liants hydrauliques. Part 2 : Mélanges traités au laitier.
- Al-Khafaji, R., Jafer, H., Dulaimi, A., Atherton, W., & Weida, Z. (2017).** Soft soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag. In *The 3rd BUiD Doctoral Research Conference, At British University in Dubai*.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010).** Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 C. *Applied clay sciences*, 50(2), 191-198.
- Angulo-Ramírez, D. E., de Gutiérrez, R. M., & Puertas, F. (2017).** Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. *Construction and Building Materials*, 140, 119-128.

- Al-Rawas, A. A. (2002).** ‘Microfabric and mineralogical studies on the stabilization of an expansive soil using cement by-pass dust and some types of slags. *Canadian geotechnical journal*, 39(5), 1150-1167.
- Al-Tabbaa, A., Barker, P., Evans, C.W. (2011).** Soil mix technology for land remediation: recent innovations. *Ground Improv.* 164 (3), 127–137.
- Balan, E., Calas, G., & Bish, D. L. (2014).** Kaolin-group minerals: from hydrogen-bonded layers to environmental recorders. *Elements*, 10(3), 183-188.
- Bibi, I., Icenhower, J., Niazi, N. K., Naz, T., Shahid, M., & Bashir, S. (2016).** Clay minerals: structure, chemistry, and significance in contaminated environments and geological CO₂ sequestration. In *Environmental Materials and Waste*, pp. 543-567.
- Bekki, H., Djilaili, Z., Tlidji, Y., Tahar H. et Daouadji, T. H. (2015).** Durability of treated silty soil using lime and cement in road construction - a comparative study. *Journal of Science and Technology*, 5 (2), pp. 23 - 33.
- Bell, F.G. (1996).** Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geol.* 42 (4), 223–237.
- Bellmann, F., & Stark, J. (2009).** Activation of blast furnace slag by a new method. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 644-650.
- Bentabol, M., Ruiz Cruz, M. D., & Huertas, J. F. (2007).** Synthesis of Ni-rich 1: 1 phyllosilicates. *Clays and Clay Minerals*, 55(6), 572-582.
- Bergaya, F., Lagaly, G., Vayer, M., (2013).** Cation and anion exchange chapter 2.11 handbook of clay science. Second ed. *Developments in Clay Science Series*, vol. 5. Elsevier, Amsterdam. Part 5B: techniques and applications, 333-359.
- Brigatti, M. F., Galan, E., & Theng, B. K. G. (2013).** Structure and mineralogy of clay minerals. In *Developments in clay science*, Vol. 5, pp. 21-81.
- Bougharraf, N., Louati, D., Mosbahi, M., Rouis, M. J., & Rigane, H. (2018).** Comparison of the effectiveness of different binders in solidification/stabilization of a contaminated soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-11.
- Burkart, B., Goss, G.C., Kern, J.P. (1999).** The role of gypsum in production of sulfate-induced deformation of lime-stabilized soils. *Environ. Eng. Geosci.* 2, 173–187.
- Cabane, N. (2004).** Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques « Contribution à l’identification et à l’analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation ». Thèse de doctorat. École nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, France.
- Celik, E., & Nalbantoglu, Z. (2013).** Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils. *Engineering Geology*, 163, 20-25.
- Cherfa, H., Ait Mokhtar, K., Munoz, M.E., & Santamaria, A. (2011).** Utilisation d’un grave traité au laitier de haut fourneau pour les couches de chaussée. *Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de construction*, Université Houari Boumediene, Alger, Algérie.

- Chen, Z., Li, J. S., Zhan, B. J., Sharma, U., & Poon, C. S. (2018).** Compressive strength and microstructural properties of dry-mixed geopolymers synthesized from GGBS and sewage sludge ash. *Construction and Building Materials*, 182, 597-607.
- Cokca, E., Yazici, V., & Ozaydin, V. (2009).** Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement. *Geotechnical and geological engineering*, 27(4), 489.
- Corrêa-Silva, M., Miranda, T., Rouainia, M., Araújo, N., Glendinning, S., & Cristelo, N. (2020).** Geotechnical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122017.
- Cygan, R. T., Romanov, V. N., & Myshakin, E. M. (2012).** Molecular simulation of carbon dioxide capture by montmorillonite using an accurate and flexible force field. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(24), 13079-13091.
- Das, B.M., (1998).** Principles of Geotechnical Engineering, fourth ed. PWS Publishing Company, Boston.
- Dayal, A. M. (2017).** Environmental Concerns of Shale Gas Production. In *Shale Gas*, pp. 137-144.
- Dayalan, J. (2016).** Comparative study on stabilization of soil with ground granulated blast furnace slag (GGBS) and fly ash. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 3(5), pp. 2198-2204.
- Detellier, C., & Schoonheydt, R. A. (2014).** From platy kaolinite to nanorolls. *Elements*, 10(3), 201-206.
- Du, Y. J., & Jiang, N. J. (2022).** Stabilization/solidification of contaminated soils: a case study. In *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes*, pp. 75-92.
- Du, Y. J., Wu, J., Bo, Y. L., & Jiang, N. J. (2020).** Effects of acid rain on physical, mechanical and chemical properties of GGBS–MgO-solidified/stabilized Pb-contaminated clayey soil. *Acta Geotechnica*, 15, 923-932.
- Dutta, D. K. (2018).** Clay mineral catalysts. In *Developments in Clay Science*, Vol. 9, pp. 289-329.
- Duyu, H., Tania, T., & Dhake, M. (2017).** Study on Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Properties of Black Cotton Soil and Red Soil. *International Journal of Science and Research*, 6 (5), pp. 418-422.
- Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966).** A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway research record*, 139.
- Ehwailat, K. I. A., Ismail, M. A. M., & Ezreig, A. M. A. (2021).** Novel approach for suppression of Ettringite formation in sulfate-bearing soil using blends of nano-magnesium oxide, ground granulated blast-furnace slag and rice husk ash. *Applied Sciences*, 11(14), 6618.

- Emmerich, K. (2013).** Full characterization of smectites. In *Developments in Clay Science*, Vol. 5, pp. 381-404.
- Estabragh, A. R., Jahani, A., Javadi, A. A., & Babalar, M. (2022).** Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 160-170.
- Fitzpatrick, R. W., Davies, P. G., Thomas, B. P., Merry, R. H., Fotheringham, D. G., and Hicks, W. S. (2002).** Properties and distribution of South Australian coastal acid sulfate soils and their environmental hazards. *Proc., 5th Int. Acid Sulfate Soils Conf., Tweed Heads, NSW.*
- Goodarzi, A. R., & Salimi, M. (2015).** Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Applied Clay Science*, 108, 61-69.
- Goodarzi, A. R., & Movahedrad, M. (2017).** Stabilization/solidification of zinc-contaminated kaolin clay using ground granulated blast-furnace slag and different types of activators. *Applied Geochemistry*, 81, 155-165.
- Gu, K., Jin, F., Al-Tabbaa, A., Shi, B., & Liu, J. (2014).** Mechanical and hydration properties of ground granulated blast furnace slag pastes activated with MgO–CaO mixtures. *Construction and Building Materials*, 69, 101-108.
- GTR. (2000).** Réalisation des remblais et des couches de forme, fascicules 1 et 2. LCPC-SETRA, France.
- GTS. (2000).** Traitements des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques en remblai et en couche de forme. LCPC-SETRA, France.
- Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G. L., & Winnefeld, F. (2011).** Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag-Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 955-963.
- Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G., & Winnefeld, F. (2012).** Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast furnace slag-Part II: Effect of Al₂O₃. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 74-83.
- Häkkinen, T. (1993).** The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete. Part 1: Microstructural studies and basic mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 23(2), 407-421.
- He, J., Wang, X. Q., Su, Y., Li, Z. X., & Shi, X. K. (2019).** Shear strength of stabilized clay treated with soda residue and ground granulated blast furnace slag. *Journal of materials in civil engineering*, 31(3), 06018029.
- He, J., Feng, X. Y., Zhou, L. R., & Zhang, L. (2021).** Utilization of soda residue and ground granulated blast furnace slag to stabilize/solidify sewage sludge in leachate soaking environment. *Water Science and Engineering*, 14(4), 304-313.
- Higgins, D. D., Kinuthia, J. M., & Wild, S. (1998).** Soil stabilization using lime-activated ground granulated blast furnace slag. *Special Publication*, 178, 1057-1074.

- Higgins, D. D. (2005).** Soil stabilisation with ground granulated blastfurnace slag. UK Cementations Slag Makers Association (CSMA), 1-15.
- Higgins, D.D. (2007).** GGBS and sustainability. *Construction Materials*, 160 (3): 99–101.
- Holtz, R.D., et Kovacs, W.D. (1991).** Introduction à la géotechnique, traduit par Lafleur, J. Édition de l'école Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Houzé, C. (2013).** Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse. Thèse de doctorat. Université de Paris-Est, France.
- Hu, X. L., & Michaelides, A. (2010).** The kaolinite (0 0 1) polar basal plane. *Surface Science*, 604(2), 111-117.
- Hunter, D. (1988).** Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. *Journal of geotechnical engineering*, 114(2), 150-167.
- Huggett, J. M., Burley, S. D., Longstaffe, F. J., Saha, S., & Oates, M. J. (2015).** The nature and origin of authigenic chlorite and related cements in Oligo–Miocene reservoir sandstones, Tapti Gas Fields, Surat Depression, offshore western India. *Journal of Petroleum Geology*, 38(4), 383-409.
- Islam, S., Haque, A., & Bui, H. (2016).** 1-D compression behaviour of acid sulphate soils treated with alkali-activated slag. *Materials*, 9(4), 289.
- Islam, S., Haque, A., Wilson, S. A., & Ranjith, P. G. (2015).** Time-dependent strength and mineralogy of Lime-GGBS treated naturally occurring acid sulfate soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015077.
- Islam, S., Haque, A., Wilson, S. A., & Ranjith, P. G. (2014).** Improvement of acid sulfate soils using lime-activated slag. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 167(4), 235-248.
- Islam, S., Haque, A., & Wilson, S. A. (2013).** Effects of curing environment on the strength and mineralogy of lime-GGBS–treated acid sulphate soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5), 1003-1008.
- Islam, S., Chowdhury, B., & Haque, A. (2012).** On the sustainable ground improvement aspects of pyrite bearing clay-using lime activated slag. In *Grouting and Deep Mixing 2012* (pp. 1781-1788).
- Islam, M. S. (2014).** Strength and Mineralogical Behaviour of Lime-GGBS-treated Acid Sulphate Soils. Doctoral dissertation, Monash University.
- Ismadji, S., Soetaredjo, F.E., Ayucitra, A. (2015).** Natural clay minerals as environmental cleaning agents. In: *Clay Materials for Environmental Remediation*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 5-37.
- Jacquemot, F. (2014).** Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton. Thèse de doctorat. Université de Lille 1, France.

- James, R., Kamruzzaman, A. H. M., Haque, A., & Wilkinson, A. (2008).** Behaviour of lime–slag-treated clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 161(4), 207-216.
- Jeong, Y., Oh, J. E., Jun, Y., Park, J., Ha, J. H., & Sohn, S. G. (2016).** Influence of four additional activators on hydrated-lime [Ca (OH) 2] activated ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 65, 1-10.
- Jiang, Q., He, Y., Wu, Y., Dian, B., Zhang, J., Li, T., & Jiang, M. (2022).** Solidification/stabilization of soil heavy metals by alkaline industrial wastes: A critical review. *Environmental Pollution*, 120094.
- Jin, F., Wang, F., & Al-Tabbaa, A. (2016).** Three-year performance of in-situ solidified/stabilised soil using novel MgO-bearing binders. *Chemosphere*, 144, 681-688.
- Johnston, C. T. (2017).** Infrared studies of clay mineral-water interactions. In *Developments in Clay Science*, Vol. 8, pp. 288-309.
- Kalev, S. D., & Toor, G. S. (2018).** The Composition of Soils and Sediments. In *Green Chemistry*, pp. 339-357.
- Kavak, A., & Bilgen, G. (2016).** Reuse of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in lime stabilized embankment materials. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(1), 11.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2016).** Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay. *Applied Clay Science*, 132, 722-730.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2018).** Effect of slag on restoration mechanical characteristics of Ethanol Gasoline–Contaminated Clay. *Journal of environmental engineering*, 144(7), 06018001.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017).** A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247-268.
- Khattab S.A.A, Al–Mukhtar M, Fleureau J.M. (2002).** Effect of initial suction on the swelling pressure and porosity of lime-stabilised clays. *Proceedings of 3rd Int. Conference on unsaturated soils 10-13 march, Recife–Brazil*, A.A.Balkema Publishers, *Unsaturated Soils*, Jucà, de Campos & Marinho Editors, ISBN 90 5809 371 9, vol. 2, pp 605–609.
- Khayat, N., Nazarpour, A., & Ganjipour, S. S. (2021).** Application of lime Ground-Granulated Basic Furnace Slag (GGBS) in improving geotechnical properties of clayey soils in floodplain area, case study, Khuzestan Plain. *Advanced Applied Geology*, 10(4), 669-682.
- Kogbara, R. B. (2014).** A review of the mechanical and leaching performance of stabilized/solidified contaminated soils. *Environmental reviews*, 22(1), 66-86.
- Kilsby, C., Glendinning, S., Hughes, P. N., Parkin, G., & Bransby, M. F. (2009).** Climate-change impacts on long-term performance of slopes. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, Vol. 162, No. 2, pp. 59-66).

- Kim, M. S., Jun, Y., Lee, C., & Oh, J. E. (2013).** Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 54, 208-214.
- Kitazume, M., Terashi, M. (2013).** *The Deep Mixing Method*. CRC press, New York.
- Kogbara, R. B., Yi, Y., & Al-Tabbaa, A. (2011a).** Process envelopes for stabilisation/solidification of contaminated soil using lime–slag blend. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 1286-1296.
- Kogbara, R. B., & Al-Tabbaa, A. (2011b).** Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil. *Science of the total environment*, 409(11), 2325-2335.
- Komonweeraket, K., Cetin, B., Aydilek, A.H., Benson, C.H., Edil, T.B., 2015.** Effects of pH on the leaching mechanisms of elements from fly ash mixed soils. *Fuel* 140, 788–802.
- Lambe, T.W., 1958.** The structure of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 84 (No. SM2), 1654-1–1654-34.
- Lasledj, A. (2009).** *Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques*. Thèse de doctorat. Université d’Orléans, France.
- Le Runigo, B. (2008).** *Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques « comportement physico-chimique, microstructural, hydraulique, et mécanique »*. Thèse de doctorat. École Centrale de Nantes, France.
- Le Borgne, T. (2010).** *Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- Li, W., Yi, Y., & Puppala, A. J. (2020).** Suppressing ettringite-induced swelling of gypseous soil by using magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(7), 06020008.
- Li, W., Yi, Y., & Puppala, A. J. (2022).** Comparing carbide sludge-ground granulated blastfurnace slag and ordinary Portland cement: Different findings from binder paste and stabilized clay slurry. *Construction and Building Materials*, 321, 126382.
- Li, J. S., Chen, L., Zhan, B., Wang, L., Poon, C. S., & Tsang, D. C. (2021).** Sustainable stabilization/solidification of arsenic-containing soil by blast slag and cement blends. *Chemosphere*, 271, 129868.
- Little, DN., Nair, S., and Herbert, B. (2010).** Addressing sulphate induced heave in lime treated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 110(1): 110–118.
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018).** Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the total environment*, 633, 206-219.

- Madejová, J., Gates, W. P., & Petit, S. (2017).** Ir spectra of clay minerals. In *Developments in Clay Science*, Vol. 8, pp. 107-149.
- Marrot, L. (2010).** Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique.
- Mehenni, A. (2015).** Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Thèse de doctorat. École doctorale RP2E -ressources procédés produits environnement appliquée, université de Lorraine, France.
- Mitchell, J.K. (1976).** *Fundamentals of Soil Behavior*. University of California., Berkeley. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 422 p.
- Mitchell J.K., (1993).** *Fundamentals of soil behavior*. 2ème Ed. John Wiley & Sons, 437 p.
- Mitchell, J.K., Soga, K., 2005.** *Fundamentals of Soil Behavior*, third ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 577 pp.
- Mukherjee, S. (2013).** *Internal Structures of Clay Minerals*. In: *The Science of Clays*. Springer, Dordrecht.
- National Working Party on Acid Sulfate Soils. (2000).** National strategy for the management of coastal acid sulfate soils. NSW agriculture, Wollongbar Agricultural Institute, Wollongbar, NSW, Australia.
- Ng, C. W. W., Wang, Y. C., Ni, J. J., & Wang, Z. J. (2021).** Quality and yield of *Pseudostellaria heterophylla* treated with GGBS as pH adjuster against the toxicity of Cd and Cu. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 216, 112188.
- Nguyen, T. T. H. (2015).** Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel. Thèse de doctorat. Université Paris-Est, France.
- Nidzam, R. M., & Kinuthia, J. M. (2010).** Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag—a review. *Proceedings of the Institution of civil engineers-construction materials*, 163(3), 157-165.
- Obuzor, G. N., Kinuthia, J. M., & Robinson, R. B. (2012).** Soil stabilisation with lime-activated-GGBS-A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. *Engineering Geology*, 151, 112-119.
- Obuzor, G. N., Kinuthia, J. M., & Robinson, R. B. (2011b).** Enhancing the durability of flooded low-capacity soils by utilizing lime-activated ground granulated blastfurnace slag (GGBS). *Engineering Geology*, 123(3), 179-186.
- Obuzor, G. N., Kinuthia, J. M., & Robinson, R. B. (2011a).** Utilisation of lime activated GGBS to reduce the deleterious effect of flooding on stabilised road structural materials: A laboratory simulation. *Engineering geology*, 122(3-4), 334-338.
- Pathak, A.K., Pandey, V., Murari, K., & Singh, J.P. (2014).** Soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag. *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, Issue 5, pp.164-171.

- Pramanik, T., Kumar, S.K., & Singh, J.P. (2016).** Study the behaviour of soil for sub grade by using marble dust and ground granulated blast furnace slag. *IJRSET*, 5 (5), pp. 8399-8406.
- Proctor, R.R. (1933).** Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News-Record*, vol. 111, n° 9, 10, 12, and 13.
- Pusch, R. (2006).** Mechanical properties of clays and clay minerals. *Developments in clay science*, 1, 247-260.
- Pusch, R., Boërgesson, L., and Erlström, M. (1987).** Alteration of isolating properties of dense smectite clay in repository environment as exemplified by seven pre-Quaternary clays. SKB Technical Report, TR 87-29. SKB, Stockholm.
- Prinz, H., Strauß, R., (2006).** Abriss der Ingenieur geologie, fourth ed. Spektrum Akademischer Verlag, Oxford, 671 pp.
- Rabbani, P., Daghigh, Y., Atrechian, MR, Karimi, M. & Tolooiyan, A. (2012).** The potential of lime and grand granulated blast furnace slag (GGBFS) mixture for stabilisation of desert silty sands. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(6), 108-119.
- Rani, T. G., Tulasi, K., & Krishna, Y. S. R. (2017).** Ground granulated blast furnace slag as an expansive soil stabilizer. *VFSTR Journal of STEM*, Vol. 03, No. 01, 2455-2062.
- Rashad, A. M., Bai, Y., Basheer, P. A. M., Milestone, N. B., & Collier, N. C. (2013).** Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement and concrete composites*, 37, 20-29.
- Rasool, R., & Kapoor, K. (2017).** Comparative study on stabilization of soil with ground granulated blast furnace slag (GGBS). *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, Volume 6, Issue 3: Page No.37-41.
- Sekhar, D., & Nayak, S. (2017).** SEM and XRD investigations on lithomargic clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-15.
- Rossi, P., Gavois, L., Raoul, G. (2014).** Laitiers de haut-fourneau - Origine, Production et caractéristiques. *Technique de l'ingénieur C5379*.
- Salhi, K. (2007).** Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton. Mémoire de magister. Université de Biskra, Algérien.
- Sargent, P. (2015).** The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In *Handbook of alkali-activated cements. Mortars and concretes*, pp. 555-604.
- Saussaye, L. (2012).** Traitement des sols aux liants hydrauliques « aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification ». Thèse de doctorat. Université de Caen, France.

- Schoonheydt, R. A., Johnston, C. T., & Bergaya, F. (2018).** Clay minerals and their surfaces. In *Developments in Clay Science*, Vol. 9, pp. 1-21.
- Schoonheydt, R.A., Johnston, C.T. (2006).** Surface and interface chemistry of clay minerals. *Handbook of Clay Science*. Elsevier, Amsterdam.
- Schoonheydt, R. A., & Johnston, C. T. (2013).** Surface and interface chemistry of clay minerals. In *Developments in clay science*, Vol. 5, pp. 139-172.
- Seco, A., Del Castillo, J. M., Espuelas, S., Marcelino, S., & García, B. (2022).** Sulphate soil stabilisation with magnesium binders for road subgrade construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1840-1850.
- Sekhar, D., & Nayak, S. (2017).** SEM and XRD investigations on lithomargic clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-15.
- Sekhar, D. C., Nayak, S., & Preetham, H. K. (2017).** Influence of Granulated Blast Furnace Slag and Cement on the Strength Properties of Lithomargic Clay. *Indian Geotechnical Journal*, 47(3), 384-392.
- Sharma, A. K., & Sivapullaiah, P. V. (2016).** Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations*, 56(2), 205-212.
- Singh, S. P., Samantasinghar, S., & Sindhuja, D. (2017).** Stabilization of Red Mud Using Ground Granulated Blast Furnace Slag by Geopolymerization Technique. In *International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"*, pp. 338-350.
- Skempton, A. W. (1953).** ‘The colloidal activity of clays. Selected papers on soil mechanics. 106-118.
- Song, J., Shen, Q., Wang, L., Qiu, G., Shi, J., Xu, J., & Liu, X. (2018).** Effects of Cd, Cu, Zn and their combined action on microbial biomass and bacterial community structure. *Environmental pollution*, 243, 510-518.
- Song, S., Sohn, D., Jennings, H. M., & Mason, T. O. (2000).** Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Science*, 35(1), 249-257.
- Sravanthi, P., Peera, S. K. (2017).** Black cotton soil stabilization with ground granulated blast furnace slag and RBI grade-81. *JIRSET*, 6 (7), pp. 12906-12913.
- Sridevi, G., & Sreerama Rao, A. (2014).** Efficacy of GGBS stabilized soil cushions with and without lime in pavements. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, 9(2), pp. 141- 147.
- Środoń, J. (2013).** Identification and quantitative analysis of clay minerals. In *Developments in Clay Science*, Vol. 5, pp. 25-49.
- Stanley, B., Chowdhury, B., & Haque, A. (2011).** Discussion of “Addressing Sulfate-Induced Heave in Lime Treated Soils” by Dallas N. Little, Syam Nair, and Bruce Herbert. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(8), 812-813.

- Tashima, M. M., Reig, L., Santini, M. A., B Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Payá, J., & Soriano, L. (2017).** Compressive strength and microstructure of alkali-activated blast furnace slag/sewage sludge ash (GGBS/SSA) blends cured at room temperature. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1441-1451.
- Tasong, WA, Wild, S. & Tilley, RJ. (1999).** Mechanisms by which ground granulated blast furnace slag prevents sulphate attack of lime-stabilised kaolinite. *Cement and concrete research*, 29(7), 975-982.
- Terashi, M., & Kitazume, M. (2011).** AQ/CQ pour terrain mixte profond : pratiques actuelles et besoins de recherche futurs. *Actes de l'Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164 (3), 161-177.
- Thomas, A., Tripathi, R. K., & Yadu, L. K. (2018).** A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-10.
- Thomas, BI. (2001).** Stabilisation of sulphide rich soil: Problems and solutions. Doctoral dissertation, university of Glamorgan.
- Tournassat, C., Bourg, I. C., Steefel, C. I., & Bergaya, F. (2015).** Surface properties of clay minerals. In *Developments in Clay Science*, Vol. 6, pp. 5-31.
- Theng, B. K. G. (2012).** The clay minerals. In *Developments in clay science*, Vol. 4, pp. 3-45.
- Ugochukwu, U. C. (2019).** Characteristics of clay minerals relevant to bioremediation of environmental contaminated systems. In *Modified Clay and Zeolite Nano composite Materials*, pp. 219-242.
- Vakili, M. V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., & Keramatikerman, M. (2016).** Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. *Applied Clay Science*, 124, 243-251.
- Vindula, S. K., Chavali, R. V. P., Reddy, P. H. P., & Srinivas, T. (2017).** Ground granulated blast furnace slag to control alkali induced swell in kaolinitic soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-8.
- Veith, G. H. (2000).** Engineering properties of sulphate-bearing clay soils stabilised with lime-activated ground granulated blast furnace slag (GGBS). Doctoral dissertation, university of Glamorgan.
- Venegas, A., Rigol, A., & Vidal, M. (2016).** Changes in heavy metal extractability from contaminated soils remediated with organic waste or biochar. *Geoderma*, 279, 132-140.
- Wagner, J. F. (2013).** Mechanical properties of clays and clay minerals. In *Developments in clay science*, Vol. 5, pp. 347-381.
- Wang, F., Shen, Z., & Al-Tabbaa, A. (2018).** An evaluation of stabilised/solidified contaminated model soil using PC-based and MgO-based binders under semi-dynamic leaching conditions. *Environmental science and pollution research*, 25, 16050-16060.

- Wang, F., Wang, H., Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2015).** The performance of blended conventional and novel binders in the in-situ stabilisation/solidification of a contaminated site soil. *Journal of hazardous materials*, 285, 46-52.
- Wang, F., Jin, F., Shen, Z., & Al-Tabbaa, A. (2016).** Three-year performance of in-situ mass stabilised contaminated site soils using MgO-bearing binders. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 302-307.
- Wang, F., Xu, J., Zhang, Y., Shen, Z., & Al-Tabbaa, A. (2021).** MgO-GGBS binder–stabilized/solidified pae-contaminated soil: strength and leachability in early stage. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(8), 04021059.
- Wild, S., Abdi, M. R., & Leng-Ward, G. (1993).** Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: II. Reaction products and expansion. *Clay minerals*, 28(4), 569-583.
- Wild, S., & Tasong, W. A. (1999).** Influence of ground granulated blastfurnace slag on the sulphate resistance of lime-stabilized kaolinite. *Magazine of Concrete Research*, 51(4), 247-254.
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I., & Higgins, D. D. (1998).** Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils. *Engineering Geology*, 51(1), 37-53.
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B., & Humphreys, I. (1996).** Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates. *Clay Minerals*, 31(3), 423-433.
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I., & Higgins, D. D. (1999).** Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime-stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag (GGBS). *Engineering geology*, 51(4), 257-277.
- Wu, H. L., Jin, F., Bo, Y. L., Du, Y. J., & Zheng, J. X. (2018).** Leaching and microstructural properties of lead contaminated kaolin stabilized by GGBS-MgO in semi-dynamic leaching tests. *Construction and building materials*, 172, 626-634.
- Xu, B., & Yi, Y. (2019).** Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend. *Applied Clay Science*, 178, 105136.
- Xu, P., Sun, C. X., Ye, X. Z., Xiao, W. D., Zhang, Q., & Wang, Q. (2016).** The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 132, 94-100.
- Yi, Y., & Ni, P. (2018).** Stabilization of Marine Soft Clay with Two Industry By-products. In *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics*, pp. 121-128.
- Yi, Y., Gu, L., Liu, S., & Jin, F. (2016).** Magnesia reactivity on activating efficacy for ground granulated blast furnace slag for soft clay stabilisation. *Applied Clay Science*, 126, 57-62.

- Yi, Y., Zheng, X., Liu, S., & Al-Tabbaa, A. (2015a).** Comparison of reactive magnesia-and carbide slag-activated ground granulated blast furnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil. *Applied Clay Science*, 111, 21-26.
- Yi, Y., Gu, L., & Liu, S. (2015b).** Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blast furnace slag. *Applied Clay Science*, 103, 71-76.
- Yi, Y., Li, C., Liu, S., & Jin, F. (2015c).** Magnesium sulfate attack on clays stabilised by carbide slag-and magnesia-ground granulated blast furnace slag. *Géotechnique Letters*, 5(4), 306-312.
- Yi, Y., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2014a).** Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 267-274.
- Yi, Y., Li, C., & Liu, S. (2014b).** Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay. *Journal of materials in civil engineering*, 27(4), 04014146.
- Yi, Y., Gu, L., Liu, S., & Puppala, A. J. (2014c).** Carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag for soft clay stabilization. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(5), 656-663.
- Yi, Y., Li, C., Liu, S., & Al-Tabbaa, A. (2014d).** Resistance of MgO-GGBS and CS-GGBS stabilised marine soft clays to sodium sulfate attack. *Géotechnique*, 64(8), 673-679.
- Yu, B. W., Du, Y. J., Jin, F., & Liu, C. Y. (2016).** Multiscale study of sodium sulfate soaking durability of low plastic clay stabilized by reactive magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016016.
- Yum, W. S., Jeong, Y., Yoon, S., Jeon, D., Jun, Y., & Oh, J. E. (2017).** Effects of CaCl₂ on hydration and properties of lime (CaO)-activated slag/fly ash binder. *Cement and Concrete Composites*, 84, 111-123.
- Zhang, W. L., Zhao, L. Y., McCabe, B. A., Chen, Y. H., & Morrison, L. (2020).** Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leachability. *Science of the Total Environment*, 733, 138551.
- Zhang, Y., Ong, Y. J., & Yi, Y. (2022).** Comparison between CaO-and MgO-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) for stabilization/solidification of Zn-contaminated clay slurry. *Chemosphere*, 286, 131860.