

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et génie civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Structure, Matériaux et Sol

**STABILISATION DES SOLS, DURABILITÉ DES BLOCS
ET CONSTRUCTIONS EN TERRE.**

Par

BENHAOUA Wahiba

Devant le jury composé de :

MENADI BELKACEM.	Prof.	U. de Blida-1	Président
BAHAR RAMDANE	Prof.	USTHB	Examineur
ABED YOUNES	M.C.A	U. de Blida-1	Examineur
GRINE KHALED.	Prof.	U. de Blida -1	Rapporteur
KENAI SAID	Prof.	U. de Blida -1	Co-Rapporteur

Blida, Mars 2021

الملخص

التربة هي أكثر المواد المستخدمة في البناء على هذا الكوكب من حيث الوفرة والأقدمية، بالإضافة إلى أنها أكثر محافظة على البيئة إلا أنه وبالرغم من كل هذه المزايا المسندة إليها كمادة بناء، لا زالت تعاني من بعض النقص مثل الحساسية للماء وقلة القوة والمتانة.

تم استخدام العديد من الوسائل منذ العصور القديمة إلى حين الساعة لتحسين خصائص التربة للتغلب على نقاط الضعف التي تظهرها هذه الأخيرة وتعزيز قدرتها، لتكون مادة أكثر استدامة عند استخدامها في البناء، ومن بين هذه الوسائل إضافة الجير والأسمنت إليها وذلك لتثبيتها وزيادة خصائصها الفيزيائية الميكانيكية، وبالتالي التغلب على المشاكل المذكورة أعلاه.

وبالفعل، فقد أظهرت معظم الدراسات التي أجريت على تثبيت التربة بإضافة الجير والإسمنت أن هذين الأخيرين لهما تأثير إيجابي في زيادة قوتها ومتانتها بالإضافة إلى أنه تم الأخذ بعين الاعتبار في السنوات الأخيرة الجانب البيئي في العمل الهندسي، بهدف الحفاظ على البيئة من آثار المخلفات الضارة، وجعل النفايات الصناعية والزراعية مثل الرماد المتطاير وخبث الفرن العالي والألياف الطبيعية تستخدم على نطاق واسع بمزجهم بالمضافات الرئيسية (الإسمنت والجير) في تثبيت التربة.

تهدف هذه الدراسة البحثية إلى تقييم استخدام خبث الفرن العالي الحبيبي من جهة، ومن جهة ثانية ألياف قش القمح الطبيعي مع الإسمنت / أو الجير، من أجل تثبيت التربة والحصول على مادة بناء قوية وبيئية ومتينة.

الدراسة العملية أجريت باستخدام نوعين من التربة، وهما التربة الطينية والغضارية مثبتة بنسبة وزنية من المضافات الرئيسية (الإسمنت والجير) بمفردها وبالاقتران مع نسب مختلفة من خبث الفرن العالي الحبيبي وألياف قش القمح.

تم إجراء الاختبارات الفيزيائية (الدونة) والاختبار الميكانيكي (الضغط وقوة الانضغاط الغير المحصورة)، والديمومة (التربيط والتجفيف، اختبارات الامتصاص الشعري، التعرية، الكشط، الانتفاخ والانكماش) والموصلية الحرارية على عينات التربة الغير معالجة والعينات المستقرة باستخدام توليفات مختلفة من أجل دراسة تأثيرها على أداء كتل التربة والحصول على التركيبة المثلى التي تؤدي إلى أقوى لبنة ترابية بيئية ومتينة.

أوضحت النتائج المتوصل إليها أن الجمع بين نسبة من الخبث / أو قش القمح إلى المواد المضافة الرئيسية (الإسمنت والجير) ينتج عنه مادة بناء قوية وبيئية وبتينة مع التربة الغضارية وتكون التركيبات المثلى هي (8% جير -12% خبث) و (8% إسمنت-0.75% ألياف قش القمح)، ومع التربة الطينية الخام فإن التوليفات المثلى هي (8% جير -16% خبث) و (8% جير -0.75% ألياف قش القمح).

كلمات المفاتيح: التربة الخام، التثبيت، الجير، الإسمنت، الخبث، قش القمح، بيئي، المتانة والموصلية الحرارية.

RESUME

La terre crue est un matériau très répandu et écologique. Malgré ces avantages, en tant que matériaux de construction, elle présente certaines déficiences telles que la sensibilité à l'eau, le manque de résistance et de durabilité. Pour surmonter ces déficiences, la chaux et le ciment ont été les principaux additifs ajoutés à la terre crue, afin de la stabiliser, en augmentant ses propriétés physico-mécaniques, surmontant ainsi les problèmes cités précédemment. En effet, la plupart des études effectuées sur la stabilisation de la terre crue, par l'ajout de chaux et de ciment, ont démontré que ces derniers ont un effet positif sur l'augmentation de sa résistance et sa durabilité. De plus, la prise en compte durant ces dernières années de l'aspect environnemental dans les travaux d'ingénierie, dans le but de préserver l'environnement de l'impact des résidus nocifs, a fait que des déchets industriels et agricoles tels que, les cendres volantes, le laitier et les fibres naturelles ont été largement utilisés comme ajout aux principaux additifs (ciment et chaux) dans la stabilisation de la terre crue.

Le but principal de ce travail est de valoriser l'utilisation de la paille de blé et du laitier en combinaison avec du ciment ou de la chaux dans la stabilisation de la terre crue, pour la réalisation d'un bloc de construction en terre, résistant, durable et écologique. Dans ce cadre, une étude expérimentale a été conduite au laboratoire en utilisant deux types de terre, l'une à caractère limoneux et l'autre à caractère argileux, traitées au ciment et à la chaux seuls ou combinées avec différents teneurs en laitier et en fibres de paille de blé. Les échantillons de terre stabilisés avec différentes combinaisons de chaux, de ciment, de laitier et de fibres de paille de blés ont été soumis à des essais physiques (plastiques), mécaniques (compactage, résistance à la compression sèche et humide), de durabilité (séchage/mouillage, absorption capillaire, érosion, abrasion, gonflement, retrait) et de conductivité thermique, afin de voir leurs effets sur la performance des blocs de terre réalisés et de dégager la ou les combinaison(s) optimale(s), donnant un bloc de construction en terre plus résistant, durable et écologique.

Les résultats montrent que la stabilisation de la terre crue en utilisant la paille de blé et le laitier, en combinaison avec le ciment ou la chaux, permet de réaliser un bloc de terre, résistant, durable et écologique. Pour une terre crue à caractère limoneux, les combinaisons optimales et économiques, incorporant l'utilisation de laitier ou de fibres de paille de blé en combinaison avec du ciment ou de la chaux, pour la production d'un bloc de terre résistant, durable et écologique sont (8% de chaux-12% de laitier) et (8% ciment-0.75% de fibres de paille de blé). Tandis que pour une terre crue à caractère argileux, les combinaisons optimales et économiques, incorporant l'utilisation de laitier ou de fibres de paille de blé en combinaison avec du ciment ou de la chaux, pour la production d'un bloc de terre résistant, durable et écologique sont, (8% chaux-16% de laitier) et (8% chaux-0.75% de fibres en paille de blé).

Mots clés : Terre crue, stabilisation, chaux, ciment, laitier, paille de blé, écologique, durabilité et conductivité thermique.

ABSTRACT

The raw earth is the most abundant and oldest material used in construction on the planet. It offers the advantages to be low energy implementation, and a good thermal inertia material. However, despite all these advantages, traditional earth constructions have been highly vulnerable to water absorption and other atmospheric agents leading to a decrease in their strength, durability and thermal comfort. Indeed, from the ancient time, to today, several means have been used to improve the properties of earth material in order to overcome the weaknesses shown by a such material and enhance its ability, to be a more sustainable material when used in construction. Stabilization using cement and lime alone as a main additive/ or in combination to waste products such as pulverised fuel ashes (PFA), colliery spoil, granular blast furnace slag (GBFS), natural straw fibres, have been widely used as an alternative to enhance the physical and mechanical properties of the raw earth. This fact has been highlighted and agreed by many studies reported in the literature, undertaken by researchers from all the world.

This research study aims to valorise the use of the granular blast furnace slag, natural wheat straw fibres in combination with cement/ or lime, for the stabilisation of a raw earth in order to obtain a strong, ecological and durable, block construction material. A laboratory study using two types of raw earth, a silty and a clayey earth, stabilised with a proportion by weight of the main additives (cement and lime) alone and in combination with different proportion of granular blast furnace slag and wheat straw fibres. Physical tests (plasticity), mechanical test (compaction, unconfined compressive strength (UCS), shrinkage, wetting and drying, capillary absorption and thermal conductivity tests were performed on either untreated raw earth samples and the stabilised ones using the different combination in order to investigate their effect upon the performance of raw earth blocks realised and to get the optimal combination leading to the strongest, ecological and durable earth block material.

The results, show that combining a proportion of slag/or wheat straw to the main additives (cement- lime) results in a strong, durable and ecological construction block material. With a silty raw earth, the optimal combinations are (8% lime-12% slag), and (8% cement- 0.75% wheat straw fibres). However, with a clayey raw earth, the optimal combinations are, (8% lime-16 % slag) and (8% lime-0.75% wheat straw fibres).

Key words: Raw earth, lime, cement, slag, wheat straw fibers, ecological, durability and thermal conductivity.

REMERCIEMENTS

Nous rendons tout d'abord grâce à Dieu qui nous a donné la santé, la sagesse et la force pour accomplir ce travail.

A mon directeur de thèse, Monsieur Grine Khaled, Professeur à l'université de Blida-1 pour son investissement et ses conseils qui m'ont aidé à conduire mon projet jusqu'au bout.

A mon co-directeur de thèse Monsieur KENAI Said, Professeur à l'université de Blida-1 pour ses conseils appliqués et son accompagnement précieux dans la conduite de mes travaux recherche.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail :

- Pr. MENADI Balkecem ;
- Pr. BAHAR Ramdane ;
- Dr. ABED Younes;

Ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Génie civil de l'université de Blida, je tiens à adresser nos sincères remerciements à toute l'équipe du laboratoire.

J'adresse aussi mes remerciements à toute l'équipe de l'unité (L.N.H.C / D.R.C) de Oued Smar, pour nous avoir accueillis au sein de leur équipe, et ainsi de nous avoir permis de réaliser notre essai de compression uniaxiale au sein du laboratoire.

Je voudrais également remercier mon mari qui a contribué à l'élaboration de ce travail. Sans son aide précieuse, ce travail n'aurait en effet pu voir le jour.

DEDICACE

En témoignage de gratitude et de fidélité,

Je dédie ce travail

À mes très chers parents, Qui n'ont jamais cessé de me soutenir et encourager dans les études. Que le Seigneur vous bénisse et vous accorde une longue vie.

À mon très cher mari, tes sacrifices, ton soutien moral et matériel m'ont permis de réussir mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

À mon fils Abdelmalek, je t'aime énormément.

À mes beaux – parents, que Dieu vous protège, vous donne la santé et longue vie.

À mes frères, ma sœur, ma belle sœur, tous les membres de ma famille.

TABLE DE MATIÈRES

RESUME

TABLE DE MATIÈRES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....17

CHAPITRE I : CONSTRUCTION EN TERRE ET TECHNIQUES DE STABILISATION22

1.1	Introduction.....	22
1.2	Terre crue	22
1.2.1	Constituants.....	22
1.2.2	Propriété fondamentale de la terre crue	26
1.3	Construction en terre.....	29
1.3.1	Aperçu sur la construction en terre	29
1.3.2	Techniques de construction en terre.....	32
1.4	Problèmes de l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction ..	35
1.5	Propriétés à prendre en compte pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction.....	37
1.5.1	Résistance à la compression.....	37
1.5.2	Durabilité	37
1.5.3	Propriétés thermiques.....	38
1.6	Stabilisation du sol comme technique d'amélioration des propriétés de la terre crue.....	38
1.6.1	Principaux stabilisateurs	40
1.6.2	Additifs aux principaux stabilisateurs (déchets industriels)	69
1.6.3	Stabilisation du sol par les fibres	82
1.7	Conclusion	94

CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE D'ESSAIS.....95

2.1.	Introduction.....	95
2.2.	Matériaux	95
2.2.1.	Terre crue	95
2.2.2.	Les ajouts (ciment, chaux, laitier et paille de blé)	95
2.3.	Formulation des combinaisons	97
2.4.	Préparation des échantillons pour les essais	102
2.4.1.	Analyse granulométrique	102
2.4.2.	Limites d'Atterberg	102
2.4.3.	Essai Proctor	102
2.4.4.	Essai de la résistance à la compression uniaxiale	103
2.4.5.	Essai d'humidification – séchage.....	104

2.4.6.	Essai d'absorption capillaire	104
2.4.7.	Essais d'érosion (spray test) et d'abrasion	104
2.4.8.	Essais de gonflement/ retrait	105
2.4.9.	Essai de la conductivité thermique.....	106
2.5.	Procédures d'essais	106
2.5.1.	Essais physico- chimiques	106
2.5.2.	Essais mécaniques.....	109
2.5.3.	Essais et tests de durabilité.....	111
CHAPITRE III : RÉSULTATS.....		116
3.1.	Introduction.....	116
A-	Terre à base de sol limoneux	117
3.2.	Essais physiques et minéralogique.....	117
3.2.1.	Granulométrie	117
3.2.2.	Composition minéralogique	117
3.2.3.	Observations microscopiques par MEB.....	119
3.2.4.	Coefficient d'absorption de la paille de blé	120
3.2.5.	Limites d'Atterberg.....	121
3.3.	Essai mécanique	127
3.3.1.	Essai Proctor	127
3.3.2.	Essai de compression uniaxiale.....	133
3.4.	Essai de durabilité	147
3.4.1.	Essai d'humification – séchage.....	147
3.4.2.	Essai d'absorption capillaire	160
3.5.	Synthèse des résultats du traitement de la terre à base de sol limoneux avec différents additifs	164
3.6.	Effet des optimums des additifs sur les blocs de terre à base de sol limoneux 169	
3.6.1.	Essai d'érosion	169
3.6.2.	Essai d'abrasion	172
3.6.3.	Essai de gonflement	174
3.6.4.	Essai de retrait	177
3.6.5.	Essai de conductivité thermique	179
B.	Terre à base de sol argileux	182
3.7.	Essais physico-chimiques	182
3.7.1.	Granulométrie	182
3.7.2.	Composition minéralogique	182
3.7.3.	Observations microscopiques par MEB.....	183
3.7.4.	Limites d'Atterberg.....	184
3.8.	Essai mécanique	190
3.8.1.	Essai Proctor	190
3.8.2.	Essai de compression uniaxiale.....	195
3.9.	Essais de durabilité.....	208

3.9.1. Essai humification – séchage	208
3.9.2. Essai d'absorption capillaire	221
3.10. Synthèse des résultats du traitement du sol argileux aux différents additifs	225
3.11. Effet des optimums des additifs sur les blocs de terre à base de sol argileux 229	
3.11.1. Essai d'érosion	229
3.11.2. Essai d'abrasion	230
3.11.3. Essai de gonflement	232
3.11.4. Essai de retrait	234
3.11.5. Essai de conductivité thermique	235
3.12. Conclusion	237
CHAPITRE IV : DISCUSSIONS	240
4.1. Introduction.....	240
4.2. Terre à base de sol limoneux.....	240
4.2.1. Effet des ajouts sur la résistance à la compression	240
4.2.2. Effet des ajouts sur la durabilité.....	249
4.2.3. Effet des ajouts sur la conductivité thermique	270
4.2.4. Synthèse des résultats obtenue.....	271
4.3. Terre à base de sol argileux.....	273
4.3.1. Effet des ajouts sur la résistance	273
4.3.2. Effet des ajouts sur la durabilité.....	281
4.3.3. Effet des ajouts sur la conductivité thermique	300
4.3.4. Synthèse des résultats obtenue.....	301
4.4. Conclusion	303
CONCLUSION GENERALE.....	308
Recommandations et perspectives	310
REFERENCES	311

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 : Photographiques au microscope Électronique à balayage des argiles [4].	24
Figure 1. 2 : Schématisation de la kaolinite [2].	25
Figure 1. 3 : Schéma de la particule d'illite [2].	25
Figure 1. 4 : Schéma de la particule de montmorillonite [2].	26
Figure 1.5 : Diagramme de granularité des sols [6].	27
Figure 1.6 : Nomogrammes de plasticité montrant les surfaces recommandées de PI/LL des sols pour l'adobe, les blocs de terre comprimée ou le pisé [6].	28
Figure 1.7 : Carte de diffusion de la construction en terre (Source : http://craterre.org/).	29
Figure 1.8 : Villes de Ramsès II à Gouma.	30
Figure 1.9 : Citadelle de Bam (Iran).	30
Figure 1.10: Grande Muraille (Chine).	30
Figure 1.11 : Ville de Chan Chan (Peru).	30
Figure 1.12: Exemple des constructions en terre en Algérie (Ksar de Ouaghlama) [10].	31
Figure 1.13 : Schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE en 1986 [8].	32
Figure 1.14 : Construction en pisé [12].	32
Figure 1.15 : Construction en adobe.	33
Figure 1.16 : Maisons contemporaines en torchis. (1989).	33
Figure 1.17 : Construction en bauge.	34
Figure 1.18 : Construction en BTC (Sources Internet).	34
Figure 1.19 : Construction en terre avec de nombreuses fissures de retrait [15].	36
Figure 1.20 : Micrographies MEB de la microstructure avant et après traitement au ciment [27]. a- avant traitement. b- après traitement.	41
Figure 1.21: Effet du ciment sur les limites d'Atterberg [33].	43
Figure 1.22 : Effet du ciment sur la densité sèche maximale des sols [34].	43
Figure 1.23 : Variation de la résistance à la compression sèche et humide en fonction de la teneur en ciment et l'indice de plasticité [42].	44
Figure 1.24: Variation de la perte de poids en fonction de ciment [46].	46
Figure 1.25 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de ciment [49].	47
Figure 1.26 : Variation du taux d'érosion avec la teneur en ciment [29].	48
Figure 1.27 : Effet de la teneur en ciment sur le développement du retrait [51].	49
Figure 1.28 : Variation de conductivité thermique en fonction du ciment, teneur en argile et la densité sèche [57].	50
Figure 1.29 : Limites d'Atterberg pour les mélanges (sol-chaux) [33].	54
Figure 1.30 : Variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale [74].	54
Figure 1.31: Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux [41].	56
Figure 1.32 : Relation entre la résistance et la teneur en chaux pour différents types de sols [80].	57
Figure 1.33 : Perte de poids lors des tests humidification-séchage du sol stabilisé avec 6 % et 9% de chaux [84].	59
Figure 1.34 : Variation d'absorption capillaire en fonction de la chaux additionnée [82].	60
Figure 1.35 : Détérioration par érosion après 48 mois d'exposition des murs en terre stabilisé à la chaux [89].	61

Figure 1.36 : Variation du retrait linéaire en fonction du temps de cure et de la quantité de chaux additionné [93].	62
Figure 1.37 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la quantité de la chaux additionnée [95].	63
Figure 1.38 : Effet du mélange (ciment + chaux) sur les limites d'atterberg [99].	64
Figure 1.39 : les caractéristiques de compactage de sol argileux traité au mélange (ciment- chaux) [102].	65
Figure 1.40 : Effet de la chaux en tant qu'additif sur la résistance à la compression d'un sol stabilisé avec du ciment durci pendant 7 jours [105].	66
Figure 1.41 : Perte de poids des différents échantillons [99].	67
Figure 1.42 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de la chaux, du ciment et du mélange (ciment + chaux) [109].	68
Figure 1.43 : Effet des cycles humidification-séchage sur la résistance à la compression de sol argileux stabilisé à la cendre volante [118].	71
Figure 1.44 : Variation du pic de stress avec la période de cure pour différentes teneurs en fumées de silice [123].	72
Figure 1.45 : Coulée de laitier à la sortie du haut fourneau [124].	73
Figure 1.46 : Effet de laitier sur les limites d'atterberg [136].	75
Figure 1.47 : Effet de laitier sur les caractéristiques de compactage [140].	75
Figure 1.48 : Variation de la résistance à la compression en fonction du laitier ajouté [125].	76
Figure 1.49 : Variation de la résistance à la compression en fonction du laitier activé par la chaux [145].	77
Figure 1.50 : développement de la résistance de sol stabilisé au laitier et ciment [146].	78
Figure 1.51 : Variation de la résistance à la compression après les cycles de durabilité [151].	79
Figure 1.52 : Perte de poids cumulée de l'échantillon après chaque cycle de durabilité [153].	80
Figure 1.53 : Influence du laitier sur l'absorption capillaire des blocs de terre [152].	80
Figure 1.54 : Conductivité thermique des échantillons traités au laitier [156].	82
Figure 1.55 : Paille de blé.	84
Figure 1.56 : Effet de fibre de bagasse sur la densité sèche maximale [165].	85
Figure 1.57 : Variation de la résistance en fonction de la teneur en fibre et ciment [166].	86
Figure 1.58 : Résistance à la compression en fonction des fibres de kénaf [167].	87
Figure 1.59 : Résistance à la compression en fonction des fibres de sisal [169].	88
Figure 1.60 : Perte de poids des blocs renforcés par différents types de fibres [170].	89
Figure 1.61 : Érosion des blocs renforcés par différents types de fibre [170].	89
Figure 1.62: Effet de la variation de la teneur en fibres sur le coefficient d'absorption d'eau des blocs stabilisés avec 10 % de chaux vive après 7 jours de cure au four [171].	90
Figure 1.63 : Effet des différents types des fibres sur le retrait (%) [173].	91
Figure 1.64 : Variation du retrait volumique en fonction du type de terre et de la teneur en fibres [168].	92
Figure 1.65 : Effet des fibres sur la conductivité thermiques [175].	93
Figure 1.66 : Influence de différents pourcentages en fibres sur la conductivité thermique des briques [177].	93
Figure 2.1: laitier.	95
Figure 2.2: Paille en blé.	96
Figure 2.3 : Formulation des combinaisons de la terre à base de sol limoneux.	97
Figure 2.4 : Formulation des combinaisons de sol argileux.	99
Figure 2.5: Programme expérimentale.	101

Figure 2.6 : Carottes métalliques pour le prélèvement des éprouvettes de l'essai de la compression uniaxiale.....	103
Figure 2.7 : Réalisation des éprouvettes pour les essais de durabilité.....	105
Figure 2.8 : Éprouvette réalisée pour l'essai de gonflement et de retrait.....	105
Figure 2.9 : Éprouvette réalisée pour l'essai de la conductivité thermique.....	106
Figure 2.10 : MEB,(QUNATA650).....	108
Figure 2.11 : Procédure d'écrasement des éprouvettes destinées à la résistance à la compression.....	110
Figure 2.12 : Étapes de l'essai de séchage - mouillage (séchage dans l'étuve).....	111
Figure 2.13 : Principe de l'essai d'absorption capillaire.....	112
Figure 2.14 : Arrangement général des essais d'érosion sous pression.....	112
Figure 2.15 : Principe de l'essai de l'abrasion.....	113
Figure 2.16 : Essai de gonflement.....	114
Figure 2.17 : Essai de retrait.....	114
Figure 2.18 : CT-mètre.....	115
Figure 3.1 : Courbes granulométriques de sol limoneux.....	117
Figure 3.2 : Spectre de la DRX de sol limoneux.....	118
Figure 3.3 : Spectre de la DRX du laitier.....	119
Figure 3.4 : Observation microscopique de sol limoneux par MEB.....	120
Figure 3.5 : Observation au MEB des fibres de la paille de blé.....	120
Figure 3.6 : Coefficient d'absorption d'eau de la paille de blé.....	121
Figure 3.7 : Diagramme de plasticité (Norme XP P 13-901).....	122
Figure 3.8 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de laitier additionnée.....	122
Figure 3.9 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment additionnée.....	123
Figure 3.10 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.....	124
Figure 3.11 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée.....	125
Figure 3.12 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.....	126
Figure 3.13 : Courbe Proctor du sol de base.....	128
Figure 3.14 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de laitier additionnée.....	128
Figure 3.15 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de ciment additionnée.....	129
Figure 3.16 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.....	130
Figure 3.17 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de la chaux additionnée.....	131
Figure 3.18 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.....	131
Figure 3.19 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de la paille additionnée.....	132
Figure 3.20 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.....	133
Figure 3.21 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de laitier additionnée. (a- 7 jours, b- 28 jours.).....	134
Figure 3.22 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de laitier additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.).....	135
Figure 3.23 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.).....	135
Figure 3.24 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.).....	136
Figure 3.25 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.....	137

Figure 3.26: Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.....	139
Figure 3.27 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.).....	140
Figure 3.28 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux additionnée. (a-7 jours. b- 28 jours.).....	141
Figure 3.29 : Évolution de la résistance à la compression pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.	142
Figure 3.30 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux additionnée.....	143
Figure 3.31 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de fibres additionnée. (a- 7 jours. b- 28 jours).....	144
Figure 3.32 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus fibres additionnée.....	145
Figure 3.33 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus fibres additionnée.	146
Figure 3.34 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au laitier.	147
Figure 3.35 : Variation de la perte de poids de bloc de terre en fonction du laitier additionné.	148
Figure 3.36 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au ciment.....	149
Figure 3.37: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en ciment additionnée. (a- 7 jours. b- 28 jours).....	149
Figure 3.38: Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au ciment et au laitier.	150
Figure 3.39 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de ciment plus laitier.....	151
Figure 3.40 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux.	153
Figure 3.41: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en chaux additionnée. (a-7 jours. b- 28 jours).....	153
Figure 3.42 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux plus laitier.....	154
Figure 3.43 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en chaux plus laitier additionnée.....	155
Figure 3.44 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la paille.....	156
Figure 3.45 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en fibres. a- 7 jours. b-28 jours.....	157
Figure 3.46 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la paille plus du ciment.	158
Figure 3.47 : Variation de la perte de poids pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur ciment et de fibres additionnée	159
Figure 3.48 : Effondrement de surface des échantillons du sol limoneux pendant l'essai d'absorption.....	161
Figure 3.49 : Valeurs minimales de résistance à la compression sèche et humide dans toutes les normes internationales (CEB).....	165
Figure 3.50 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (ciment -laitier).....	170
Figure 3.51 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (chaux -laitier).....	170
Figure 3.52: Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (ciment-fibre).	171
Figure 3.53 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (ciment –laitier).....	172
Figure 3.54 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (chaux –laitier).....	173
Figure 3.55: Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisé au mélange (ciment -fibre).....	174
Figure 3.56 : Variation du taux de gonflement en fonction du mélange (ciment –laitier).....	175

Figure 3.57 : Variation du taux de gonflement en fonction du mélange (chaux –laitier).	176
Figure 3.58 : Variation du taux de gonflement en fonction du mélange (ciment –fibre).....	176
Figure 3.59: Évolution de retrait en fonction du mélange (ciment –laitier) et du temps de cure...	177
Figure 3.60 : Évolution de retrait en fonction du mélange (chaux -laitier) et du temps de cure....	178
Figure 3.61: Évolution de retrait en fonction du mélange (ciment –fibre) et du temps de cure.	179
Figure 3.62 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (ciment –laitier)...	180
Figure 3.63 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (chaux- laitier)....	180
Figure 3.64 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (ciment –fibre).....	181
Figure 3.65 : Courbes granulométriques de sol argileux.....	182
Figure 3.66 : Spectre de la DRX de sol argileux.....	183
Figure 3.67 : Observation microscopique de sol argileux par MEB.....	183
Figure 3.68 : Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901).....	184
Figure 3.69 : Variation des limites d’Atterberg en fonction de la quantité de laitier additionné...	185
Figure 3.70 : Variation des limites d’Atterberg en fonction de la quantité de la chaux additionné	186
Figure 3.71 : Variation des limites d’Atterberg en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.....	187
Figure 3.72 : Variation des limites d’Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée.	188
Figure 3.73 : Variation des limites d’Atterberg en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.....	189
Figure 3.74: Courbe Proctor due sol de base.	190
Figure 3.75 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de laitier additionnée.	191
Figure 3.76 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de chaux additionnée.....	191
Figure 3.77 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.	192
Figure 3.78 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de ciment additionnée.....	193
Figure 3.79 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.	194
Figure 3.80 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de fibres additionnée.....	194
Figure 3.81 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée	195
Figure 3.82 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier additionnée	196
Figure 3.83 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier additionnée.....	197
Figure 3.84 : Évolution de la résistance à la compression pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux additionnée.....	197
Figure 3.85: Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux additionnée.	198
Figure 3.86 : Évolution de la résistance à la compression pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux et de laitier additionnée.	199
Figure 3.87 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux et de laitier additionnée.....	200
Figure 3.88 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment additionnée.	201
Figure 3.89 : Évolution de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment additionnée.	202
Figure 3.90 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité d’ ciment plus laitier additionnée.	203
Figure 3.91 : Évolution de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.....	204

Figure 3.92 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de fibres en paille de blé additionnée.....	205
Figure 3.93 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité de chaux plus fibres additionnée pour le sol argileux.	206
Figure 3.94: Évolution de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité de chaux plus fibres en paille de blé additionnée.....	207
Figure 3.95 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au laitier.	208
Figure 3.96 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en laitier additionnée. (a- 7 jours. b- 28 jours).	209
Figure 3.97 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux.	210
Figure 3.98: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux additionnée.....	210
Figure 3.99: Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux et au laitier....	211
Figure 3.100: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux plus laitier additionnée.....	212
Figure 3.101 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au ciment.	213
Figure 3.102 : Variation de la perte de bloc de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en ciment additionné.....	214
Figure 3.103 : Cycles de saturation-séchage après traitement au ciment et au mélange (ciment-laitier).....	215
Figure 3.104 : Variation de la perte de poids des blocs de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en ciment plus laitier additionnée.....	216
Figure 3.105 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement par les fibres de paille de blé.....	217
Figure 3.106: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en fibres de paille de blé additionnée.....	218
Figure 3.107 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux et à la chaux plus fibres en paille de blé paille.	219
Figure 3.108 : Variation de la perte de bloc de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux plus fibres de paille de blé additionnée.	220
Figure 3.109 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (chaux -laitier).	229
Figure 3.110 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (chaux - fibres).....	230
Figure 3.111: Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (chaux – laitier).	231
Figure 3.112 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (chaux – fibres).....	231
Figure 3.113 : Taux de gonflement des blocs stabilisée au mélange (chaux –laitier).	232
Figure 3.114: Taux de gonflement des blocs stabilisés au mélange (chaux –fibres).....	233
Figure 3.115 : Évolution de retrait en fonction du mélange (chaux -laitier) et du temps de cure.	234
Figure 3.116 : Évolution de retrait en fonction du mélange (chaux - fibre) et du temps de cure..	235
Figure 3.117 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (chaux –laitier)...	236
Figure 3.118: Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (chaux –fibres)....	236
Figure 4.1 : Variation de la résistance à la compression de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) ajoutée et du temps de cure.	240
Figure 4.2 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de qqqlaitier, de ciment et de mélange (ciment-laitier) ajoutée et du temps de cure.	242
Figure 4.3 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et du temps de cure.....	243

Figure 4.4 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et du temps de cure.	245
Figure 4. 5 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol limoneux, en fonction de la quantité de fibres de paille de blé et de mélange (ciment -fibre de paille de blé) ajoutée et du temps de cure.....	246
Figure 4. 6: Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de fibres de paille de blé et de mélange (ciment –fibre de paille de blé) ajoutée et du temps de cure.....	247
Figure 4.7 : Comparaison entre l’effet du ciment, de la chaux, du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur la résistance à la compression à l’état sec.	248
Figure 4.8 : Effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.	249
Figure 4. 9 : Photos de terre à base de sol limoneux, prises à partir du Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	251
Figure 4.10 : Effet du laitier, de la chaux et de mélange (chaux-laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.....	252
Figure 4.11 : Photos de terre à base de sol limoneux, prises à partir du Microscopie Électronique à Balayage (MEB). (a)- Terre non traitée. (b)- (Terre +8 % chaux+12 % laitier).....	253
Figure 4.12 : Comparaison entre l’effet du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux	254
Figure 4.13 : Effet de fibres de paille de blé et du mélange (ciment - fibre en paille de blé) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.	255
Figure 4.14 : Photos (MEB) de la terre à base de sol limoneux, traité à 8 % du ciment et renforcé par 0.5 % de la paille de blé,.....	256
Figure 4.15 : Corrélacion entre la résistance à la compression et la perte de poids pour la terre à base de sol limoneux traitée au mélange.	257
Figure 4.16 : Effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur l’absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.	258
Figure 4.17 : Effet de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur l’absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.....	259
Figure 4.18 : Comparaison entre l’effet du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur l’absorption capillaire de la terre à base du sol limoneux.	260
Figure 4.19 : Effet des fibres de paille de blé et du mélange (ciment-fibres de paille de blé) sur l’absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.....	261
Figure 4. 20: Effet des différents ajouts sur l’érosion de la terre à base de sol limoneux.....	262
Figure 4.21 : Les blocs stabilisés après l’essai d’érosion.	263
Figure 4.22 : Corrélacion entre la perte de poids et le taux d’érosion de la terre à base du sol limoneux traitée au mélange.	265
Figure 4.23 : Effet des différents ajouts sur la résistance à l’abrasion de sol limoneux.	266
Figure 4.24 : Corrélacion entre la résistance à la compression et à l’abrasion de la terre à base de sol limoneux traitée au mélange.	267
Figure 4.25 : Effet des différents ajouts sur le gonflement de sol limoneux.	268
Figure 4.26 : Effet des différents ajouts sur le retrait de la terre à base de sol limoneux.....	269
Figure 4.27: Effet des différents ajouts sur la conductivité thermique	271
Figure 4.28 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité du laitier, chaux et mélange (chaux-laitier) ajoutée et le temps de cure. ...	273

Figure 4.29 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier, de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et le temps de cure.	275
Figure 4.30 : Variation de la résistance à la compression sèche de terre à base de sol argileux en fonction de la quantité, ciment et mélange (ciment-laitier) ajoutée et le temps de cure.	276
Figure 4.31 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment et de mélange (ciment-laitier) ajoutée et le temps de cure.	278
Figure 4.32 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la chaux et la quantité de mélange (chaux-fibres de paille de blé) ajoutée et le temps de cure.	279
Figure 4.33 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de mélange (chaux-fibres en paille de blé) ajoutée et le temps de cure.	280
Figure 4.34 : Comparaison entre l'effet du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur la résistance à la compression de la terre à base de sol argileux.....	281
Figure 4.35 : Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux - laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux.	282
Figure 4.36 : Photos de lame mince observées au Microscopie électronique à balayage d'échantillons de terre à base de sol argileux	283
Figure 4.37 : Effet du ciment, du mélange (ciment - laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux et la période de cure.	284
Figure 4.38 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux traitée au laitier, à la chaux, au ciment et au mélange (chaux/ou ciment-laitier) après 28 jours de cure.....	285
Figure 4.39 : Effet de la fibre en paille de blé, chaux et mélange (chaux – fibres en paille de blé) et la cure, sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux.	286
Figure 4.40 : Microscopie électronique à balayage pour la terre à base de sol argileux renforcé par la paille de blé.....	287
Figure 4.41 : Corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids de sol argileux.	288
Figure 4.42 : Effet du laitier, de la chaux, du mélange (chaux - laitier) et de la cure sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux.....	289
Figure 4.43 : Effet du ciment, du mélange (ciment - laitier) et de la cure sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux.....	290
Figure 4.44 : Comparaison entre l'effet de la chaux, du mélange (chaux –laitier), du ciment et du mélange (ciment – laitier) et la cure sur la perte de poids du sol limoneux.	291
Figure 4.45 : Effet des fibres en paille de blé, du mélange (chaux - fibre) et la cure sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux.....	292
Figure 4.46: Effet des différents ajouts sur l'érosion de la terre à base de sol argileux.....	293
Figure 4.47 : les blocs de terre à base de sol argileux après l'essai d'érosion.....	294
Figure 4.48 : Corrélation entre la perte de poids et le taux d'érosion de la terre à base de sol argileux.....	295
Figure 4.49: Effet des différents ajouts sur la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol argileux à 7 et 28 jours de cure.	295
Figure 4.50: corrélation entre la résistance à la compression et à l'abrasion de la terre à base de sol argileux.....	296
Figure 4.51 : Effet des différents ajouts sur le gonflement de la terre à base sol argileux.	298
Figure 4.52 : Effet des différents ajouts sur le retrait de la terre à base de sol argileux.	299
Figure 4.53 : Apparition de fissure dans les blocs a base de sol argileux.....	300
Figure 4.54 : Effet des différents ajouts sur la conductivité de la terre à base de sol argileux.	301

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'utilisation de la terre crue comme matériau de construction remonte à des temps lointains. Elle a été utilisée dans toutes les cultures anciennes, non seulement pour construire des maisons, mais aussi pour les édifices religieux. Il n'y a pas de consensus sur la date à laquelle l'homme a commencé à utiliser la terre dans la construction. Les techniques de construction en terre sont connues depuis plus de 9 000 ans. La plus ancienne brique du monde a été découverte en 1952 dans les fouilles de Jéricho, le long du Jourdain, datée entre 8 300 et 7 600 avant JC. Des fondations en pisé datant de 5000 avant JC ont été découvertes en Syrie.

La terre crue recèle de nombreux avantages qui en ont fait le matériau le plus utilisé dans le passé et qui peuvent en faire le matériau de construction de l'avenir. Une des raisons de l'utilisation de la terre crue est sa disponibilité dans la plupart des régions, son faible coût, sa résistance au feu et sa capacité de fonctionner mieux comme régulateur d'humidité. En effet, elle est capable d'équilibrer le climat intérieur mieux que tout autre matériau de construction, en raison de sa capacité à absorber et à désorber l'humidité et à sa grande inertie thermique permettant de réguler les écarts de température. Ceci permet, d'avoir un habitat non seulement frais en saison chaude, mais aussi capable de conserver la chaleur en saison froide. Par ailleurs, il faut souligner le fait que la terre crue économise de l'énergie. Il s'agit d'une matière première largement disponible et renouvelable, ne nécessitant aucune énergie, étant donné qu'aucune cuisson n'est nécessaire pour sa fabrication. De plus, lorsque les filières locales existent, l'impact lié aux transports est quasi nul. À partir de là, nous pouvons déduire que la terre crue, en tant que matériau, peut contribuer pleinement à une réelle démarche de développement durable. Elle est considérée comme l'un des matériaux les plus respectueux de l'environnement.

Malgré ces nombreux avantages, l'image des constructions en terre crue peut être dévalorisée par quelques inconvénients ou par des caractéristiques particulièrement défavorables, comme la faible résistance à la compression, la vulnérabilité à l'absorption d'eau et d'autres agents de l'environnement conduisant à une diminution de leur résistance, leur durabilité et leur confort thermique dans le temps.

La technique traditionnelle, pour l'obtention d'un matériau en terre crue, consiste à mélanger la terre argileuse avec un pourcentage d'eau élevé, pour permettre un malaxage

manuel aisé. Le bloc en terre est généralement obtenu en tassant la terre à la main dans un moule simple en bois, puis en la séchant au soleil. Des fibres végétales sont parfois ajoutées à la terre. Les blocs et les murs obtenus (non convenablement compacté) ont une résistance souvent faible et un retrait important. Pouvant de se traduire par des dégradations importantes. Donc le problème, que pose l'utilisation traditionnelle de la terre crue est un problème de durabilité et du manque de résistance du matériau lui-même.

Plusieurs techniques ont été mises au point dans le but d'éliminer ces inconvénients, mais la technique la plus importante et la plus prometteuse est celle du traitement ou stabilisation des sols par addition d'éléments chimiques (ciment-chaux) seuls ou combinés à des ajouts minéraux. Plusieurs études de recherche ont été menées pour voir l'effet de ces additifs sur les propriétés de la terre stabilisée et ont montré des résultats positifs quant à l'augmentation de la résistance et de la durabilité. En effet, aujourd'hui, les techniques de construction en terre crue sont entrain de connaître une évolution grâce à l'établissement de cette technique de stabilisation des sols. Ils ont permis à l'homme de réaliser des constructions modernes, en utilisant des matériaux stabilisés par des liants hydrauliques tels que le ciment et la chaux.

De plus, l'accroissement de l'intérêt apporté au volet écologique dans le domaine du génie civil et des enjeux de la réduction de la consommation d'énergie, des émissions de dioxyde de carbone et de l'atténuation des problèmes d'élimination des déchets résultant de l'activité industrielle, ont motivé les chercheurs pour trouver des alternatives durables, pour remplacer partiellement ou totalement le ciment dans la stabilisation. L'utilisation des déchets industriels, tels que le laitier, les cendres volantes, la fumée de silice et agricoles, tels que, les fibres naturelles, dans la stabilisation de la terre crue, a été un axe d'investigation très exploré, faisant l'objet de plusieurs études de recherche, pour aider à diminuer la pollution et préserver l'environnement.

Le laitier de hauts fourneaux est un sous-produit de la production de l'acier, dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. En Algérie, plus de 500 000 tonnes de laitier sont produites chaque année. Plusieurs travaux de recherche ont été menés afin d'étudier l'effet du laitier sur les propriétés de la terre crue. Ayant souvent peu de propriétés cimentaires, le laitier est généralement utilisé en combinaison avec du ciment Portland ou de la chaux hydratée, qui fournissent l'alcali nécessaire à l'activation et, au-delà, l'amélioration du matériau traité. Selon les résultats de ces études, l'utilisation du laitier, en combinaison avec

le ciment/ou la chaux, améliore la résistance à la compression, diminue l'absorption d'eau et la perte de poids. Néanmoins, l'effet du laitier de haut fourneau combiné au ciment et à la chaux sur la performance de la terre crue, sur d'autres propriétés de durabilité, notamment le retrait, la résistance à l'érosion et l'abrasion des blocs de terre ainsi que la conductivité thermique a été peu étudié.

Ces dernières années, l'emploi croissant de ressources facilement renouvelables et produites localement est une des pistes d'avenir majeures en matière de développement durable. En Algérie, la paille de blé figure au nombre de ces ressources intéressantes, car elle est disponible dans beaucoup de régions en d'importantes quantités et à un coût modeste. La paille produite peut être laissée sur le champ, retirée de la terre ou même brûlée selon la décision prise par le propriétaire. L'élimination de la paille de blé par brûlage, a été remise en question, en raison des préoccupations croissantes, concernant les effets de la fumée provenant des champs brûlés sur la santé. Le brûlage de la paille de blé produit de grandes quantités de polluants atmosphériques, notamment, des particules (PM10), du CO et du NO₂. Il est donc intéressant et nécessaire de trouver un autre moyen d'éliminer les excédents de la paille de blé. En effet, leur valorisation dans le secteur du bâtiment permet de réduire les impacts environnementaux grâce à leur caractère renouvelable, leur neutralité en CO₂ et leur économie en énergie lors de la production. La stabilisation des blocs de terre à l'aide de fibres végétales, souvent la paille, a été employée de par le monde, depuis plusieurs décennies. La présence de fibres a pour conséquence une diminution de la propagation des fissures à la traction, après la déformation initiale du nombre de fissures causées par le retrait, et une diminution de la conductivité des terres compactées. Cependant, le renforcement par les fibres naturelles augmente l'absorption d'eau et le gonflement. L'utilisation de la chaux et du ciment seuls ou combiné à des additifs minéraux dans le mélange (terre crue – fibres) pourrait être une solution à adopter, pour remédier à de tels problèmes et empêcher la dégradation des fibres dans le mélange. En effet, parmi les études antérieures rencontrées, portant sur l'effet des fibres naturelles sur la durabilité des blocs de terre, peu, sont celles qui ont soulevé l'effet des fibres végétales, notamment la paille de blé, combinées aux principaux stabilisateurs ciment ou chaux, sur la durabilité et la conductivité thermique des blocs en terre.

Au cours de la dernière décennie, de nombreux pays ont publié plusieurs codes techniques ainsi que des directives pour la construction en terre crue. Ces tentatives de

normalisation sont importantes car, en l'absence d'une véritable science de la construction en terre, elles fournissent des recommandations pour la conception des matériaux et pour l'évaluation des caractéristiques telles que la résistance à la compression, le pourcentage de retrait et de la durabilité (absorption et érosion causées par l'eau).

Le présent travail de recherche a pour but de valoriser l'utilisation de la paille de blé et du laitier en combinaison avec le ciment ou la chaux dans la stabilisation de la terre crue pour la réalisation d'un bloc de construction en terre résistant, durable et écologique.

Les objectifs tracés pour atteindre le but visé par la présente étude sont donnés dans ce qui suit :

- voir l'effet du laitier, seul/ou combiné avec du ciment ou de la chaux sur la plasticité.
- voir l'effet du laitier et de la paille, seuls/ou combinés avec du ciment ou de la chaux sur le compactage.
- voir l'effet du laitier et de la paille, seuls/ou combinés avec du ciment ou de la chaux sur la résistance à la compression.
- Voir l'effet du laitier et de la paille, seuls/ou combinés avec du ciment ou de la chaux sur la durabilité (cycle humidification-séchage, absorption capillaire, résistance à l'érosion, résistance à l'abrasion et la variation volumique (retrait-gonflement))
- Voir l'effet du laitier et de la paille, seuls/ou combinés avec du ciment ou de la chaux sur la conductivité thermique.

Pour ce faire, l'organisation du travail, s'est faite de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur l'historique et les techniques de construction en terre, les différentes propriétés de terre. Les avantages et les inconvénients de terre comme matériau de construction. Ce chapitre présentera aussi les travaux antérieurs réalisés sur l'effet des différents additifs particulièrement la chaux, le ciment, les ajouts minéraux (laitier) et les fibres, sur la plasticité, le compactage, la résistance, la durabilité et la conductivité thermique.

Le deuxième chapitre est dédié, dans un premier temps, aux caractérisations des différents matériaux (le sol, la chaux, le ciment, le laitier granulé et les fibres) utilisés dans

cette étude. En second temps, à toutes les formulations, aux méthodes de préparation des échantillons ainsi qu'aux différents types d'essais réalisés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats issus de la phase expérimentale.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus par rapport à ceux rapportés dans la littérature.

Et enfin, une conclusion générale présentant l'essentiel des enseignements tirés de ce travail de recherche ainsi que les perspectives de développement.

CHAPITRE I : CONSTRUCTION EN TERRE ET TECHNIQUES DE STABILISATION

1.1 Introduction

Un intérêt particulier a été porté, ces dernières années, à la réintroduction de la terre crue comme matériau dans le domaine de la construction, en premier lieu, grâce à l'intérêt économique et écologique qu'offre ce matériau; en second lieu, grâce aux techniques d'améliorations développées telles que la technique de stabilisation des sols par utilisation d'additifs chimiques (ciment-chaux) seuls ou associés à des ajouts minéraux, qui offrent la possibilité d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques de la terre crue et de surmonter les problèmes posés par un tel matériau lors de son utilisation comme matériau de construction.

Ce chapitre comporte une étude bibliographique sur la terre crue (constituants et propriétés), les constructions en terre crue et leurs techniques, la technique de stabilisation des sols en relation avec l'amélioration de la performance des blocs en terre crue utilisée dans la construction, en termes de résistance, de durabilité et de conductivité thermique. Une attention particulière est accordée à la stabilisation par addition de ciment, de chaux et de déchets (industriels et agricoles), notamment le laitier granulé de haut fourneau et les fibres naturelles.

1.2 Terre crue

La terre crue, par définition désigne, un matériau meuble naturel, d'épaisseur et de composition variable, disponible sur la surface terrestre appelée «sol ». Ce dernier est issu de procédés, très lents, de dégradation par des mécanismes complexes et de migration des particules. Ces procédés de dégradation se manifestent suite à une interaction d'actions physiques, chimiques, et biologiques appliquées sur une roche mère, sur des périodes géologiques, donnant une couche de matière meuble d'épaisseur et de nature variable. Lorsque la terre crue contient peu de matières organiques, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre.

1.2.1 Constituants

Les sols sont très complexes dans leur composition et très variables dans leurs propriétés et leurs occurrences. Leur nature complexe, leur comportement changeant au cours de leur utilisation et leur distribution spatiale variable sont le résultat d'un mélange

non homogène et de l'interaction de tous leurs composants. Ils sont constitués d'un certain nombre de phases, notamment, la phase des gaz, la phase des liquides et la phase des solides. Parmi les constituants de la phase des gaz et celle des liquides, provenant de l'environnement extérieur, remplissant les vides dans le sol, on note principalement l'air et l'eau, respectivement.

Par contre, les composants solides du sol, qui sont en grande partie des constituants minéraux, des éléments organiques issus de la vie végétale et animale, peuvent également être présents dans le sol. Les constituants minéraux sont le résultat de la détérioration de la roche mère, soit sous forme de fragments de la roche mère, soit sous forme de minéraux composant ces roches.

Les sols sont composés de proportions variables de quatre types de matériaux, graviers, sables, limons et argiles qui sont détaillés ci-dessous. Chacun d'entre eux se comporte de manière caractéristique propre. En effet, lorsqu'ils sont exposés à des variations d'humidité, certains changent de volume, d'autres pas. Les deux premiers de ces types de matériaux sont dans l'ensemble stables, les deux derniers sont instables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire la capacité à résister à une alternance d'humidité et de sécheresse sans que les propriétés ne changent, est d'une importance fondamentale dans la caractérisation, d'un matériau de construction en terre crue.

- les graviers sont constitués de fragments de roche de dureté variable, dont la taille varie entre 2 et 20 mm environ. Leurs propriétés mécaniques ne subissent aucune modification détectable en présence d'eau. Ils forment un constituant stable du sol.

- les sables sont constitués de particules minérales dont la taille est comprise entre 0,06 et 2 mm environ. Ils manquent de cohésion à sec, mais présentent un très fort degré de frottement interne, c'est-à-dire une très grande résistance mécanique au mouvement entre les particules qui les composent. En revanche, lorsqu'ils sont humides, ils présentent une cohésion apparente due à la tension superficielle de l'eau occupant les vides entre les particules. Comme pour les graviers, ils forment un constituant stable du sol.

- les limons sont constitués de particules dont la taille varie entre environ 0,002 mm (2 μ m) et 0,06 mm. Leur résistance au mouvement entre les particules qui les composent est généralement inférieure à celle des sables. Ils ont peu de cohésion à l'état sec, mais présentent

une certaine cohésion quand ils sont humides. Lorsqu'ils sont exposés à différents niveaux d'humidité, ils gonflent et se contractent, changeant sensiblement de volume.

Les graviers, les sables et, à un degré moindre, les limons se caractérisent donc par leur stabilité en présence d'eau. Lorsqu'ils sont secs, ils ont peu ou pas de cohésion et ne peuvent donc pas être utilisés seuls comme matériau de construction dans le domaine de la construction.

- les argiles

La proportion argileuse d'un sol est la partie granulaire inférieure à 2 μm . Ces argiles se regroupent en groupes de micelles constitués de plusieurs cristaux d'argile de formes variées. Une unité cristalline appelée feuillet est composée de plusieurs structures feuilletées et d'espaces interfoliaires. Cet espace est constitué d'eau suivant les différents types d'argile et d'ions solidement fixés. L'empilement de ces différentes couches implique une nature différente des argiles.

• les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des aluminosilicates en feuillet, plus ou moins hydratés, constitués d'une association de couches tétraédriques (T) et octaédriques (O) [1, 2, 3]. La couche tétraédrique est formée par l'association de tétraèdres de silicium (SiO_4)⁴⁻. La couche octaédrique est constituée d'octaèdres d'aluminium ($\text{Al}(\text{O}, \text{OH})_6$). Les deux couches sont reliées par des atomes d'oxygène, figure 1.1.

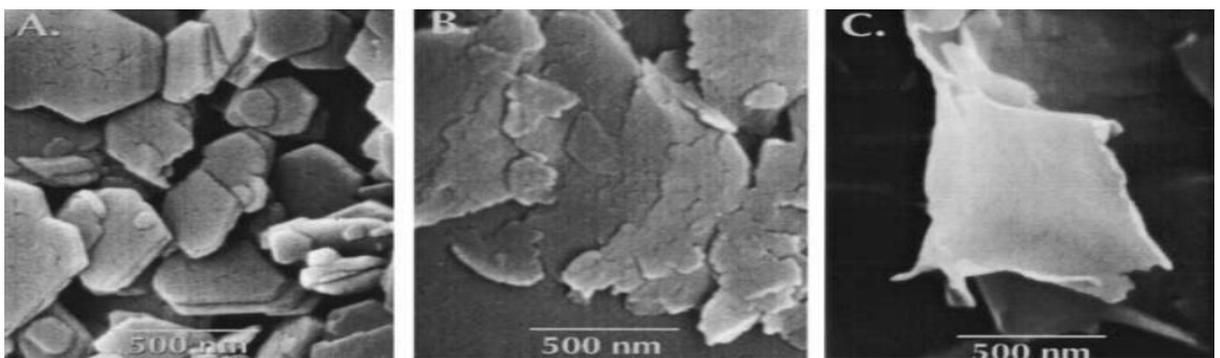
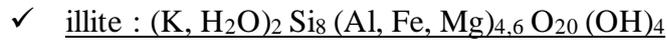


Figure 1.1 : Photographiques au microscope Électronique à balayage des argiles [4].
a-Kaolinite. b- illite. c- montmorillonite

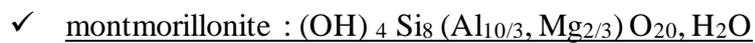
✓ kaolinite : $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{Al}_4(\text{OH})_8$

Le feuillet élémentaire est composé d'une couche de silice et d'une couche d'alumine. Entre les différents feuillets de kaolinite, le contact se fait entre un plan contenant

les ions hydroxyle OH^- de l'octaèdre et celui contenant les ions oxygène O^{2-} du tétraèdre. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau. Un exemple de schématisation des particules de kaolinite est présenté dans la figure 1.2.



Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine entre deux couches de silice. Dans les couches de silice, un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions potassium K^+ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets [2, 3]. Un exemple de schématisation des particules d'illite est présenté dans la figure 1.3.



Le feuillet élémentaire est composé, comme pour l'illite, d'une couche d'alumine entre deux couches de silice. Un ion Al^{3+} est remplacé par un ion Mg^{2+} dans les couches d'alumine. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou des ions Na^+ (montmorillonite sodique). Comme la valence des ions sodium est inférieure à celle des ions calcium, la montmorillonite de sodium présente la plus grande surface spécifique et la plus grande capacité d'échange cationique. Comme les liaisons entre les couches sont très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un potentiel de gonflement élevé [2.3]. Un exemple de schématisation des particules de montmorillonite est présenté dans la figure 1.4.

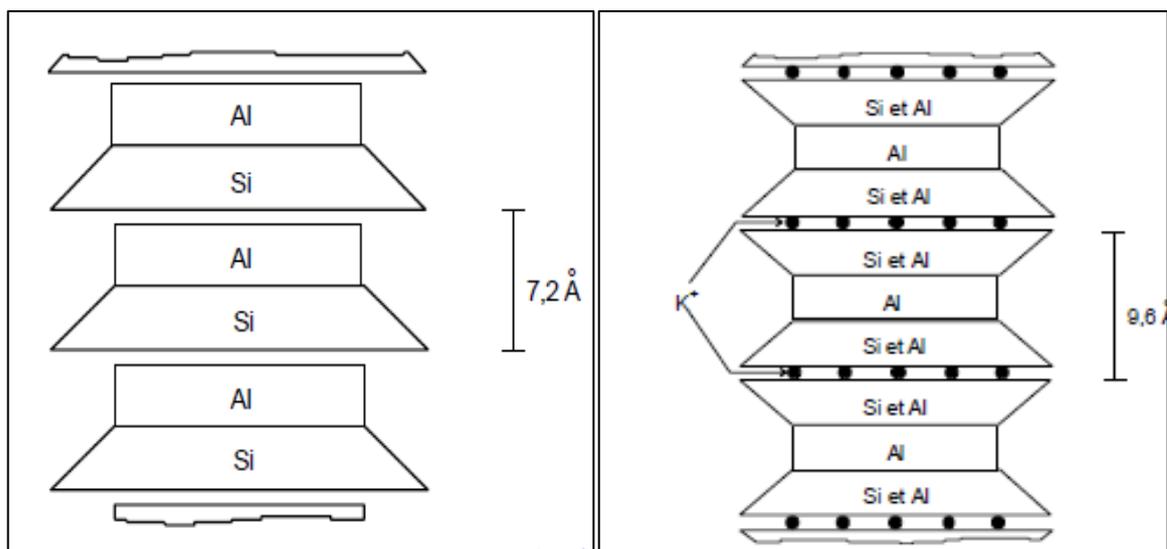


Figure 1. 2 : Schématisation de la kaolinite [2].

Figure 1. 3 : Schéma de la particule d'illite [2].

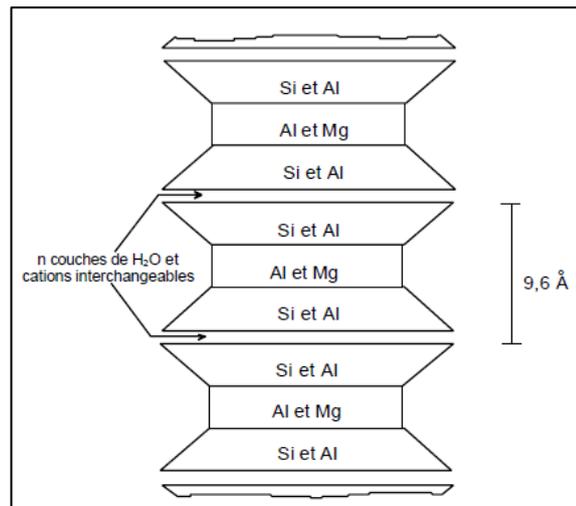


Figure 1. 4 : Schéma de la particule de montmorillonite [2].

1.2.2 Propriété fondamentale de la terre crue

Les propriétés de la terre changent d'un sol à l'autre en fonction de la nature des fractions de particules qui la composent. La compréhension de ses propriétés chimiques et physiques permet de définir la qualité et la performance d'un sol à des fins constructives. Parmi toutes ces caractéristiques, on distingue trois caractéristiques fondamentales qui permettent à elles seules d'avoir une bonne compréhension du type de terre [5] :

- la texture ou granularité.
- la plasticité.
- la compaction.

a) Texture ou granularité

La répartition granulométrique est mesurée en deux temps en fonction de la taille des particules. Les graviers, les sables et les limons sont étudiés par granulométrie et les argiles (et colloïdes) par analyse de sédimentométrie. Les particules les plus gros donnent au matériau sa force, tandis que les fines assurent la cohésion et contrôlent la plasticité et la façon dont le sol réagit à l'humidité, ce qui permet de contrôler le retrait et le gonflement.

Les retours d'expérience sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence. Il est très important de respecter la teneur

minimale en argile pour toutes les techniques, figure 1.5. Le pourcentage commun d'argile à toutes les recommandations se situe entre 10% et 22% pour les blocs de terre comprimée et entre 10 % à 15 % pour le pisé. Cependant, la teneur en limon est entre 10 % à 25 % pour les blocs de terre comprimée [6].

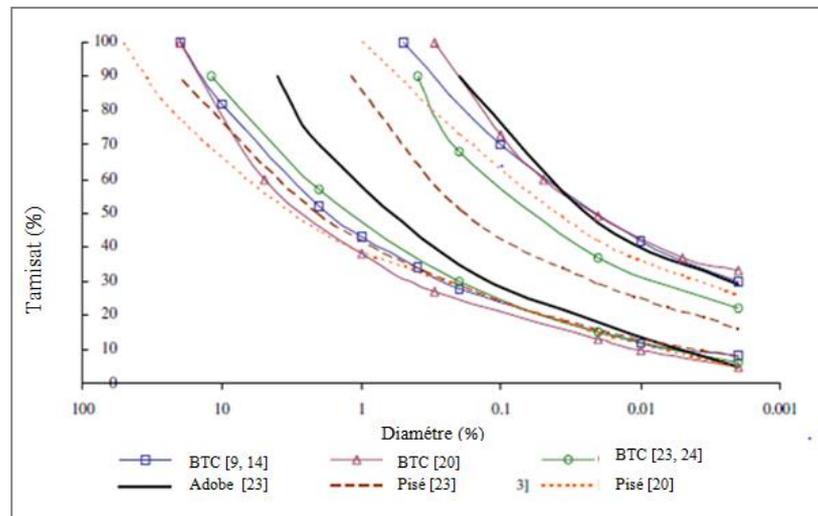


Figure 1.5 : Diagramme de granularité des sols [6].

b) Plasticité

La plasticité traduit l'aptitude d'une terre à se déformer sans qu'une réaction élastique significative ne se produise. Les limites d'Atterberg définissent les limites entre différents états de cohérence d'une terre. Elles sont évaluées en quantité d'eau sur la fraction fine du sol (moins de 0,4 mm). De l'état liquide à l'état plastique, limite marquée par la limite de liquidité (LL), la terre commence à manifester une résistance au cisaillement. Le passage de l'état plastique à un état solide, limite marquée par la limite de plasticité (LP), la terre devient friable.

Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes des sols fins. Elles sont utilisées dans l'identification et la classification des sols. La figure 1.6 présente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. La plasticité est similaire pour le pisé et les blocs de terre comprimée, en revanche l'utilisation de la terre en adobe demande une limite de liquidité et un indice de plasticité plus important par rapport à des techniques de construction plus sèche comme les blocs de terre comprimée ou les murs en pisé. En général, une bonne terre de construction présente un indice de plasticité (IP) compris entre 16 et 28% et une limite de liquidité (LL) entre 32 et 46% [6].

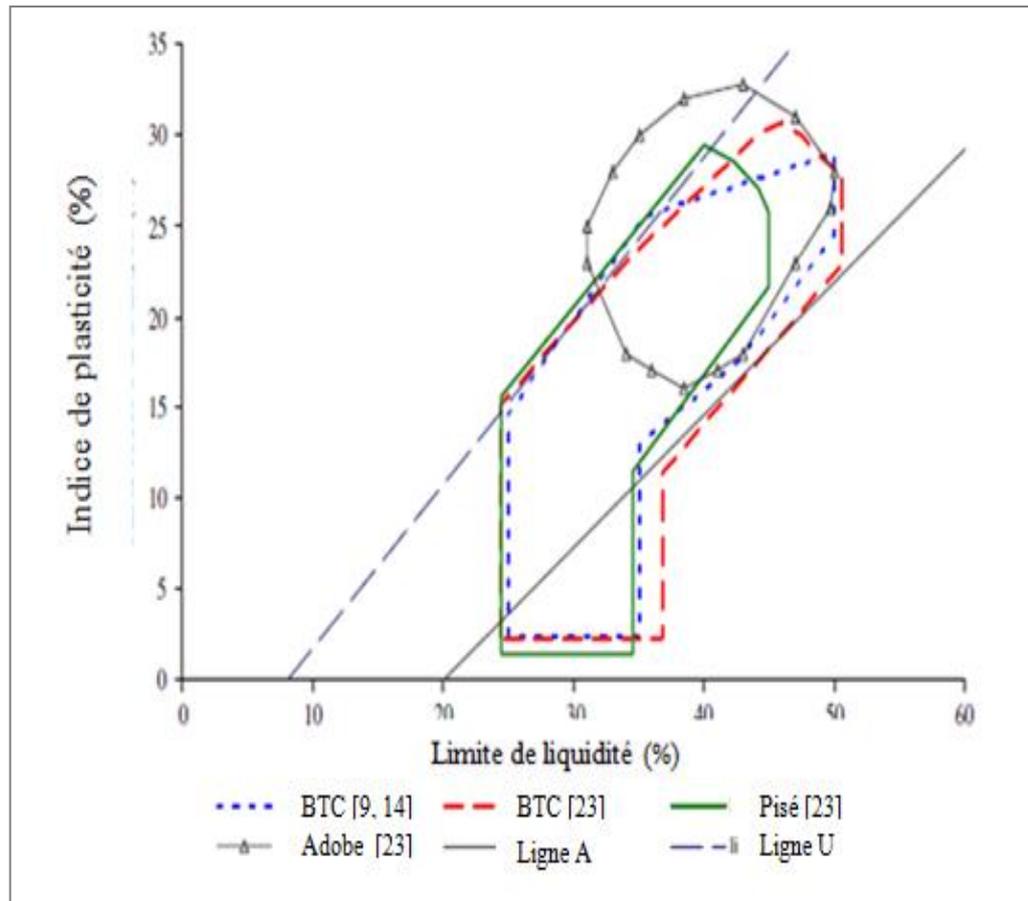


Figure 1.6 : Nomogrammes de plasticité montrant les surfaces recommandées de PI/LL des sols pour l'adobe, les blocs de terre comprimée ou le pisé [6].

c) Compaction

La compaction est la capacité de la terre à être compactée par une pression statique ou un compactage dynamique de façon à réduire son volume. Pour atteindre un compactage maximal, la terre doit avoir une teneur en eau spécifique, dite "teneur en eau optimale", qui permet aux particules d'être déplacées dans une configuration plus dense. Plus la densité d'un sol peut être augmentée, plus son indice de vide est moindre, et plus il est difficile pour l'eau de le pénétrer. Cette propriété résulte du réarrangement des particules qui réduit le risque de modification de la structure en présence d'eau. La teneur en eau doit être suffisamment élevée pour lubrifier les particules et leur permettre de se déplacer de manière à occuper le moins d'espace possible. En même temps, la teneur en eau ne doit pas être trop élevée, car si les vides sont pleins d'eau, le matériau devient incompressible. La compaction d'un sol est mesurée par l'essai Proctor.

1.3 Construction en terre

La construction en terre existe dans tous les continents du monde. Aujourd'hui encore, plus d'un tiers des habitants de la planète vit dans des constructions en terre. Pour les pays en développement, ce pourcentage s'élève à 50% de la population rurale et à, au moins, 20 % de la population urbaine et périurbaine.

1.3.1 Aperçu sur la construction en terre

La majorité des constructions en terre crue se trouvent dans presque toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine. Elles sont également présentes en Chine et en Inde dans des habitats vernaculaires. En Europe, par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en briques crues sont toujours présents dans le paysage comme un témoignage du passé. Nous pouvons les trouver au Danemark, en Suède, en Allemagne, en Europe de l'Est, mais aussi en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique [7].

La figure 1.7 illustre les régions du monde où la technologie de construction en terre est utilisée. Des exemples de villes construites en briques de terre sont présentés dans la figure 1.8. Cette dernière montre les villes de Ramsès II à Gournà, en Égypte, construites en briques de terre il y a 3 200 ans [8, 9]. La figure 1.9 montre la citadelle de Bam, en Iran, dont certaines parties ont 2 500 ans. La figure 1.10 montre que la Grande Muraille de Chine a été construite en briques de terre battue il y a 4 000 ans. La figure 1.11 montre la ville de Chan Chan (Pérou), qui a été construite en adobe il y a 3500 ans.



Figure 1.7 : Carte de diffusion de la construction en terre (Source : <http://craterre.org/>).



Figure 1.8 : Villes de Ramsès II à Gournah.



Figure 1.9 : Citadelle de Bam (Iran).



Figure 1.10 : Grande Muraille (Chine).



Figure 1.11 : Ville de Chan Chan (Peru).

L'Algérie recèle un important patrimoine d'architecture en terre crue qui remonte à des milliers d'années. La qualité et la diversité des constructions en terre ne sont pas en reste, elles sont encore visibles dans les zones présahariennes : Béchar (Ksar de Moughel), Adrar (vallée du Gourara), Timimoune, Biskra, Ghardaïa (vallée du M'Zab), Tamanrasset, dans les Aurès (les villages de Ghoufi, Béni Souik) et aussi dans la chaîne de montagne qui compte de nombreux villages aux maisons traditionnelles construites en terre, figure 1.12. Des maisons, certes moins célèbres et moins spectaculaires que les ksours du désert mais, qui restent un témoignage du savoir-faire ancestral de la société villageoise du nord du pays.



Figure 1.12 : Exemple des constructions en terre en Algérie (Ksar de Ouaghlama) [10].

L'intérêt de l'Algérie pour la construction en terre remonte au début des années 1970, avec l'apparition du Centre national d'études et de recherche intégrée du bâtiment (CNERIB). Ce dernier réalise des constructions en Bloc de Terre Stabilisé (BTS). Plusieurs projets utilisant cette technique ont été réalisés, comme le montre le tableau 1.1 [11].

Tableau 1.1 : Les opérations de construction en terre en Algérie selon le CNERIB [11].

Date	Technique	Nombres	Lieu
1969-1970	Terre coulee	02	Zéralda
1970-1973	Terre remplissante	/	Abadla
1972	Pisé	136	Batna
1973-1975	Pisé (R+2)	30/300	Bel abbesse
1976	Toub	100	Felliache Biskra
1980	Bloc de terre comprimée	120	Boussaâda
1981	Bloc de terre comprimée	40	Chèraga
1984	Bloc de terre comprimée	20	Tamanrasset
1984	Bloc de terre comprimée	02	Tamanrasset et Soudania
1986	Bloc de terre comprimée	10	Reggane Adrar
1993	Bloc de terre comprimée	68	Tamanrasset
1999	Pisé	01	Soudania (Alger)
2007	Bloc de terre comprimée	01	Soudania (Alger)

1.3.2 Techniques de construction en terre

Il existe de nombreuses techniques de construction en terre, avec un nombre infini de variations qui reflètent l'identité des lieux et des cultures. Principalement, il existe douze façons différentes d'utiliser la terre pour la construction représentée dans la figure 1.13. Parmi celles-la, cinq sont très couramment utilisées [8].

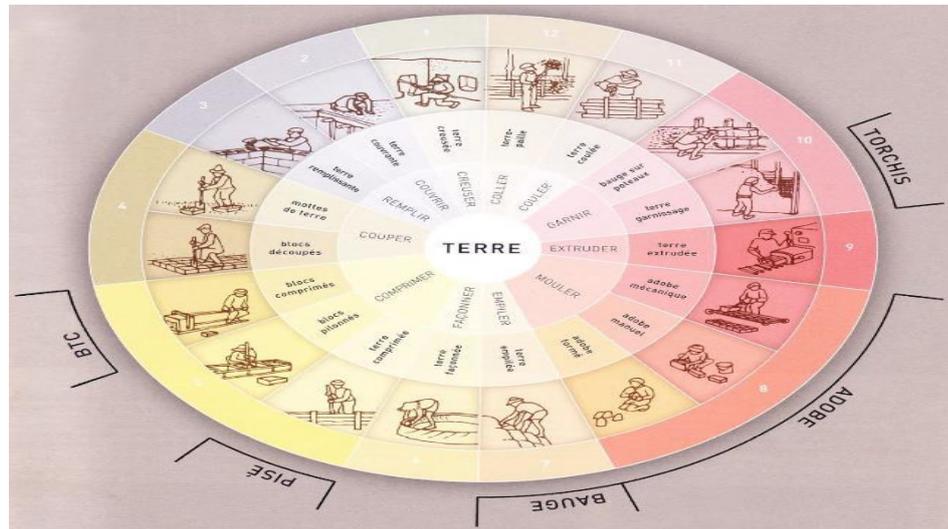


Figure 1.13 : Schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE en 1986 [8].

1.3.2.1. Pisé

Le pisé est une technique de construction ancienne, un moyen pas cher pour l'homme de construire sa propre maison. Elle consiste à construire des murs monolithiques porteurs en compactant progressivement des couches de terre superposées dans des coffrages ou des banches. Le compactage est effectué manuellement par le maçon à l'aide d'un pilon appelé dame ou pisoir, figure 1.14.



Figure 1.14 : Construction en pisé [12].

1.3.2.2. Adobe

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques en terre crue brute façonnées à la main ou moulées puis séchées au soleil, appelées adobes. Ces briques étaient ensuite appareillées dans des murs épais qui avaient l'avantage d'être porteurs. La terre d'adobe, composée d'argile et de sable, est parfois mélangée à de la paille, de la chaux ou du ciment selon l'utilisation, figure 1.15.



(a)

(b)

Figure 1.15 : Construction en adobe. (<http://www.cite-sciences.fr/au-programme/expos-temporaires/ma-terre-premiere/decouvrir/construire/adobe.php>)
 a- fabrication d'adobe. b-Exemple d'une maison construit en adobe.

1.3.2.3. Torchis

Le torchis est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire, car il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales). Contrairement aux techniques précédentes, le torchis n'est pas une construction porteuse. Les lattis sont fixés sur une structure porteuse en bois, puis rempli d'un mélange de terre et de paille. Les terres à torchis sont généralement fines, argileuses et collantes. Elles ne contiennent pas beaucoup de sable, mais se fissurent en séchant, c'est pourquoi elles sont mélangées à de la paille, Figure 1.16.



(a)

(b)

Figure 1.16 : Maisons contemporaines en torchis. (1989).
 a- [Thierry Joffroy / CRAterre-ENSAG]. b-[Marcelo Cortes].

1.3.2.4. Bauge

La bauge, est une technique de construction en terre crue, qui consiste à réaliser des murs monolithiques en formant puis en empilant des mottes de terre en couches horizontales superposées. Cette technique permet de modéliser des murs porteurs sans utiliser de moules ou de coffrages (Figure 1.17).



(a)

(b)

Figure 1.17 : Construction en bauge.

a- Mélange du torchis.

b- Maison contemporaine en bauge.

1.3.2.5. Les blocs de terre comprimée

Les blocs de terre comprimée, sont une évolution moderne du bloc de terre moulée ou de l'adobe. Ils constituent une amélioration considérable de la technique de construction traditionnelle. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance des blocs de terre moulée est ancienne. C'est à l'aide de pilons en bois que les premiers blocs de terre comprimée ont été fabriqués. Aujourd'hui, des presses manuelles, mécaniques et hydrauliques sont utilisées pour améliorer la qualité du matériau. Les blocs de terre comprimée ont une forme régulière et des arêtes vives (figure 1.18).



(a)

(b)

Figure 1.18 : Construction en BTC (Sources Internet).

a- bloc de terre comprimée.

b- Cloison en bloc de terre comprimée.

Cette technique se retrouve partout dans le monde, notamment en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie. En Algérie, les techniques de construction en terre les plus répandues sont l'adobe, ou briques de terre crue, que nous pouvons trouver dans toutes les régions du Sahara, et dans les Aurès et l'Atlas saharien. Le pisé se retrouve dans la majorité des régions de l'Atlas Tellien et des hautes plaines. Les centres historiques algériens construits en terre, le plus connus, sont, sans doute, les ksours de Timimoune, Taghit ou Beni Abbas [10].

1.4 Problèmes de l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction

Les problèmes avec l'utilisation de la terre crue sont souvent liés aux techniques traditionnelles, adaptées dans la confection des blocs en terre crue, conduisant à des blocs et des murs avec une faible résistance et présentant des retraits importants, pouvant se traduire par des dégradations ou des détériorations importantes.

Le terme de détérioration a été défini par plusieurs auteurs comme étant la perte de la qualité d'un matériau, liée au temps, généralement sous l'influence d'agents environnementaux. La détérioration des murs en terre peut être causée par différents processus. Divers problèmes de durabilité ont été identifiés dans les constructions en terre. Parmi ces problèmes, nous pouvons distinguer :

- L'action solvant de l'eau

L'action solvant de l'eau est l'un des mécanismes de détérioration les plus courants qui se produisent dans de nombreux matériaux de construction. La capacité d'un bloc de terre à se mouiller facilement et la capacité du bloc à absorber et à retenir l'eau pendant des périodes suffisamment longues sont deux propriétés qui peuvent laisser le matériau vulnérable à l'action solvant de l'eau [13].

- Absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité est la principale cause de la détérioration des briques de terre. La forte absorption d'eau contribue à une détérioration rapide de ce type de brique [14]. La quantité d'absorption d'eau dépend du type de sol utilisé et est liée à la résistance à la compression et à la durabilité des matériaux. L'eau s'infiltré par capillarité dans le matériau poreux et très hydrophile. L'utilisation des blocs de terre en zone humide nécessite une isolation du mur contre les infiltrations de pluie, car le plus gros problème des blocs est l'effet de l'eau sur la résistance des blocs.

- Érosion

L'érosion de la surface des blocs de terre par l'eau de pluie a été identifiée comme étant, l'un des mécanismes de détérioration les plus courants associés à l'eau. L'érosion de surface ne se produit que dans les zones sujettes à des pluies fréquentes et intenses, comme les tropiques. Le mécanisme de l'érosion de surface peut se dérouler lorsque l'eau de pluie frappe la surface d'un bloc exposé. Elle a un impact direct sur ce dernier. Si l'effet de l'impact peut être lié à l'élimination des particules détachées, l'effet de la pluie est plus susceptible de mouiller la surface du bloc en premier [13]. L'affaiblissement, dû à l'effet des facteurs environnementaux sur les forces d'attraction qui lient les particules entre elles, entraîne une érosion. Les effets indirects de l'érosion de surface comprennent une diminution de la résistance à la compression, une perte de rigidité, une diminution de la densité et une augmentation de la perméabilité.

- Retrait- gonflement

Ce problème est fréquent dans les maisons en terre. Les constructions en terre souffrent de fissures de retrait et ont une mauvaise stabilité dimensionnelle qui nécessite un entretien continu, figure 1.19.



Figure 1.19 : Construction en terre avec de nombreuses fissures de retrait [15].

Les problèmes de retrait semblent être plus fréquents par temps chaud. Les constructions en terre souffrent de problèmes de retrait excessifs pendant la construction. La durée de vie du bâtiment est considérablement réduite en raison des fissures de retrait. Le retrait dépend de la proportion d'argiles et de leur nature, de la porosité totale et de la quantité

d'eau au moment de l'installation. À des températures ambiantes élevées, l'humidité d'un bloc peut être perdue par évaporation. L'eau non liée, qui remplit les pores capillaires d'un bloc, est expulsée pendant le processus, créant ainsi un espace vide supplémentaire. Le matériau peut se déposer pour éliminer les vides, pouvant entraîner souvent des fissures.

Le gonflement est l'opposé du retrait. Si l'eau est à nouveau mise à la disposition d'un bloc de sol qui a subi un retrait, l'eau pénètre dans les vides du sol par l'extérieur et réduit ou détruit les forces internes décrites ci-dessus. Ainsi, une masse d'argile va absorber l'eau et se dilater ou gonfler.

1.5 Propriétés à prendre en compte pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction

Toutes les constructions en terre possèdent des propriétés importantes à prendre en compte pour leur amélioration. D'après les problèmes qui se posent lorsqu'on utilise la terre comme matériau de construction, on note la résistance, la durabilité et la propriété thermique [16].

1.5.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques essentielles pour caractériser la capacité de charge des matériaux, permettant à un mur ou à un bloc de terre de supporter sa charge sans se rompre ou éclater localement aux points de forte contrainte. C'est donc, un facteur important dans la construction de structures [17]. Il existe différentes normes, qui proposent, différents critères, pour évaluer la performance des blocs en termes de résistance. La résistance à la compression minimale requise, doit être de 2 MPa, pour que les blocs puissent être utilisés pour la construction, selon les normes IS 1725 (Inde) [18], NBR (Brésil) [19], ARS (Afrique) [20], NZS (Nouvelle-Zélande) [21], XP P13- 901 (France) [22].

1.5.2 Durabilité

L'une des caractéristiques essentielles de la construction en terre, est la durabilité. C'est probablement la qualité la plus importante pour tout matériau de construction, car le sol à l'état naturel, n'a pas la stabilité dimensionnelle nécessaire à la construction. Le manque de durabilité, est un autre problème lié à l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Par définition, la durabilité est une mesure de la capacité du bloc à soutenir ou à maintenir ses caractéristiques distinctives de résistance, de stabilité dimensionnelle et de

résistance aux intempéries dans les conditions d'utilisation, tout au long de la vie utile de la structure. La durabilité du bloc semble dépendre des propriétés d'absorption d'eau, de la perméabilité et de la porosité du bloc de terre, d'une part, et de la nature de l'action de l'humidité et de la capacité du bloc à résister aux forces perturbatrices, d'autre part. La perméabilité et la porosité semblent jouer un rôle majeur dans l'entrée et la rétention de l'eau par les pores et sa mobilité à l'intérieur du bloc de terre [16]. La nature poreuse des blocs de terre leur permet de respirer, ou d'absorber et de désorber l'humidité de façon cyclique. Si ce comportement est bénéfique pour la régulation des niveaux d'humidité intérieure, il peut entraîner des effets de dégradation sur les blocs eux-mêmes.

1.5.3 Propriétés thermiques

La conductivité thermique définit la capacité d'un matériau à transmettre ou à retenir la chaleur. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique de la terre dépend principalement de sa masse volumique et de sa porosité. En ce qui concerne les propriétés thermiques des constructions en terre, les blocs de terre sont massifs et contribuent à augmenter l'inertie thermique des bâtiments. Cette caractéristique peut avoir une influence positive sur la performance thermique des bâtiments dans certains climats. Les blocs de terre ont également une très bonne inertie thermique, comparable à celle du béton cellulaire.

Enfin, la plupart des sols à l'état naturel n'ont pas la résistance, la stabilité dimensionnelle et la durabilité requises pour la construction de bâtiments. Cependant, tout matériau utilisé pour la construction de murs doit avoir une résistance à la compression et une durabilité adéquate. Afin de remédier aux principaux problèmes rencontrés avec l'utilisation de la terre crue dans le domaine de la construction, plusieurs techniques de stabilisation sont utilisées. Les caractéristiques d'un mélange terre-eau telles que la résistance mécanique, la résistance à l'eau de pluie ou la diminution de la fissuration lors du séchage sont ainsi améliorées. Les différentes méthodes de stabilisation des sols sont résumées ci-dessous.

1.6 Stabilisation du sol comme technique d'amélioration des propriétés de la terre crue

La stabilisation du sol est une technique introduite depuis très longtemps. L'objectif ultime de la stabilisation est d'améliorer la résistance et la durabilité du sol de manière irréversible et de lui donner des propriétés mécaniques appropriées [3, 23-24] :

- en réduisant le gonflement, le retrait et l'abrasion de la surface et en augmentant l'imperméabilité à l'eau ;
- en cimentant les particules et en augmentant la résistance mécanique et la cohésion ;
- en réduisant les vides interstitiels et/ou en bloquant les pores qui ne peuvent être éliminés.

Il existe plusieurs types de stabilisation, stabilisation physique, stabilisation mécanique et stabilisation chimique.

Pour la stabilisation physique de la texture du matériau en terre, nous avons procédé deux manières. La première est la modification des propriétés du sol pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas, le processus intervient directement sur la granularité du sol et le mélange obtenu, conduit, selon le cas, à la réduction de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout de fines. La deuxième manière est l'ajout de fibres végétales aux terres argileuses. Cela, renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage.

La stabilisation mécanique, quant à elle, consiste à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure et plus particulièrement sur sa porosité, sa perméabilité et sa densité [8]. Au niveau de la porosité, la stabilisation réduit le volume des vides entre les particules ainsi que les variations de volume du matériau (gonflement-retrait à l'eau). En ce qui concerne la perméabilité, la stabilisation agit en colmatant les vides. Cela améliore la résistance à l'érosion (en raison du vent et de la pluie). La stabilisation améliore les liaisons entre les particules, ce qui augmente la résistance à la compression [5].

Enfin, La stabilisation chimique est l'altération des propriétés du sol par l'utilisation d'additifs chimiques. Lorsqu'ils sont mélangés dans un sol, ces additifs entraînent une augmentation de la résistance et des modifications de la porosité, de la perméabilité et de la densité. Les stabilisateurs agissant au niveau chimique généralement utilisés sont le ciment, la chaux, le bitume ou encore les résines. Néanmoins, on trouve également d'autres types d'additifs naturels d'origine géologique, animale ou végétale. L'ajout de ces stabilisateurs permet une amélioration à plus long terme des sols. La sélection du type et la détermination du pourcentage d'additifs qui sera utilisé dépendent de la classification du sol et du degré d'amélioration désirés dans la qualité du sol, de la résistance et de la durabilité requises du

mur en terre crue, du coût des différents stabilisateurs et des conditions environnementales (d'exposition) auxquelles la structure résultante sera soumise.

L'introduction de la technique de stabilisation, ces derniers temps, dans la construction en terre, a vu son émergence comme une bonne alternative pour améliorer les caractéristiques des matériaux des murs. La popularité de la construction en terre a vu sa cote augmentée en raison de la prise de conscience croissante de la construction durable. La stabilisation chimique par addition principalement du ciment et de la chaux sera détaillée dans ce qui suit.

1.6.1 Principaux stabilisateurs

À ce jour, les deux principaux stabilisateurs utilisés pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols sont la chaux et le ciment.

1.6.1.1. Stabilisation au ciment

Tout type de ciment peut être utilisé pour la stabilisation du sol, mais le ciment Portland ordinaire est le plus largement utilisé. Les deux principaux facteurs sont l'aptitude du sol et du ciment Portland ordinaire à être mélangés de manière satisfaisante et, qu'après mélange et compactage, le sol-ciment durcit de manière adéquate [23]. Le principal constituant du ciment Portland est le clinker (un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile), calciné à 1450°C et broyé en une fine poudre inférieure à 80 µm). Il combine quatre composés anhydres : les silicates tricalciques (C₃S), les silicates dicalciques (C₂S), les aluminates tricalciques (C₃A) et les alumino-ferrites tétra-calciques (C₄AF). Un régulateur de prise, le gypse CaSO₄.2H₂O (CSH₂), est ajouté au clinker pour modérer la réaction des C₃A au contact de l'eau [25].

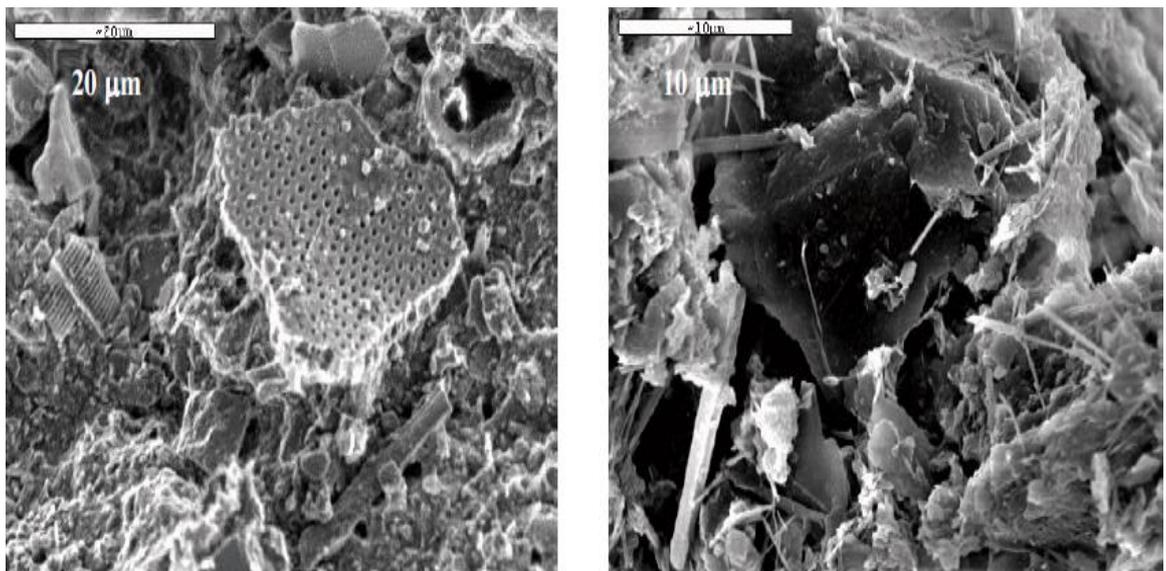
Selon les proportions de ces éléments, les ciments peuvent avoir des propriétés différentes. Par exemple, une teneur élevée en C₃S donnera une résistance élevée, tandis qu'un ciment à forte teneur en C₃A présentera une faible résistance à l'action d'une eau agressive.

- Mécanisme de stabilisation

Le mécanisme de stabilisation des sols avec du ciment diffère selon le type de sol. Les sols non cohésifs ont une taille de particules plus grande que les grains de ciment et peuvent donc être recouvert de ciment. Le ciment peut réagir avec lui-même ou avec le

squelette granulaire sableux. Le ciment hydraté lie les particules de sol aux points de contact, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du sol.

Dans les sols cohésifs, de nombreuses particules sont plus fines que les grains de ciment et ne peuvent donc pas être enrobées de ciment [26]. Lorsque le ciment Portland est mélangé à de l'eau, l'hydratation est initiée. Cette hydratation entraîne la formation de composés cimentaires [calcium silicate de calcium hydrate (C-S-H) et aluminat de calcium hydraté (C-A-H), figure 1.20 [27].



(a) (b)
Figure 1.20 : Micrographies MEB de la microstructure avant et après traitement au ciment [27]. a- avant traitement. b- après traitement.

Les hydrates aident à stabiliser les particules d'argile floculées par la cimentation. Après hydratation, ces deux phases produisent, à la fois, de l'hydroxyde de calcium, qui fournit le calcium disponible pour l'échange de cations, la floculation et l'agglomération et du silicate de calcium hydraté (C-S-H).



L'augmentation se produit principalement entre 24 heures et 28 jours, tandis que le ciment continue à s'hydrater à un rythme décroissant tant qu'il y a de l'eau libre. Des réactions pouzzolaniques se produisent également en raison de l'interaction entre l'hydroxyde de

calcium et les minéraux argileux due à l'environnement alcalin, augmentant considérablement la solubilité de la silice et de l'alumine dans les minéraux argileux [28].

- Effet du ciment sur les propriétés du matériau sol

La stabilisation au ciment connaît une popularité croissante en raison de l'augmentation plus rapide et plus importante de la résistance, de la durabilité, de la disponibilité et de la capacité à obtenir des propriétés acceptables avec un faible pourcentage de ciment, en particulier dans les sols à faible plasticité [29].

a) Effet du ciment sur la plasticité de sol

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau séparant les divers états du sol. Elles sont au nombre de trois :

- ✓ limite de liquidité W_L : séparant l'état liquide et l'état plastique,
- ✓ limite de plasticité W_P : séparant l'état plastique et l'état solide,
- ✓ limite de retrait W_S : séparant l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait,

L'indice de plasticité est la différence entre la limite liquide et la limite plastique.

Le ciment est généralement utilisé pour les sols à faible plasticité. L'ajout de ciment entraîne une augmentation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité et, par conséquent, une réduction de l'indice de plasticité, figure 1.21, [28, 30-33].

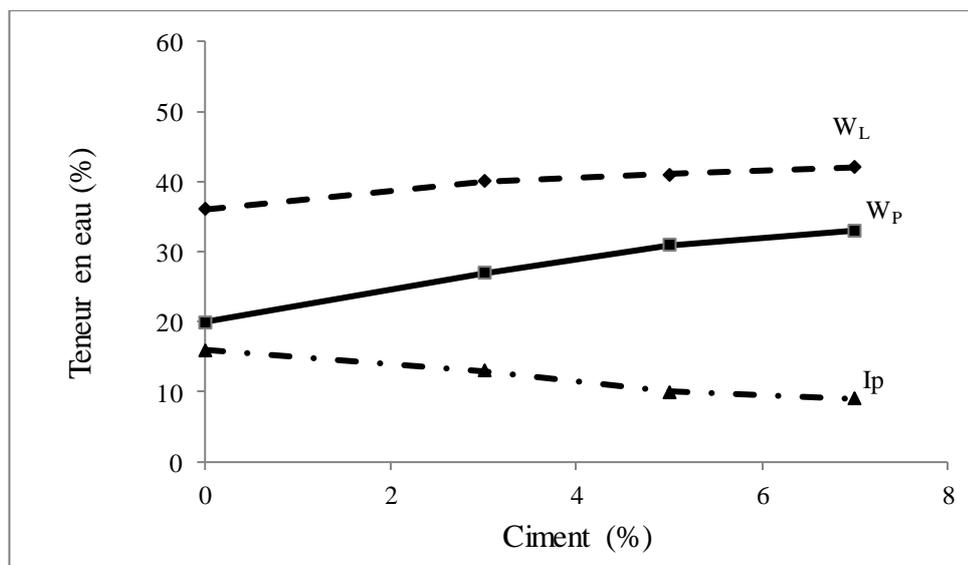


Figure 1.21 : Effet du ciment sur les limites d'Atterberg [33].

Cette modification peut s'expliquer par la dissolution des silicates et des aluminates des particules d'argile dans un environnement à pH élevé, produite par la chaux très réactive et l'hydratation du ciment. La matière dissoute se combine avec le Ca^{2+} pour produire un agent de cimentation qui lie les particules d'argile adjacentes [30, 31].

b) Effets du ciment sur les caractéristiques de compactage

L'ajout de ciment aux sols argileux entraîne une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale, figure 1.22, [34].

La réduction de la densité sèche maximale est due à la floculation et à l'agglomération des particules d'argile, tandis que l'augmentation de la teneur optimale en eau est due à l'affinité du sol pour l'eau nécessaire à l'hydratation et à la réaction pouzzolanique. La réaction pouzzolanique du mélange sol-ciment semble commencer environ une heure après le mélange, ce qui laisse penser que les produits de la réaction, au lieu d'être des unités agglomérées, sont en fait des unités décomposées qui ne semblent pas contribuer à l'agglomération des particules d'argile [35].

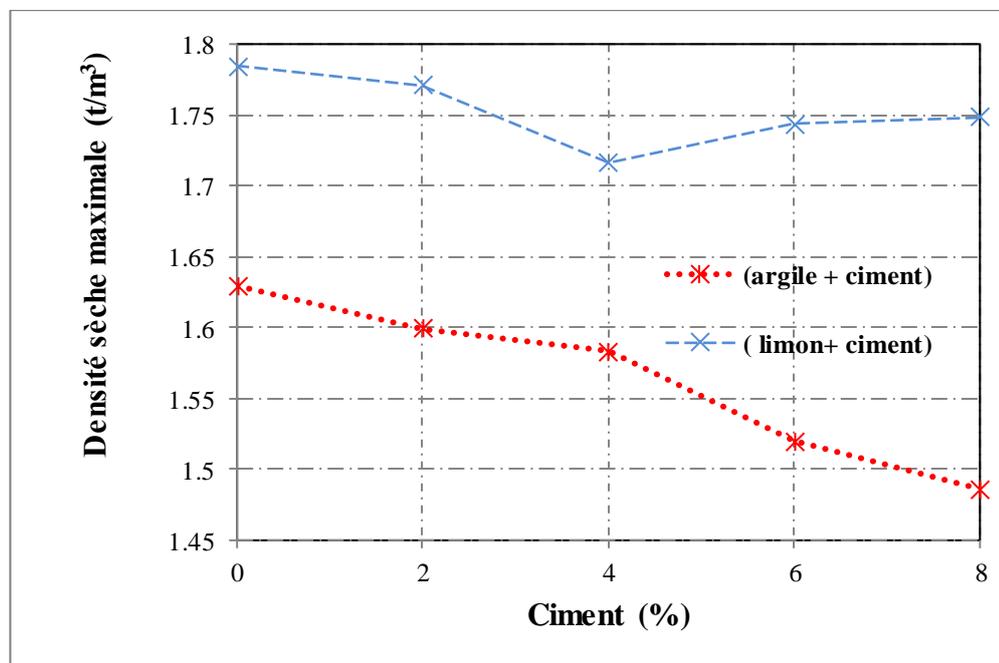


Figure 1.22 : Effet du ciment sur la densité sèche maximale des sols [34].

c) Effets du ciment sur la résistance à la compression

Dans la plupart des études, l'efficacité de la stabilisation est évaluée en mesurant la résistance à la compression [36]. Cette dernière augmente avec l'augmentation des dosages de ciment. L'augmentation de la résistance est attribuée aux composants actifs du ciment Portland. Par hydratation, ces composés actifs (silicate tricalcique, silicate dicalcique et aluminate tricalcique) cristallisent et lient ensemble les particules du sol, les transformant en une masse dure. L'efficacité du ciment à améliorer la résistance du sol peut également être attribuée à la composition du sol [30, 37-41].

Dans le but d'étudier la variation de la résistance à la compression sèche et humide en fonction de la quantité du ciment additionnée et de l'indice de plasticité, une étude antérieure a été menée par Walker (1997) [42] (figure 1.23).

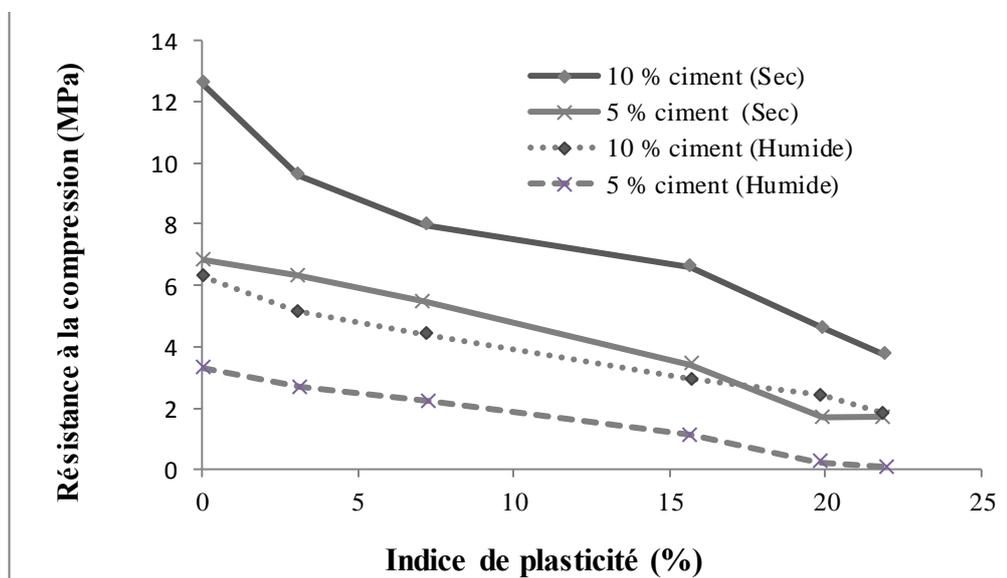


Figure 1.23 : Variation de la résistance à la compression sèche et humide en fonction de la teneur en ciment et l'indice de plasticité [42].

Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression sèche avec l'augmentation de la teneur en ciment de 5 % à 10 %. En ce qui concerne l'indice de plasticité, les résultats montrent une diminution régulière, quasi linéaire, de la résistance avec l'augmentation de l'indice de plasticité du sol.

Cette réduction peut être attribuée à l'affaiblissement de la liaison entre le ciment et la structure sable/gravier par les minéraux argileux. De plus, il en ressort que la résistance à la compression humide est améliorée par l'augmentation du ciment contenu. Des études antérieures ont confirmé l'existence d'une relation linéaire entre le ciment et la résistance à

la compression humide [39]. Pour tous les mélanges de sol, les valeurs de la résistance à la compression sèche sont supérieures aux valeurs humides. La réduction de la résistance humide est généralement comprise entre 40 et 60 %. La diminution de la résistance peut être attribuée à la pression de l'eau interstitielle et à la liquéfaction des minéraux argileux non stabilisés. Malgré la baisse de résistance en cas d'humidification, les effets du ciment et de la plasticité sur la résistance sèche sont similaires à ceux décrits pour la résistance humide.

d) Effets du ciment sur la durabilité

L'ajout du ciment permet essentiellement d'optimiser les performances mécaniques du sol. L'ampleur de ces optimisations dépend du dosage, de la nature du sol et du temps de cure. L'ajout du ciment peut affecter les autres propriétés du sol, dont la durabilité. L'approche de cette dernière est détaillée ci-dessous.

➤ Test d'humidification - séchage

Dans le but d'étudier la durabilité du matériau terre stabilisée lorsqu'il est soumis à des alternances pluviométriques (saturation en eau en hiver, séchage en été), un test type de durabilité (humidification-séchage) est effectué sur des mélanges de sol. Pour les différents dosages, la perte de poids maximale admissible est de 10 % (climat sec) ou de 5 % (autre climat) après les cycles de mouillage-séchage. L'augmentation maximale de volume à l'humidité admissible est de 0,15 % selon le test normalisé pour les parpaings de béton moulé. Ce test est utilisé pour déterminer les pertes de matériaux, les variations d'humidité et les changements de volume (contraction-expansion) qui se produisent après le mouillage et le séchage [43].

L'ajout de ciment entraîne une diminution de la perte de poids [44-48]. Dans une étude sur un sol de « sabkha » classé comme non plastique, les échantillons non traités se sont complètement effondrés, tandis que les échantillons traités à 3 % de ciment se sont divisés à partir du tiers supérieur de leur hauteur, après 2 cycles et ont, donc, échoué au test de durabilité. Au bout de 12 cycles, la perte de poids est d'environ 3,5 % pour les échantillons traités à 5 % de ciment. Toutefois, les données de la figure 1.24 indiquent qu'il n'y a pas de différence fondamentale dans la perte de poids pour les échantillons stabilisés avec 7 % et 10 % de ciment [46].

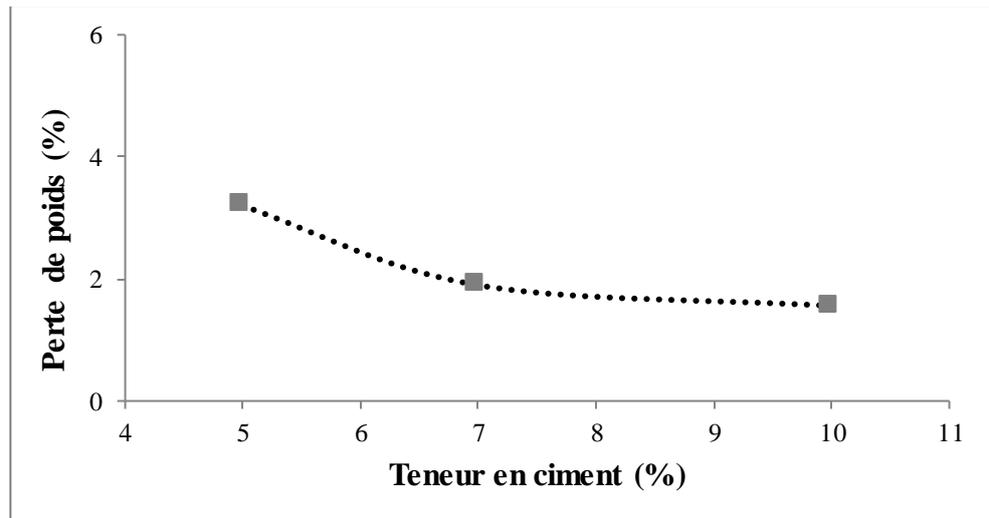


Figure 1.24 : Variation de la perte de poids en fonction de ciment [46].

Alors que dans une autre étude réalisée sur un sol argileux limoneux stabilisé à 6, 8, 10, 12 % de ciment, le pourcentage maximal de perte de poids est inférieur à 5 % pour les quatre mélanges. La valeur la plus faible a été obtenue avec la teneur en ciment la plus élevée de 12 %, soit seulement 1,5 %. Les teneurs en ciment de 8 et 10 % ont montré une tendance presque similaire. L'augmentation de la quantité de ciment a permis d'obtenir une plus grande capacité de liaison et donc une meilleure durabilité [45].

➤ Test d'absorption capillaire

Plus l'absorption d'eau capillaire est faible, plus le matériau est résistant à l'eau. En fait, lorsque le bloc de sol est partiellement immergé dans l'eau, l'eau pénètre par les pores au cœur du bloc de sol, ce qui entraîne la détérioration des blocs de terre. Les pores sont formés lors des réactions d'hydratation avec l'eau. Les pores capillaires sont causés par l'eau excédentaire. Leur volume correspond à l'eau qui n'a pas été utilisée par les réactions d'hydratation. Ces pores forment un réseau à mailles fines. Selon le degré de séchage, les pores sont remplis en partie d'eau et en partie d'air. La capillarité est un réseau de pores ouverts à la surface qui est en contact avec un liquide (dans notre cas, le liquide est l'eau).

Afin d'améliorer un sol argileux par des tests mécaniques, pour la production des blocs de terre comprimée ayant une grande résistance à l'eau et capables de résister dans les zones humides, un travail de recherche sur l'effet de l'ajout de ciment sur l'absorption capillaire des blocs de terre comprimée, a été effectué. Les résultats de l'étude montrent

qu'avec l'ajout de 3, 5, 8 et 11% de ciment, l'absorption capillaire varie entre 5.99 % et 5,34%, figure 1.25 [49].

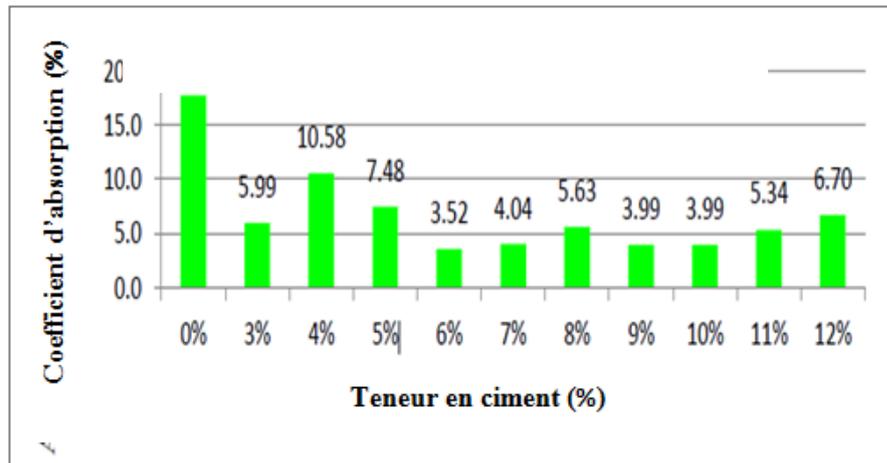


Figure 1.25 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de ciment [49].

Ces changements sont causés par l'effet de la réaction entre les sols argileux et le ciment. Ces valeurs sont acceptables dans un environnement capillaire pour des éléments structurels, capables de résister à des charges élevées [49].

➤ Test d'érosion

Dans les climats secs, la terre crue est très durable, comme en témoignent les structures datant de centaines, voire de milliers d'années. Cependant, dans les climats humides, les précipitations provoquent une érosion de surface, en particulier dans les structures terrestres non stabilisées [50]. Le test d'érosion sous pression (test d'érosion accélérée) a été effectué pour simuler les conditions de fortes précipitations attendues dans les conditions climatiques tropicales. Le test d'érosion consiste à placer un bloc de terre sur une grille en face d'un jet de pulvérisation, pendant une période de temps (t). La résistance à l'érosion est évaluée en mesurant la profondeur des trous ou la perte de poids des briques. La plupart du temps, les résultats de ce test ne sont donnés qu'à titre indicatif. Le taux maximal d'érosion (mm/h) est donné simplement par la profondeur maximale d'érosion.

L'ajout de ciment réduit le taux d'érosion obtenu sur un mur en pisé fait de terre de sable latéritique, avec des teneurs en ciment allant de 2 à 10 %. Les taux d'érosion des spécimens, sont compris entre 3,25 et 1,25 mm/min, ce qui correspond respectivement à des teneurs en ciment de 2 et 10%, figure 1.26. Ces valeurs sont inférieures à la valeur maximale de 10 mm par heure, recommandée dans les normes australiennes [29].

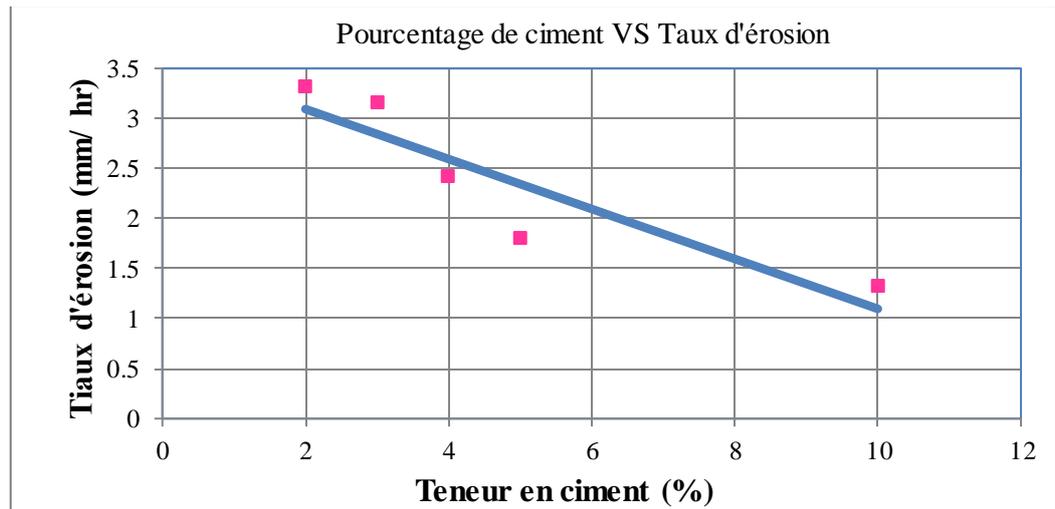


Figure 1.26 : Variation du taux d'érosion avec la teneur en ciment [29].

Les blocs de terre stabilisés au ciment montrent généralement une bonne résistance à l'érosion. Les murs de ces blocs ne nécessitent, normalement pas de protection supplémentaire. Le test d'érosion par pulvérisation, basé sur un jet d'eau provenant d'une pomme de douche de 0,07 MPa, peut être utilisé comme indicateur de la résistance des blocs de terre pressés à l'érosion par la pluie. Dans une autre étude réalisée sur un sol sablo-argileux, les résultats du test d'érosion accélérée montrent une désintégration complète des échantillons non stabilisés. L'effet sur les échantillons stabilisés compactés ne montre aucun signe visible de détresse en surface [51]. Cette diminution est principalement due à la formation de silicate de calcium hydraté qui a lié les particules isolées et a contribué à une réduction de la porosité totale [52].

e) Effet du ciment sur le retrait

Deux mécanismes différents de retrait sont censés se produire dans un bloc. Il s'agit du retrait dû, à l'expulsion de l'eau de ses pores capillaires et du retrait dû à la déshydratation de la fraction argileuse et de la pâte de ciment. Alors que le premier est considéré comme un processus réversible le second est irréversible [16].

Des études antérieures montrent que l'ajout de ciment réduit le retrait linéaire pour différents types de sols [40, 53]. Le retrait du sol (argilo-sableux) à 25 jours a été réduit d'environ 20 % et 44 % pour 6 % et 10 % de ciment respectivement. De plus, la combinaison de ciment et de sable réduit le retrait du ciment et semble donner le retrait le plus faible lorsqu'une combinaison de ciment et de sable est ajoutée, figure 1.27, [51].

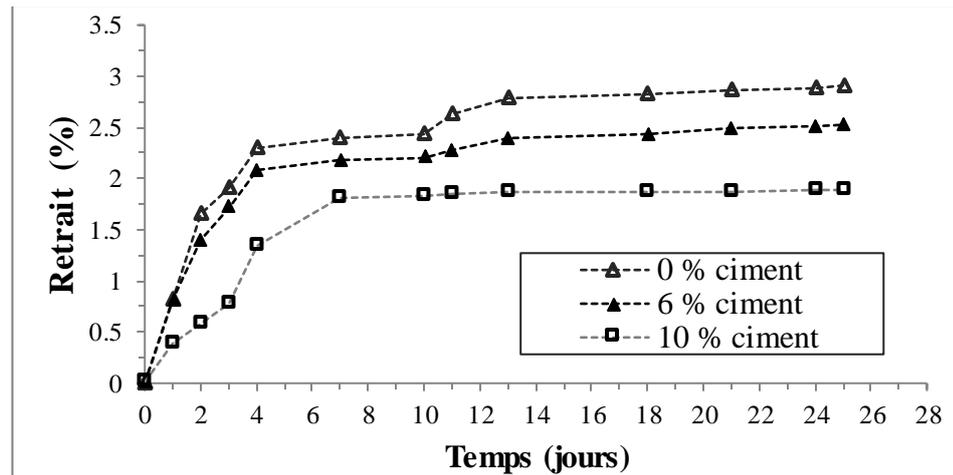


Figure 1.27 : Effet de la teneur en ciment sur le développement du retrait [51].

L'ajout de 50 % de sable, plus 14 % de ciment à un sol argileux réduit le retrait linéaire à zéro [54]. Le retrait du sol augmente avec l'augmentation des minéraux argileux. À faible teneur en minéraux argileux, le retrait est plus important pour les blocs ayant la plus forte teneur en ciment [53].

f) Effet du ciment sur la conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps, à travers un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, lorsque les deux côtés opposés diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant. Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur, plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique augmente avec la teneur en ciment dans toutes les zones de variation de la teneur en eau des échantillons. Cette variation s'explique par le fait que l'ajout de ciment apporte au matériau initial de nombreux éléments fins qui bloquent les pores créés par la proximité de grosses particules. Le matériau obtenu après le mélange est moins poreux que le matériau initial. Le ciment sert, donc, non seulement à stabiliser le matériau mais aussi, à réduire ses pores. Une augmentation de la teneur en ciment de 5 à 16 % entraîne une augmentation de 30,03 % de la conductivité thermique des blocs de sol stabilisés au ciment, figure 1.28, [55-57].

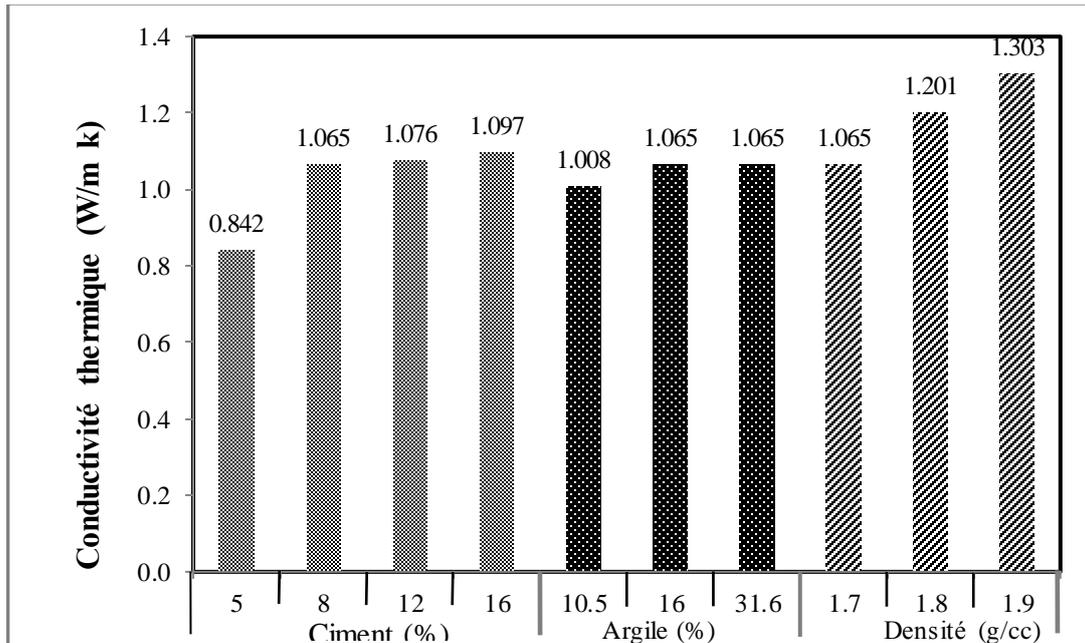


Figure 1.28 : Variation de conductivité thermique en fonction du ciment, teneur en argile et la densité sèche [57].

L'augmentation de la conductivité par l'ajout de ciment peut également être expliquée par la réaction d'hydratation du ciment qui consiste en une polymérisation des particules et en un remplissage de la microstructure obtenu à partir des produits d'hydratation du ciment [58]. La conductivité thermique dépend de la quantité d'argile présente dans le sol. L'augmentation de la teneur en argile réduit la porosité, ce qui rend le bloc plus solide et plus dense. En outre, plus la densité est élevée, plus la porosité du bloc est faible et, par conséquent, plus la conductivité thermique est élevée [57 - 59].

1.6.1.2. Stabilisation à la chaux

La chaux est le plus ancien agent connu de stabilisation des sols. Elle a été utilisée comme stabilisateur de chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes. La stabilisation à la chaux a été utilisée dans le monde entier pendant de nombreuses années pour la construction des pistes d'aéroport, des routes et des parkings. Les sols argileux, en particulier, peuvent être stabilisés par l'ajout de chaux pour améliorer leurs propriétés mécaniques, produisant ainsi un matériau de construction amélioré [60]. Tous les types de chaux peuvent être utilisés, mais la préférence est donnée à la chaux aérienne plutôt qu'à la chaux hydraulique [7]. La chaux est particulièrement recommandée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant un indice de plasticité > 17 et une limite de liquidité > 40 . La chaux est obtenue par la calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20

% de la couche terrestre). Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux.

- Chaux aérienne

Elle se combine et durcit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air. La chaux aérienne n'a pas de propriétés hydrauliques. Elle est divisée en deux sous-familles, la chaux calcique (CL) et la chaux dolomitique (DL). La chaux aérienne peut être trouvée dans deux états :

- soit de la chaux vive CaO,
- soit de la chaux hydratée.

- Chaux hydraulique

Les chaux hydrauliques sont produites :

1. soit à partir d'un calcaire contenant entre 12 et 20 % d'argile donnant une chaux hydraulique naturelle NHL ;
2. soit par ajout de silice et d'alumine au calcaire lors de la fabrication ainsi, pouvons – nous avoir une chaux hydraulique HL (d'une manière artificielle) [61] ;
3. soit en ajoutant à la chaux hydraulique naturelle des matériaux pouzzolaniques tel que le laitier et le clinker (maximum 20 %), pour obtenir la chaux NHL-Z [61, 62].

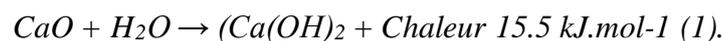
Les chaux hydrauliques sont constituées de silicate de calcium, d'aluminate de calcium et d'hydroxyde de calcium [61]. Elles ont deux phases :

- Une prise hydraulique : 70 % à 80 % en fonction du taux d'argile,
- Une prise aérienne par carbonatation : 820 % à 30 %.

- Mécanismes de stabilisation

- ✚ Dessiccation

Lorsque de la chaux vive (CaO) est ajoutée à un sol humide, une réaction exothermique se produit. Il s'agit de l'hydratation de la chaux vive qui conduit à la formation d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ [1].



Le caractère exothermique et la consommation d'eau nécessaire à la réaction d'hydratation entraînent une diminution de la teneur en eau du sol. Dans la pratique, selon plusieurs travaux, l'incorporation de 1 % de chaux vive dans un sol entraîne une diminution d'environ 1 % de sa teneur en eau [1].

- ✚ Échange cationique

L'ajout de chaux au sol argileux provoque un excès d'ions calcium (Ca^{++}), qui ont remplacé les cations métalliques associés à la surface des particules argileuses. D'une manière générale, les cations à haute valence remplacent ceux à faible valence. Lorsque deux cations de même valence sont en compétition, le cation ayant le rayon ionique hydraté le plus élevé remplace le cation ayant la valence la plus faible. Ceci est généralisé par la série suivante, où les cations de droite remplacent ceux de gauche [28, 63, 64].



Cette série est valable pour des concentrations identiques et selon la concentration des cations en solution ; cet ordre peut être différent. En effet, les ions en forte concentration auront tendance à remplacer ceux en faible concentration. Par exemple, les ions sodium Na^+ peuvent remplacer les ions calcium Ca^{2+} , si leur concentration est plus élevée [1].

Floculation et agglomération

Les charges négatives portées à la surface des particules d'argile sont responsables de l'établissement d'un champ électrostatique autour d'elles. Ce champ permet le développement de la double couche d'eau qui entoure les argiles (eau libre et eau liée). L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont l'extension diminue, induisant une diminution du volume apparent des particules et une contraction du sol. De plus, des ponts de calcium se forment entre les particules d'argile. Les floccs ainsi formés sont insensibles au lavage. La floculation améliore la consistance des argiles (limite de plasticité) [3].

Réaction pouzzolanique

La réalisation de cette réaction est conditionnée par la saturation initiale du sol à la chaux. Lorsqu'une quantité importante de chaux est ajoutée à un sol, le pH du mélange sol-chaux augmente progressivement jusqu'à 12,4 (pH de la chaux saturée); cette limite est connue sous le nom de « point de fixation de la chaux » [63]. Les silicates et les aluminates des argiles deviennent potentiellement solubles. Ils réagissent ensuite avec le calcium de la chaux pour former divers composés à base de ciment tels que le silicate de calcium hydraté CSH et l'aluminate de calcium hydraté CAH. La nature des hydrates formés, lors des réactions pouzzolaniques, dépend de la nature des argiles présentes dans le sol [3, 25, 65].





Les réactions pouzzolaniques peuvent se produire lentement, sur des mois ou même des années. Pendant cette période, le sol gagnera en résistance au cisaillement et sa plasticité sera réduite [66]. La réaction pouzzolanique est responsable du développement d'une résistance à long terme du sol traité.

✚ Carbonatation

La carbonatation de la chaux est une réaction indésirable qui peut également se produire dans les mélanges sol-chaux. Lorsqu'il est dissous dans l'eau de porosité, le dioxyde de carbone réagit avec les ions hydroxyle pour former des ions carbonates. Les ions carbonate peuvent alors réagir avec les ions calcium fournis par la chaux pour former du carbonate de calcium. Les cristaux de carbonate ont une très faible propriété de liaison [67]. Les performances mécaniques ne sont pas ou peu améliorées par la présence de carbonates. Par conséquent, la carbonatation est considérée comme une réaction perturbatrice du traitement, car elle consomme une partie de la chaux destinée aux réactions pouzzolaniques, sans améliorer les performances mécaniques des matériaux traités.

- Effet de la chaux sur les propriétés du matériau sol

- a) Effet sur la plasticité

L'addition de la chaux provoque une amélioration de la plasticité du sol qui se traduit par une réduction de l'indice de plasticité comme le montre la figure 1.29, [33, 68-74].

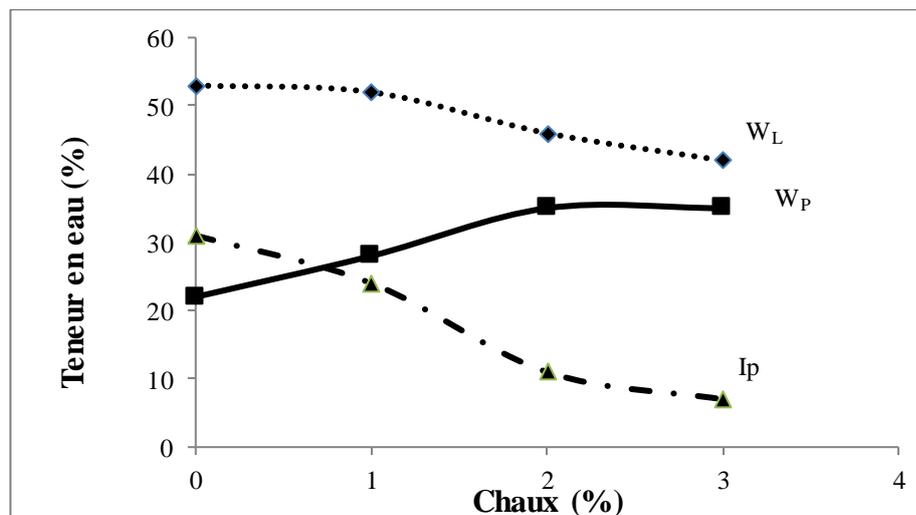


Figure 1.29 : Limites d'Atterberg pour les mélanges (sol-chaux) [33].

L'augmentation et la diminution des limites d'Atterberg dépendent du type de sol et le minéral argileux. En effet, dans l'argile montmorillonitique, l'ajout de la chaux provoque une augmentation de la limite plasticité une diminution de la limite de liquidité [63, 75]. Pour le cas du quartz et du l'argile kaolinitique, l'addition de chaux entraîne une faible variation de la limite de plasticité et une forte augmentation de la limite de liquidité [76]. La diminution de la limite de liquidité avec l'augmentation de la chaux peut être le résultat de l'échange cationique qui provoque la floculation des particules du sol et la diminution de la taille de fraction de l'argile, tandis que l'augmentation de la limite de plasticité, généralement entraîne une réduction de propriété plastique du sol, qui est due à l'altération de la pellicule d'eau qui entoure les minéraux d'argile dans le sol [35, 77]. La présence d'une quantité importante de matière organique diminue l'action de la chaux sur la limite de liquidité et la limite de plasticité et, par conséquent, sur l'indice de plasticité. Plus la teneur en matière organique est importante dans le sol, plus l'effet de la chaux est diminué.

b) Effets de la chaux sur les caractéristiques de compactage

Les caractéristiques de compactage des sols stabilisés à la chaux (c'est-à-dire la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale) ont fait l'objet d'études approfondies. L'ajout de chaux aux matériaux argileux augmente leur teneur en eau optimale et réduit leur densité sèche maximale pour la même énergie de compactage, figure 1.30, [63, 72, 74].

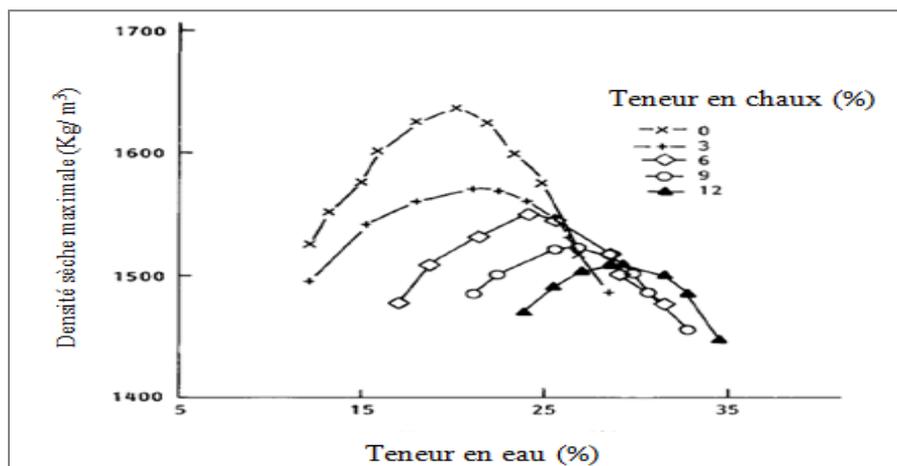


Figure 1.30 : Variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale [74].

La diminution de la densité sèche maximale est due à la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. L'ampleur de ces modifications dépend de la quantité de chaux ajoutée. Plus la quantité de chaux ajoutée est importante, plus la teneur en eau optimale est déplacée vers les teneurs en eau plus élevées et plus la densité sèche maximale est diminuée. L'augmentation de la teneur en eau optimale est attribuée à l'ajout de chaux au sol qui nécessite plus d'eau pour les réactions (hydratation, pouzzolanique) avec la chaux, ce qui augmente la teneur en eau optimale [63, 76, 77].

c) Effets de la chaux sur la résistance à la compression

La résistance mécanique des sols argileux augmente avec l'ajout de chaux [41, 74, 76, 78-80]. Cependant, au-delà d'une certaine quantité optimale de chaux, la résistance diminue, figure 1.31, [41].

Cette diminution est causée par la chaux elle-même, car elle n'a ni cohésion ni frottement appréciable. L'ampleur de l'augmentation dépend de divers facteurs (minéraux argileux, dosage de la chaux, temps de cure, température, caractéristiques de compactage). La cinétique de l'augmentation des performances mécaniques est meilleure pour les montmorillonites en raison de leur forte activité liée à leur grande surface spécifique, ce qui faciliterait l'attaque des minéraux par la chaux. Ainsi, une cinétique élevée correspond à une dissolution plus rapide des minéraux [63-65]. De plus, l'augmentation de la résistance dépend de la présence de pouzzolane dans le sol, lorsque la pouzzolane est disponible, elle réagit avec la chaux et améliore la résistance [63].

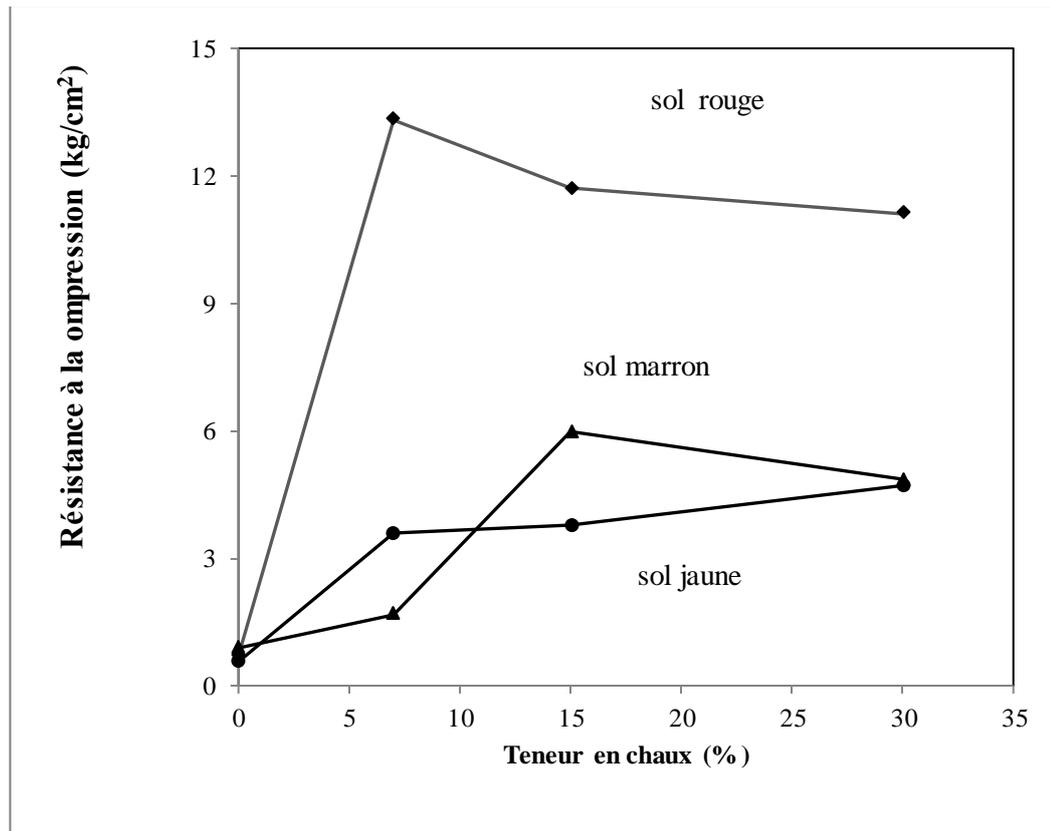


Figure 1.31 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux [41].

Dans une étude réalisée sur l'effet de la chaux sur la résistance à la compression humide pour 4 types de sols argileux, les résultats montrent qu'il existe une teneur en chaux optimale (olc), qui donne une résistance maximale. En d'autres termes, la résistance à la compression d'un sol traité à la chaux se développe rapidement avec l'augmentation de la teneur en chaux jusqu'à ce qu'une teneur en chaux optimale soit atteinte. Au-delà, la résistance continue à augmenter mais à un rythme réduit ou commence à diminuer, figure 1.32, [80].

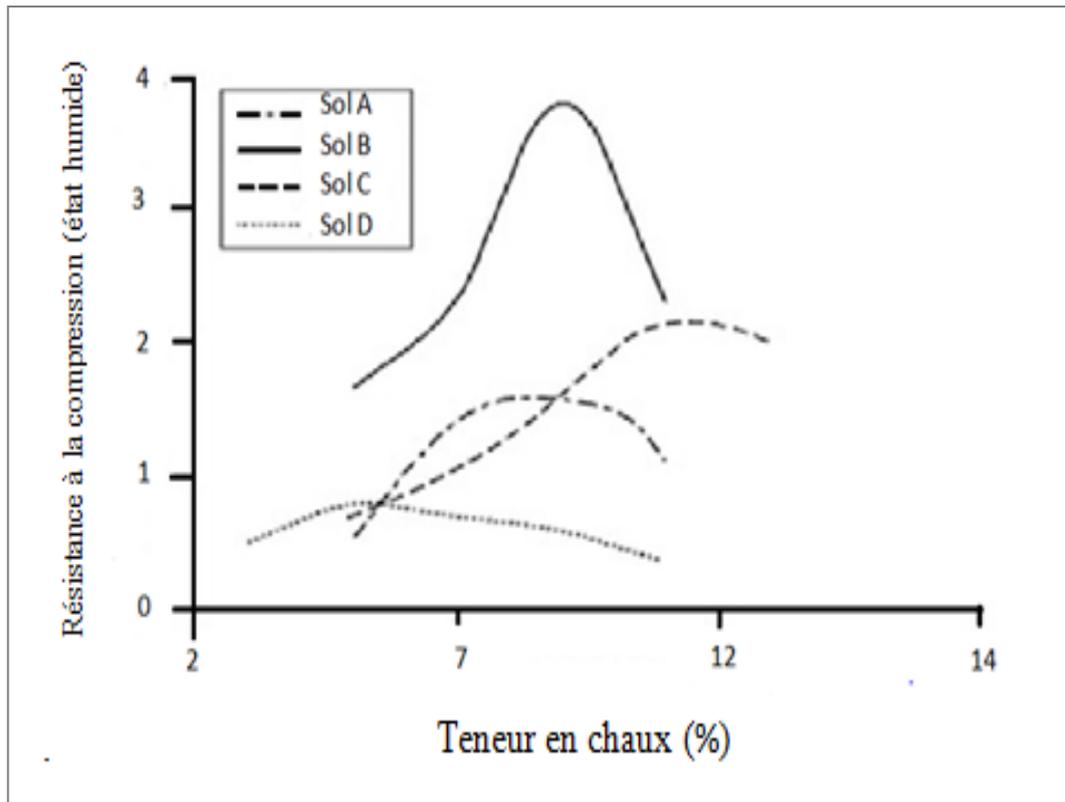


Figure 1.32 : Relation entre la résistance et la teneur en chaux pour différents types de sols [80].

Une autre étude menée sur le traitement à la chaux d'un matériau argileux riche en quartz pour la fabrication de briques d'adobe montre que l'augmentation de la résistance à une teneur en chaux $< 10\%$ est due à la formation d'une grande quantité de CSH devant une petite quantité de calcite et de portlandite. La formation quantitative de ces derniers composés (calcite et portlandite) a entraîné une réduction de la résistance à une teneur en chaux supérieure à 10% [81]. Le processus de cure a une grande influence sur la résistance des sols traités. Ces effets dépendent de plusieurs facteurs tels que le temps et la température. La résistance du sol traité augmente avec le temps de cure [40, 63, 75, 81]. Cependant, l'ampleur de cette augmentation varie en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

d) Effets de la chaux sur la durabilité

La durabilité peut être mesurée par divers tests impliquant la pulvérisation d'échantillons avec de l'eau, l'immersion des échantillons dans l'eau pendant des périodes de temps déterminées pour mesurer l'absorption, la résistance aux cycles humidification-séchage et la résistance aux intempéries [17, 60].

➤ Test d'humidification - séchage

Afin d'évaluer la durabilité et les performances des blocs de terre, un test d'humidification -séchage a été effectué sur des blocs de terre traitée à la chaux. Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation de la teneur en chaux entraîne une diminution de la perte de poids, cependant, cette diminution n'est pas régulière. Par exemple, dans le cas de 5 % de chaux, la perte de poids est très importante pour une énergie de compactage jusqu'à 15 MPa. Dans le cas de 8 à 12 % de chaux, l'effet de la chaux sur la perte de poids est important. Au-delà de cette valeur, l'ajout de chaux est moins important [82].

Suite à l'application de cycles d'humidification-séchage sur des sols argileux stabilisés à la chaux, le potentiel de gonflement a été réduit. Bien que la réduction maximale du potentiel de gonflement ait été observée au niveau du premier cycle, le potentiel de gonflement diminue progressivement dans les cycles suivants et atteint l'équilibre après 4 à 6 cycles. Les sols argileux stabilisés sont affectés négativement par les cycles d'humidification et de séchage. En d'autres termes, l'effet bénéfique de la stabilisation à la chaux dans le contrôle du potentiel de gonflement des échantillons de sols argileux traités est partiellement perdu, car ils sont soumis à des cycles d'humidification et de séchage [83].

La durabilité du sol après le test d'humidification-séchage dépend principalement de la structure des pores et de la résistance à la traction du matériau. Après chaque cycle, des fissures se produisent, entraînant une perte de résistance puis une accélération de la dégradation du sol. D'autres paramètres, tels que la friction et la cohésion interparticulaire, peuvent également influencer la perte de matériau dans ce test. Lorsque l'eau entre et sort du réseau de pores de l'échantillon pendant l'humidification et le séchage, les parois des pores sont soumises à une pression capillaire et peuvent s'effondrer. L'utilisation de la chaux dans le sol réduit et diminue la propagation des fissures en formant de nouveaux hydrates par réaction pouzzolanique. Cette réduction devient plus importante avec l'augmentation du temps de cure, figure 1.33, [79, 84, 85].

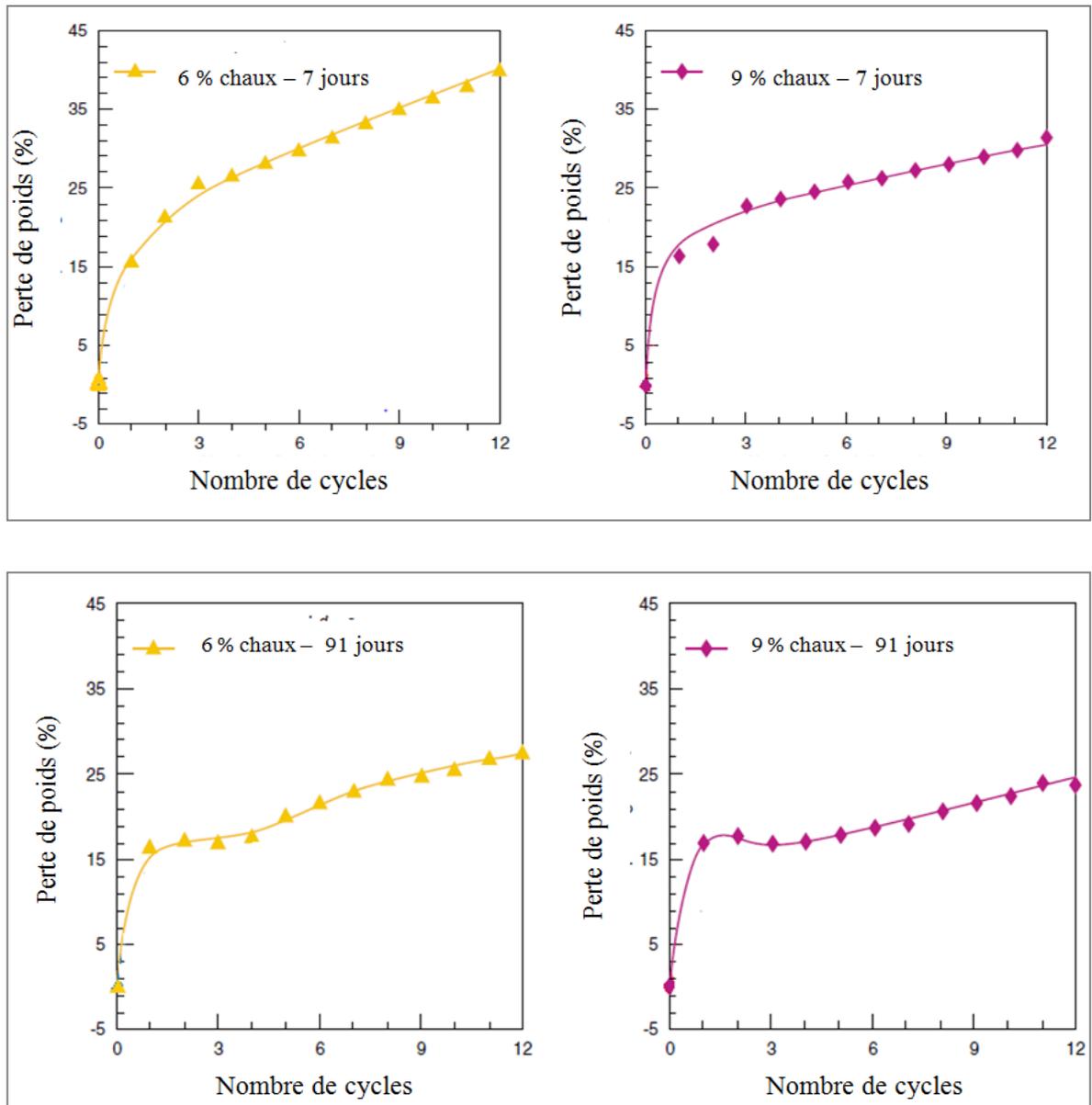


Figure 1.33 : Perte de poids lors des tests humidification-séchage du sol stabilisé avec 6 % et 9% de chaux [84].

➤ Test d'absorption capillaire

L'absorption capillaire pour les blocs de terre diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux et de l'énergie de compactage. Par exemple, elle varie de 3,8 à 2,7 % lorsque la teneur en chaux varie de 5 à 12 % avec une énergie de compactage de 17,5 MPa. Dans le cas de la chaux à 8 %, le pourcentage d'absorption capillaire varie de 4,9 à 2,9 % lorsque l'énergie de compactage varie de 5 à 20 MPa. Ainsi, un matériau durable peut être obtenu contre l'action principale de la détérioration des constructions en terre par le processus de stabilisation à la chaux (figure 1.34) [82].

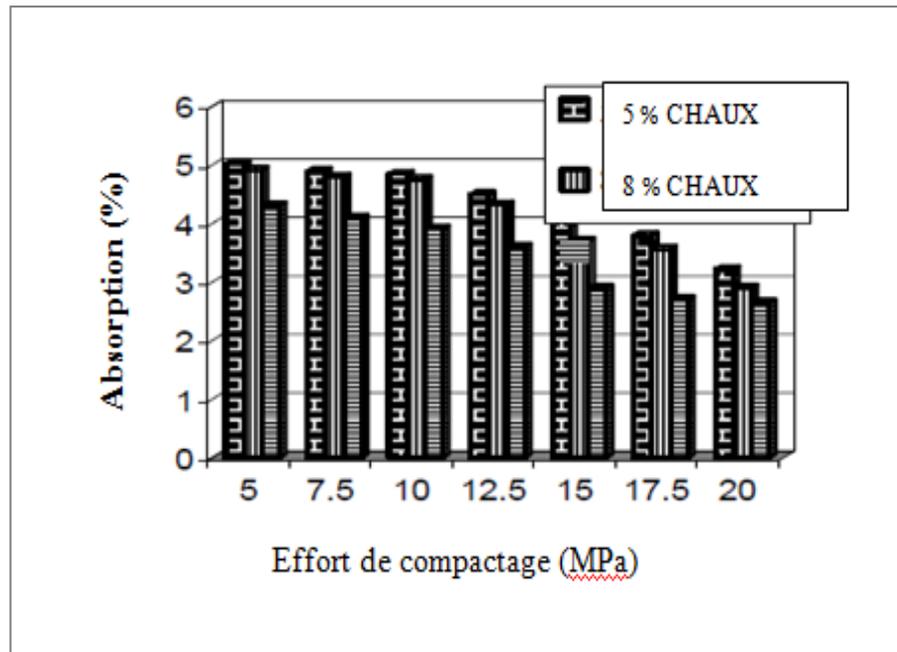


Figure 1.34 : Variation d'absorption capillaire en fonction de la chaux additionnée [82].

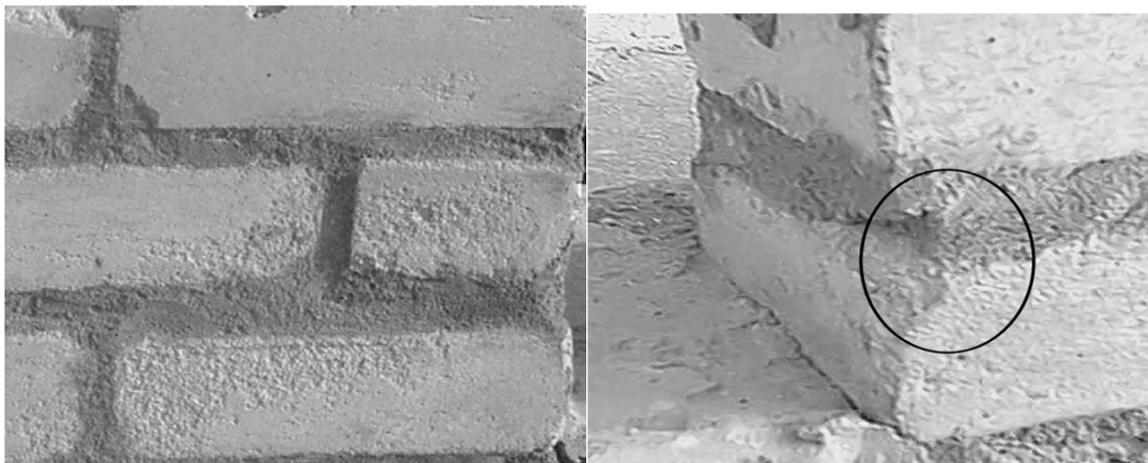
Le test de temps capillaire fournit des informations importantes sur la performance des blocs en cas d'exposition excessive à l'eau et permet une évaluation plus détaillée de sa relation avec la structure des pores. L'étude de l'absorption capillaire d'un bloc de sol argileux en fonction du temps révèle deux phases différentes : une phase de taux d'absorption élevé est observée pendant les 15 premières minutes et, une fois les taux d'absorption et d'évaporation se sont stabilisés, une réduction progressive de l'absorption d'eau s'ensuit. C'est un comportement typique des matériaux poreux puisque l'absorption d'eau est progressivement réduite jusqu'à ce que l'équilibre avec les conditions de laboratoire soit atteint. Les échantillons sans chaux ajoutée n'ont pas pu être testés en raison de la perte de matériau. En conclusion, cette analyse montre que la chaux hydraulique naturelle réduit l'absorption capillaire par rapport aux échantillons de contrôle [86]. En fait, la stabilisation à la chaux a permis d'obtenir un mélange plus compact et moins poreux [87].

➤ Test d'érosion

Les principaux facteurs qui provoquent l'érosion de la construction en terre sont la pluie et le gel. L'ajout de chaux réduit l'érosion des blocs de terre. Dans une étude réalisée sur l'effet de la chaux sur l'érosion d'un bloc, l'auteur a observé que de petits trous de moins de 1 mm de profondeur sont visibles sur les faces des blocs sol-chaux, en utilisant de la terre rouge, contenant 2 % de fraction argileuse. Il y a également de petites taches d'environ 1 mm

de profondeur sur la surface du bloc sol-chaux. Ce test indique que le sol-chaux pressé a une résistance adéquate à l'érosion par la pluie [88].

Dans une étude menée sur l'influence de la chaux sur un mur de terre, qui a été exposé pendant 48 mois à des conditions climatiques réelles, les murs traités avec 8 % de chaux se sont effondrés sur la face nord de la première et de la deuxième rangée. Cette détérioration provoque une érosion jusqu'à une profondeur maximale de 1 mm et sur une surface d'environ 40 % de la surface du bloc exposé. Sur la face sud, aucune détérioration n'a été observée. Apparemment, cela est dû à l'effet de la direction du vent dominant. Pour les murs traités avec 12 % de chaux, aucune érosion n'a été enregistrée, mais une disparition de petits morceaux de la brique du premier rang a été observée aux niveaux des coins gauche et droit de la face nord. Il faut également noter que, pendant la période hivernale, tous les murs présentent des efflorescences à la base, mais beaucoup plus pour les murs traités à la chaux, figure 1.35 [89].



8 % chaux

12 % chaux

Figure 1.35 : Détérioration par érosion après 48 mois d'exposition des murs en terre stabilisé à la chaux [89].

e) Effet de la chaux sur le retrait

Le retrait au séchage dépend principalement de la composition minéralogique et de la texture de l'argile [90]. L'ajout de chaux aux sols argileux réduit le retrait linéaire [63, 90-93]. Cette réduction varie avec le temps, le type de minéral argileux et la quantité de chaux ajoutée [63, 92], figure 1.36 [93].

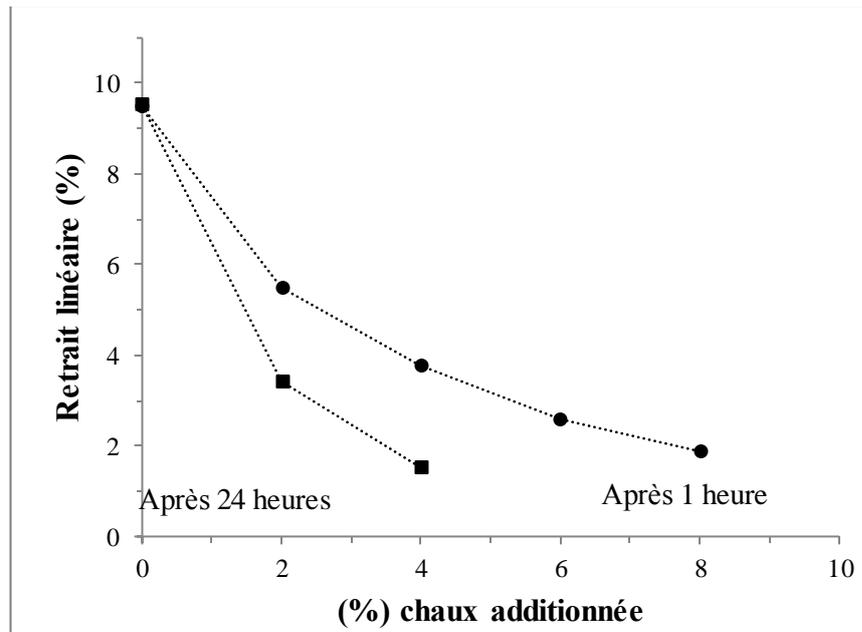


Figure 1.36 : Variation du retrait linéaire en fonction du temps de cure et de la quantité de chaux additionné [93].

Dans le cas d'une argile montmorillonitique, 4 % de chaux réduit son retrait linéaire de 25 % à 4 % [63]. Pour les sols contenant principalement de l'illite et de la kaolinite, la valeur de retrait diminue de 6 % à 1 % (soit une réduction de 83 %) [63]. Cette réduction est due à des réactions chimiques entre la chaux et l'argile qui entraînent une réduction de la plasticité et des contraintes de retrait associées [91]. En outre, les cristaux de calcite et les gels de liaison, formés à la suite de la réaction pouzzolanique, provoquent également un retrait moindre dans les échantillons stabilisés à la chaux [94].

f) Effet de la chaux sur la conductivité thermique

L'ajout de chaux au bloc de sol entraîne une augmentation de la conductivité thermique [95- 96], figure 1.37. Les résultats d'une étude sur l'influence de différentes teneurs en chaux, sur la conductivité thermique des blocs de sol montrent que l'augmentation du pourcentage de chaux de 0 à 12 % entraîne une augmentation de la conductivité thermique des blocs de sol-chaux. La conductivité thermique du sol stabilisé est comprise entre 0,7902 et 0,9785 (W / (m.K)), pour une variation de la teneur en chaux de 5 % à 12 %. Sur la base de ces résultats, les auteurs ont suggéré que le bloc de terre comprimée non stabilisée est considéré comme une meilleure solution d'isolation thermique car il a la plus faible conductivité thermique par rapport aux briques de terre comprimée stabilisée [95].

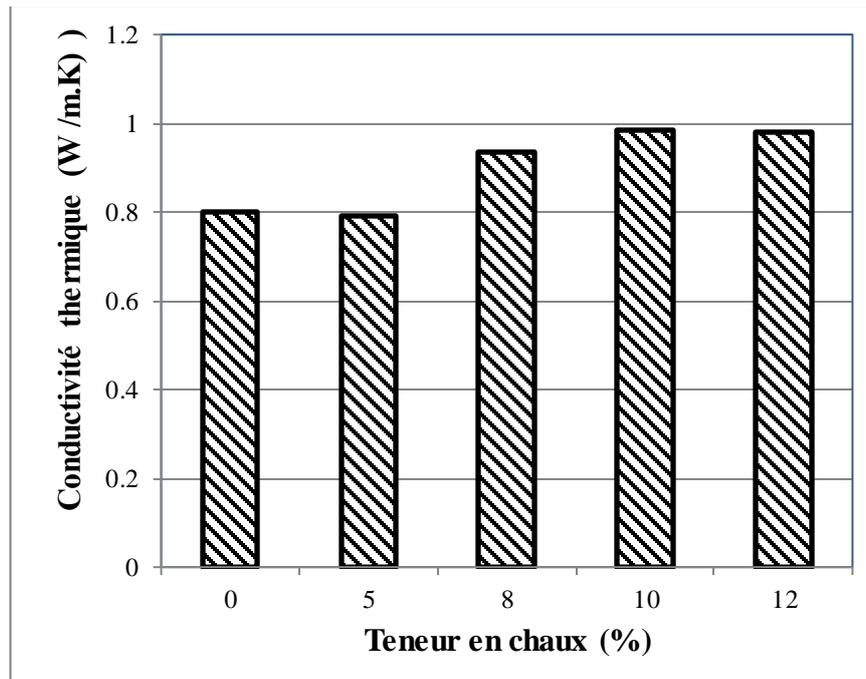


Figure 1.37 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la quantité de la chaux additionnée [95].

1.6.1.3. Stabilisation mixte chaux-ciment

Ce type de traitement est effectué sur des sols trop humides et plastiques. La chaux seule est utilisée dans un premier temps à faible teneur, puis le ciment. Les deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires. Un traitement préalable à la chaux permet de sécher le sol trop humide. Sa floculation en présence de chaux le rend pulvérulent et friable et donc plus adapté à un mélange ultérieur avec du ciment. Le ciment, dont la cinétique d'hydratation est supérieure à celle de la chaux, permet d'obtenir une résistance mécanique dès les premiers jours du traitement. Il n'existe aucune étude sur les mécanismes régissant ce traitement. Apparemment, la portlandite Ca(OH)_2 , libérée par le ciment en solution, joue le même rôle stabilisateur que celui de la chaux. Les hydrates formés par la chaux libre et la portlandite dans le ciment s'accumulent avec ceux du ciment dissous [97, cité dans 98].

a) Effets de la chaux + ciment sur la plasticité

Les résultats de l'étude réalisée sur le traitement d'un sol limoneux par mélange (ciment - chaux) montrent que le traitement mixte réduit considérablement l'indice de plasticité par rapport au traitement unique (avec du ciment ou de la chaux) [99, 100], figure 1.38.

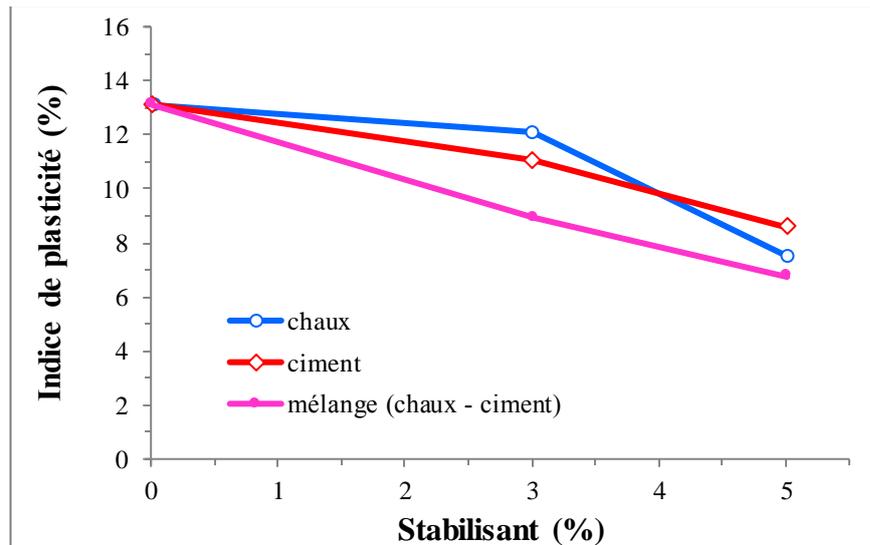


Figure 1.38 : Effet du mélange (ciment + chaux) sur les limites d'atterberg [99].

Les sols traités deviennent plus friables en raison de la réaction de floculation et d'agglomération qui donne aux particules d'argile une qualité similaire à celle du limon [100]. Le même résultat est obtenu par Khemissa et al (2014) [101], pour une argile expansive traitée avec différents mélanges (ciment-chaux). L'argile après traitement devient moins sensible à l'eau, donc peu expansive et mieux compactable.

b) Effets de la chaux + ciment sur le compactage

Dans une étude sur l'effet de la chaux et du ciment sur les caractéristiques de compactage, les résultats de la variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale, pour diverses teneurs en ciment et en mélange chaux-ciment, montrent une diminution de la densité sèche maximale du ciment de $1,886 \text{ g/cm}^3$ à $1,839 \text{ g/cm}^3$, lorsque la teneur en ciment varie de 8 à 12 %, alors que pour les sols stabilisés dans le mélange (chaux-ciment), la densité varie de $1,869 \text{ g/cm}^3$ à $1,861 \text{ g/cm}^3$, figure 1.39. Cependant, la diminution de la densité des sols traités à la chaux-ciment est insignifiante. La teneur en eau optimale des sols stabilisés au ciment passe de 10,7 % à 11,1 %, tandis que pour le mélange (chaux + ciment), elle passe de 10,9 % à 11,2 % [102].

La diminution de la teneur en eau optimale peut être attribuée à des réactions chimiques qui jouent un rôle dans la réduction de la densité des mélanges. De plus, l'ajout de stabilisants entraîne une augmentation de la surface spécifique du mélange, ce qui augmente la teneur en eau optimale. La réaction d'échange de cations intensifie encore

l'augmentation de la teneur en eau optimale puisque la réaction utilise plus d'eau pour mobiliser les ions Ca^{2+} qui sont introduits dans le mélange par les stabilisateurs [102 - 103].

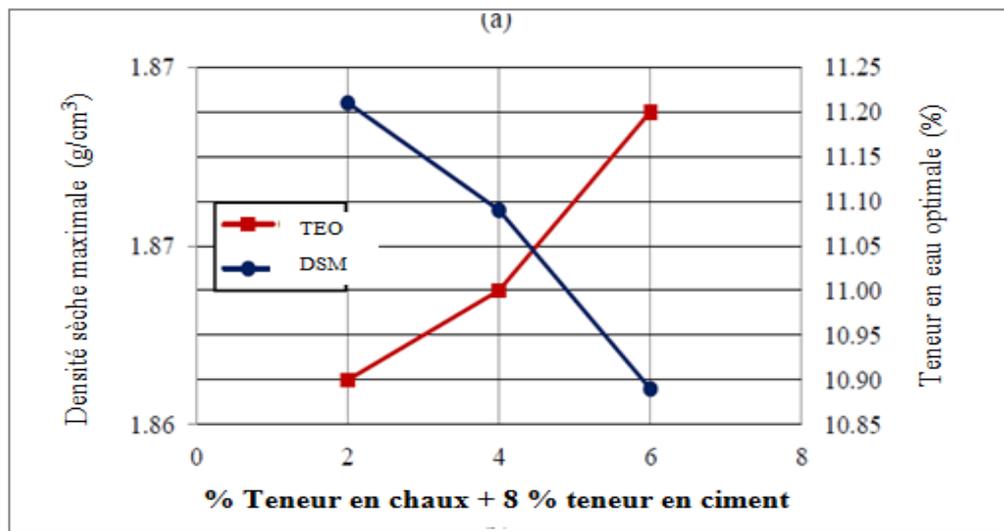


Figure 1.39 : les caractéristiques de compactage de sol argileux traité au mélange (ciment-chaux) [102].

c) Effets de la chaux + ciment sur la résistance à la compression

L'ajout de chaux aide à flocculer et à agglomérer le sol argileux, ce qui réduit la plasticité et améliore la maniabilité du sol. Le ciment peut alors être mélangé de manière homogène avec le sol. Dans une étude portant sur cinq échantillons différents de sol argileux traités avec différentes combinaisons de chaux et de ciment, l'ajout de chaux a augmenté la résistance à la compression des mélanges sol-ciment contenant des sols argileux à base de montmorillonite. En outre, pour chaque mélange sol-ciment, il existe une quantité optimale de chaux qui donne une résistance maximale à la compression. Cette quantité optimale de chaux est indépendante de la teneur en ciment du mélange et augmente avec l'augmentation de la teneur en argile du sol [104].

Une autre étude sur l'influence du mélange (ciment-chaux) sur trois types de sols (limon argileux, argile limoneuse et argile marneuse) montre que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux jusqu'à 3 % pour les trois sols lorsqu'ils sont stabilisés avec du ciment. Au-delà de cette valeur, une nouvelle augmentation de la teneur en chaux entraîne une diminution de la résistance, comme le montre la figure 1.40 [105].

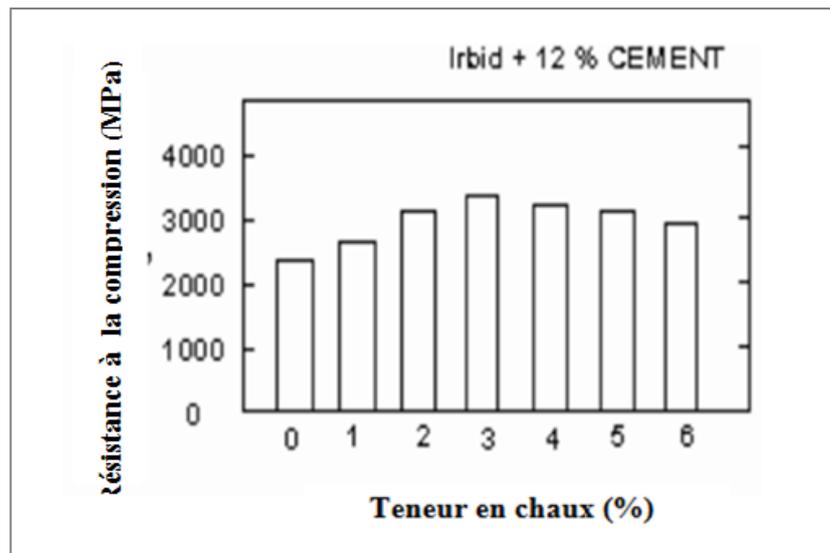


Figure 1.40 : Effet de la chaux en tant qu'additif sur la résistance à la compression d'un sol stabilisé avec du ciment durci pendant 7 jours [105].

Cette teneur en chaux optimale diffère d'une étude à l'autre, par exemple, dans une étude sur l'influence du mélange (ciment-chaux) sur la résistance à la compression d'un sol argileux, les résultats montrent une augmentation de la résistance des sols à base de ciment avec une augmentation de la teneur en chaux jusqu'à 4 %, mais, au-delà de laquelle la résistance commence à diminuer [102].

L'utilisation de la chaux combinée au ciment pour produire un bloc de terre comprimé donne une résistance à la compression à sec de 28 jours supérieure à celle du ciment ou de la chaux seuls. De plus, la stabilisation à la chaux et au ciment seuls n'a pas permis d'obtenir une résistance à la compression à 28 jours supérieure à la valeur minimale de la spécification SLS 1382 (2,8 MPa). La stabilisation en combinaison avec le mélange (chaux-ciment) peut être utilisée pour améliorer la résistance à long terme, ce qui ne peut pas être obtenu avec le ciment ou la chaux seuls [106].

Des essais expérimentaux sur des blocs de terre comprimée, stabilisée avec de la chaux comme substitut au ciment dans certaines proportions, montrent clairement l'efficacité des combinaisons chaux-ciment pour améliorer la résistance humide à long terme plutôt qu'avec le ciment seul. La combinaison du ciment et de la chaux s'est avérée mutuellement bénéfique pour conférer une meilleure résistance aux blocs. Le ciment est utilisé pour stabiliser la partie sableuse, avec des produits d'hydratation obtenus à partir du ciment, alors que la chaux est utilisée pour stabiliser la fraction argileuse présente dans le mélange. Cela permettrait

d'augmenter la résistance des blocs, ce qui serait une réflexion sur la durabilité et la performance des bâtiments construits à l'aide de blocs de terre comprimée stabilisée [107].

d) Effet du mélange (ciment + chaux) sur la durabilité

- Test d'humidification-séchage

Les résultats d'une étude sur l'effet du ciment, de la chaux et du mélange chaux-ciment sur la durabilité des sols limoneux, présentés dans la figure 1.41, montrent que le pourcentage maximal de perte de poids est obtenu pour les sols limoneux traités avec 3 % de chaux. La perte de poids la plus faible est obtenue pour un traitement mixte avec 1 % de chaux plus 4 % de ciment. Il semble que les sols traités à la chaux ou avec une petite quantité de ciment ne présentent aucune résistance à la durabilité, car le pourcentage de perte de poids est supérieur à 10 %. Ainsi, le traitement mixte avec 1 % de chaux plus 4 % de ciment est le seul mélange qui répond aux exigences de durabilité. En effet, l'ajout de chaux à un taux de 1 % peut être suffisant pour provoquer une augmentation du pH du mélange et peut stimuler les réactions pouzzolaniques en ajoutant jusqu'à 4 % de ciment, ce qui contribue à renforcer le sol traité grâce à l'auto-hydratation du ciment [99].

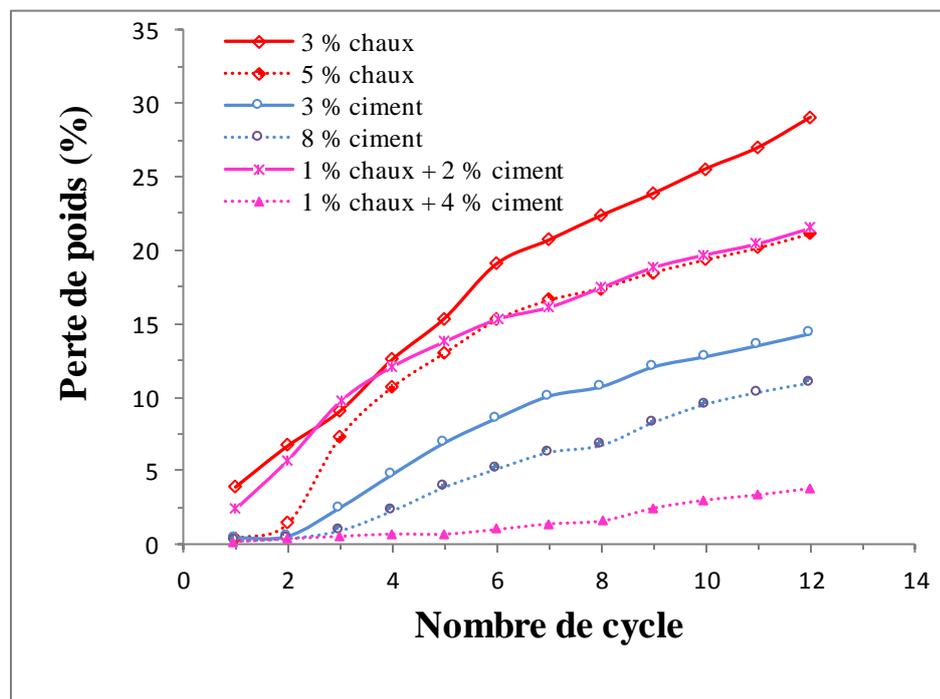


Figure 1.41 : Perte de poids des différents échantillons [99].

- Test d'absorption capillaire

L'absorption capillaire des blocs diminue avec l'augmentation du mélange (ciment + chaux), [89, 109, 110]. Les auteurs expliquent ce phénomène par la formation croissante de produits cimentaires qui obstruent les pores et réduisent la perméabilité. La quantité de chaux dans les mélanges réduit les volumes de vide, alors que le ciment améliore l'adhérence et la formation de produits d'hydratation du ciment tels que le silicate de calcium hydraté (CSH) et l'hydroxyde de calcium. Ces produits remplissent les vides et empêchent les cylindres d'absorber beaucoup d'eau. Les résultats de la figure 1. 42 indiquent que le mélange ayant la teneur en chaux la plus élevée présente l'absorption la plus faible par rapport à tous les échantillons [109].

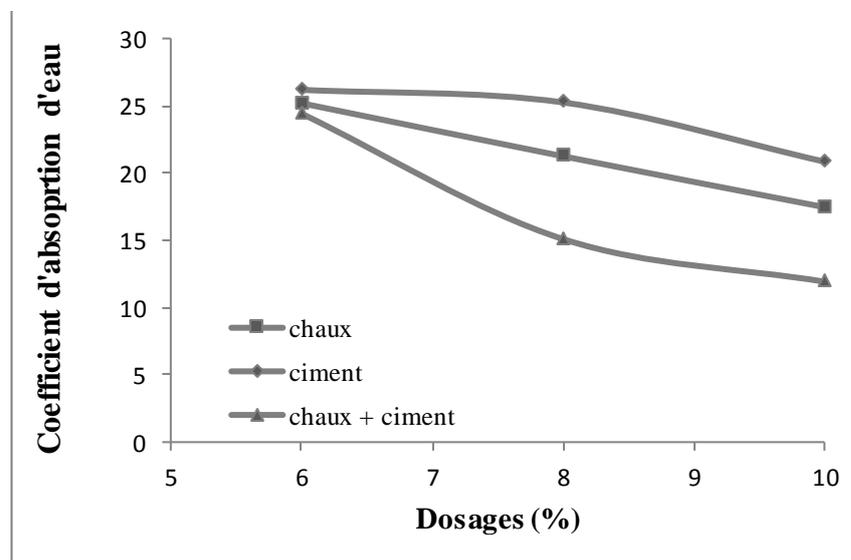


Figure 1.42 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de la chaux, du ciment et du mélange (ciment + chaux) [109].

- Test d'érosion

Une étude antérieure a été menée par Francisco et al. (2012) [111], sur l'effet du ciment et du mélange chaux-ciment sur l'érosion d'un bloc de terre comprimée. Les résultats montrent que lorsqu'ils ont été exposés à l'essai d'érosion, tous les blocs de mélange non stabilisés ont été détruits en quelques minutes. C'est-à-dire que les longueurs des blocs ont été entièrement pénétrées. Aucun des mélanges stabilisés, que ce soit avec du ciment ou avec le mélange ciment-chaux n'a subi de dommages discernables, ce qui a entraîné des profondeurs d'érosion trop faibles pour être mesurées avec précision. Le seul effet discernable est une perte de particules de surface de moins de 1 mm de diamètre, ce qui donne une surface de bloc plus rugueuse qu'avant le test. Les seules différences signalées

entre les blocs stabilisés au ciment et les blocs stabilisés par un mélange ciment - chaux au cours des essais sont que les blocs traités par un mélange (ciment – chaux) commencent à perdre des particules avant les blocs traités au ciment (les 15 premières minutes) et que le mélange (ciment – chaux) enregistre des profondeurs de pénétration de l'eau supérieures. Par conséquent, selon la norme NZS 4298 (1998), les blocs non stabilisés ne présentent aucune résistance aux fortes pluies et les blocs stabilisés ont un indice d'érodabilité de 1, ce qui démontre une grande résistance aux fortes pluies.

e) Effet du mélange (ciment + chaux) sur la conductivité thermique

La conductivité thermique est influencée par la composition du bloc et surtout par l'humidité interne du bloc [111]. En fait, les blocs saturés présentent une conductivité thermique 2 à 2,5 fois plus élevée que les blocs secs. La composition du bloc présente moins d'impact sur la conductivité thermique des blocs de terre comprimée. À l'état sec, la conductivité thermique est en moyenne de 8 % inférieure à celle des mélanges ciment-chaux stabilisés. Les blocs non stabilisés sont considérés comme une meilleure solution d'isolation thermique car ils ont la conductivité thermique la plus faible. En revanche, les blocs stabilisés au ciment ont une conductivité thermique plus élevée que ceux stabilisés avec un mélange (ciment-chaux). Par ailleurs les blocs traités au mélange (ciment-chaux) présentent une porosité plus élevée que les blocs traités au ciment en raison de leur rapport eau/ciment plus élevé. La littérature sur le béton atteste que plus le rapport eau/ciment est élevé, plus le béton est poreux [112, 113].

1.6.2 Additifs aux principaux stabilisateurs (déchets industriels)

Toute activité de production ou de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et présentent des risques multiples pour la santé humaine. L'industrie en Algérie a une part de responsabilité importante dans la pollution globale du pays, notamment les industries pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais [114]. Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation de toute substance ou matière, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou destiné à être abandonné par son détenteur.

La valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le domaine du génie civil et notamment dans le traitement des sols donne des résultats encourageants en termes d'économie, d'écologie et de comportement. En effet, les déchets industriels peuvent être

utilisés comme matériau de substitution au ciment ou à la chaux et réduisent ainsi la production de gaz à effet de serre (CO_2). La production de ciment et de chaux contribue à la production de CO_2 , cela est dû à la nécessaire décomposition du calcaire (CaCO_3) pour former du CaO et éliminer le CO_2 . Les déchets sont classés selon leur nature et leur origine ou selon leur caractère plus ou moins toxique. Il existe une distinction entre :

- déchets inertes

Ces déchets n'évoluent pas, ne se décomposent pas et ne se dégradent pas. Ce sont les décombres des travaux de démolition. Ils ne sont pas dangereux, mais vu leurs volumes et leurs quantités, ils sont stockés dans des centres spécialisés. Parmi eux, nous distinguons les briques, le béton, la terre ou le verre.

- déchets des activités économiques (DAE)

Il s'agit de déchets d'entreprise et parmi eux nous distinguons :

- Cendres volantes

Les cendres volantes sont des cendres fines produites lorsque du combustible pulvérisé tel que le charbon est brûlé dans une centrale thermique pour la production d'énergie. Ce produit est connu sous le nom de pouzzolane artificielle avec les propriétés d'un liant pouzzolanique. Un exemple de pouzzolane naturelle est la cendre volcanique. Les cendres volantes contiennent de la silice, de l'alumine et des minéraux de calcium. Lors de l'exposition à l'eau, ces composés de calcium hydratés forment des produits à base de ciment similaires aux produits formés lors de l'hydratation du ciment Portland [33].

De nombreuses études publiées ces dernières années montrent la faisabilité de l'utilisation des cendres volantes dans le traitement des sols en améliorant leur plasticité [115- 118]. Du point de vue de la résistance, la tendance générale est à l'augmentation de la teneur en cendres volantes [118, 119] (figure 1.43). Cependant, la résistance à la compression d'un sol stabilisé avec des cendres volantes seules n'est pas suffisante. L'ajout de chaux ou de ciment en combinaison avec les cendres volantes donne au sol une meilleure résistance à la compression [120]. De plus, l'incorporation de cendres volantes dans le sol s'avère bénéfique pour la durabilité à la fois en augmentant la résistance après les cycles (humide et sec)[118] et en réduisant le retrait [119].

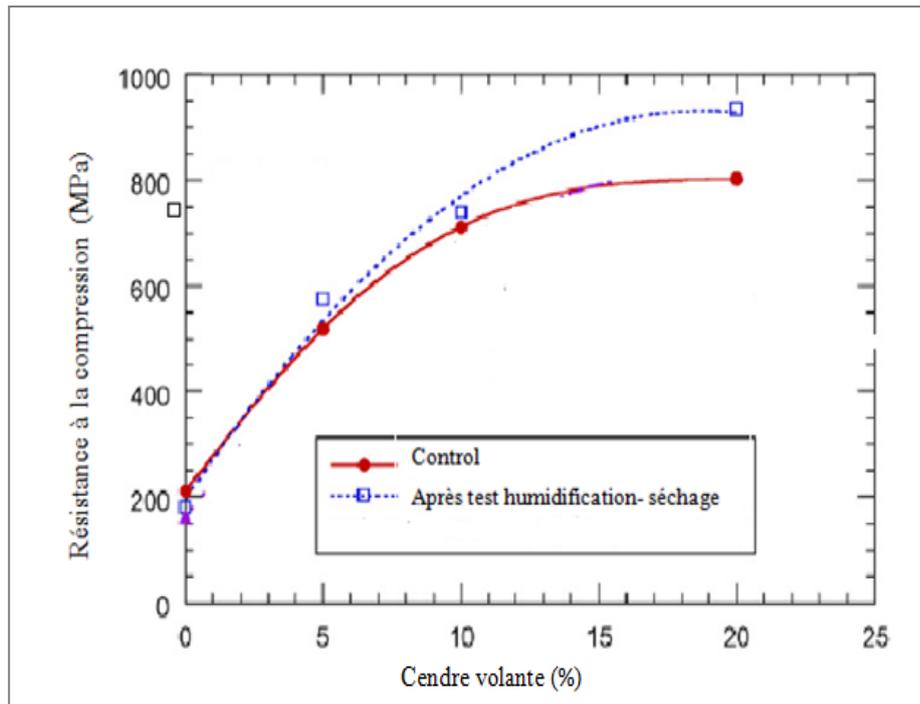


Figure 1.43 : Effet des cycles humidification-séchage sur la résistance à la compression de sol argileux stabilisé à la cendre volante [118].

✚ Fumées de silice

La fumée de silice est un déchet industriel généralement récupéré comme sous-produit de la métallurgie du silicium et/ou de la production d'alliages à base de silicium. Les particules sont sphériques avec un diamètre moyen de 150 nm, figure 1.38. La fumée de silice (SF) est utilisée dans le génie civil, notamment pour la fabrication de béton à très hautes performances. La fumée de silice est devenue le sous-produit le plus précieux parmi les matériaux pouzzolaniques en raison de sa propriété pouzzolanique très active et élevée.

L'incorporation de la fumée de silice dans le sol entraîne une diminution de la plasticité [121-122] et une augmentation de la résistance à la compression. En outre, quelle que soit la teneur en fumée de silice, la résistance la plus élevée a été obtenue pendant la plus longue période de cure (28 jours). Plus la période de cure augmente, plus les produits à base de ciment se développent dans le mélange (sol-fumée de silice), ce qui contribue à donner une plus grande résistance au sol étudié [121] (figure 1.44). L'ajout de fumée de silice peut également avoir un effet positif sur la durabilité [123].

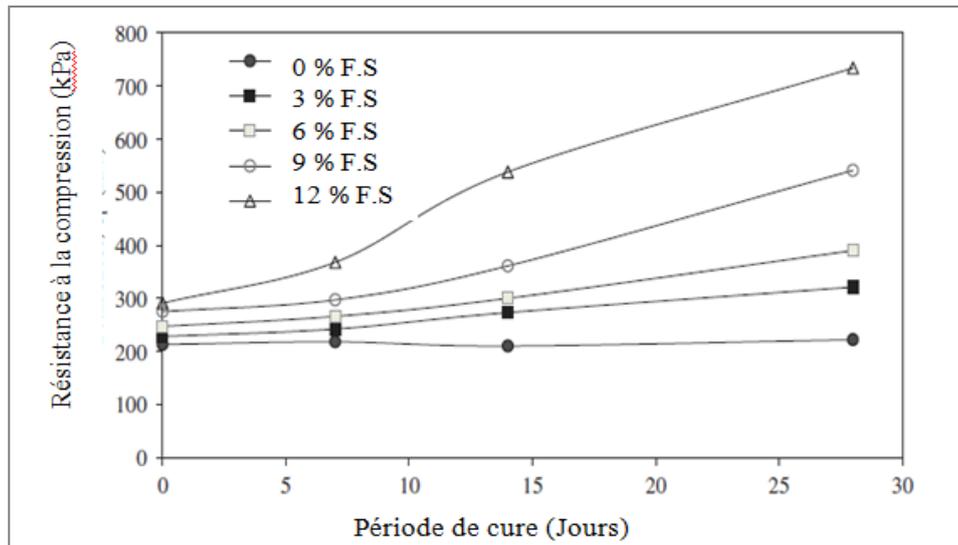


Figure 1.44 : Variation du pic de stress avec la période de cure pour différents teneurs en fumées de silice [123].

Dans ce travail de recherche, notre intérêt se porte sur le laitier de haut fourneau granulé en tant que déchets. Il est donc nécessaire de souligner certains points importants concernant ce laitier.

1.6.2.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la production d'acier dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, selon la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et le procédé utilisé. En général, les concentrations d'oxydes varient pour la chaux (CaO) de 30 à 50 (%), la silice (SiO₂) de 28 à 38 (%), l'alumine (Al₂O₃) de 8 à 24 (%), le soufre (S) de 1 à 2,5 (%) [124]. D'un point de vue minéralogique, les constituants du laitier de haut-fourneau (LHF) sont essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Il s'agit d'une forme minéralogique stable. Dans ce laitier cristallisé, nous pouvons trouver également des oxydes et des sulfures. Il n'y a pas de risque d'instabilité de volume dans le laitier cristallisé car il ne contient ni de la magnésie libre (MgO) ni de la chaux libre (CaO).

La matière première du laitier moulu est une matière secondaire issue de la fabrication de la fonte. Le minerai de fer (composé principalement de silice, d'oxyde de fer et d'alumine) et le fondant (chaux CaO et dolomite MgO) sont portés à haute température (1400 à 1600 °C) dans un haut fourneau. La fusion est obtenue par cette opération. La gangue liquéfiée du minerai, de plus faible densité, arrive à la surface de la fonte en fusion et peut donc être

recupérée par écoulement séparé. À la sortie du haut fourneau, cette gangue (laitier de haut fourneau) est soumise à un processus de refroidissement brutal : la trempe est généralement réalisée par des jets d'eau sous haute pression. Cet abaissement très rapide de la température provoque la solidification du laitier et la formation de « granules » d'une taille comparable à celle du sable (moins de 5 mm). Le matériau résultant, le laitier de haut fourneau granulé, est vitreux et possède des propriétés hydrauliques latentes (figure 1.45).



Figure 1.45 : Coulée de laitier à la sortie du haut fourneau [124].

- Mécanisme de stabilisation

Le laitier sans activateur réagit avec l'eau et le taux d'hydratation est très lent. Sa réactivité hydraulique dépend de divers facteurs tels que la teneur en phase vitreuse, la distribution granulométrique et la composition chimique. Lorsque le laitier est exposé à l'eau, un revêtement d'aluminosilicate imperméable se forme à la surface des grains de laitier, empêchant toute réaction ultérieure avec l'eau. Par conséquent, un activateur chimique ou un milieu chimique est essentiel pour une hydratation supplémentaire. De nombreux activateurs ont été proposés pour activer le laitier et parmi eux, l'hydroxyde de calcium, le gypse, le ciment Portland ordinaire, l'hydroxyde de sodium, le carbonate et le sulfate de sodium. Le taux d'hydratation est élevé lorsque la teneur en alcalins augmente, car ces derniers contribuent à rompre les liaisons Si-O et Al-O.

Le ciment Portland est l'un des activateurs les plus utilisés. La réaction du laitier avec le ciment Portland et l'eau est un processus complexe. Lorsque de l'eau est ajoutée à un mélange de ciment de laitier, elle commence à se combiner avec le ciment Portland et du silicate de calcium hydraté commence à se former. Les autres produits de réaction du ciment sont l'hydroxyde de calcium et, plus tard, les hydroxydes de sodium et de potassium. Ces alcalis activent le laitier qui réagit avec l'eau pour produire des hydrates similaires à ceux produits par l'hydratation du ciment Portland. Les silicates et aluminates en excès provenant

de l'hydratation du laitier, se combinent avec l'hydroxyde de calcium dans une réaction pouzzolanique. [125-126].

En ce qui concerne la chaux, l'introduction du laitier dans l'hydratation de la chaux-argile modifiera sans aucun doute les produits typiques de la réaction de la chaux et de l'argile. Les réactions dans un mélange ternaire argilo-chaux-laitier sont donc différentes et plus complexes par rapport aux réactions de l'argile et de la chaux qui se produisent dans la stabilisation classique des sols à la chaux [127]. Plusieurs réactions concurrentes se produisent plutôt qu'une seule. La première réaction est l'hydratation du laitier activé à la chaux pour produire le gel de CASH [128]. La deuxième réaction est la réaction de la chaux pour produire le CASH et des aluminates de calcium et aluminosilicates. Contrairement à la réaction pouzzolanique de l'argile avec la chaux, qui est lente, l'hydratation du laitier activé à la chaux est beaucoup plus rapide [125].

- Effet du laitier sur les propriétés du matériau sol

- a) Effets du laitier sur la plasticité

L'incorporation du laitier dans un sol argileux entraîne une diminution de l'indice de plasticité [129- 133]. Ces résultats sont attribués, d'une part, à la réduction de la double couche diffuse par l'ajout du laitier, et d'autre part, à la floculation des particules d'argile et à la translation des courbes granulométriques des sols traités au laitier vers le côté grossier en raison de l'augmentation des particules grossières et de la réduction des particules fines [131-135]. La diminution de l'indice de plasticité dépend du type de sol, des cations échangeables associés et de la quantité de minéraux argileux dans les échantillons.

D'autre part, d'autres études montrent que l'augmentation de la teneur en laitier entraîne une diminution de la limite de plasticité et de la limite de liquidité et donc une augmentation de l'indice de plasticité, figure 1.46, [136, 137]. Cependant, l'ajout du laitier, activé à la chaux hydratée, au sol provoque une augmentation de la limite de plasticité et une diminution de la limite de liquidité, qui lesquelles les conséquences de la première réaction immédiate du séchage due au processus d'absorption et d'évaporation qui a eu lieu. Par la suite, le processus rapide de réactions d'échange d'ions entre le laitier activé et les minéraux organiques du sol provoque la floculation et l'agglomération des minéraux dans les fines particules du sol, ce qui entraîne une réduction de l'indice de plasticité du sol et une amélioration de son aptitude au travail [135, 138].

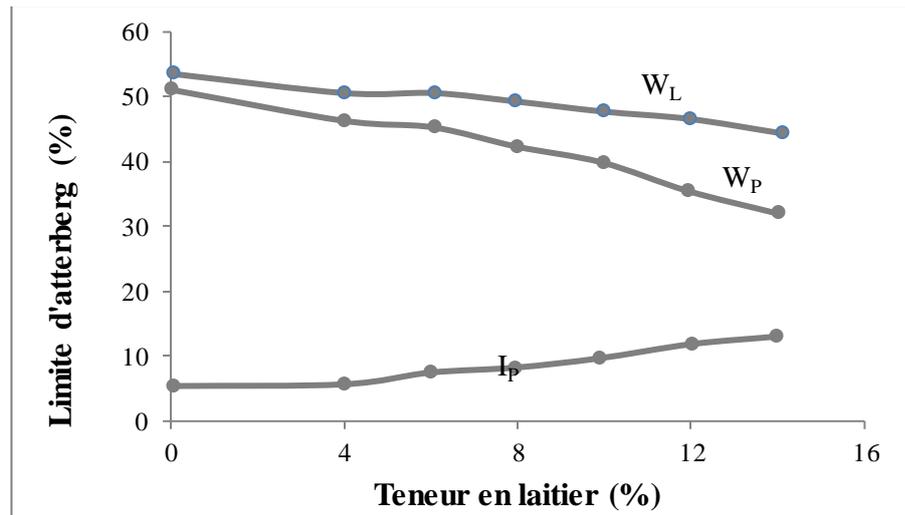


Figure 1.46 : Effet de laitier sur les limites d'atterberg [136].

b) Effets du laitier sur les caractéristiques de compactage

Plus le pourcentage de laitier augmente, plus la teneur en eau optimale diminue et plus la densité sèche maximale augmente, figure 1.47, [130, 138-140].

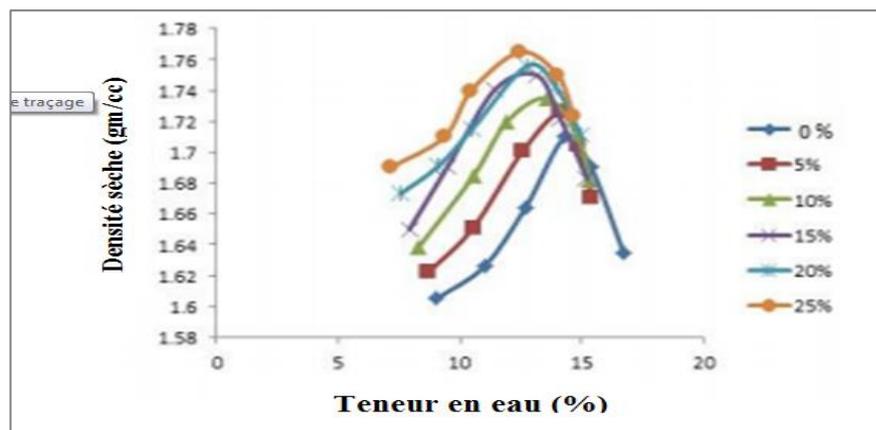


Figure 1.47 : Effet de laitier sur les caractéristiques de compactage [140].

Le sol traité devient alors plus dense et plus dur. Cette augmentation de la densité est probablement due à la translation des courbes granulométriques du sol traité vers le côté grossier et à la diminution de la fraction fine lorsque l'on ajoute les proportions de laitier granulé [134,139]. Le traitement des sols avec des mélanges chaux-laitier tend à augmenter la teneur en eau optimale et à diminuer la densité sèche maximale [120, 135]. Ce changement est considéré comme une indication de l'amélioration des caractéristiques de compactage des sols stabilisés avec du laitier granulé activé. La réduction de la densité sèche maximale s'explique par le fait que les particules de sol agglomérées et floculées occupent des espaces

plus importants. Par contre, l'augmentation de la teneur en eau optimale s'explique par le fait que le laitier activé à la chaux hydratée nécessite davantage d'eau pour la réaction initiale immédiate du processus de séchage par absorption et évaporation, ainsi que pour le processus d'échange d'ions généré par les réactions entre le laitier activé et les minéraux fins du sol, engendrant la floculation et l'agglomération des minéraux dans les particules fines du sol [135].

c) Effets du laitier sur la résistance à la compression

La résistance à la compression des sols argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier [125, 140-141]. Ce comportement s'explique par la formation de composés cimentaires entre le laitier et le sol. L'augmentation de la résistance dépend du temps et de la température de cure. Une étude sur l'effet du laitier sur la résistance du sol pendant différentes périodes de durcissement (7 jours, 28 jours, 3 mois, 6 mois, 9 mois et 12 mois) montre que le laitier semble avoir une faible influence sur la résistance après 7 jours de durcissement. D'autre part, la résistance augmente de manière significative avec l'augmentation de la teneur en laitier après de longues périodes de 6 et 12 mois (figure 1.48) [125].

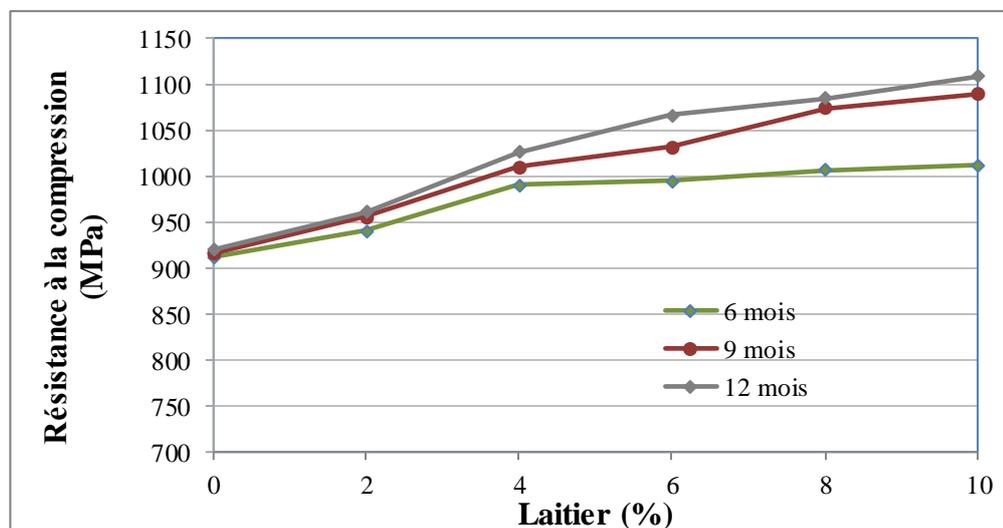


Figure 1.48 : Variation de la résistance à la compression en fonction du laitier ajouté [125].

Le laitier est caractérisé par une hydratation minimale en raison de son pH faible et, pour être efficace en termes de traitement du sol, il doit être activé avec un activateur approprié pour rompre sa phase vitreuse. Des études antérieures sur l'effet du laitier, mélangé à de la chaux ou du ciment, sur la résistance mécanique ont révélé l'effet bénéfique

de l'ajout du laitier sur l'amélioration de la résistance mécanique à long terme [125, 137, 142-145]. L'ajout de 5 % de chaux et de 3,33 % de laitier permet d'obtenir une meilleure résistance à la compression dans les sols argileux. L'augmentation de la résistance passe de 400 kPa pour les sols argileux naturels à 2400 kPa pour les sols argileux stabilisés à la chaux et au laitier. Ces résultats montrent que la stabilisation avec du laitier activé à la chaux est plus efficace que la stabilisation avec de la chaux seule. Par conséquent, la stabilisation peut produire des gains élevés et une résistance durable. Elle réduit également de manière significative l'impact environnemental [143].

Dans une autre étude, l'effet du laitier activé par la chaux sur la résistance de l'argile sableuse a été analysé. Les auteurs ont utilisé les pourcentages de 20% de laitier mélangé à 0, 2 et 4 % de chaux et 40 % de laitier mélangé à 0, 2 et 4 % de chaux. Les résultats montrent que l'ajout de 20 % de laitier et de 4 % de chaux (rapport 5:1 entre le laitier et la chaux) au sol augmente considérablement la résistance près de 16 fois. Alors que l'utilisation de 40 % de laitier et de 4 % de chaux (rapport 10:1 entre le laitier et la chaux) augmente la résistance près de 18 fois par rapport à un sol non traité, figure 1.49, [145].

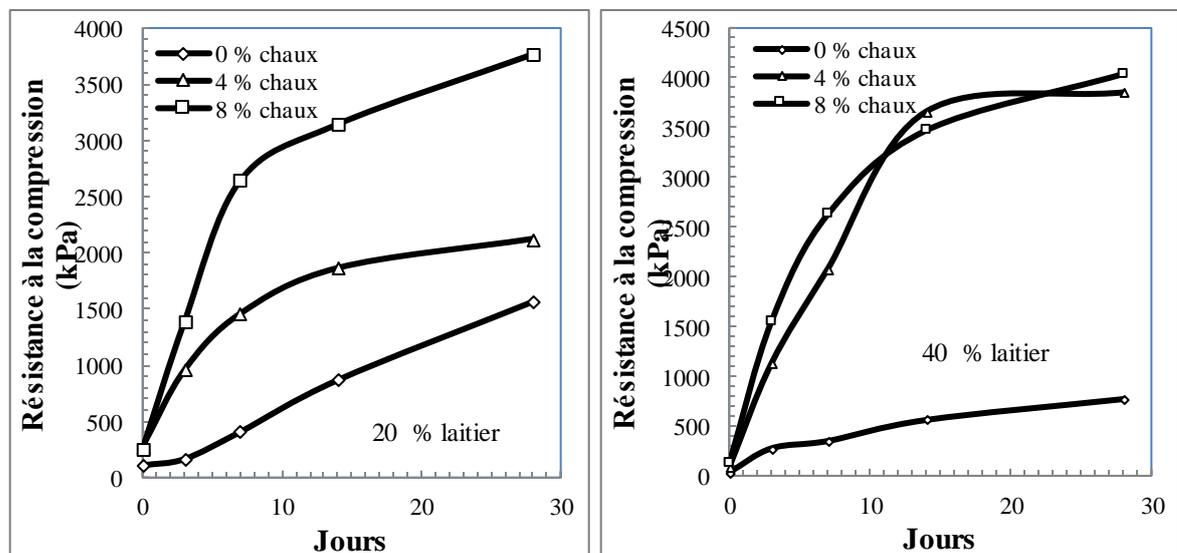


Figure 1.49 : Variation de la résistance à la compression en fonction du laitier activé par la chaux [145].

D'autres études montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment pour différents pourcentages de laitier et avec le temps de cure, figure 1.50, [146-148]. Pendant l'hydratation du ciment, les C_3S et C_2S présents dans le ciment réagissent avec l'eau pour former des hydrates de silicate de calcium complexes.

Le gel C-S-H ou C-S-H, qui en résulte, remplit le vide et lie les particules entre elles pour donner de la résistance au sol. Plus la teneur en ciment du mélange augmente, plus la quantité de gel formé augmente, ce qui permet de lier les particules plus efficacement. Un gain appréciable de résistance à mesure que le laitier augmente et que la teneur en ciment reste constante est observé. Le laitier contient des matériaux siliceux et alumineux très réactifs sous une forme finement divisée, appelée pouzzolane. Ces matériaux pouzzolaniques, en présence d'eau, réagissent avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment pour former des composés (gel C-S-H) aux propriétés cimentaires. De plus, le laitier contient de la chaux libre, qui subit une réaction pouzzolanique avec la silice et l'alumine, pour former un gel [149]. La résistance à la compression des blocs produits avec du laitier activé à la chaux comme stabilisateur est supérieure à celle des blocs produits avec du laitier activé au ciment dans le même essai [150].

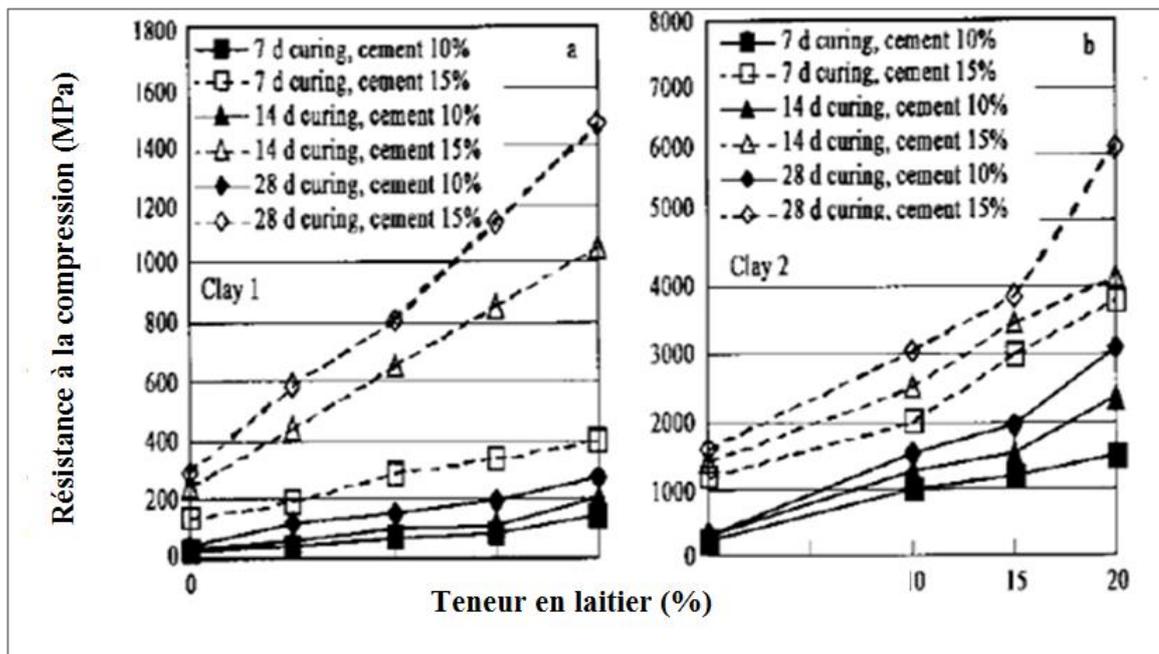


Figure 1.50 : développement de la résistance de sol stabilisé au laitier et ciment [146].

Une étude récente menée pour comparer la résistance d'un sol traité immergé 12 fois dans l'eau avec son état initial (0 fois immergé dans l'eau) et avec un sol non traité montre que la résistance du sol après 28 jours de cure et 12 cycles de séchage-saturation diminue jusqu'à 77,7 % par rapport aux échantillons dans leur état initial (0 fois immergé dans l'eau). En général, les sols traités sont généralement plus résistants par rapport aux sols non traités, même après des cycles de 12 jours (figure 1.51) [151].

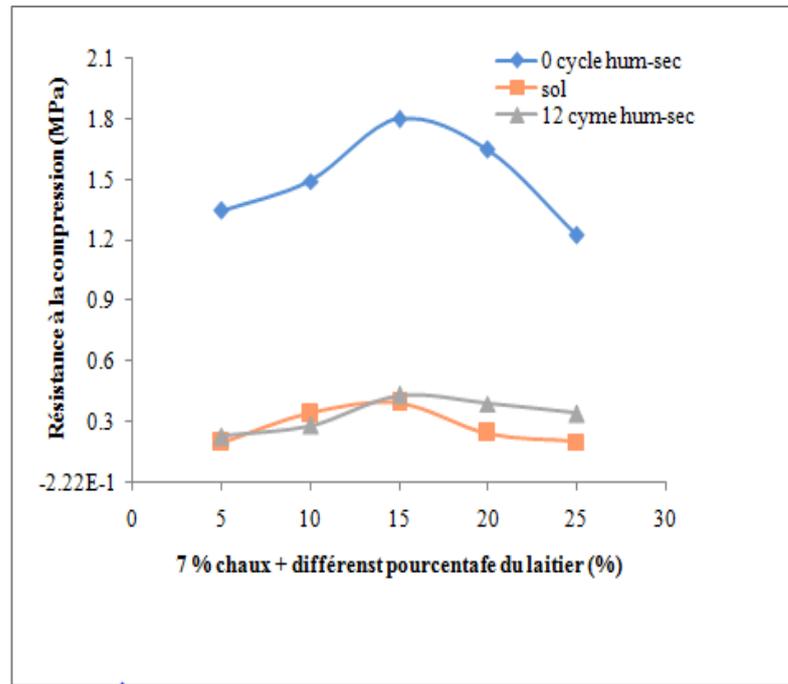


Figure 1.51 : Variation de la résistance à la compression après les cycles de durabilité [151].

d) Effets du laitier sur la durabilité

- Test d'humidification-séchage

Les résultats des tests de durabilité montrent l'effet favorable du laitier sur la perte de poids des blocs de terre comprimée et stabilisée à la chaux, après douze cycles d'humidification-séchage. La tendance à diminuer la perte de poids est fonction du type et du dosage des ajouts et du temps de cure. Tous les blocs répondent au critère de durabilité, basé sur les limites sévères de perte de poids de 10 % (climat sec) ou 5 % (autre climat) après les cycles d'humidification-séchage [152].

L'effet du mélange (chaux-laitier) sur la perte de poids des blocs après les cycles de séchage, est illustré dans la figure 1.52. Les résultats montrent une augmentation de la perte de poids après chaque cycle. Cette augmentation peut être attribuée à la lixiviation des ions calcium de l'échantillon [153]. L'échantillon a pu résister à huit cycles de durabilité. La dissolution des particules de CSH, formées dans la matrice du sol stabilisé dans de l'eau distillée, peut même réduire la résistance du sol [154].

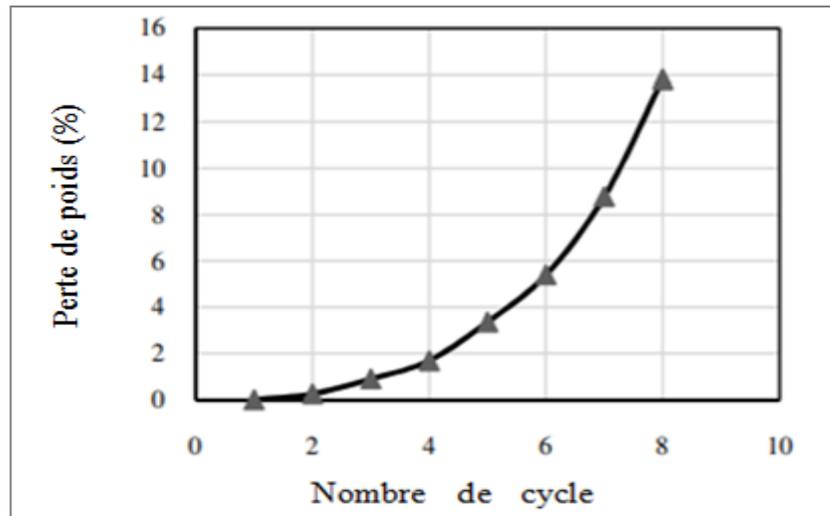


Figure 1.52 : Perte de poids cumulée de l'échantillon après chaque cycle de durabilité [153].

- Essai d'absorption capillaire

La durabilité de la brique est principalement affectée par l'absorption d'eau. Le principe de base de la stabilisation est de prévenir les attaques de l'eau pour obtenir un matériau durable. Une étude conduite par Izemmouren (2016) [152], ayant pour but d'examiner l'effet du laitier, activé par la chaux, sur l'absorption capillaire des blocs de terre comprimée à base d'un sable-argileux peu plastique, révèle une réduction de l'absorption capillaire de l'ordre de 27.27 %, avec l'augmentation de la teneur en laitier de 0 à 30 %, pour les blocs traités à 8 % de chaux, figure 1.53.

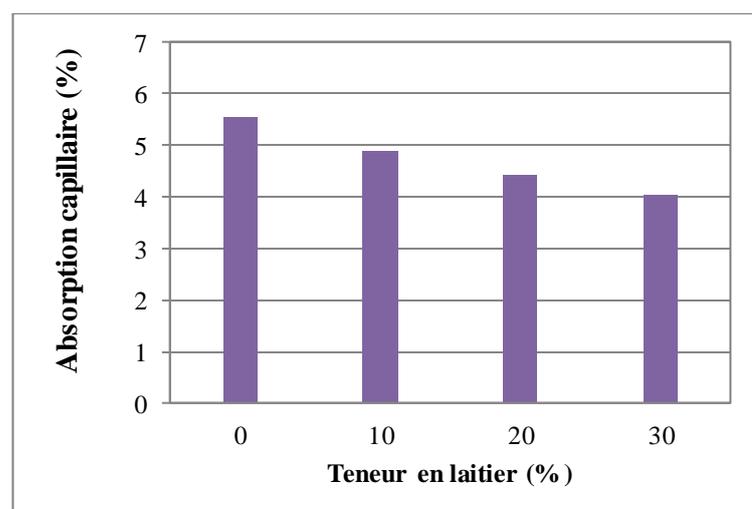


Figure 1.53 : Influence du laitier sur l'absorption capillaire des blocs de terre [152].

L'effet positif de la réduction de l'absorption capillaire des blocs avec l'incorporation de laitier à la chaux peut s'expliquer par la formation de cimentations [152].

e) Effets du laitier sur le retrait

Lorsque la composition d'argile est soumise à la dessiccation, les particules élémentaires ont tendance à s'agréger et à se chevaucher. Ce processus conduit au retrait. Dans un travail expérimental effectué par Manjunath et al (2011) [145], le retrait des sols argileux traités avec du laitier ou du laitier activé à la chaux est réduit, ce qui entraîne une augmentation de la limite de retrait W_s en fonction de la quantité de laitier ajoutée (Tableau 1.5) [145].

Tableau 1.2 : Effet du laitier et de la chaux sur les propriétés de retrait du sol de type argile sableuse [145].

Matériaux utilisés	Limite de retrait (%)
100 % sol	17.43
80 % sol + 20 % laitier + 0 % chaux	19.44
80 % sol + 20 % laitier + 2 % chaux	38.12
80 % sol + 20 % laitier + 4 % chaux	39.93
60 % sol + 40 % laitier + 0 % chaux	20.89
60 % sol + 40 % laitier + 2 % chaux	38.21
60 % sol + 40 % laitier + 4 % chaux	41.93

Dans l'objectif d'étudier l'influence du laitier et du mélange (ciment –laitier) sur les propriétés de sol, Cokca et al. [155], mènent une investigation sur la limite de retrait du sol argileux. Les résultats montrent que l'addition du laitier seul augmente la limite de retrait par rapport au sol non traité. Cette amélioration est de l'ordre de 8.8 % et 27.77 %, pour les échantillons traités respectivement à 5 % et 25 %, du laitier. L'addition combinée du laitier et du ciment s'est avérée très avantageuse dans l'amélioration de la limite de retrait.

f) Effets du laitier sur la conductivité thermique

La conductivité thermique des matériaux de construction fait référence à l'efficacité énergétique, à l'environnement intérieur et au confort thermique des bâtiments. Dans une étude très récente, Liu et al (2018) [156] montrent que la conductivité thermique d'un nouveau matériau en pisé augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier. La conductivité thermique d'échantillons stabilisés avec 10 %, 15 %, 20 % et 25 % de laitier, est augmentée à 5,3 %, 9,8 %, 14,2 % et 21 % respectivement par rapport aux échantillons non stabilisés [157], figure 1.54.

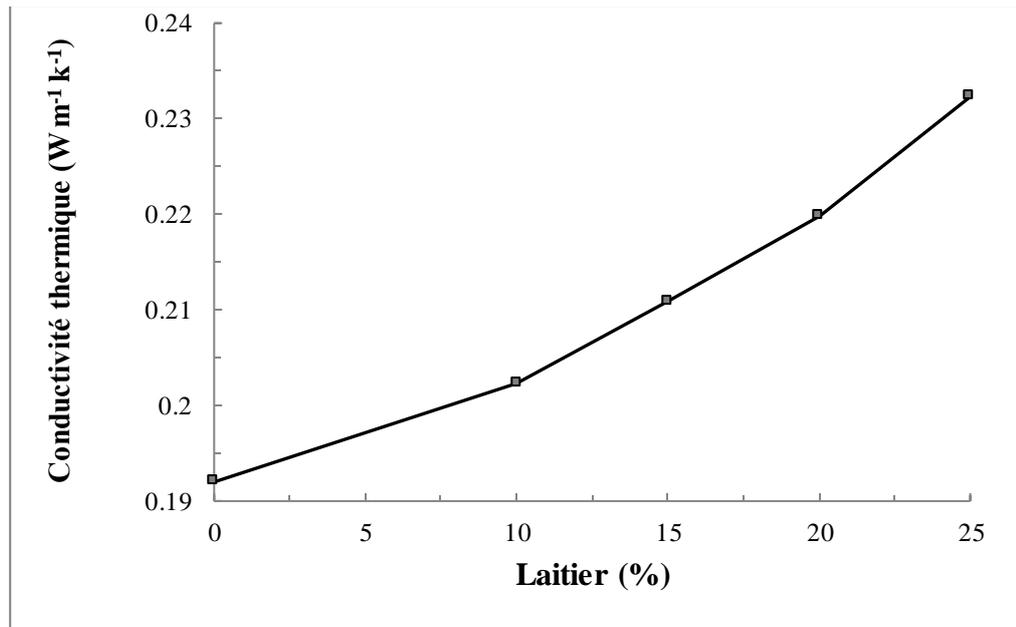


Figure 1.54 : Conductivité thermique des échantillons traités au laitier [156].

La conductivité thermique varie en fonction de la densité du matériau et de sa teneur en eau. Oti et al (2010) [157] comparent la conductivité thermique des blocs à base de chaux et de laitier avec ceux à base de ciment et de laitier. Il ressort de leur étude que les blocs d'argile stabilisés au mélange (chaux – laitier) présentent une meilleure valeur de conductivité thermique que les blocs d'argile stabilisée au mélange (ciment –laitier).

1.6.3 Stabilisation du sol par les fibres

La stabilisation par armature à l'aide de fibres a été largement utilisée dans le monde de la construction en terre. La résistance apportée par les fibres permet de résoudre d'autres problèmes rencontrés dans les briques en terre crue, que la stabilisation à la chaux et au ciment ne peut pas nécessairement pas résoudre [158, cité dans 159]. Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. Le nom « fibre » englobe une grande famille de matériaux qui ont été introduits sur le marché en tant que nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique et artificielle), leur forme (droite, ondulée, en aiguille), leur dimension (macro ou microfibre) et également selon leurs propriétés mécaniques. Toutefois, pour faire un choix sur les fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice et du mode de performance du composite.

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- fibres naturelles minérales et végétales : les fibres provenant de graines (coton, kapok) ; les fibres extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie, paille) ; les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de Manille), et d'enveloppes de fruits (noix de coco) ;
- fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques ;
- fibres synthétiques organiques : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide.

Ce travail de recherche porte sur les fibres végétales, en particulier la paille de blé, qui est l'une des ressources végétales les plus abondantes en Algérie et qui reste aujourd'hui encore peu exploitée. Il est donc nécessaire de mettre en évidence certains points importants de ces fibres.

1.6.3.1. Les fibres végétales

Les fibres végétales ont été utilisées depuis plus de 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'Égypte ancienne, où la paille et l'argile étaient mélangées pour construire des murs. En conséquence, ces fibres ont suscité une attention croissante en raison de leur faible coût, de leur faible densité, de leur biodégradabilité, de leur disponibilité et de leur facilité de traitement. Ces avantages sont intéressants pour leurs applications dans divers domaines tels que la construction, qui exige des matériaux légers à haute performance, des possibilités de recyclage, un impact environnemental minimal et une réduction du coût du matériau. Les fibres végétales proviennent de nombreuses plantes dans de nombreuses régions du monde. L'utilisation de fibres végétales présente deux avantages principaux. Premièrement, les fibres sont largement disponibles à faible coût et deuxièmement, l'utilisation de fibres végétales réduit les impacts environnementaux grâce à leur nature renouvelable, leur neutralité en CO₂ et leur économie en énergie [160].

- Paille de blé

La paille de blé (*Triticumaestivum* L.), un sous-produit obtenu après la récolte des grains de blé, a une production mondiale annuelle de 529 millions de tonnes [161], figure 1.55.



Figure 1.55 : Paille de blé.

La paille de blé est composée d'entre-nœuds ($57 \pm 10\%$), de nœuds ($10 \pm 2\%$), de feuilles ($18 \pm 3\%$), de paillettes ($9 \pm 4\%$) et de rachis ($6 \pm 2\%$).

L'analyse de la composition de la paille de blé montre la présence de cellulose (34–40%), d'hémicellulose (20–25%) et de lignine (20%) [161].

- La cellulose

La cellulose est un polymère de glucose qui est l'un des principaux constituants de la paroi végétale. C'est le bipolymère responsable de la majeure partie de la résistance mécanique des plantes sans tissus secondaires, en raison de sa forte structure cristalline et de son agencement très ordonné. Cette quantité augmente avec le temps. Une jeune plante aura donc une résistance mécanique plus faible car elle a moins de cellulose [162]. Son organisation, essentiellement cristalline, la rend insoluble dans la plupart des solvants, en particulier dans l'eau, même si ce composé reste très hydrophile.

- Les lignines

Les lignines sont des composés hautement hydrophobes qui se présentent sous la forme de polymères tridimensionnels. Leur structure complexe varie selon les espèces, mais aussi selon les éléments morphologiques (fibres, vaisseaux). Elles confèrent rigidité et imperméabilité aux plantes qui les possèdent. Les lignines sont des composés très hydrophobes. Elles participent à la cohésion des fibres dans les parties ligneuses lignocellulosiques du xylème et leur confèrent une résistance importante à la compression.

- Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polysaccharides à chaînes plus courtes que la cellulose et ont une structure amorphe. Elles sont hydrophiles et ont notamment la capacité de gonfler au contact de l'eau. C'est ce gonflement qui est responsable de l'instabilité dimensionnelle

du bois. De plus, les hémicelluloses sont solubles dans l'eau et peuvent être extraites de la paroi lors d'un trempage alcalin [163].

- Effet du renforcement avec les fibres végétales sur les propriétés du matériau

L'ajout de fibres aide à prévenir la fissuration pendant le séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau. Elles accélèrent le séchage par les canaux des fibres qui permettent un drainage de l'eau vers l'extérieur. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption et la résistance à la traction [98]. L'efficacité du renforcement par fibres dépend des caractéristiques du sol et des interactions entre les fibres et le sol.

a) Effet de la fibre sur le compactage

L'ajout de fibres de sisal aux sols argileux entraîne une diminution à la fois de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale. La réduction de la densité est attribuée à la réduction du poids moyen des solides dans le mélange fibres-sol [164]. À travers une étude sur l'influence de la fibre de bagasse, seule ou mélangée à de la chaux, sur les caractéristiques de compactage, les auteurs montrent que l'inclusion de la fibre de bagasse dans les sols sans traitement à la chaux diminue la densité sèche maximale. Cette réduction est attribuée à la faible densité de la fibre de bagasse. En outre, l'ajout de 2,5 % de chaux hydratée au mélange (sol-fibres), comme illustré dans la figure 1.56, entraîne une nouvelle diminution de la densité du sol. Il est important de noter que la densité du mélange sol-chaux-fibres est évidemment inférieure à celle du mélange sol-fibres [165].

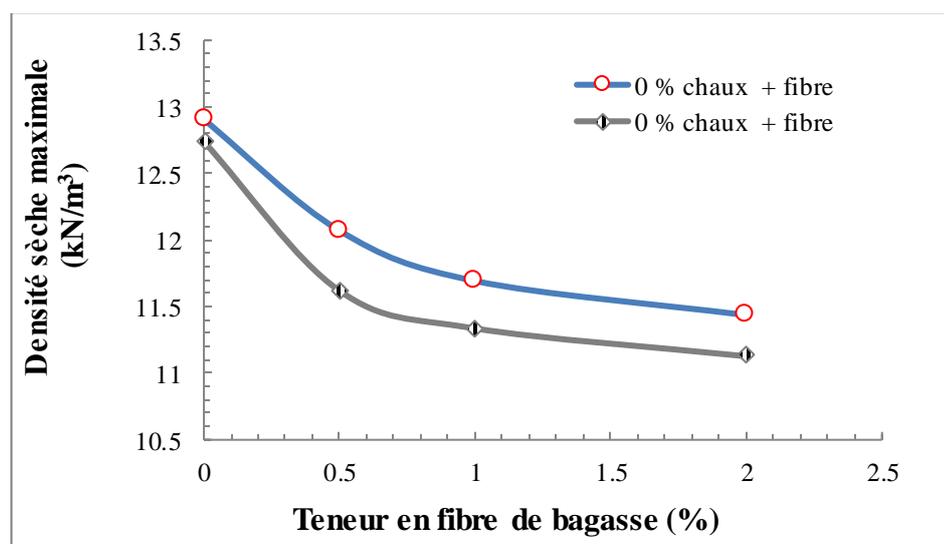


Figure 1.56 : Effet de fibre de bagasse sur la densité sèche maximale [165].

b) Effet de la fibre sur la résistance à la compression

Dans un travail de recherche effectué sur l'effet de la modification de la teneur en fibres de «palmier-dattier» sur la résistance à la compression à sec du bloc de terre comprimé traité au ciment, les résultats montrent que pour une teneur en ciment de 8 %, l'inclusion de fibres dans les blocs de terre augmente la résistance à la compression sèche. La valeur la plus élevée a été obtenue avec l'utilisation de 0,05 % de fibres. L'augmentation de la résistance est de l'ordre de 6 % comparativement au bloc sans fibres. Cependant, dans les autres cas, une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres a été observée. Par exemple, pour les cas de 6,5% et 5%, une diminution de la résistance est enregistrée pour certaines teneurs en fibres, tandis que pour d'autres, aucun changement dans les résultats de résistance n'a été constaté. Pour les faibles teneurs en ciment (5% et 6,5 %), comme le montre la figure 1.57, la diminution de la résistance à la compression du bloc peut être attribuée à la domination de l'effet des fibres sur celui de la teneur en ciment. En effet, la quantité de produits d'hydratation est faible devant l'importance des vides créés dans le mélange suite à la présence des fibres dans le mélange, ayant subi une importante contrainte de compactage, rendant le mélange trop élastique après le déchargement. Cela entraîne une augmentation du réseau poreux dans les blocs, ce qui se répercute défavorablement sur la résistance mécanique [166].

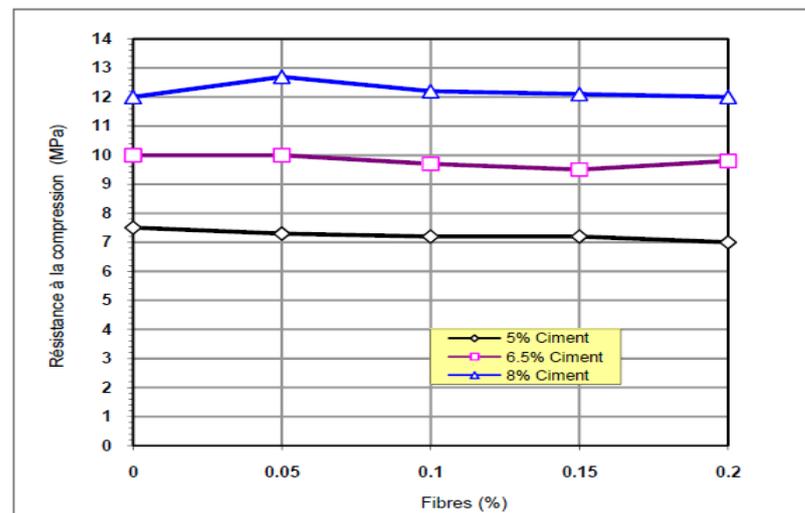


Figure 1.57 : Variation de la résistance en fonction de la teneur en fibre et ciment [166].

Une autre étude antérieure s'est intéressée au renforcement des sols argileux avec des fibres de «*kénaf*» dont la teneur en fibres est de 0,2 à 0,8% en poids avec deux longueurs de fibres, 15 mm et 30 mm. Les résultats montrent que la résistance augmente avec la teneur

en fibres de « *kénaf* » jusqu'à 0,2 % pour des fibres de 3 cm de long et jusqu'à 0,4 % pour des fibres de 1,5 cm de long. Au-delà de ces valeurs, la résistance diminue, figure 1.58. L'amélioration de la résistance à la compression est due à la présence de fibres dans la matrice argileuse empêchant la propagation des fissures en raison de leur bonne adhérence à cette matrice du fait de leurs surfaces rugueuses. Dans cette étude, la longueur des fibres est également un paramètre qui peut influencer la résistance mécanique. En effet, plus les fibres sont longues, plus elles augmentent la résistance à la compression en formant une sorte de pont de jonction entre elles et la matrice [167].

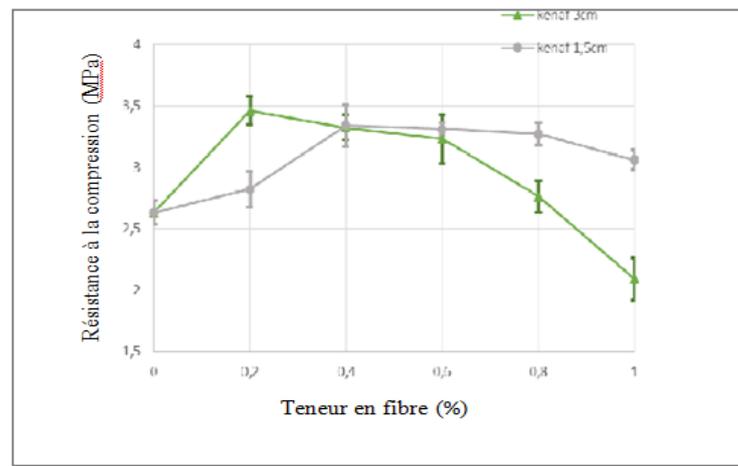


Figure 1.58 : Résistance à la compression en fonction des fibres de kénaf [167].

La résistance à la compression des blocs renforcés de fibres est influencée par plusieurs facteurs, la longueur des fibres et la fraction des fibres. Les résultats d'une recherche sur l'effet de la paille et de la fraction de paille d'orge sur la résistance à la compression, à 28 jours, de 4 types de sol (sol limoneux argileux, sol sablo-argileux et deux sols limoneux sableux), pour diverses fibres d'une longueur de 20 à 40 mm, indiquent que l'augmentation de la proportion de fibres jusqu'à 1,5 % améliore la résistance à la compression de 10 à 20 %, selon le type de sol utilisé. Au-delà de cette valeur, l'augmentation du pourcentage de fibres entraîne une diminution de la résistance à la compression. Par exemple, pour une fraction de fibres de 3,5 %, la réduction de la résistance à la compression est d'environ 45 %. Sur la base de ces résultats d'essais sur différents types de sols, les auteurs concluent que l'efficacité des fibres est plus prononcée avec les sols argileux qu'avec les autres sols sableux. L'effet de l'augmentation de la longueur des fibres sur la résistance à la compression est négligeable, mais il semble augmenter la capacité des blocs à se déformer au moment de la rupture [168]. Les résultats d'une étude sur l'effet des fibres de sisal sur la

résistance des blocs de sol stabilisé au ciment et au sisal montrent que la teneur en sisal, en présence de ciment, ne semble pas avoir d'effet sur les caractéristiques de résistance des blocs de sol comprimé, figure 1.59, [169].

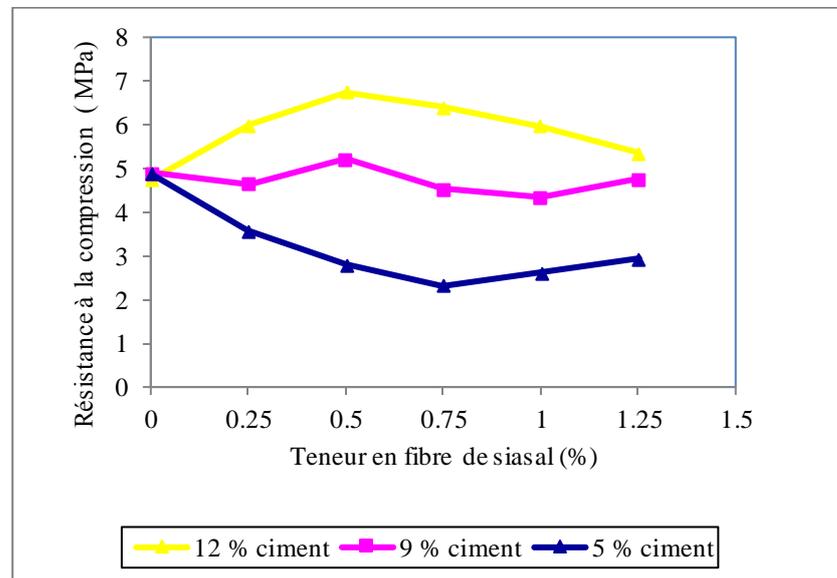


Figure 1.59 : Résistance à la compression en fonction des fibres de sisal [169].

c) Effet du renforcement par les fibres sur la durabilité

- Test d'humidification-séchage

Des tests d'humidification-séchage et d'érosion ont été effectués pour déterminer les propriétés de durabilité des blocs de terre améliorée. Dans un travail de recherche [170], l'auteur a étudié l'effet de trois fibres naturelles telles que les fibres de bagasse, les fibres de coco et les fibres de palmier à huile sur la durabilité (représentée par test d'humidification-séchage et test d'érosion) des blocs à base de deux sols argileux (B et R). Les résultats montrent, d'après la figure 1.59, une réduction rapide de la perte de poids des blocs jusqu'à 0,5% en poids de fibres, au-delà de cette teneur en fibres, la perte de poids se stabilise ou s'inverse avec une nouvelle inclusion de fibres. La plus grande réduction de la perte de poids par rapport aux blocs de sol non renforcés a été de 20 %, 38 % et 33 %, respectivement, pour les blocs de sol renforcé en fibres de palmier à huile, de coco et de bagasse pour le sol R, alors que la réduction pour le sol B était de 47%, 50% et 47%, respectivement pour les blocs de sol renforcé de fibres de palmier à huile, de noix de coco et de bagasse.

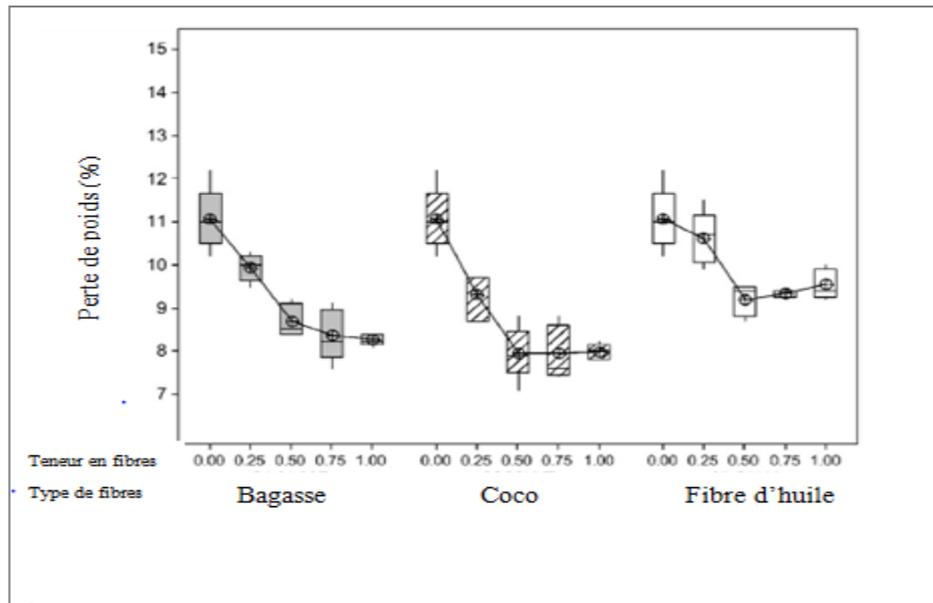


Figure 1.60 : Perte de poids des blocs renforcés par différents types de fibres [170].

- Test d'érosion

Dans la même étude citée ci-dessus [170], les résultats de l'effet des différentes teneurs et types de fibres sur la résistance à l'érosion indiquent une réduction rapide de l'érosion avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à 0,5% en poids. Nous pouvons constater une réduction de 50-70 % à 44-50 %, respectivement pour le sol R et le sol B, de l'érosion pour les blocs de sol renforcés en fibres par rapport aux blocs de sol non renforcé (figure 1.61).

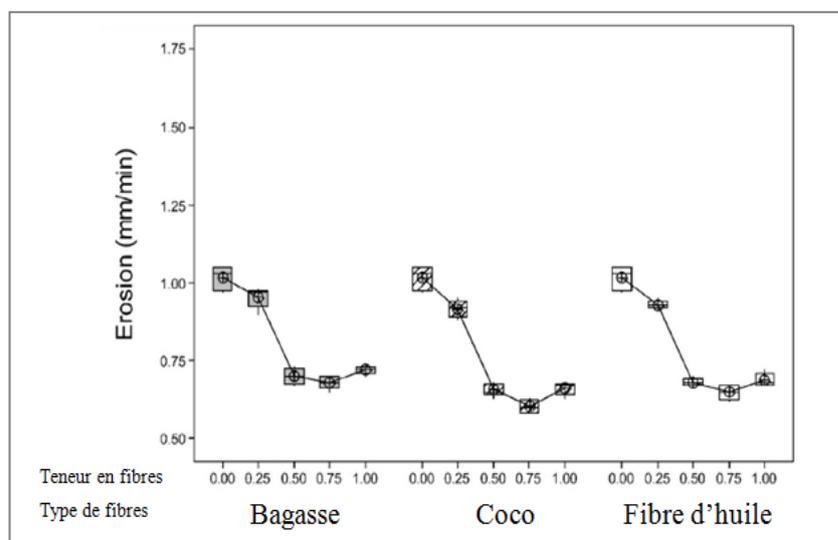


Figure 1.61 : Érosion des blocs renforcés par différents types de fibre [170].

Les auteurs ont justifié l'augmentation par la capacité des fibres à protéger les particules du sol contre le lavage, réduisant ainsi l'effet d'érosion sur les blocs. Le comportement des fibres du sol est similaire à celui des racines des arbres qui protègent le sol de l'érosion [170].

- Test d'absorption capillaire

La variation du coefficient d'absorption d'eau pour les blocs de terre comprimée en fonction de la teneur en fibres "palmier dattier" traitée et non traitée a fait l'objet d'une étude menée par Taallah et al. (2016) [171]. Les résultats montrent que l'ajout de fibres augmente l'absorption capillaire (figure 1.62). Plus la teneur en fibres augmente, plus le coefficient d'absorption d'eau C_b augmente. Le coefficient d'absorption d'eau se situe entre 4,53 % et 5,26 % pour les blocs renforcés par les fibres non traitées, alors que pour les blocs de terre renforcés par les fibres traitées aux alcalis, le coefficient d'absorption se situe entre 4,65% et 5,69%. Dans le cas des blocs sans fibres, la valeur C_b est de 4,42%. Ce comportement s'explique, d'une part, par l'augmentation des vides formés dans le mélange en raison de la présence des fibres et, d'autre part, par la nature hydrophile des fibres lignocellulosiques [167].

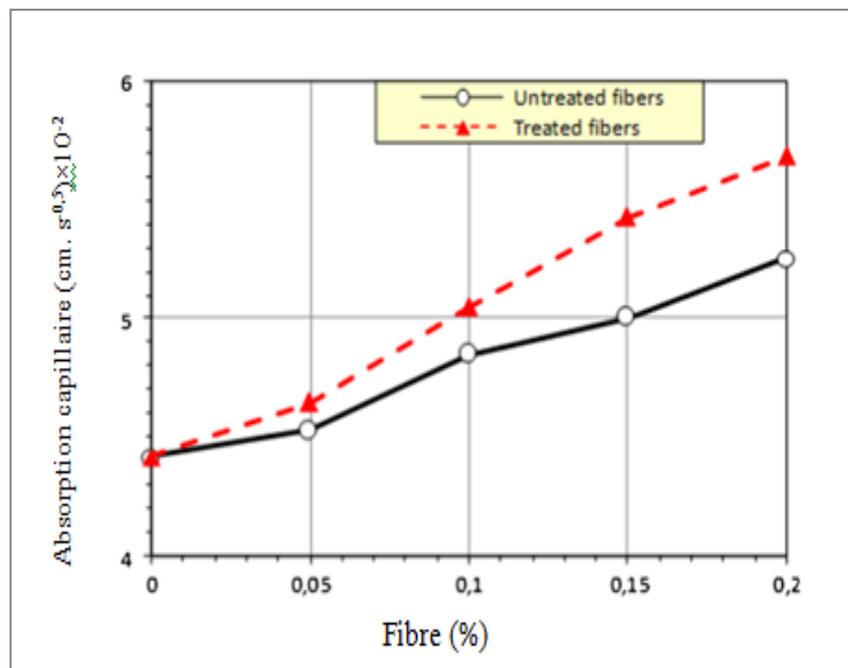


Figure 1.62: Effet de la variation de la teneur en fibres sur le coefficient d'absorption d'eau des blocs stabilisés avec 10 % de chaux vive après 7 jours de cure au four [171].

d) Effet de la fibre sur le retrait

La terre a besoin d'eau pour être modelée et cohésivée. Durant le séchage, le retrait peut être important suivant la nature argileuse de la terre. L'ajout des fibres permet de répartir le retrait dans tout le volume du matériau. Sans fibres, le retrait est concentré à quelques endroits du matériau avec l'apparition de grandes fissures [172]. Les résultats montrent que l'effet du renforcement sur le retrait linéaire dépend du type et de la quantité de fibres utilisées. La figure 1.63 souligne que tous les types de fibres utilisés (fibre de polypropylène, fibre de verre, fibre de jute, fibre de banane) pour l'étude aident à contrôler le retrait linéaire. En outre, une plus grande quantité de fibres est plus efficace pour arrêter les fissures de retrait. La longueur des fibres est également un paramètre important dans le contrôle du retrait linéaire. La présence de fibres, en particulier des fibres naturelles dans la matrice du sol, accélère le séchage car elles accélèrent le mouvement de l'eau dans les vides. Non seulement les fibres contrôlent la fissuration, mais, elles remplissent également la largeur de la fissure, ce qui limite la largeur des fissures de retrait qui apparaissent lors du séchage. Les fibres de jute et de polypropylène sont les plus efficaces pour contrôler le retrait linéaire [173].

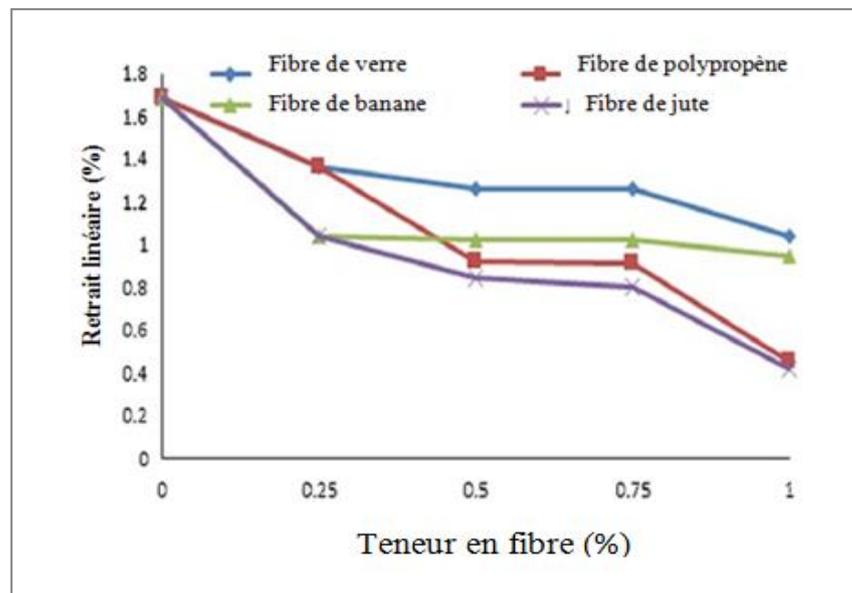


Figure 1.63 : Effet des différents types des fibres sur le retrait (%) [173].

Le retrait dépend également du type de sol. Une étude sur l'effet de la paille sur le retrait de différents types de sol montre que le retrait volumique est plus important pour les sols argileux (sol A). Le rétrécissement est de 9,2 % pour le sol A, alors qu'il est de 2,5 % pour les 3 autres sols pour la même teneur en fibres de 3,5 %. Une diminution du retrait est

observée avec l'augmentation de la longueur des fibres à tous les niveaux de renforcement (figure 1.64). Cela pourrait être attribué à la longueur suffisante des pailles pour permettre aux tensions de liaison à l'interface paille-sol de se développer et ainsi de contrecarrer la déformation et la contraction du sol [168].

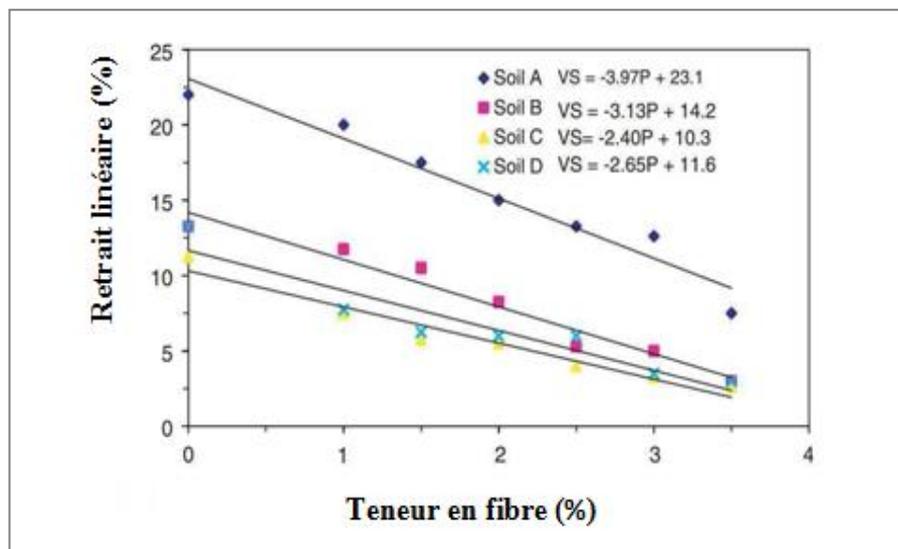


Figure 1.64 : Variation du retrait volumique en fonction du type de terre et de la teneur en fibres [168].

e) Effet de la fibre sur la conductivité thermique

La conductivité thermique est influencée par plusieurs facteurs, à savoir la teneur en fibres et la longueur. Cela est bien montré dans l'étude de Millogo et al (2014) [174], qui ont constaté que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la teneur et de la longueur des fibres d'*hibiscus cannabinus* ("kenaf").

Les résultats d'une étude sur l'effet de la paille de lavande et de la paille d'orge sur la conductivité thermique montrent une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en paille. Cela signifie que plus le matériau contient de paille, plus il est isolant thermiquement. La paille d'orge offre une meilleure isolation thermique que la paille de lavande à un dosage massique constant. Cela pourrait s'expliquer par les microstructures des deux pailles, où une structure plus dense a été observée pour la paille de lavande, contrastant avec la porosité plus élevée de la paille d'orge (figure 1. 65) [175].

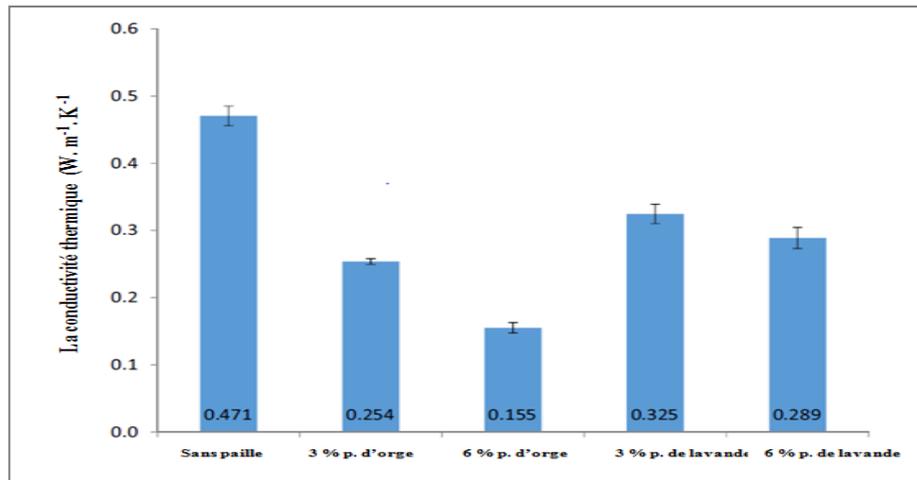


Figure 1.65 : Effet des fibres sur la conductivité thermiques [175].

La conductivité thermique des briques à base d'argile latéritique comprimée stabilisée par des fibres de coco diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et cette diminution atteint un taux significatif d'environ 50 % [176]. L'augmentation des pourcentages de paille de blé de 0% à 3% entraîne une diminution de la conductivité thermique à 54,4% par rapport aux blocs sans fibres comme le montre la figure 1.66.

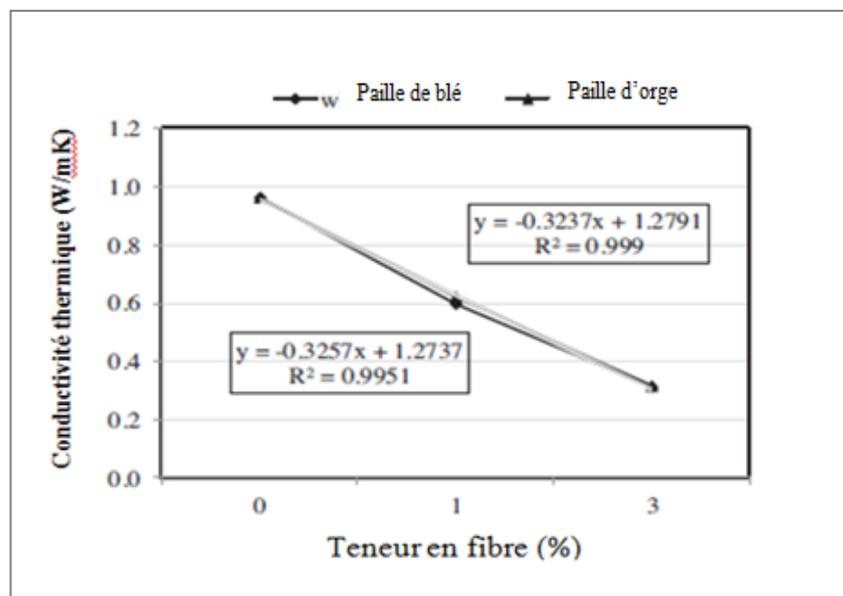


Figure 1.66 : Influence de différents pourcentages en fibres sur la conductivité thermique des briques [177].

De plus, l'augmentation des pourcentages de fibres de la paille d'orge de 0% à 3% a entraîné une diminution du pourcentage de conductivité thermique à 53% par rapport aux

briques sans fibres. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les blocs renforcés de fibres de paille de blé et ceux renforcés d'orge [177].

1.7 Conclusion

D'après cette synthèse bibliographique sur la terre crue, ses caractéristiques, la technique de stabilisation des sols et sur la terre crue stabilisée, son utilisation et sa performance comme matériau de construction, on peut conclure que :

- comme matériau, la terre crue offre l'avantage d'être abondante, écologique et économique, du fait que sa transformation en matériau de construction requiert peu de dépenses énergétiques (très peu d'émission de CO₂). Néanmoins, sa sensibilité à l'eau fait que les constructions en terre souffrent souvent de certaines déficiences comme le manque de résistance, de durabilité et de perte de ses caractéristiques thermiques.

- la technique de stabilisation a été une solution pour remédier au problème posé par un tel matériau, afin d'augmenter sa performance en tant que matériau de construction.

- des études rapportées dans la bibliographie, concernant la terre crue stabilisée, révèlent que le ciment et la chaux sont les principaux stabilisateurs utilisés. Le ciment et la chaux sont utilisés soit seuls, soit combinés à des ajouts minéraux tels que, le laitier, les cendres volantes, la fumée de silice ou à des fibres naturelles.

- la stabilisation des blocs de terre crue, utilisant le ciment, la chaux, le laitier et les fibres naturelles, affecte de façon positive leurs performances vis à vis de caractéristiques importantes déterminant un matériau de construction, à savoir, la résistance, la durabilité et la conductivité thermique.

- les études antérieures, concernant la stabilisation de blocs de terre crue, rapportées dans la bibliographie, révèlent peu de recherches explorant l'effet du laitier de haut fourneau combiné au ciment et à la chaux sur la performance de la terre crue stabilisée vis à vis des propriétés de durabilité, notamment, le retrait, la résistance à l'érosion et à l'abrasion des blocs de terre et de la conductivité thermique.

- il en est de même pour les fibres naturelles utilisées dans la stabilisation des blocs de terre crue. Parmi les études antérieures, peu, sont celles qui ont soulevé l'effet des fibres végétales, notamment la paille de blé, combinées aux principaux stabilisateurs, ciment ou chaux sur la durabilité et la conductivité thermique des blocs en terre crue.

CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE D'ESSAIS

2.1. Introduction

Ce chapitre décrit les différents matériaux utilisés pour la conduite du programme expérimental réalisé pour cette étude, à savoir, la terre crue, les différents additifs utilisés dans la stabilisation (caractéristiques physiques et chimiques), les différentes combinaisons adoptées pour la confection des échantillons stabilisés, la procédure de préparation des échantillons vierges et stabilisés pour effectuer les tests de laboratoire, les modalités des tests effectués, ainsi que les instruments utilisés dans le programme expérimental conçu pour atteindre nos objectifs.

2.2. Matériaux

2.2.1. Terre crue

Deux types de terre crue, pour la confection d'échantillons vierge et stabilisées, sont utilisés dans le programme expérimental. Une terre à caractère limoneux, utilisant un sol limoneux, nommé dans cette étude « terre à base de sol limoneux » et une à caractère argileux, utilisant un sol argileux, nommé « terre à base de sol argileux ».

2.2.2. Les ajouts (ciment, chaux, laitier et paille de blé)

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland de la classe de résistance 42.5 (CEM II 42.5). La chaux est une chaux hydratée d'origine commerciale provenant de l'usine SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie. Le laitier est un laitier de haut fourneau provenant du complexe sidérurgique d'El Hadjar. Il est présenté sous forme sableuse avec une granulométrie de 0 à 5 mm et une couleur gris clair. Ce laitier a été broyé dans le laboratoire de géo-matériaux et de génie civil de l'université de Blida, figure 2.1.



Figure 2.1 : laitier.

Les principales compositions chimiques et physiques sont indiquées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Composition chimique des ajouts utilisé.

Composition chimique	Chaux	Ciment	Laitier
CaO	> 83.3	61.17	42.20
MgO	< 0.5	3.41	4.70
Fe ₂ O ₃	< 2	2.3	2
Al ₂ O ₃	< 1.5	3.82	6
SiO ₂	< 2.5	16.11	40.10
SO ₃	< 0.5	2.4	0.15
Na ₂ O	0.4 - 0.5	0.2	-
CO ₂	< 5	-	-
CaCO ₃	0.4 - 0.5	-	-
MnO	-	-	2.60
K ₂ O	-	0.61	1.20
SO ₃	-	-	0.15
TiO ₂	-	-	1.20
Densité spécifique	2	-	-

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres naturelles disponibles dans le commerce (paille de blé), figure 2.4. La paille a été stockée en laboratoire dans les conditions de conservation du sol.



Figure 2.2 : Paille de blé.

Les caractéristiques physiques de la paille de blé sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Caractéristiques physiques de la paille de blé.

Caractéristiques physique	
Diamètre	1-4 mm
Longueur	10-40 mm

2.3. Formulation des combinaisons

Les échantillons de terre ont été traités avec différents pourcentages de chaux, de ciment, de laitier et de paille de blé. Les échantillons étudiés ont été fabriqués à partir de différentes formulations de combinaisons terre - ajouts minéraux. Ils sont présentés respectivement dans la figure 2.3, tableau 2.3 et la figure 2.4, tableau 2.4 pour la terre à base de sol limoneux et celle à base de sol argileux. Le programme expérimental est illustré dans la figure 2.5.

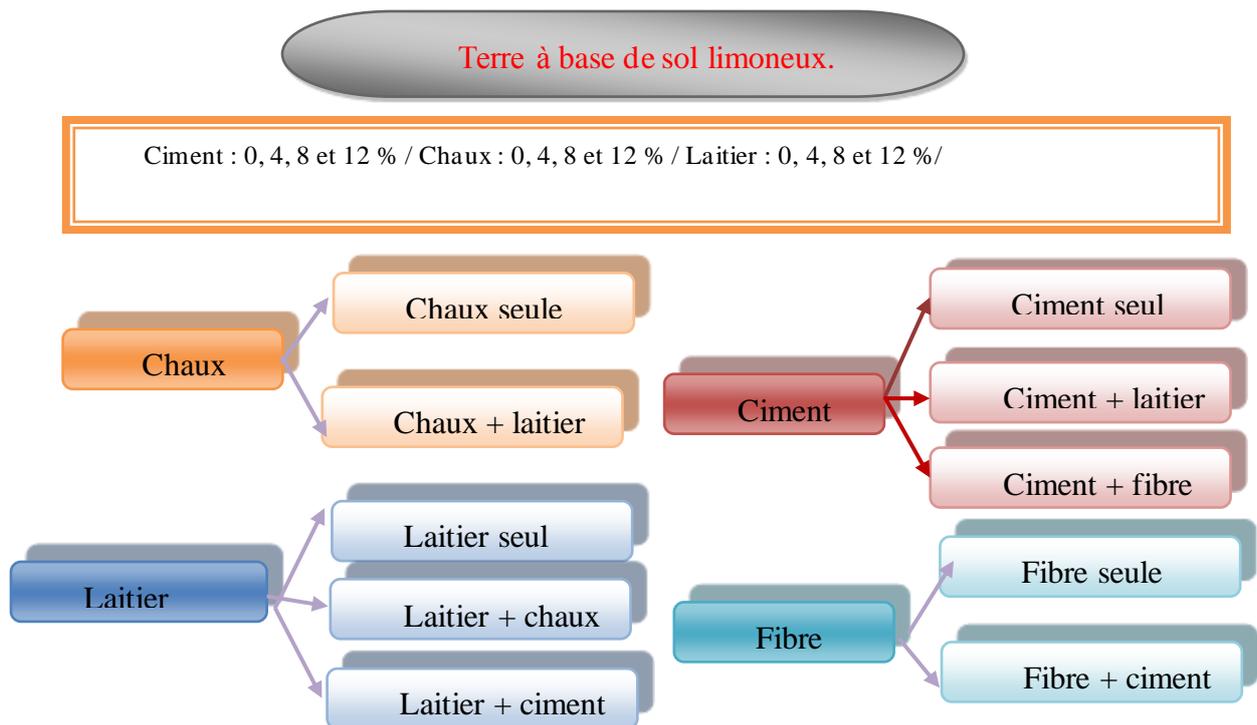


Figure 2.3 : Formulation des combinaisons de la terre à base de sol limoneux.

Tableau 2.3 : Formulation des combinaisons (Terre à base de sol limoneux).

Type de sol	Mélange	Sol (%)	Ciment (%)	Chaux (%)	Laitier (%)	Fibre (%)
Sol limoneux	A1	100	0	0	0	0
Sol limoneux	A2	96	4	0	0	0
Sol limoneux	A3	92	8	0	0	0
Sol limoneux	A4	88	12	0	0	0
Sol limoneux	A5	96	0	4	0	0
Sol limoneux	A6	92	0	8	0	0
Sol limoneux	A7	88	0	12	0	0
Sol limoneux	A8	96	0	0	4	0
Sol limoneux	A9	92	0	0	8	0
Sol limoneux	A10	88	0	0	12	0
Sol limoneux	A11	92	4	0	4	0
Sol limoneux	A12	88	4	0	8	0
Sol limoneux	A13	84	4	0	12	0
Sol limoneux	A14	88	8	0	4	0
Sol limoneux	A15	84	8	0	8	0
Sol limoneux	A16	80	8	0	12	0
Sol limoneux	A17	92	0	4	4	0
Sol limoneux	A18	88	0	4	8	0
Sol limoneux	A19	84	0	4	12	0
Sol limoneux	A20	88	0	8	4	0
Sol limoneux	A21	84	0	8	8	0
Sol limoneux	A22	80	0	8	12	0
Sol limoneux	A23	99.5	0	0	0	0.5
Sol limoneux	A24	99.25	0	0	0	0.75
Sol limoneux	A25	99	0	0	0	1
Sol limoneux	A26	95.5	4	0	0	0.5
Sol limoneux	A27	95.25	4	0	0	0.75
Sol limoneux	A28	95	4	0	0	1
Sol limoneux	A29	91.5	8	0	0	0.5
Sol limoneux	A30	91.25	8	0	0	0.75
Sol limoneux	A31	91	8	0	0	1

Terre à base de sol argileux.

Ciment : 0, 4, 8 et 12 % / Chaux : 0, 4, 8 et 16 % / Laitier : 0, 4, 8 et 16 % /

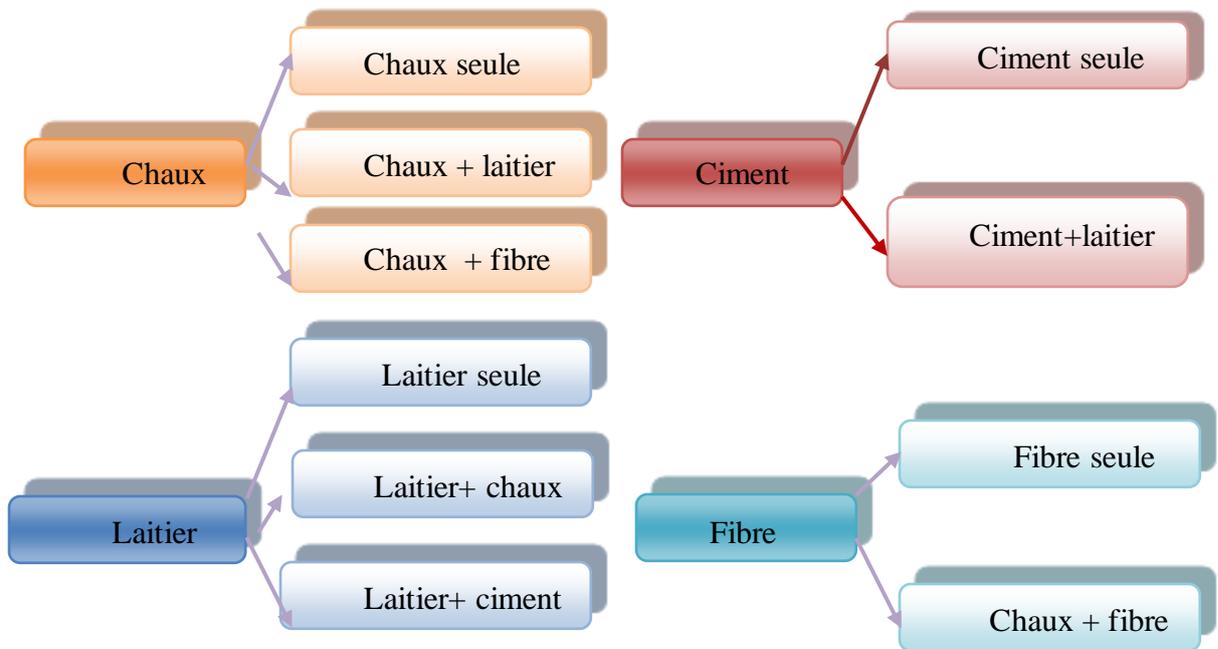


Figure 2.4 : Formulation des combinaisons de sol argileux.

Tableau 2.4 : formulation des combinaisons (Terre à base de sol argileux).

Type de sol	Mélange	Sol (%)	Ciment(%)	Chaux(%)	Laitier (%)	Fibre (%)
Sol argileux	A35	100	0	0	0	0
Sol argileux	A36	96	4	0	0	0
Sol argileux	A37	92	8	0	0	0
Sol argileux	A38	88	12	0	0	0
Sol argileux	A39	96	0	4	0	0
Sol argileux	A40	92	0	8	0	0
Sol argileux	A41	84	0	16	0	0
Sol argileux	A42	96	0	0	4	0
Sol argileux	A43	92	0	0	8	0
Sol argileux	A44	84	0	0	16	0
Sol argileux	A45	92	4	0	4	0
Sol argileux	A46	88	4	0	8	0
Sol argileux	A47	80	4	0	16	0
Sol argileux	A48	88	8	0	4	0
Sol argileux	A49	84	8	0	8	0
Sol argileux	A50	80	8	0	16	0
Sol argileux	A51	92	0	4	4	0
Sol argileux	A52	88	0	4	8	0
Sol argileux	A53	80	0	4	16	0
Sol argileux	A54	88	0	8	4	0
Sol argileux	A55	84	0	8	8	0
Sol argileux	A56	76	0	8	16	0
Sol argileux	A57	99.5	0	0	0	0.5
Sol argileux	A58	99.25	0	0	0	0.75
Sol argileux	A59	99	0	0	0	1
Sol argileux	A60	95.5	4	0	0	0.5
Sol argileux	A61	95.25	4	0	0	0.75
Sol argileux	A62	95	4	0	0	1
Sol argileux	A63	91.5	8	0	0	0.5
Sol argileux	A64	91.25	8	0	0	0.75
Sol argileux	A65	91	8	0	0	1

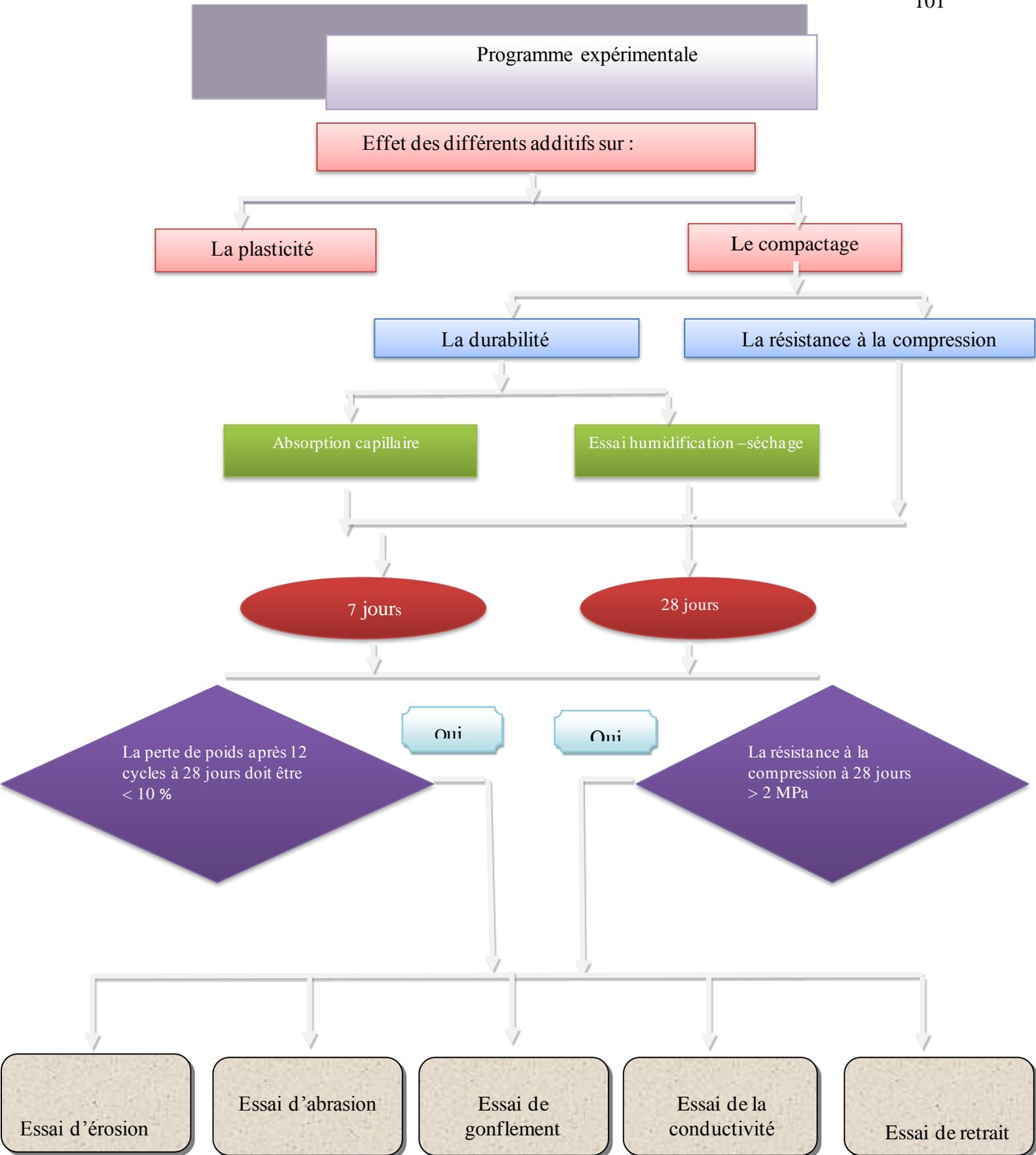


Figure 2.5: Programme expérimentale.

2.4. Préparation des échantillons pour les essais

2.4.1. Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques par tamisage et sédimentation ont été effectuées selon les normes NF P94-056 [178] et NF P94-057 [179], respectivement. Un échantillon de test de sol (200 g) est mis à tremper pendant 24 heures pour faciliter le tamisage ultérieur à travers un tamis de 80 μm de diamètre. Les refus et les tamisats sont récupérés et séchés. Les refus sont utilisés pour l'analyse granulométrique et les tamisats pour l'analyse sédimentométrique. La méthode de sédimentation (NF P94-057) [179] complète la méthode de tamisage. Elle est effectuée sur la fraction inférieure à 80 μm . Un échantillon sec, en poudre, de cette fraction, de $80\text{g} \pm 10\text{g}$, est mis en suspension dans une solution défloculante d'hexamétaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (60 ml d'une solution défloculante d'hexamétaphosphate à 5%).

2.4.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées sur la fraction inférieure à 400 μm du sol conformément à la norme NF P94-051 [180]. Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau présentant les limites de passage du sol d'un état à un autre. Après échantillonnage du sol et homogénéisation par broyage, une masse de matériau (m) est mise à imbiber dans un récipient d'eau à température ambiante, pendant au moins 24 heures. Une fois imbibé, le sol est tamisé par voie humide au tamis de 400 μm . L'eau de lavage et le tamisat sont recueillis dans un bac. Après une décantation de 12 heures, l'eau claire est siphonnée sans entraîner de particules solides. L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50 $^{\circ}\text{C}$.

2.4.3. Essai Proctor

L'essai de Proctor a été effectué selon la norme NF P 94-093 [181]. Pour un seul essai, il faut au moins 12 kg de matière passant au tamis de 5mm. Le matériau est séché à 105 $^{\circ}\text{C}$ puis homogénéisé. Ensuite, une masse de 2 kg est prélevée et humidifiée avec une teneur en eau croissante. À partir de chaque pièce, des échantillons sont réalisés pour la détermination des points de la courbe Proctor. Pour la préparation des échantillons de sol traités, les différents additifs sont ajoutés après le séchage du matériau passant au tamis de 5mm. Après le malaxage à sec du sol avec de la chaux ou un mélange, les mêmes étapes pour la préparation des échantillons de sol non traité ont été suivies. Les échantillons d'essai

traités ne subissent aucune cure. L'essai Proctor est effectué immédiatement après le malaxage.

2.4.4. Essai de la résistance à la compression uniaxiale

Pour la présente étude, l'essai de la résistance à la compression uniaxiale a été réalisé sur des éprouvettes de 38 mm de diamètre avec un élancement de 1.9 à 2.2. Les éprouvettes ont été fabriquées selon les étapes suivantes :

1. détermination de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale pour chaque mélange étudié ;
2. compactage du sol traité dans un moule Proctor à la teneur en eau optimale ;
3. prélèvement à l'aide d'une carotte normalisée (Figure 2.6) des éprouvettes d'essais à partir du matériau traité et compacté ;
4. après démoulage, les éprouvettes ont été immédiatement placées dans des sachets en plastique pour éviter la perte d'humidification ;
5. faire subir une cure des éprouvettes d'essai entre 7 ou 28 jours ;
6. imbibition des éprouvettes pendant 24 heures pour simuler des situations réelles car les constructions sont souvent soumises à l'agression de l'eau, notamment par capillarité et par aspersion ; cependant, elles sont rarement immergées. Les blocs humides ont une résistance à la compression plus faible que les blocs secs. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans les cas les plus défavorables.



Figure 2.6 : Carottes métalliques pour le prélèvement des éprouvettes de l'essai de la compression uniaxiale.

2.4.5. Essai d'humidification – séchage

L'essai d'humidification – séchage a été réalisé sur des éprouvettes de 38 mm de diamètre, avec un élancement de 1.9 à 2.2, selon la norme ASTM D 559 [182]. Les éprouvettes sont réalisées, selon le même mode décrit dans la section 2.4.4.

2.4.6. Essai d'absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé sur des éprouvettes de 38 mm de diamètre avec un élancement de 1.9 à 2.2, selon la norme XP 13- 901 [22]. Les échantillons ont été retirés de leur sachet afin de les préparer pour le test de capillarité, puis recouverts à la base, par une résine époxy étanche, sur une hauteur d'environ 5cm. Après cure, les valeurs de la masse des échantillons sont déterminées. Les diamètres, ont été pris à partir de la surface sphérique de l'échantillon.

2.4.7. Essais d'érosion (spray test) et d'abrasion

Les essais sont effectués sur des spécimens prismatiques ($10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$). Pour la préparation des spécimens nécessaires au programme d'essai, un moule a été conçu selon le modèle de Guettala (Guettala et al., 2006). Il est en acier trempé, composé de 5 éléments formant un volume de $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$, après assemblage. Le moule est équipé d'un piston pour assurer la transmission de la tension de compactage, de la presse au mélange. Le compactage des éprouvettes est statique, le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble (moule + mélange + piston), alors que le plateau supérieur reste fixe. L'opération s'effectue jusqu'à une tension de compactage de 5 MPa. Après démoulage, les éprouvettes sont immédiatement recouvertes d'un film plastique. La période de cure est de 7 et 28 jours (Figure 2.7).



(a)



(b)

Figure 2.7 : Réalisation des éprouvettes pour les essais de durabilité.

a- Blocs de (10x10x20cm³). b- Conservation des blocs au laboratoire.

2.4.8. Essais de gonflement/ retrait

La mesure du gonflement et du retrait du bloc de terre se fait selon la procédure suivante (norme XP 13- 901) [22]. Les spécimens prismatiques de (10x10x20 cm³) sont démoulés et immédiatement placés et enfermés dans des sachets en plastique pour réduire la perte d'humidité. Après 07 et 28 jours de cure, les échantillons sont retirés de leur sachet afin de les préparer pour le test de gonflement et de retrait. Sur chaque bloc, deux plots de mesure sont scellés à l'aide d'une résine époxyde, puis les blocs sont placés dans un bac d'eau (figure 2.8).



Figure 2. 8 : Éprouvette réalisée pour l'essai de gonflement et de retrait.

complétée jusqu'à cette graduation avec de l'eau distillée. L'éprouvette est agitée pendant 2 minutes avant le début de l'essai et un densimètre est introduit dans la solution. À l'aide du densimètre, nous mesurons, en fonction du temps la masse volumique de la solution. Ensuite, à partir de la masse volumique de la solution, la distribution pondérale des particules est déterminée en fonction de leurs diamètres, selon la norme française NF P 94 – 057 [179].

2.5.1.2. Limite d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg permet de séparer les trois états physiques du sol fin, solide, plastique et liquide. La limite de liquidité WL sépare l'état liquide de l'état plastique, la limite de plasticité WP sépare l'état plastique de l'état solide, et la limite de retrait WS sépare l'état solide avec et sans retrait.

La limite de liquidité est mesurée avec l'essai au pénétromètre à cône selon la norme française NF P 94 - 052 - 1 [184]. L'essai consiste à faire tomber un cône en chute libre sur un échantillon de sol placé dans une tasse, pendant 5 secondes. L'essai, est effectué pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité est la teneur en eau du sol qui correspond classiquement à une dépression du cône de 17mm.

La limite de plasticité est déterminée par l'essai au rouleau, selon la norme française NF P 94 - 051 [180]. L'essai consiste à réaliser un rouleau avec le matériau qui est aminci jusqu'à un diamètre de 3mm. La limite de plasticité est la teneur en eau obtenue lorsque le rouleau se fend en atteignant un diamètre de 3mm.

La limite de retrait est déterminée par l'essai de dessiccation, selon la norme Française XP P 94-060-1 [185]. L'essai a pour principe la détermination de la masse et du volume d'une prise d'essai, avant et après dessiccation, par étuvage. Le volume final de la prise d'essai est déterminé par immersion dans le mercure.

2.5.1.3. Composition minéralogique (DRX)

La composition minéralogique des échantillons a été déterminée par la technique de diffraction des rayons X qui permet l'identification des différentes phases minérales cristallisées présentes dans l'échantillon. L'appareil utilisé est un diffractomètre à dispersion d'énergie D8 Advance BRUKER AXS.

2.5.1.4. Observation microscopique électronique à balayage (MEB)

La microstructure des échantillons a été observée et analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) QUNATA 650, comme le montre la figure 2.10. Le MEB permet d'observer la topographie de la surface d'un échantillon en balayant sa surface avec un faisceau d'électrons et en recueillant l'image formée.



Figure 2.10 : MEB,(QUNATA650)

Comme les échantillons sont non conducteurs, une métallisation des surfaces est donc nécessaire, les recouvrant d'une fine couche d'or. Deux méthodes peuvent être utilisées pour obtenir ce résultat. Pour cette étude, la pulvérisation cathodique a été utilisée. Elle consiste à déposer sur l'échantillon des atomes arrachés à un morceau de métal (or), par de l'argon ionisé, dans une enceinte à vide partiel.

2.5.1.5. Coefficient d'absorption de la paille de blé

Le coefficient d'absorption est déterminé selon la méthode décrite par Magniont [186], dans sa thèse, sur la contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco - matériau de construction à base d'agro-ressources. Il est mesuré en immergeant la paille dans l'eau pendant différentes durées (1 minute, 5 minutes, 15 minutes, 1 heure, 4 heures, 24 heures et 48 heures). Après l'immersion, les fibres sont essouffées. Le coefficient d'absorption est déterminé pour les différentes durées et est utilisé pour déterminer une courbe d'absorption.

2.5.2. Essais mécaniques

2.5.2.1. Essai de Proctor

L'essai a été réalisé selon un processus bien défini dans la norme française NF P 94-093 [181], qui consiste à compacter l'échantillon de sol à étudier par couches dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée et à mesurer sa teneur en eau et son poids sec en volume, après compactage. Pour l'essai Proctor, deux types de moules de dimensions différentes peuvent être utilisés.

- le moule Proctor ($\Phi_{\text{moule}} = 101,5 \text{ mm}$ /Hde sol = 117 mm), lorsque le matériau est suffisamment fin (pas d'éléments supérieurs 5mm),
- le moule CBR, pour des sols de dimensions supérieures à 5 mm et inférieures à 20 mm ($\Phi_{\text{moule}} = 152 \text{ mm}$ /Hde sol = 152 mm).

Avec chacun de ces moules, des énergies normalisées de compactage peuvent être appliquées selon le type d'essais Proctor, l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié.

Pour les essais Proctor réalisés dans le cadre de cette étude, le moule Proctor, une dame appelée dame Proctor modifiée avec une hauteur de chute de 457 mm, une masse de l'équipage mobile de 4 535 g ont été utilisés.

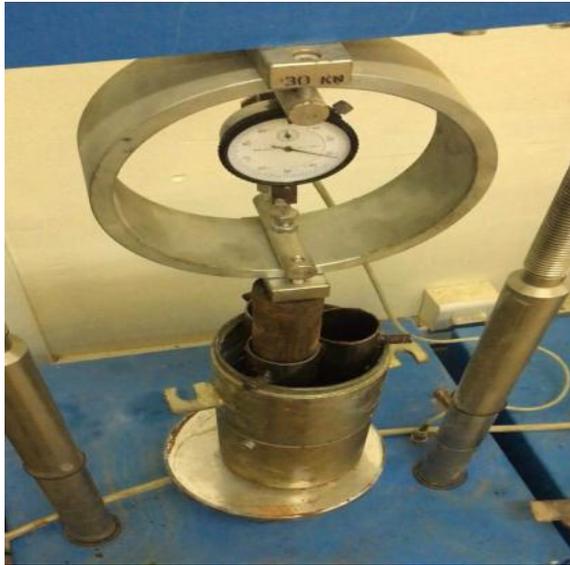
2.5.2.2. Essai de compression uniaxiale

L'essai de compression uniaxiale a été exécuté selon les procédures décrites dans la norme NF P 94 - 077 [187], en utilisant l'appareil triaxial, figure 2.11. Une fois les éprouvettes d'essai confectionnées, suivant les étapes citées dans la première partie de ce chapitre, l'essai a été effectué sur les blocs de terre vierge et stabilisée après une cure de 7 jours et une de 28 jours, ainsi que sur des blocs après une cure plus une imbibition de 24 heures. L'essai s'est déroulé comme suit :

- l'échantillon a été placé dans le dispositif de chargement de manière à ce qu'il soit centré sur le plateau inférieur ;
- le dispositif a été ajusté pour le chargement avec précaution, afin que la platine supérieure entre en contact avec l'échantillon ;
- l'indicateur de déformation a été mis à zéro pour enregistrer la lecture initiale du dispositif de déformation électronique ;
- la charge a été appliquée de manière à produire une déformation axiale, à un taux de 1/2 à 2 % / min. Les valeurs de charge, de déformation et de temps ont été enregistrées à

des intervalles suffisants pour définir la forme de la courbe contrainte-déformation (généralement, 10 à 15 points suffisent) ;

- une charge a été appliquée jusqu'à ce que les valeurs de charge diminuent avec la déformation croissante ou jusqu'à ce que la déformation de 15 % soit atteinte.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2. 11 : Procédure d'écrasement des éprouvettes destinées à la résistance à la compression.

a- Extraction des éprouvettes,

c-Installation de la cellule dans la presse.

b-Installation de l'éprouvette.

d-Éprouvette après écrasement.

2.5.3. Essais et tests de durabilité

2.5.3.1. Test d'humidification-séchage

Le test a été effectué sur des échantillons compactés de blocs de terre

non traité et traité, figure 2.12. Le test consiste à appliquer des cycles d'humidification - séchage selon la norme (ASTM D 559) [182], après une période de maturation de 7 et 28 jours. L'application des cycles consiste à immerger tous les échantillons dans l'eau pendant 5 heures, puis à les retirer et à les peser. Ensuite, les échantillons sont séchés dans une étuve à une température de $71 \pm 3^\circ\text{C}$ pendant 42 heures, puis retirés et pesés. Un cycle consiste en 5 heures d'immersion, 42 heures de séchage, 1 heure de manipulation. L'opération est répétée pour un total de 12 cycles, pour les échantillons. La perte de poids après chaque cycle est déterminée par la relation suivante :

$$\text{Perte de la masse (\%)} = \frac{\text{Masse après cure} - \text{Masse après cycle}}{\text{Masse après la cure}}$$



Figure 2.12 : Étapes de l'essai de séchage - mouillage (séchage dans l'étuve).

2.5.3.2. Essai d'absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13 - 901 [22]. Le principe est d'immerger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm, figure 2.11. Le coefficient d'absorption d'eau (C_b) correspond au taux d'absorption, après un temps égal à 10 min. Le coefficient d'absorption d'eau (C_b) est exprimé par la formule suivante :

$$C_{abs} = \frac{Pe}{S \cdot \sqrt{t}}$$

Où, C_{abs} est le coefficient d'absorption d'eau, Pe est la masse d'eau absorbée par le bloc pendant 10 min (durée de l'essai), S est la surface de l'échantillon immergé dans l'eau et t est le temps (S) qui égale 10 min.

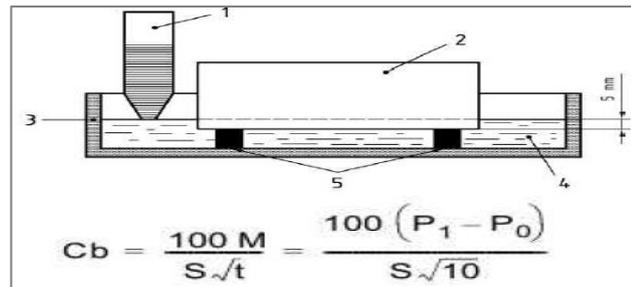


Figure 2.13 : Principe de l'essai d'absorption capillaire.

2.5.3.3. Essai d'érosion

Ce test est un essai empirique, développé par l'Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-CSIRO), conformément à la norme australienne de simulation de l'action de la pluie. Un essai d'érosion sous pression (essai d'érosion accélérée) a été effectué pour déterminer la résistance de l'échantillon à une pluie continue. Cette méthode a été utilisée parce qu'elle est plus représentative des conditions de terrain, telles que les pluies qui provoquent l'érosion des structures en terre. Le but de cet essai est de déterminer la capacité des blocs à résister à l'érosion qui peut être causée par des pluies continues.

Cet essai a été réalisé conformément à la section D de la norme néo-zélandaise. Le banc d'essai, figure 2.14, a été installé avec le panneau de protection, placé dans le bain de plastique et la buse de pulvérisation sous pression, placée sur le bain, à une distance de 470 mm du bouclier. Chaque bloc a été monté derrière un mince écran et exposé à la pulvérisation par un trou de 100 mm de diamètre. Le bouclier garantit que seule une partie limitée de la face du bloc, est soumise à la pulvérisation d'eau. L'eau du robinet a été raccordée à la buse de pulvérisation sous pression, puis ouverte à une pression de 50 kPa par la buse, sur le bloc. L'eau a été pulvérisée sur la surface exposée du bloc et évacuée par la sortie du bain de plastique. La profondeur de l'érosion a été mesurée à l'aide d'un évier.

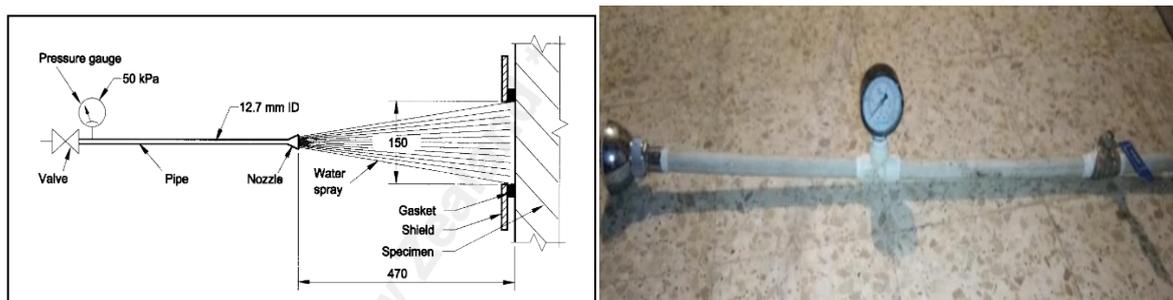


Figure 2.14 : Arrangement général des essais d'érosion sous pression.

2.5.3.4. Essai d'abrasion

La résistance à l'abrasion des blocs de terre comprimée est réalisée selon la norme expérimentale NF XP 13 - 901 [22]. L'objectif est de soumettre la brique à une friction à l'aide d'une brosse métallique de 25 mm de large. La cadence aller-retour sur cette face de parement est de 1 aller-retour par seconde pendant une minute, soit 60 allers-retours par seconde. À partir de cet essai, le coefficient d'abrasion (Ca) du bloc est déduit, il représente la perte du matériau liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion. La figure 2.15 présente le principe de l'essai d'abrasion, où (Ca) est le coefficient d'abrasion de la brique, S est la surface d'abrasion de la brique en cm^2 , m_0 est la masse initiale de la brique, avant abrasion en gramme et m_1 est la masse de la brique, après l'essai d'abrasion en gramme.

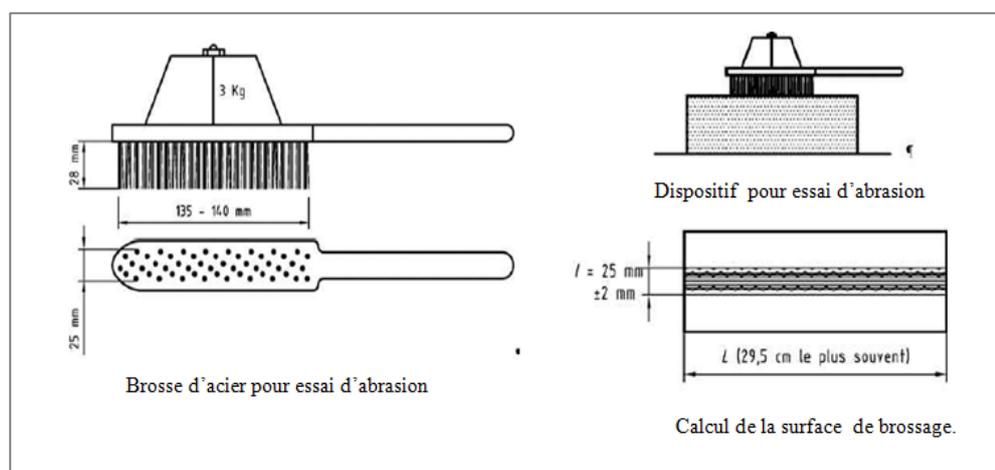


Figure 2.15 : Principe de l'essai de l'abrasion.

La norme expérimentale indique des coefficients de base permettant de classer une brique de terre crue suivant sa résistance à l'abrasion, tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Résistance à l'abrasion des BTC (NF XP 13-901) [22].

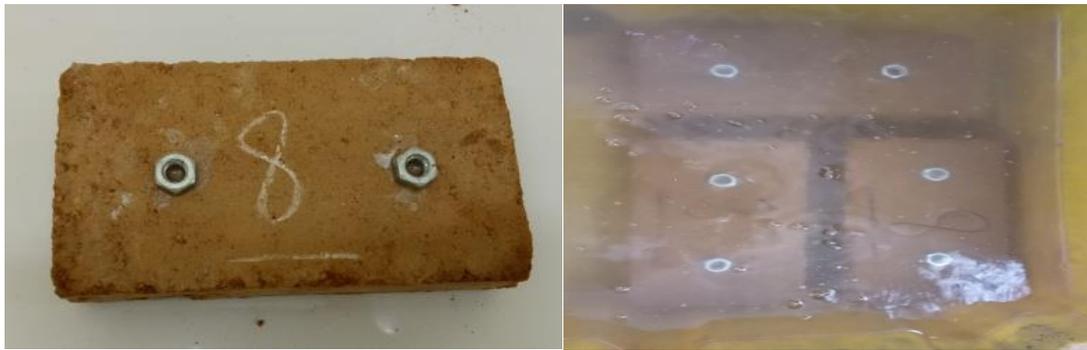
Blocs pleins	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Coefficient d'abrasion minimal (Ca) cm^2/g	2	5	7

2.5.3.5. Essai de gonflement

Le gonflement des blocs de terre comprimée est effectué selon la norme XP 13 - 901 [22]. Le principe de l'essai consiste à mesurer l'allongement entre deux plots fixés au bloc à l'aide d'une résine, après une immersion de 96 heures, figure 2.16. L'ampleur du gonflement de chaque bloc, est donnée par la formule suivante :

$$D_{lg} (mm/m) = (l_1 - l_0) / l_0$$

Où, l_0 est la distance avant immersion et l_1 est la distance après immersion.



(a)

(b)

Figure 2.16 : Essai de gonflement.

a- Les éprouvettes réalisées pour l'essai de gonflement. b- Les blocs immergés dans l'eau.

2.5.3.6. Essai de retrait

Le retrait des blocs de terre comprimée est effectué conformément à la norme expérimentale NF XP 13-901 [22]. L'essai consiste à suivre l'évolution du raccourcissement de la longueur de l'échantillon de bloc de terre, en fonction du temps, à l'aide d'un étrier. Le retrait de chaque bloc, est donné par la formule suivante :

$$D_{IR} (mm/m) = (l_F - l_i) / l_i$$

Où, l_0 est la distance initiale et l_1 est la distance finale après chaque mesure.



Figure 2.17 : Essai de retrait.

2.5.3.7. Essai de conductivité thermique

La conductivité thermique k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) a été mesurée à l'aide d'un appareil CT-mètre commercial, figure 2.17. La technique utilisée par cet appareil est le fil chaud transitoire selon la norme ISO 8894-1: 1987 [183]. La méthode du fil chaud est l'une des méthodes transitoires utilisées pour mesurer la conductivité thermique d'un bloc de terre. Les mesures sont effectuées avec une sonde à fil chaud, qui est une résistance chauffante avec un capteur mesurant la température dans un état transitoire. La sonde est placée entre deux blocs à facettes lisses pour éviter le contact avec l'air. La conductivité thermique du bloc de terre est finalement calculée à partir de la variation de la température dans le temps et de la puissance du courant électrique. À cet effet, le fil et le thermocouple sont installés dans une sonde fine et longue.



Figure 2.18 : CT-mètre.

CHAPITRE III : RÉSULTATS

3.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus des différents tests, décrits dans le chapitre précédent, effectués sur les échantillons de terre crue, à base de sol limoneux et argileux, seuls et en combinaison avec les différents additifs utilisés. Les résultats de la composition minéralogique de la terre crue, des additifs et ceux des essais physiques effectués sur les échantillons de terre crue, ainsi que celle stabilisée avec différentes combinaisons d'ajouts, de chaux, de ciment, de laitier et de fibres en paille de blé, sont présentés en premier. Ils sont suivis, des résultats obtenus, à partir des essais mécaniques, de durabilité et de conductivité thermique. Ces résultats seront discutés dans le chapitre 4.

A- Terre à base de sol limoneux

3.2. Essais physiques et minéralogique

3.2.1. Granulométrie

La courbe granulométrique de la terre à base de sol limoneux, utilisé pour la réalisation des blocs de terre comprimée, est donnée dans la figure 3.1.

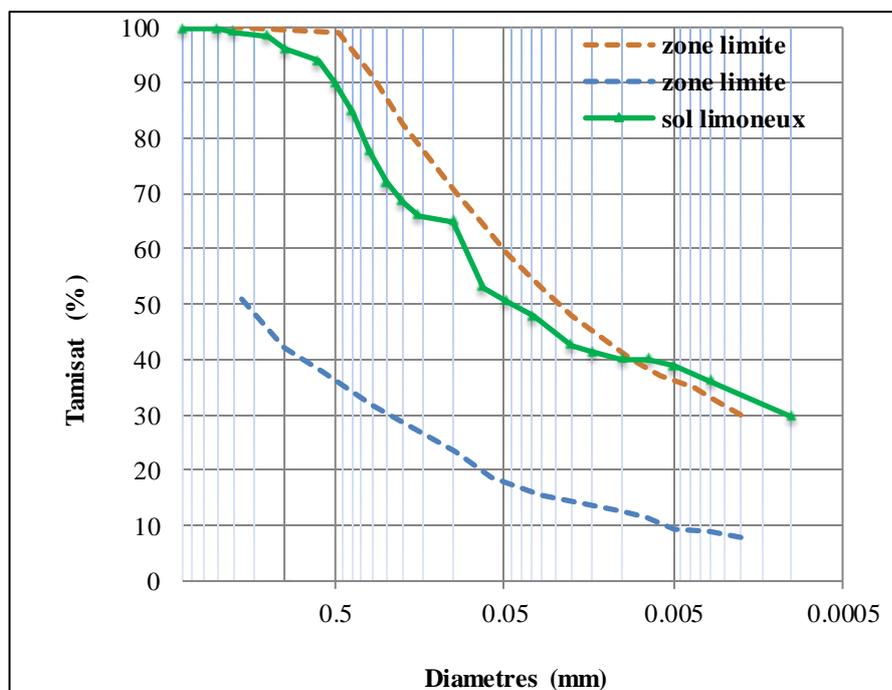


Figure 3.1 : Courbes granulométriques de sol limoneux

Les résultats montrent que la courbe se situe dans la zone limite recommandée par la norme XP P 13-901, pour les blocs de terre comprimée. Suivant la répartition des fractions granulaires, les résultats obtenus indiquent que la terre à base de sol limoneux est constituée principalement d'une fraction argileuse de 30%, limoneuse de 35% et sableuse de 35%.

3.2.2. Composition minéralogique

3.2.2.1. Terre à base de sol limoneux

Le diffractogramme obtenu par l'essai de diffraction aux rayons X, sur un échantillon de terre à base de sol limoneux, est représenté dans la figure 3.2.

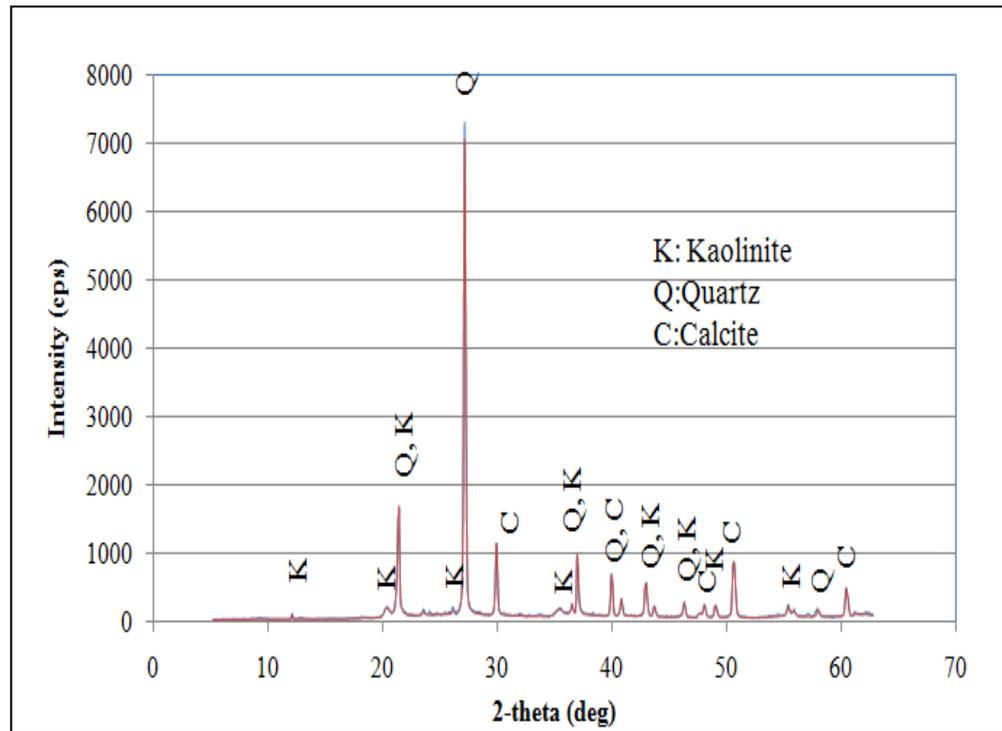


Figure 3.2 : Spectre de la DRX de sol limoneux.

Les résultats révèlent que la terre à base de sol limoneux est constituée de calcite, de quartz et de minéraux argileux, représentés par de la kaolinite. La composition minéralogique estimative est évaluée sur la base des résultats chimiques. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Analyse minéralogique des sols.

	Calcite	Quartz	Kaolinite
<i>Compositions minéralogiques en %</i>	61	31	2.5

3.2.2.2. Laitier

Le diffractogramme obtenu par l'essai de diffraction aux rayons X, sur un échantillon de laitier, est représenté dans la figure 3.3.

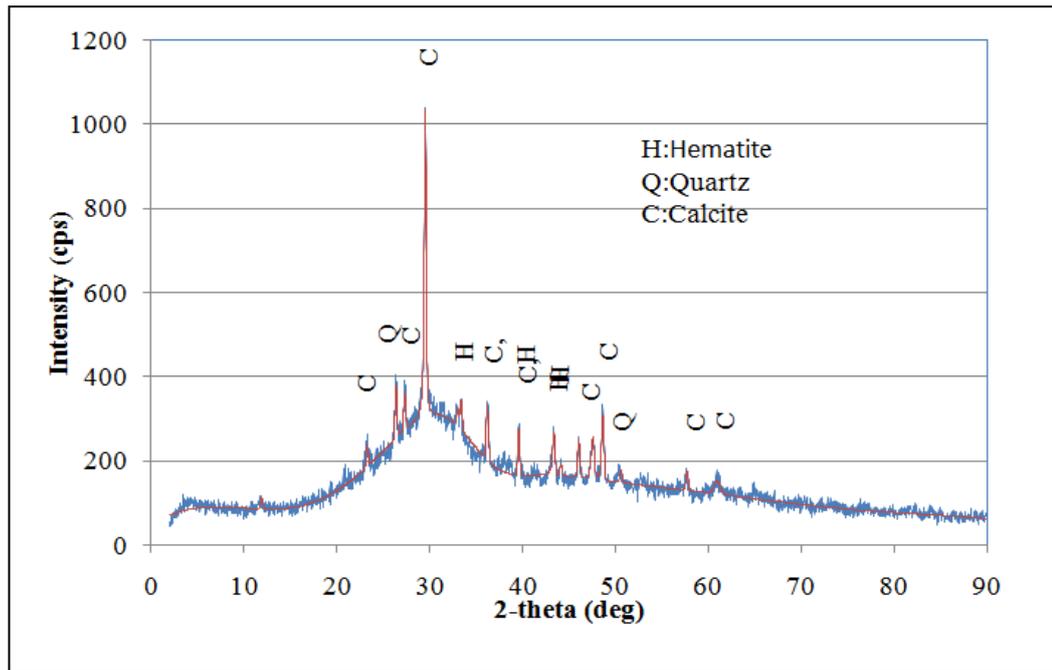


Figure 3.3 : Spectre de la DRX du laitier.

Les résultats révèlent que le laitier contient de faibles quantités de phases cristallisées. Ces dernières sont représentées sous forme de calcite, de quartz et d'hématite.

3.2.2.3. Ciment

Selon la fiche technique, la composition minéralogique du ciment utilisé dans cette étude est présentée dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Composition minéralogique du ciment.

	C3S	C2S	C3A	C4AF
Compositions %	58-64	12-18	6-8	10-12

3.2.3. Observations microscopiques par MEB

3.2.3.1. Terre à base de sol limoneux

L'image obtenue à partir de l'analyse microscopique, au microscope électronique à balayage (MEB), d'un échantillon de terre à base d'un sol limoneux est représentée dans la figure 3.4.

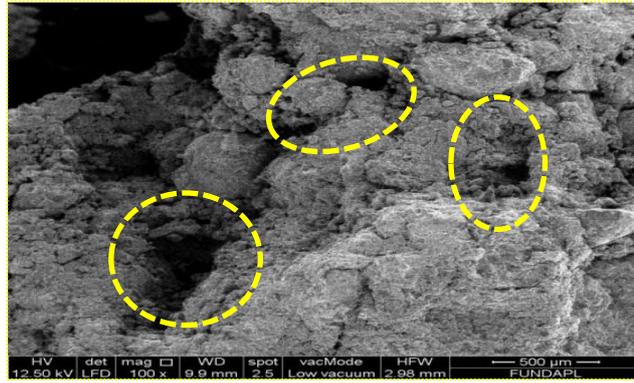


Figure 3.4 : Observation microscopique de sol limoneux par MEB.

L'image montre une structure hétérogène, avec la présence de fissures et de grands pores.

3.2.3.2. Paille de blé

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon de la paille de blé est représentée dans la figure 3.5.

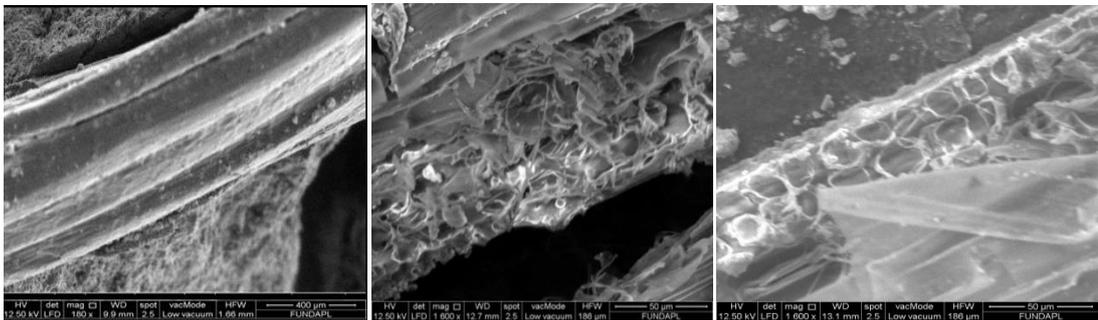


Figure 3.5 : Observation au MEB des fibres de la paille de blé.

(a) MEB de paille de blé de taille réduite. (b) Surface centrale agrandie d'une paille de blé. (c) Section transversale.

L'image montre que la paille de blé présente un motif complexe, avec l'existence de plusieurs pores, répartis à travers l'ensemble de la surface, impliquant une porosité à l'ensemble de la structure. Cette structure profère à la fibre un comportement hydrophile.

3.2.4. Coefficient d'absorption de la paille de blé

La courbe présentée dans la figure 3.6 illustre l'évolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, d'une paille de blé. L'analyse de cette figure montre l'existence de deux phases

- une première phase d'absorption de surface, qui s'étend de 0 à 15 minutes et qui provoque une augmentation très rapide de la masse de la paille de blé ce qui révèle la nature très hydrophile de ces fibres végétales.
- une deuxième phase qui correspond à une absorption, plus lente de l'eau.

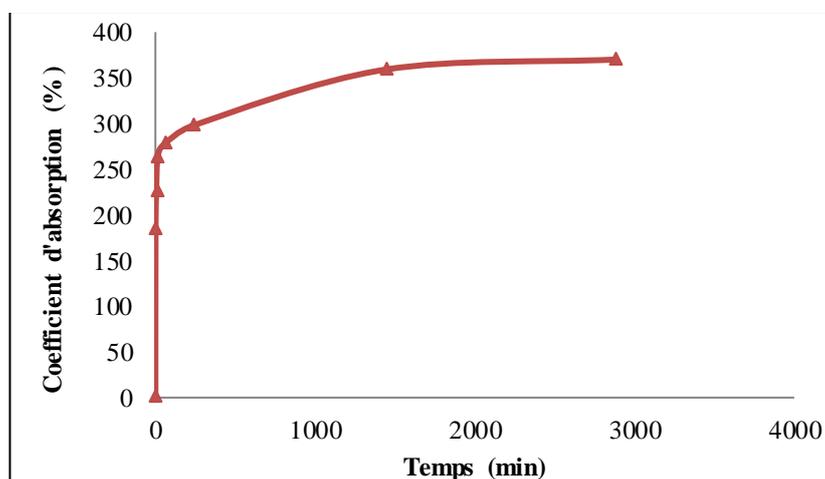


Figure 3.6 : Coefficient d'absorption d'eau de la paille de blé.

3.2.5. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont exprimées en termes de limite de liquidité (LL), de limite de plasticité (PL), d'indice de plasticité (PI) et de limite de retrait (W_s). Leur détermination est nécessaire, car elle représente un indice très important pour la classification et la caractérisation des sols fins et permet également une meilleure compréhension de leur comportement.

3.2.5.1. Terre à base de sol limoneux

Les valeurs des limites de plasticité (W_p), de liquidité (W_L), de retrait (W_s) et de l'indice de plasticité (IP) de la terre à base de sol limoneux obtenues, sont présentées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Limites d'Atterberg de sol étudié.

	Limite de retrait (%)	Limite de plasticité (%)	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité (%)
Terre à base de sol limoneux	10	16.9	30.2	13.3

La projection des résultats du test de plasticité sur les nomogrammes de plasticité, renfermant les zones recommandées de l'indice de plasticité par rapport à la limite de liquidité, présentés dans la figure 3.7, montre que la terre à base de sol limoneux utilisée, se situe dans la zone limite de la limite de liquidité et celle de l'indice de plasticité, selon la norme XP P 13-901. Cela, permet d'affirmer que la terre à base de sol limoneux présente une plasticité tout à fait adaptée à la production des blocs de terre comprimée.

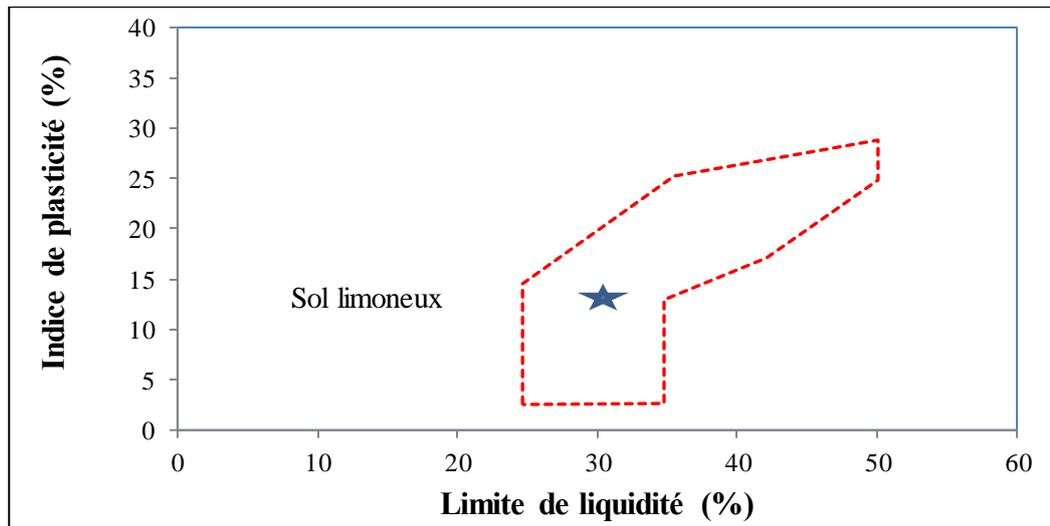


Figure 3.7 : Diagramme de plasticité (Norme XP P 13-901).

3.2.5.2. Mélange (Terre – laitier)

Les résultats de la variation des limites d'Atterberg de la terre à base de sol limoneux, en fonction de la quantité de laitier rajoutée, sont présentés dans la figure 3.8.

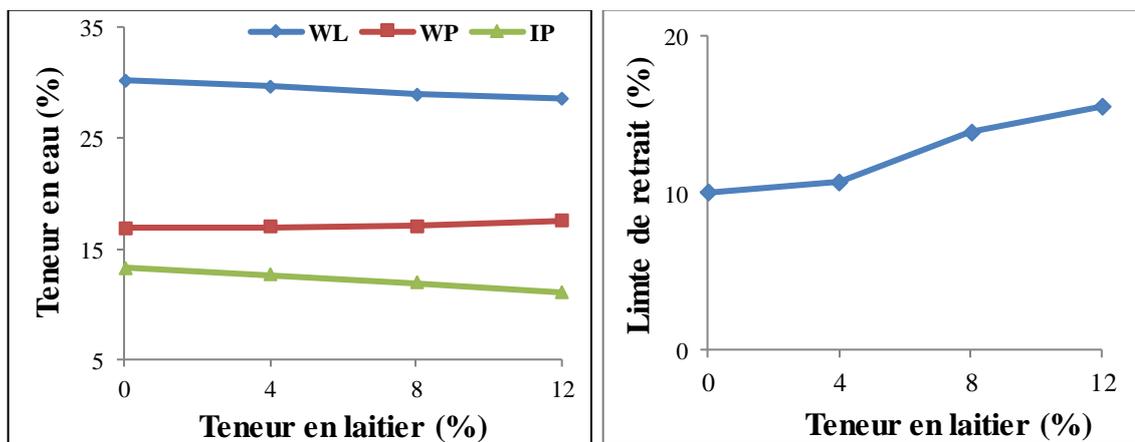
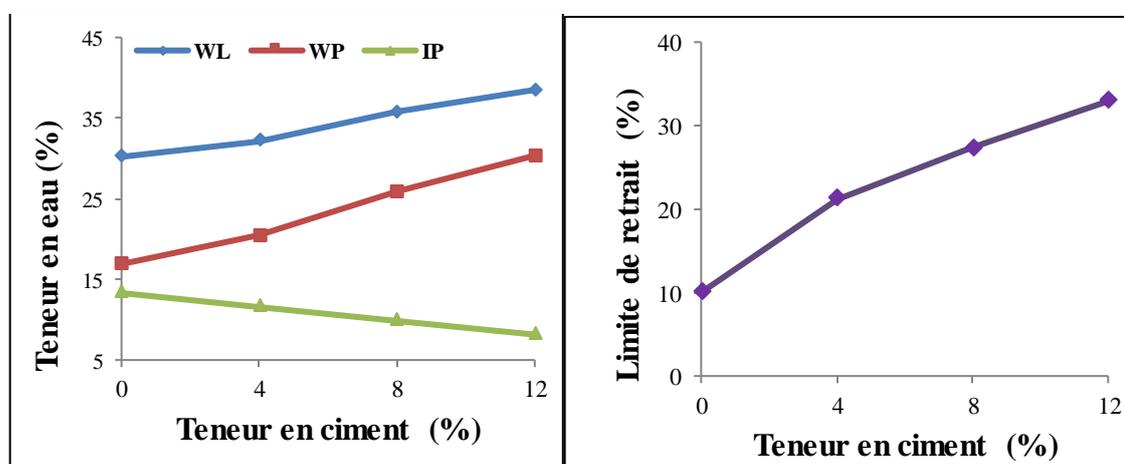


Figure 3.8 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de laitier additionnée. (a- WL, WP et IP. b- Ws.)

Les résultats montrent que la limite de plasticité augmente et la limite de liquidité de la terre à base de sol limoneux diminue avec l'augmentation du pourcentage de laitier additionné. Cela entraîne une diminution de l'indice de plasticité. Quant à la limite de retrait (Ws), les résultats, montrent une augmentation de la limite de retrait avec l'augmentation de la teneur en laitier additionnée. À titre d'exemple, l'addition de 12 %, augmente la limite de retrait jusqu'à 54 %.

3.2.5.3. Mélange (Terre - ciment)

La variation de la limite de liquidité, de la limite de plasticité de l'indice de plasticité et de la limite de retrait de la terre à base de sol limoneux, en fonction de la quantité de ciment ajoutée, est donnée dans la figure 3.9 (a - b).



(a)

(b)

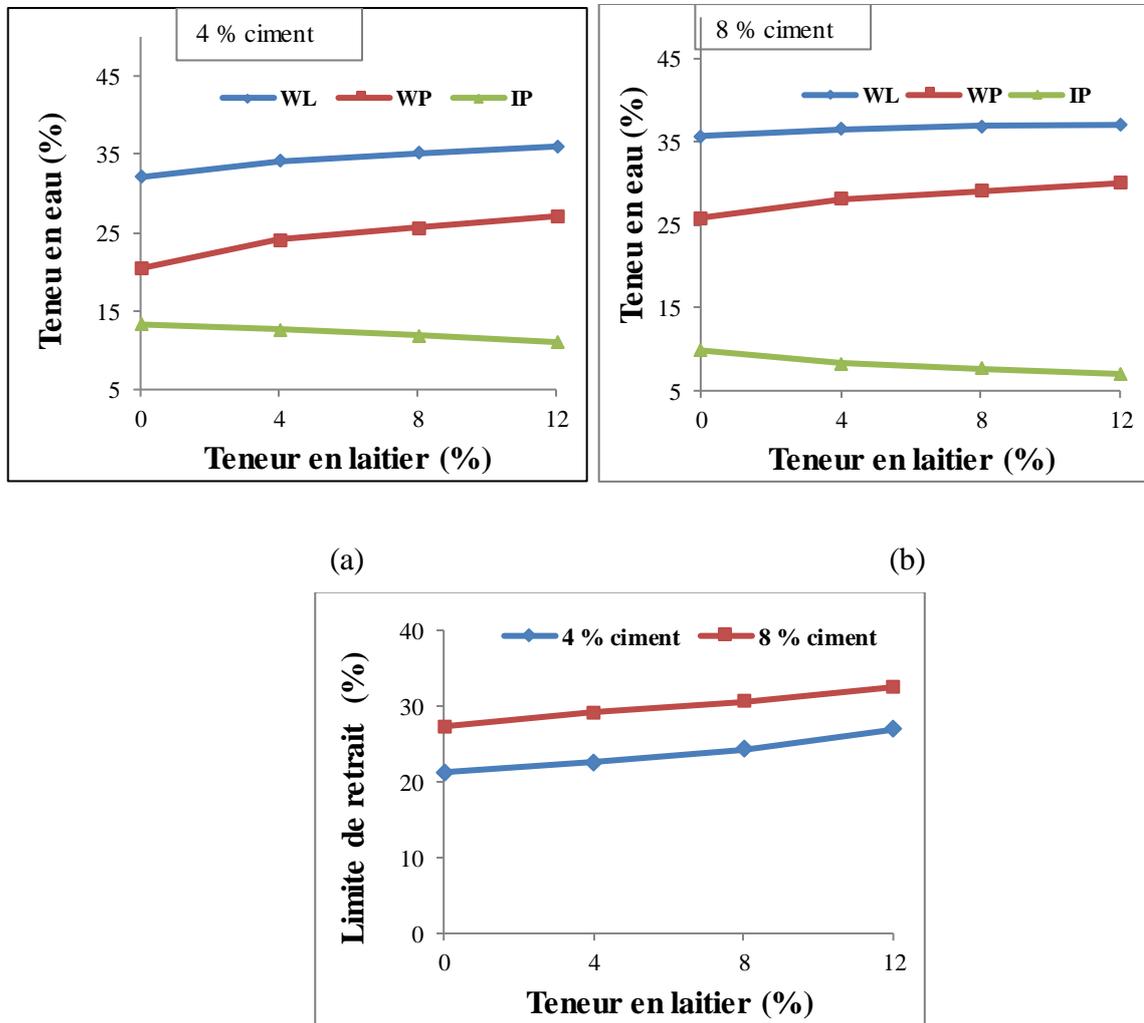
Figure 3.9 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment additionnée. (a- WL, WP .et IP. b- Ws)

Les résultats montrent que l'ajout du ciment à la terre à base de sol limoneux entraîne une diminution de l'indice de plasticité, suite à une augmentation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité. La diminution des valeurs de l'indice de plasticité à 12,5%, 25,8 %, 38,7 % par l'addition 4 %, 8% et 12 % de ciment est obtenue. En ce qui concerne la limite de retrait, l'ajout du ciment conduit à une augmentation de la limite de retrait de 10 %, à 21.27 %, 27.32 % et 32.92 % lorsque la teneur en ciment augmente de 0 % à 4 %, 8% et 12 %.

3.2.5.4. Mélange (Terre - ciment – laitier)

Afin de voir l'effet du ciment mélangé avec du laitier sur la plasticité de la terre à base de sol limoneux, huit mélanges de ciment et de laitier ont été étudiés. En termes de

pourcentages, (4 %, 8 %) de ciment plus (0, 4 %, 8 % et 12 %) de laitier ont été utilisés. La variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de laitier rajoutée pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de ciment, est donnée dans la figure 3.10.



(c)
Figure 3.10 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.

a- WL, WP et IP (4 % ciment +laitier). b- WL, WP et IP (8 % ciment +laitier). c- Ws (4 % ciment +laitier, 8 % ciment +laitier).

La figure 3.10 (a-b) montre une augmentation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité, avec l'augmentation des pourcentages de laitier de 4 % à 12%, pour les échantillons traités à 4% et 8% de ciment. Cette augmentation dans les limites de plasticité et de liquidité de la terre entraîne une diminution de l'indice de plasticité. La terre à base de sol limoneux traitée avec 8 % de ciment et mélangée avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier présente une réduction plus prononcée de la plasticité, comparativement à la terre traitée avec 4 % de

ciment plus 4 %, 8 % et 12 % de laitier. En termes de valeurs, la plasticité est respectivement varié de 12.67 % à 11.88 % et 11.05 % et de 8.34 % à 7.73 % et 7.02 % pour la terre traité à 4 % et 8% de ciment, mélangé avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier.

Pour ce qui est de la limite de retrait, figure 3.10 (c), une augmentation de cette limite est observée avec l'augmentation de la teneur en laitier, pour la terre traitée à 4 % et 8 % de ciment. L'augmentation la plus prononcée est observée avec les échantillons de terre traitée à 8 % de ciment et mélangée avec différentes teneurs en laitier. À titre d'exemple, pour la terre traitée à 8 % de ciment et mélangée avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier, les valeurs de la limite de retrait varient respectivement de 29.11 % et 30.55 % et 32.5 comparées à 22.52 % et 24.32 % et 26.89 % pour la terre traitée à 4 % de ciment et mélangée avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier

3.2.5.5. Mélange (Terre – chaux)

Les résultats des limites d'Atterberg pour la terre à base de sol limoneux traitée à 0 %, 4 %, 8 % et 12 % de chaux sont représentés sur la figure 3.11.

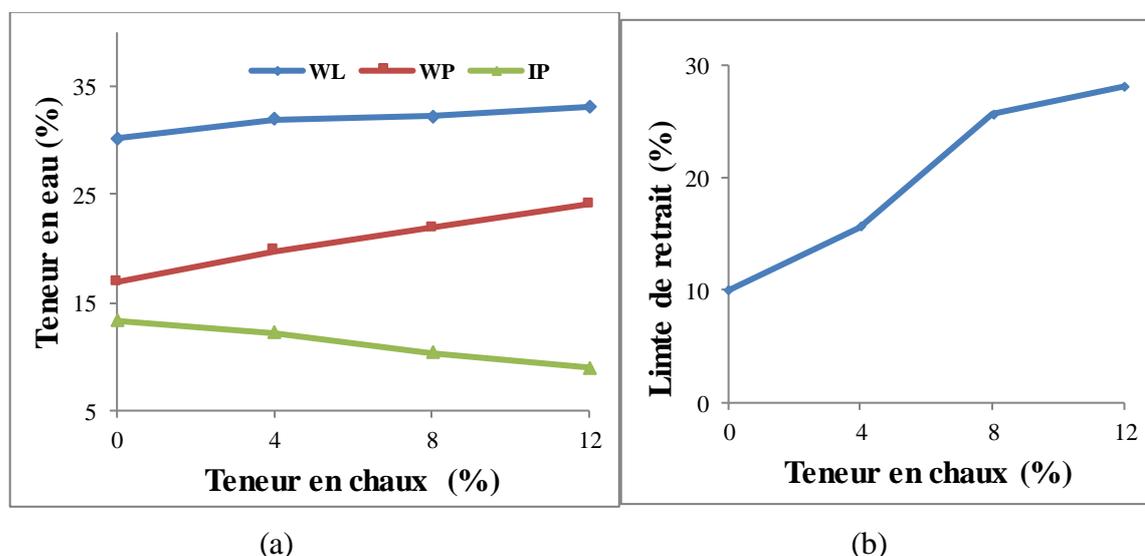


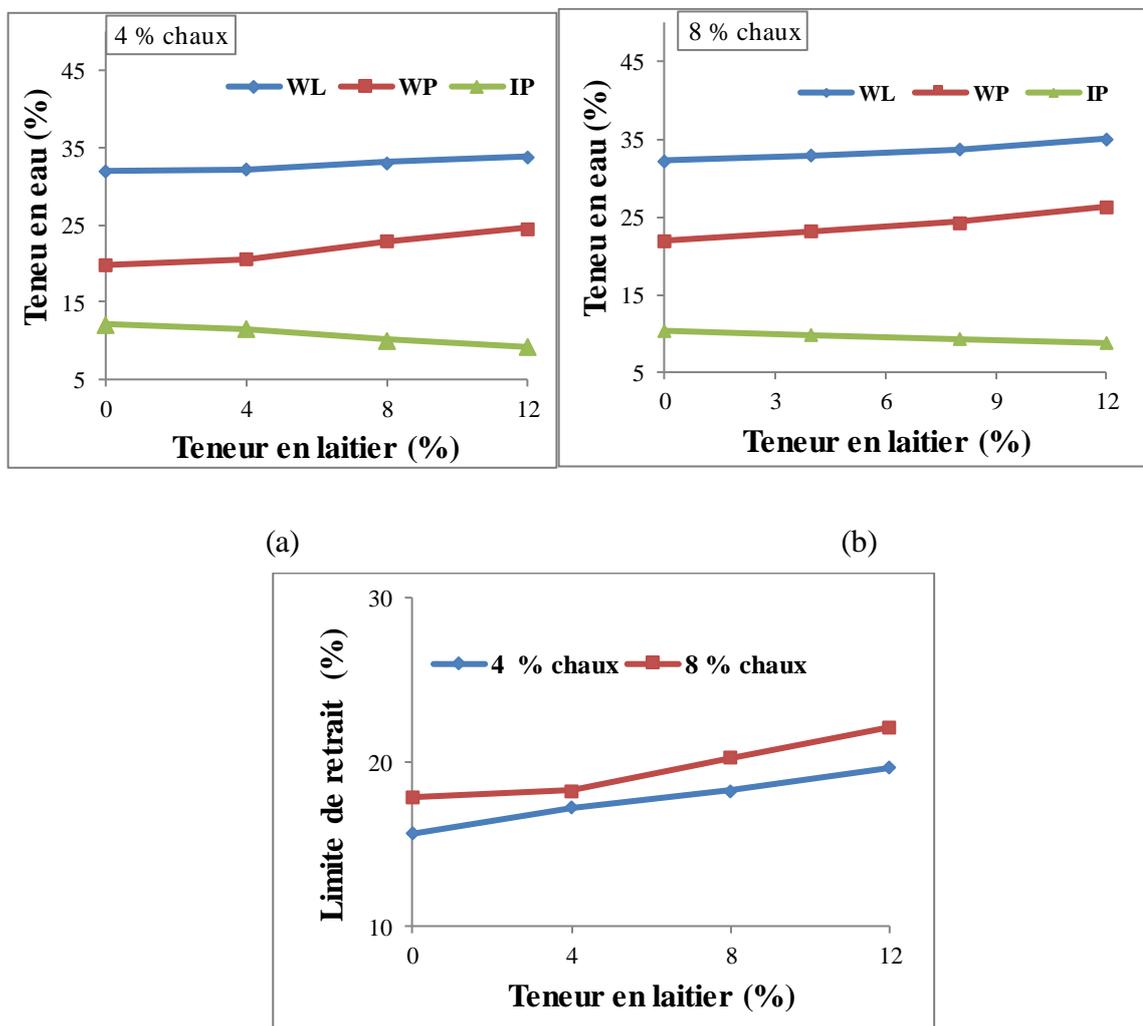
Figure 3.11 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée. (a- WL, WP et IP. b- Ws.)

Le graphe donné dans la figure 3.11 (a) montre clairement qu'une augmentation des proportions de chaux engendre une augmentation de la limite de liquidité, avec une augmentation plus accentuée de la limite de plasticité et, par conséquent une diminution de l'indice de plasticité. Il est clair que l'addition de 12 % de chaux est suffisante pour augmenter la maniabilité de la terre à base du sol limoneux étudiée, en réduisant l'indice de plasticité de 13.3 % à 8.99 %.

Les résultats de la limite de retrait sont donnés dans la figure 3.11-b. Le graphe montre que la limite de retrait augmente avec l'augmentation du dosage de chaux. Les valeurs augmentent de 10 % à 15.62 %, 25.64 % et 28.12 % lorsque la teneur en chaux augmente de 0% à 4%, 8 % et 12 %.

3.2.5.6. Mélange (Terre- chaux - laitier)

La figure 3.12 présente les résultats de l'effet de différentes teneurs en laitier (4 %, 8 % et 12 %) sur la variation des limites d'Atterberg de la terre à base de sol limoneux, traité avec 4 % et 8 % de chaux.



(c)
 Figure 3.12 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.
 (a- WL, WP et IP (4 % chaux +laitier). b- WL, WP et IP (8 % chaux +laitier). c- Ws (4 % chaux +laitier, 8 % chaux +laitier))

Une augmentation dans les valeurs des limites de plasticité, de liquidité et une réduction dans les valeurs de l'indice de plasticité, avec l'augmentation des pourcentages de laitier ajouté, pour la terre traitée à 4 % et 8 % de chaux, est observée, figure 3.12 (a-b). Une plus grande réduction dans la plasticité est obtenue pour la terre traitée à 8 % de chaux et mélangée avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier. Des valeurs de l'indice de plasticité de 11.6 %, 10.18 % et 9.2 % et de 9.76 %, 9.32 % et 8.75 % sont enregistrées respectivement pour la terre traitée à 4 % de chaux, et 8 % de chaux et mélangée avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier.

Il en est de même pour la limite de retrait, une augmentation de la limite de retrait en fonction de l'augmentation de la quantité de laitier rajoutée est observée pour la terre traitée à 4 % et 8 % de chaux, figure 3.12 (c). Une plus grande réduction dans le retrait est obtenue avec la terre traitée à 8 % de chaux et mélangée avec 4, 8 et 12 % de laitier. Les valeurs de la limite de retrait passent de 15,62 % à 17.24 %, 18.28% et 19,63 % et de 17,85 % à 18.25 %, 20.25 % et 22,11 %, lorsque la teneur en laitier augmente de 0 à 4 %, 8 % et 12 % pour la terre traitée à 4 % et 8 % de chaux respectivement.

3.3.Essai mécanique

3.3.1. Essai Proctor

Le test permet de déterminer les caractéristiques optimales de compactage d'un matériau. Ce test consiste à déterminer, pour une énergie de compactage donnée la teneur en eau (W) donnant la densité sèche maximale d'un matériau.

3.3.1.1. Terre à base de sol limoneux

Les résultats de l'essai de compactage (Proctor Modifié) de la terre à base de sol limoneux sont présentés sur la figure 3.13.

La courbe Proctor obtenue permet de déterminer la valeur de la teneur en eau optimale correspondant à la valeur de la densité sèche maximale de la terre à base de sol limoneux utilisée. La valeur de la teneur en eau optimale est de 10%, correspondant à une densité sèche maximale de 19.8 kN/m³.

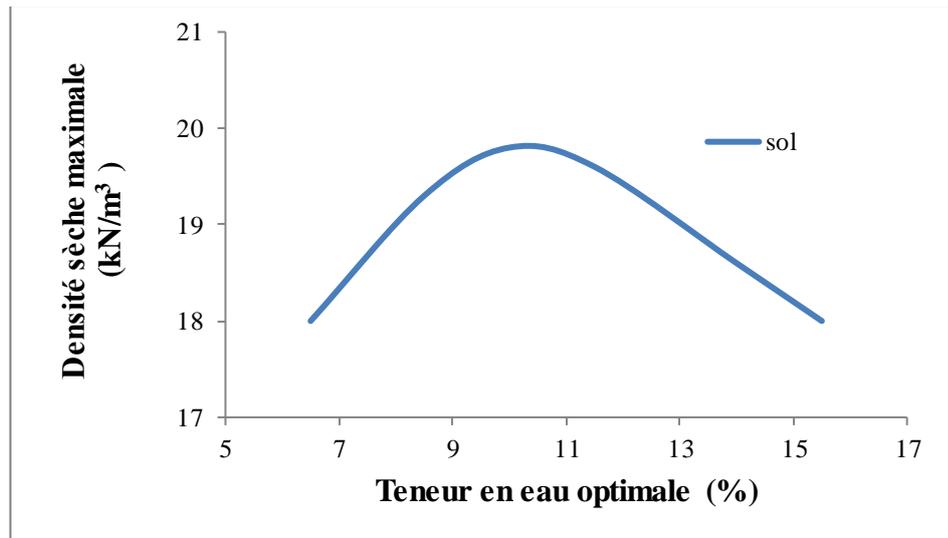


Figure 3.13 : Courbe Proctor du sol de base.

3.3.1.2. Mélange (terre – laitier)

Les résultats des essais de compactage sur la terre à base de sol limoneux mélangée avec diverses quantités de laitier (4 %, 8 % et 12 %) sont donnés dans la figure 3.14.

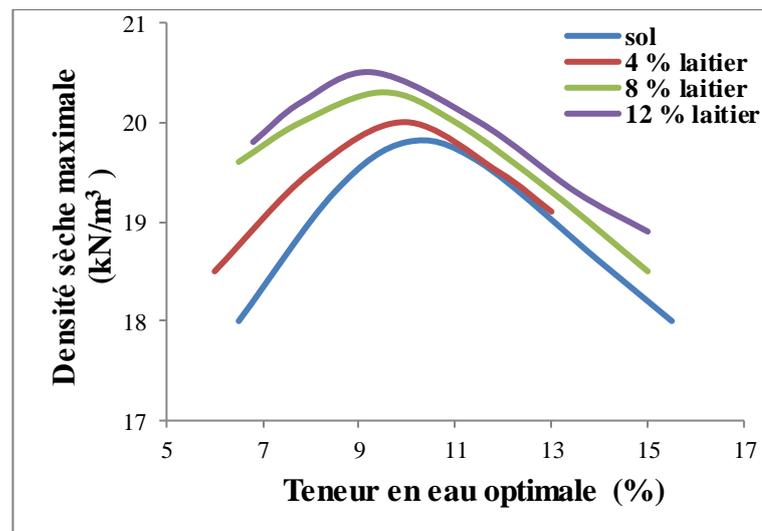


Figure 3.14 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de laitier additionnée.

Les résultats présentés dans la figure 3.14 montrent une augmentation de la densité sèche maximale et une diminution de la teneur en eau optimale avec l'augmentation de la teneur en laitier, pour le même effort de compactage.

3.3.1.3. Mélange (terre – ciment)

Les résultats des essais de compactage sur la terre à base de sol limoneux traitée à 4 %, 8 % et 12 % de ciment sont présentés sur la figure 3.15.

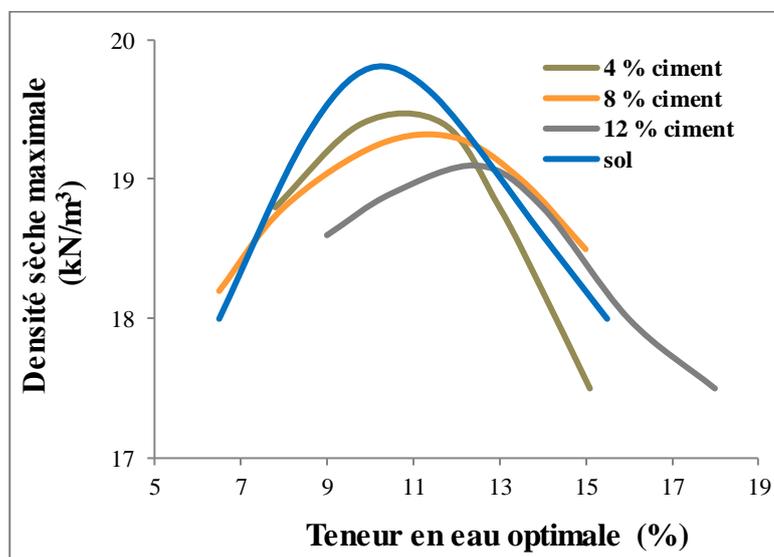


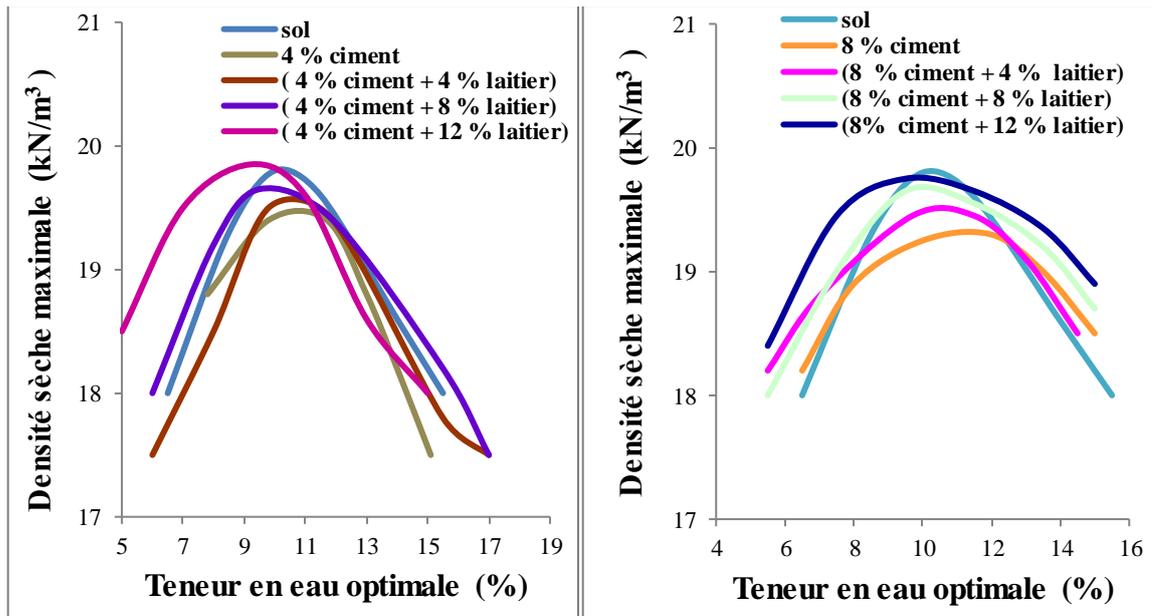
Figure 3.15 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de ciment additionnée.

Contrairement au laitier, une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale, avec l'augmentation des dosages de ciment sont notées. Les valeurs de la densité diminuent de 19.8 kN/m^3 à 19.5 kN/m^3 , 19.3 kN/m^3 et 19.1 kN/m^3 pour le sol traité à 4 %, 8 % et 12 % de ciment respectivement.

3.3.1.4. Mélange (terre - ciment- laitier)

Les courbes de compactage de la terre à base de sol limoneux traitée respectivement à 4 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier et 8 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier sont représentées sur la figure 3.16.

Sur la base des résultats obtenus, une augmentation de la densité sèche maximale et une diminution de la teneur en eau optimale, avec l'accroissement du dosage en laitier pour la terre traitée à 4 % et 8 % de ciment sont observées.



(a)

(b)

Figure 3.16 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.

a- (4 % ciment +laitier). b- (8 % ciment +laitier).

À titre d'exemple, pour le même effort de compactage, la teneur en eau de la terre traitée à 8% de ciment seul est réduite de 11.5 % à 9.4 %, lorsque la teneur en laitier varie de 0 à 12 %, soit une réduction de 10.68 %. La densité sèche maximale augmente de 19.3 kN/m^3 à 19.75 kN/m^3 , soit une augmentation de 2.33 %. L'augmentation de la densité sèche est plus importante pour la terre traitée à 4 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier, que pour celui traité à 8 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier.

3.3.1.5. Mélange (terre – chaux)

Les résultats de l'essai de compactage sur la terre à base de sol limoneux et celle traitée à 4 %, 8 % et 12 % de chaux, sont donnés dans la figure 3.17.

Comme il peut se voir sur cette figure, le rajout de la chaux, tend à augmenter la teneur en eau optimale et à réduire la densité sèche maximale, avec l'augmentation de la quantité de chaux. Pour un même effort de compactage, la teneur en eau optimale de la terre est passée de 10 % à 12.3 %, avec un mélange de chaux de 12 %, soit un accroissement de 23%. La densité sèche maximale diminue de 19.8 kN/m^3 à 19.2 kN/m^3 , soit une réduction de 3 %. Cette réduction est considérée comme une indication de l'amélioration des caractéristiques de compactage.

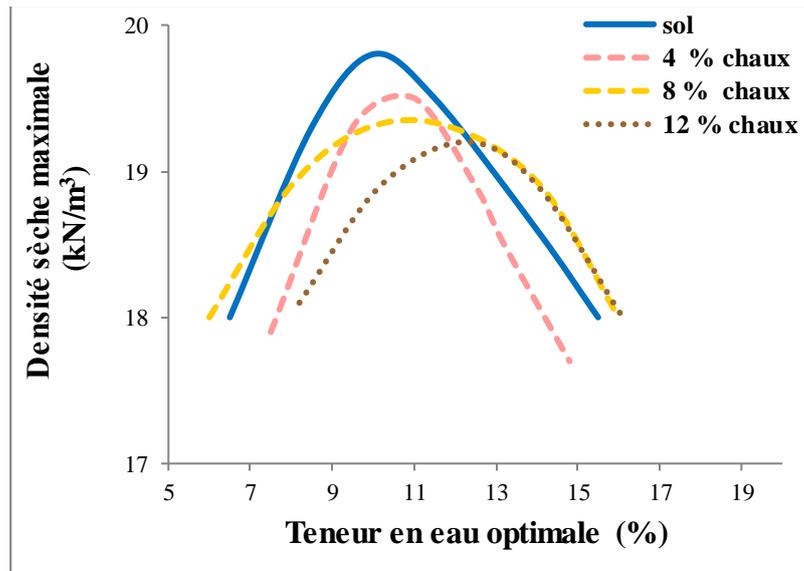
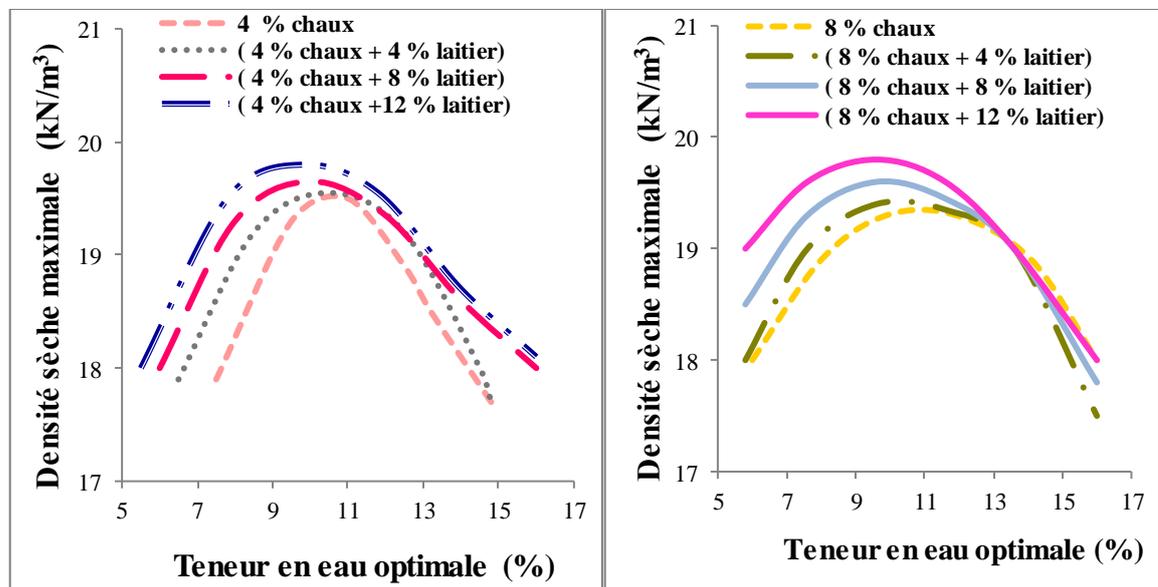


Figure 3.17 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de la chaux additionnée.

3.3.1.6. Mélange (terre – chaux- laitier)

Les résultats de l'essai de compactage sur la terre à base de sol limoneux traitée à 4 % et 8% de chaux et à 4% plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier et 8 % chaux plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier sont donnés dans la figure 3.18.



(a)

(b)

Figure 3.18 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.

a- (4 % chaux+laitier). b- (8 % chaux+laitier).

Pour la terre traitée à 4 % et 8 % de chaux, les résultats montrent que l'augmentation de la quantité de laitier de 4 % à 12 %, entraîne une augmentation de la densité sèche maximale et une réduction de la teneur en eau optimale de la terre à base de sol limoneux.

3.3.1.7. Mélange (terre – fibres de paille de blé)

Les résultats de l'essai de compactage sur la terre à base de sol limoneux renforcée avec 0, 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres de paille de blé sont donnés dans la figure 3.19.

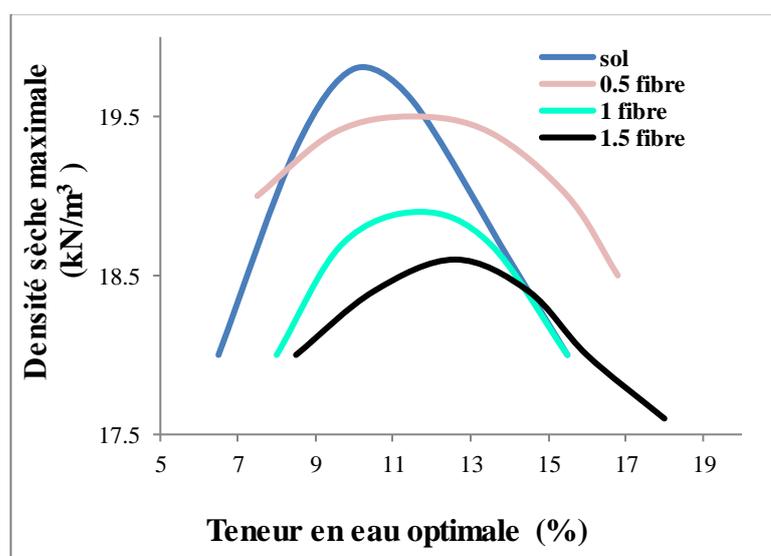


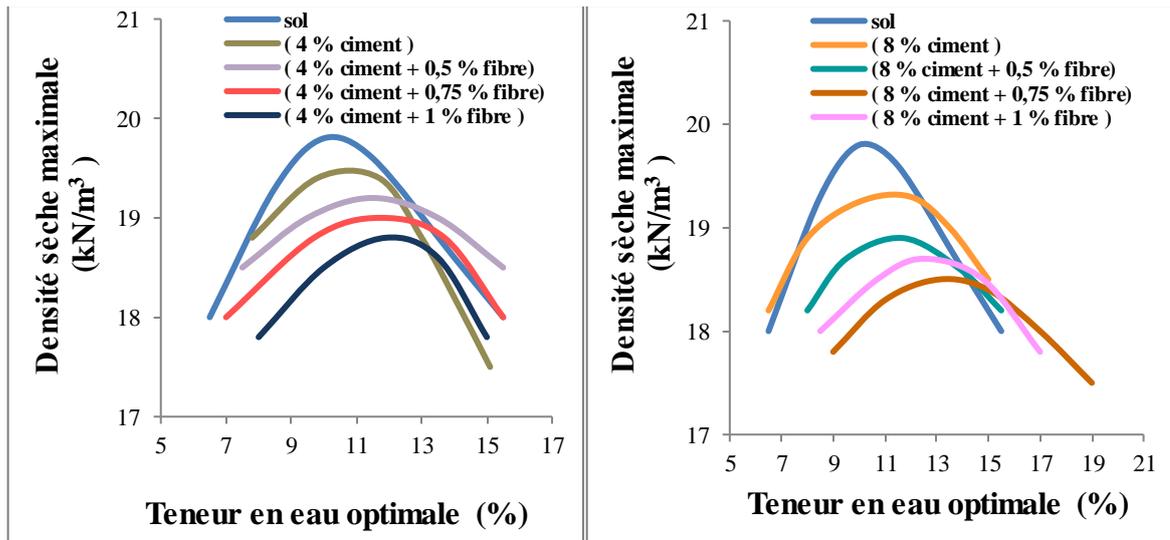
Figure 3.19: Courbe Proctor en fonction de la quantité de la paille additionnée.

Les résultats, montrent que l'inclusion de fibres de paille de blé dans la terre à base de sol limoneux réduit progressivement la densité sèche maximale de $19,8 \text{ kN/m}^3$ à $18,6 \text{ kN/m}^3$, lorsque la teneur de fibres passe de 0 à 1 %. Cependant, cette baisse de la densité sèche entraîne une augmentation de la teneur en eau optimale de 10 à 12,68 %.

3.3.1.8. Mélange (terre– ciment – fibres de paille de blé)

Les résultats de l'essai Proctor pour la terre à base de sol limoneux traitée, à 4 %, et 8 % de ciment et celle traitée respectivement, avec 4 %, 8 % de ciment plus 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres de paille de blé sont présentés sur la figure 3.20.

Les résultats montrent que l'incorporation de fibres en paille de blé à la terre à base de sol limoneux mélangée avec le ciment engendre, une fois de plus, une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale.



(a) (b)
Figure 3.20 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.
(a- (4 % ciment +fibres). b- (8 % ciment-fibres).

3.3.2. Essai de compression uniaxiale

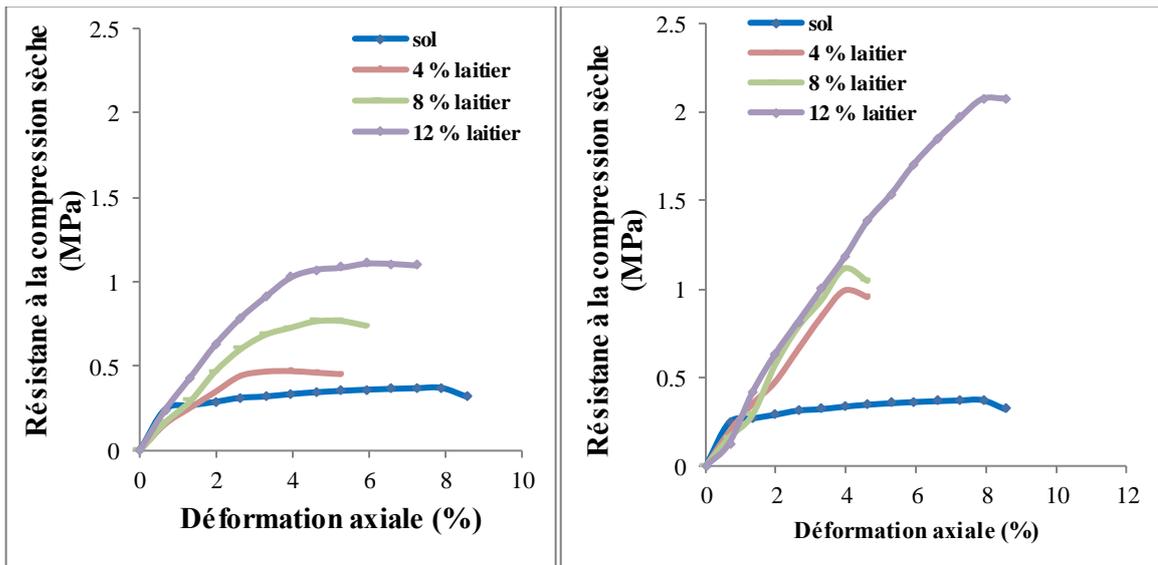
La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques essentielles pour caractériser la capacité de charge des matériaux, elle permet à un mur ou à un bloc de terre de supporter sa charge sans rupture ou défaillance locale aux points de contrainte élevée et constitue, donc, un facteur important dans la construction de structures en terre.

3.3.2.1. Mélange (terre – laitier)

Pour étudier l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la quantité d'additifs, l'essai de compression uniaxiale a été réalisé selon la norme française NF P 94-077 sur la terre à base de sol limoneux, mélangée, avec différents pourcentages de laitier de 4 %, 8 % et 12 %. Les échantillons de terre à base de sol limoneux testés ont subi une cure de 7 et 28 jours. Après la période de cure, une partie des éprouvettes a été écrasée et l'autre partie a été imbibée pendant 24 heures avant d'être écrasée. Dans le présent travail, des précautions ont été prises pour éviter la perte d'humidité pendant le durcissement, car la résistance à la compression est considérée comme sensible à toute modification significative de la teneur en eau. Il est donc important de tester chaque groupe d'échantillons dans des conditions de durcissement à peu près identiques. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures 3.21.

Pour les deux périodes de cure 7 jours et 28 jours respectivement, les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression uniaxiale de la terre à base de

sol limoneux, avec l'augmentation de la teneur en laitier. Les valeurs de résistance à 28 jours de cure sont plus élevées que celles obtenues à 7 jours de cure. Dans l'ensemble, l'augmentation de la résistance à la compression reste plus ou moins appréciable. Les valeurs de la résistance passent de 0.462 MPa à 1.107 MPa et de 0.991 MPa à 2.076 MPa MPa lorsque la teneur en laitier augmente de 4 % à 12 % respectivement pour les deux périodes de cure de 7 jours et 28 jours.

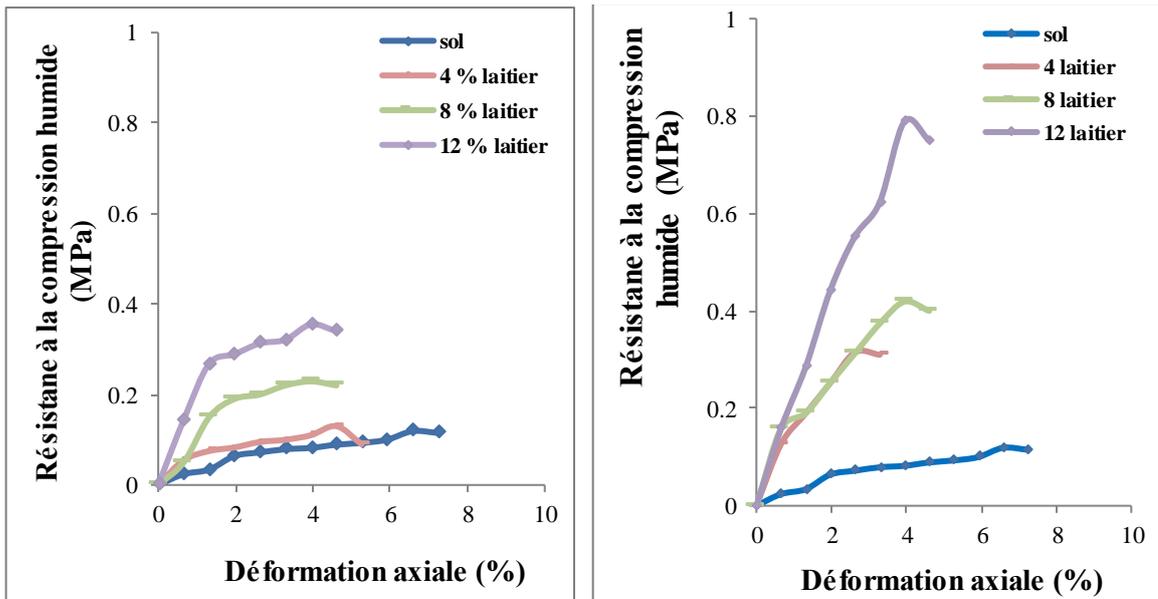


(a)

(b)

Figure 3.21 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de laitier additionnée. (a- 7 jours, b- 28 jours.)

Pour ce qui est des valeurs de résistance à la compression humide, l'évolution de la résistance avec l'augmentation du pourcentage de laitier est similaire à celle des échantillons de terre à base du sol limoneux testés à sec (figure 3.22). En effet, l'ajout du laitier a un effet notable sur la résistance à la compression humide par rapport aux échantillons de terre non traitée, les valeurs obtenues sont inférieures à 1 MPa pour les deux périodes de cure. Les valeurs de la résistance à la compression humide obtenues restent inférieures à celles de la résistance à la compression sèche à 7 et 28 jours.



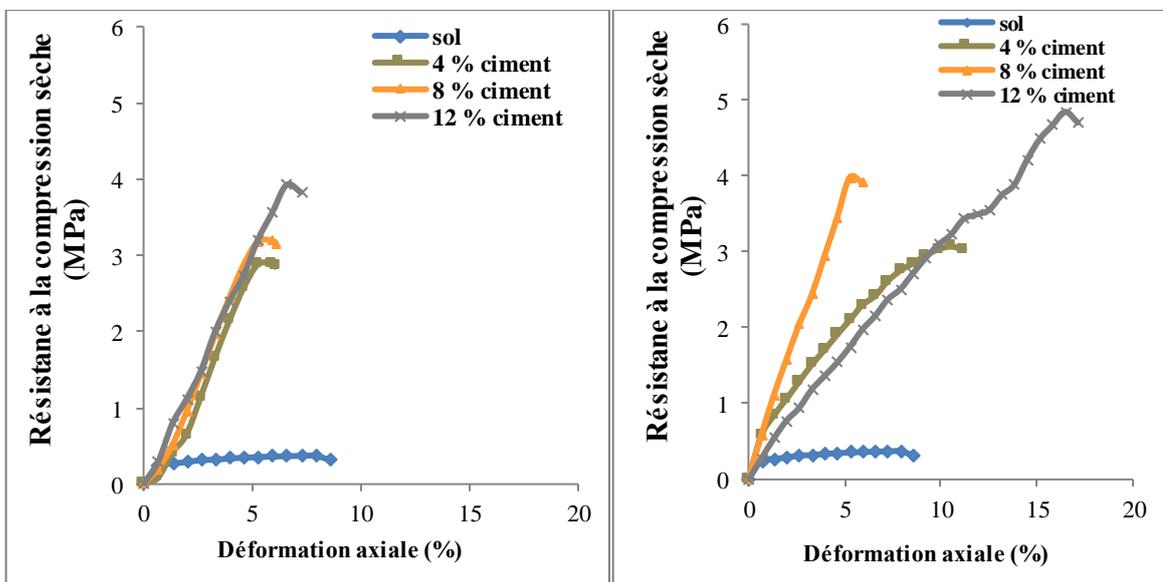
(a)

(b)

Figure 3.22 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de laitier additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.)

3.3.2.2. Mélange (terre – ciment)

L'évolution de la résistance à la compression pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités à 4 %, 8 % et 12 % de ciment est présentée à la figure 3. 23.



(a)

(b)

Figure 3.23 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.)

Comme la montre la figure ci-dessus, la résistance à la compression de la terre à base de sol limoneux augmente en fonction de la quantité de ciment ajoutée, pour les deux périodes de cure. À 7 jours, une augmentation des valeurs de la résistance à la compression uniaxiale à, 2.892 MPa, 3.129 MPa et 3.828 MPa est observée, pour échantillons de terre à base de sol limoneux traitée à, 4 %, 8 % et 12 % respectivement, tandis qu'à 28 jours, la résistance augmente à 3.068 MPa, 3.979 MPa et 4.846 MPa pour les mêmes pourcentages de ciment.

La figure 3.24 montre les résultats de la variation de la résistance à la compression humide, en fonction du dosage de ciment additionné et de la période de cure. Les courbes données par la figure montrent la même allure que celle observé pour la résistance à la compression des échantillons de terre à base de sol limoneux traités avec différentes proportions de ciment et écrasés directement après cure. L'augmentation de la résistance à la compression est proportionnelle à l'augmentation de la quantité de ciment. La résistance augmente de 1,215 MPa à 2,101 MPa et 2,997 MPa à 28 jours, lorsque la teneur en ciment augmente de 4 à 12 %. Les résultats révèlent également, que les valeurs de la résistance à la compression humide sont inférieures aux valeurs obtenues pour la résistance à la compression sèche.

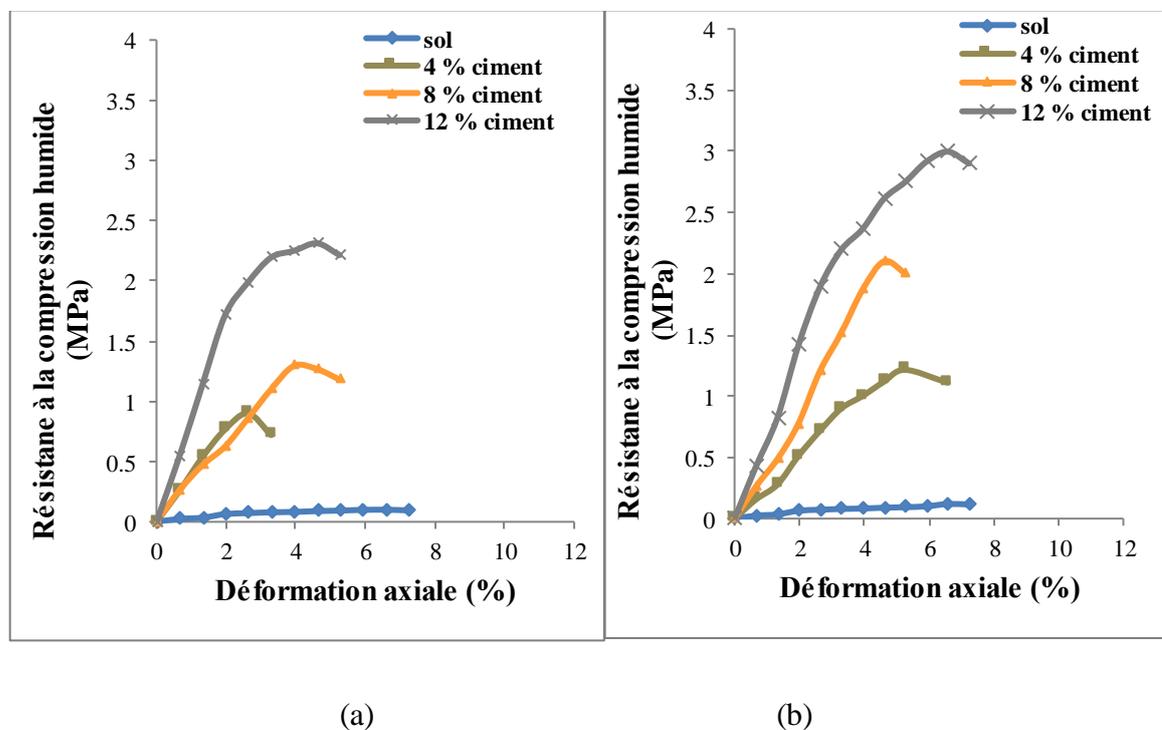


Figure 3.24 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment additionnée. (a-7 jours. b- 28 jours.)

3.3.2.3. Mélange (terre – ciment – laitier)

L'effet de rajout des quantités variables de laitier sur les échantillons de terre à base de sol limoneux traités à 4 % et 8 % de ciment, pour une période de cure de 7 jours et 28 jours, est donné sur la figure 3.25.

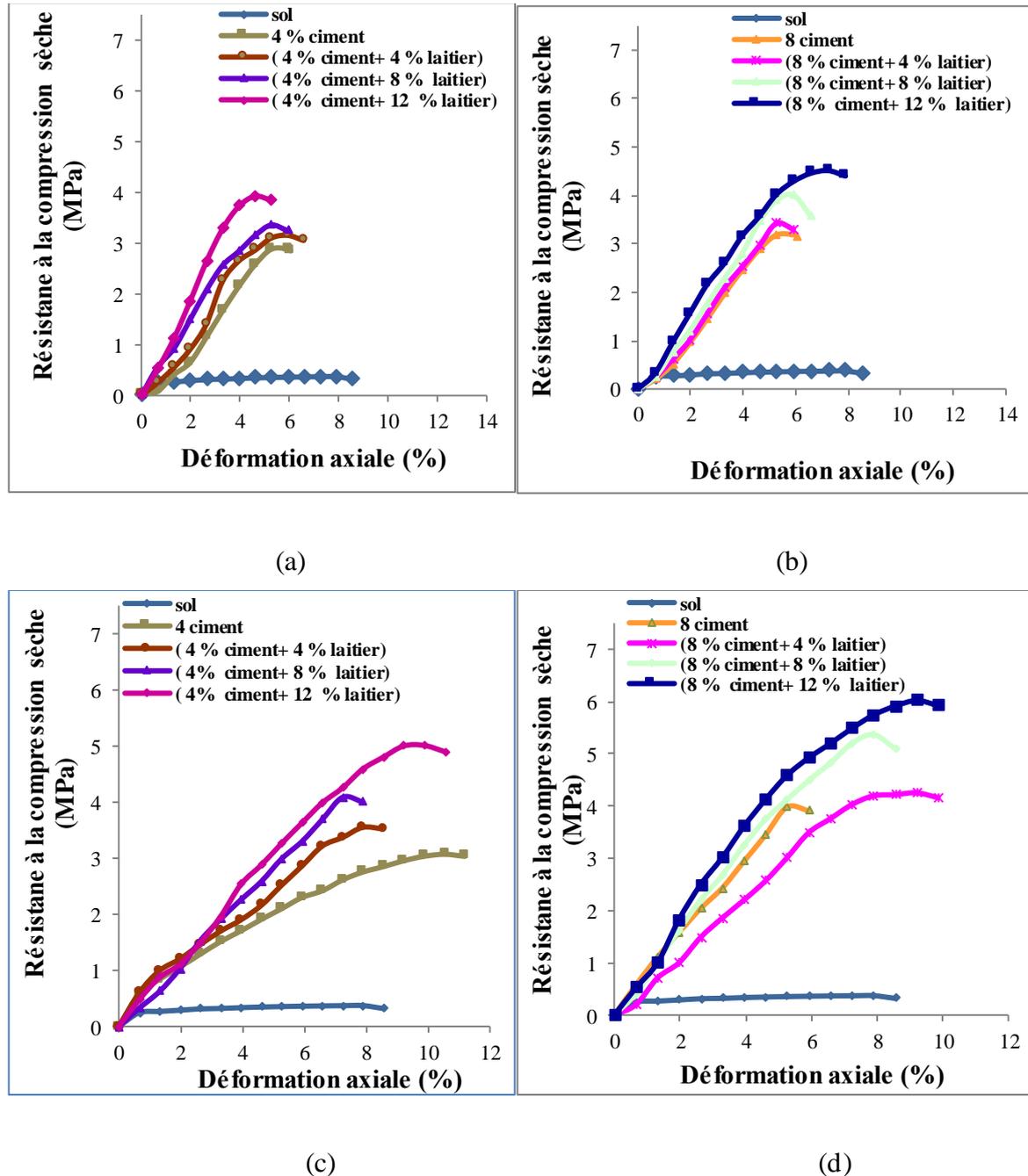


Figure 3.25 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.

.(a- (4 % ciment + laitier) à 7 jours. b- (8 % ciment +laitier) à 7 jours. c-(4 % ciment + laitier) à 28 jours. d-(8 % ciment + laitier) à 28 jours.)

Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression uniaxiale, avec l'augmentation de la quantité de laitier rajoutée, pour l'ensemble des échantillons de terre à base de sol limoneux traités à 4 % et 8 % du ciment, pour les périodes de cure de 7 jours et 28 jours. Les valeurs de résistance à la compression obtenues à 28 jours sont plus élevées que celles obtenues à 7 jours. À titre d'exemple, à 7 jours, la résistance augmente de 2.892 MPa, à 3.155 MPa, 3.358 MPa et 3.925 MPa et de 3.06 MPa à 3.52, 4.252 et 5.00 MPa, pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4% de ciment plus 0 %, 4 %, 8 % et 12 % de laitier lorsque la période de cure augmente de 7 à 28 jours, respectivement. Les plus grandes valeurs de la résistance sont obtenues pour les échantillons de terre traités à 8 % de ciment plus laitier pour une période de cure de 28 jours. En termes de valeur, Le rajout de 4 %, 8 % et 12 % de laitier aux échantillons de terre traités à 8 % de ciment augmente la résistance jusqu'à 4.252 MPa, 35.365 MPa et 6.019 MPa.

Une partie des échantillons de terre à base de sol limoneux traités avec du ciment et du laitier a subi une imbibition pendant 24 heures. L'effet du rajout de quantités variables de laitier sur la résistance à la compression à l'état humide, pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 % et 8 % de ciment, pour une période de cure de 7 jours et 28 jours, est donné sur la figure 3.26.

La même allure de l'évolution de la résistance à la compression, en fonction de la teneur en ciment pour différentes teneurs en laitier rajouté, est observée pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités et trempés dans l'eau pendant 24 heures, avant compression. Une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la quantité de laitier rajoutée et de la période de cure, pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de ciment, est observée. Les plus grandes valeurs de la résistance à la compression sont obtenues pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités à 8 % de ciment et mélangés avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier, ayant subi une cure pendant 28 jours. Néanmoins, les valeurs de résistance à la compression humide sont inférieures aux valeurs obtenues à sec.

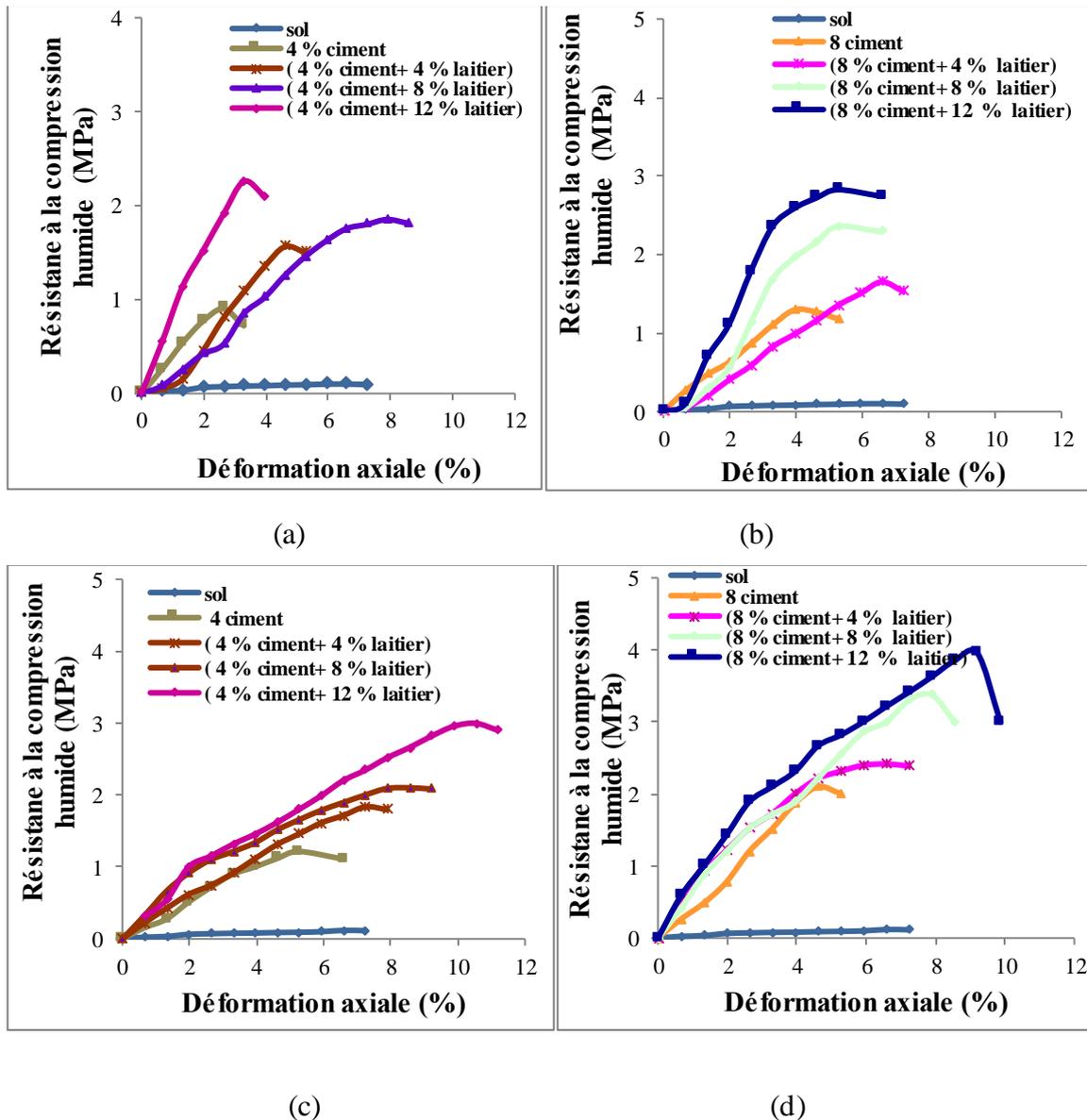


Figure 3.26: Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.

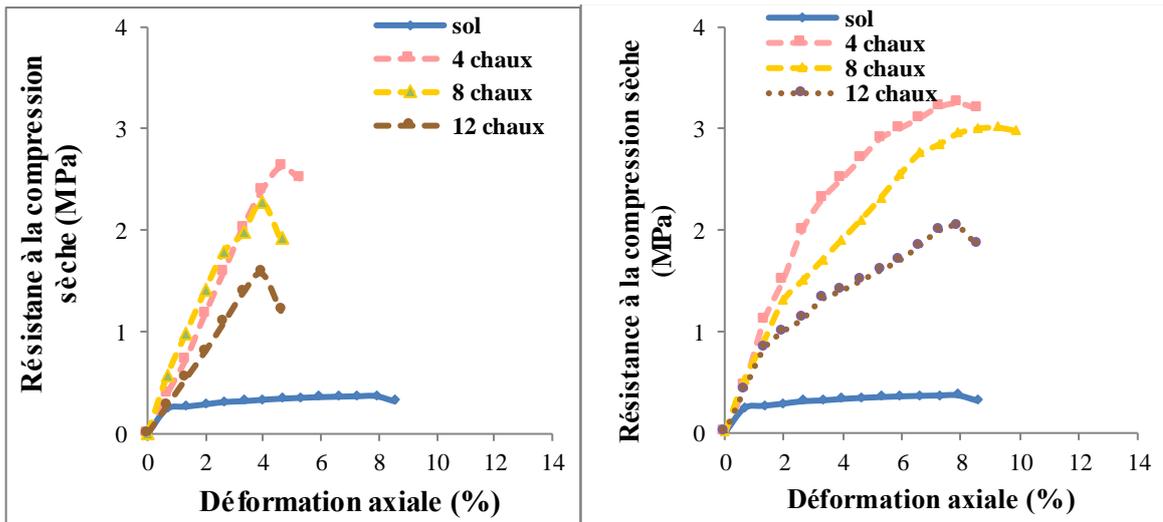
a- (4 % ciment + laitier) à 7 jours. b- (8 % ciment + laitier) à 7 jours.

c- (4 % ciment + laitier) à 28 jours. d- (8 % ciment + laitier) à 28 jours.

3.3.2.4. Mélange (terre - chaux)

Les résultats de la résistance à la compression, pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 %, 8 % et 12 % de chaux, pour les deux périodes de cure, de 7 jours et 28 jours, sont représentés dans la figure 3.27.

Contrairement au ciment, la résistance à la compression uniaxiale n'augmente pas de façon automatique avec l'augmentation de la quantité de chaux rajoutée. En effet, comme il peut se voir sur la figure, au-delà d'une quantité de chaux rajoutée (dite optimale), la résistance diminue, pour les deux périodes de cure.



(a)

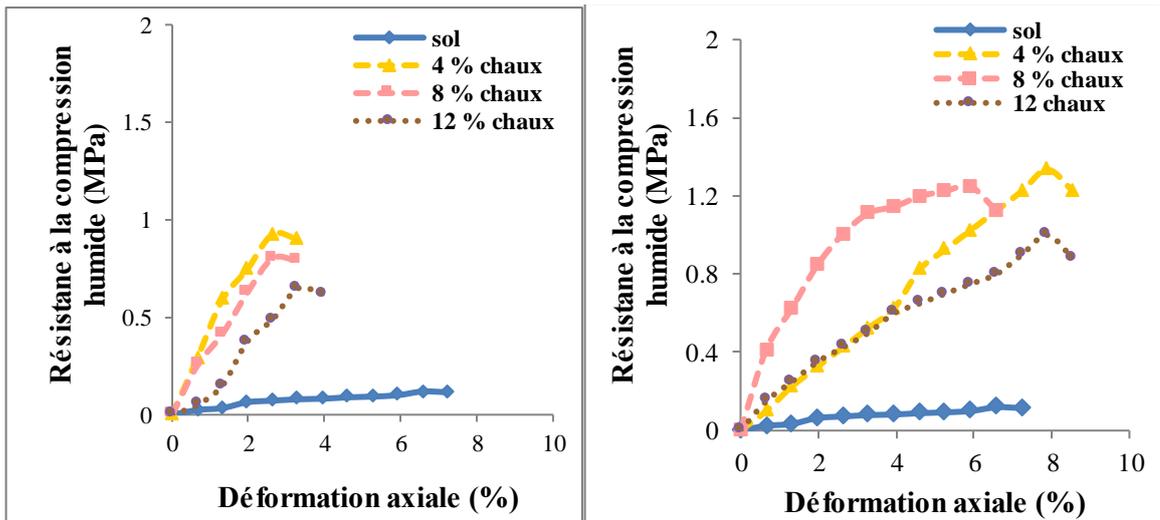
(b)

Figure 3.27 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux additionnée. (a-7 jours, b- 28 jours.)

L'augmentation de la teneur en chaux de 0 à 4 % a conduit à une augmentation de la résistance, alors qu'avec une augmentation de la teneur en chaux de 4 % à 8 et 12 %, une réduction de la résistance mécanique de 2.62 MPa à 2.27 MPa et 1.577 MPa est observée. Pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, la valeur de la quantité de chaux optimale permettant d'avoir des résistances sèches maximales est égale à 4 %. La résistance à la compression maximale augmente avec l'augmentation du temps de cure.

Pour évaluer la résistance à la compression humide, avant l'écrasement, les échantillons de terre à base de sol limoneux sont imbibés pendant 24 heures, les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3.28.

Les courbes de la résistance à la compression humide présentent la même allure que celle de la résistance à la compression sèche. La résistance à la compression uniaxiale atteint une valeur maximale, puis diminue au-delà d'une quantité de chaux, dite optimale, pour les deux périodes de cure. Les valeurs les plus élevées de résistance humide sont obtenues pour les échantillons traités à 4 % de chaux et ayant subi une cure de 28 jours avant l'imbibition. Avec la même quantité de chaux, l'imbibition dans l'eau pendant 24 heures, confère à l'échantillon de terre, à 28 jours, une résistance inférieure à celle obtenue à l'état sec, cela est bien observé dans la figure 3.28.



(a)

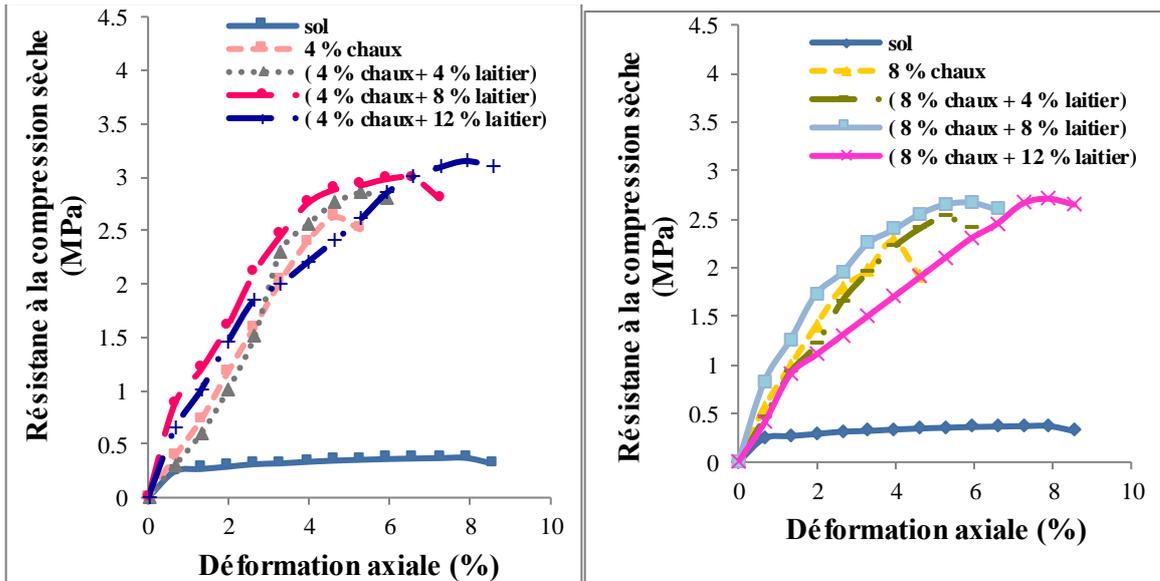
(b)

Figure 3.28 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux additionnée. (a-7 jours. b- 28 jours.).

3.3.2.5. Mélange (terre –chaux –laitier)

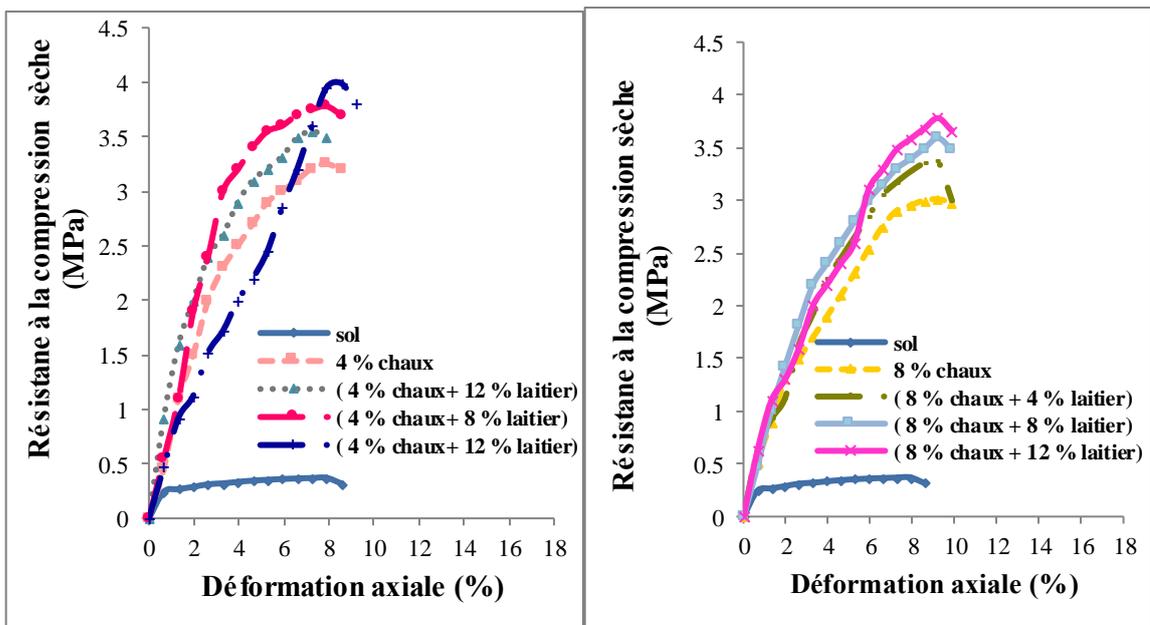
La variation de la résistance à la compression, en fonction de la quantité de laitier ajoutée aux échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 % et 8 % de chaux, pour les deux périodes de cure, est représentée dans la figure 3.29.

Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier pour l'ensemble des échantillons de terre à base du sol limoneux traités à 4 % et 8 % de chaux pour les deux périodes de cure de 7 jours et 28 jours. Les plus grandes valeurs de la résistance à la compression sont observées à 28 jours pour tous les échantillons traités à 4 % et 8 % de chaux et mélangés avec 4 %, 8 % et 12 % du laitier. Les échantillons de terre traités avec 4 % de chaux et mélangés avec différents pourcentages de laitier présentent des résistances plus grandes que celles données pour les échantillons de terre traités à 4 % de chaux et mélangés avec 4 %, 8 % et 12 % de laitier



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 3.29 : Évolution de la résistance à la compression pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.

a- (4 % chaux + laitier) à 7 jours. b- (8 % chaux +laitier) à 7 jours

c- (4% chaux + laitier) à 28 jours. d- (8 % chaux + laitier) à 28 jours.

Comme pour le cas de la résistance à la compression sèche, la même tendance est observée pour la résistance à la compression humide. Ceci est bien donné dans la figure 3.30.

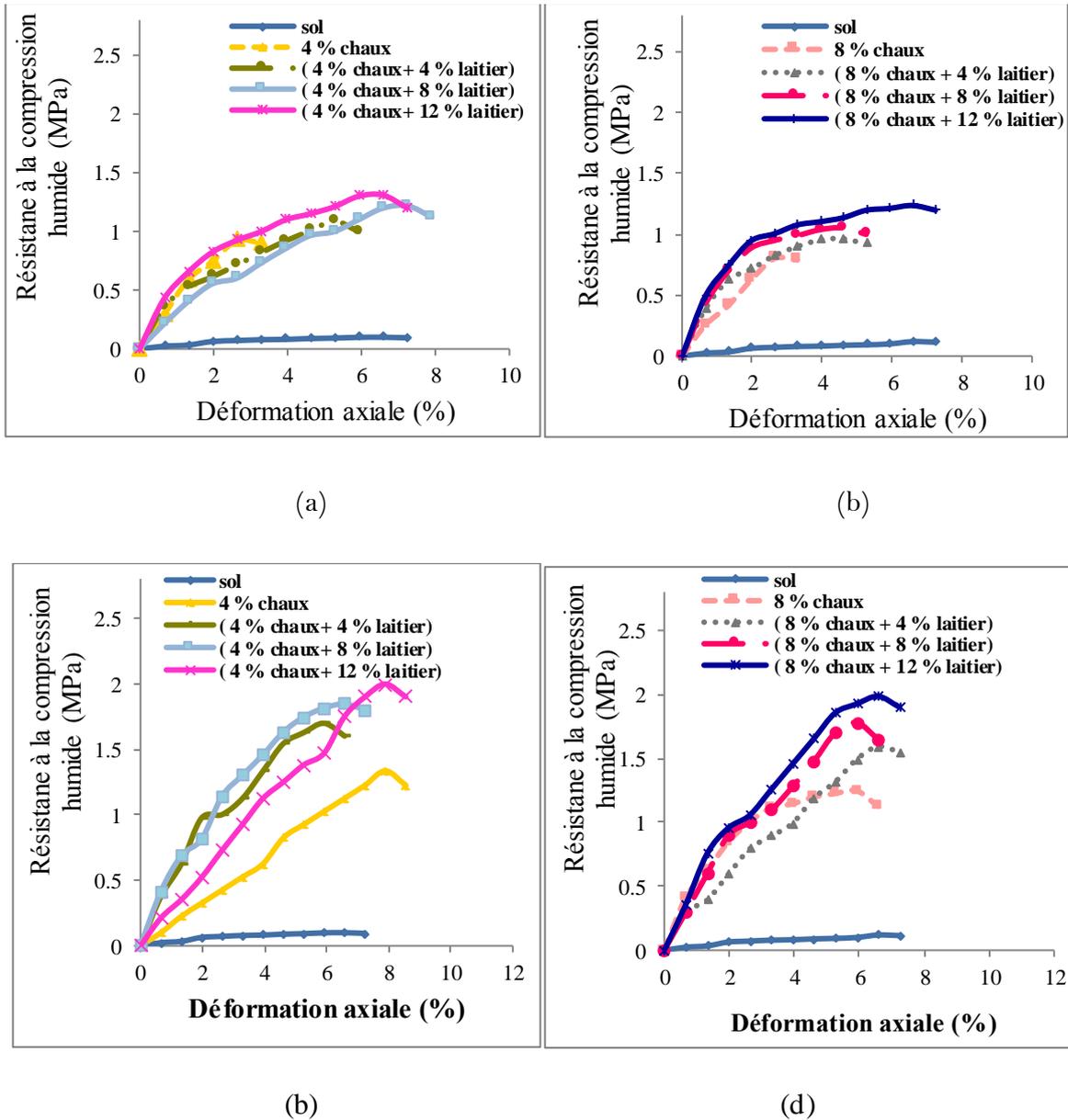


Figure 3.30 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.

a- (4 % chaux + laitier) à 7 jours. b- (8 % chaux + laitier) à 7 jours
c- (4 % chaux + laitier) à 28 jours. d- (8 % chaux + laitier) à 28 jours

La résistance à la compression humide augmente en fonction de la quantité du laitier ajoutée, pour les échantillons de terre traités à 4 % et 8 % de chaux à 7 et 28 jours de cure. Le rajout de 4 %, 8 % et 12 % de laitier à 4 % de chaux augmente la résistance de 1.592 MPa à 1.779 MPa et 1.985 MPa. Les plus grandes valeurs de la résistance à la compression sont obtenues pour les échantillons de terre traités à 4 % de chaux et mélangés avec différentes teneurs en laitier à 28 jours. Les valeurs de la résistance à la compression humide sont inférieures à celles de la résistance à l'état sec pour tous les échantillons de terre traités avec le mélange (chaux – laitier).

3.3.2.6. Mélange (terre – fibres en paille de blé)

Les résultats de la résistance à la compression pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, renforcés à 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres en paille de blé, sont représentés dans la figure 3.31.

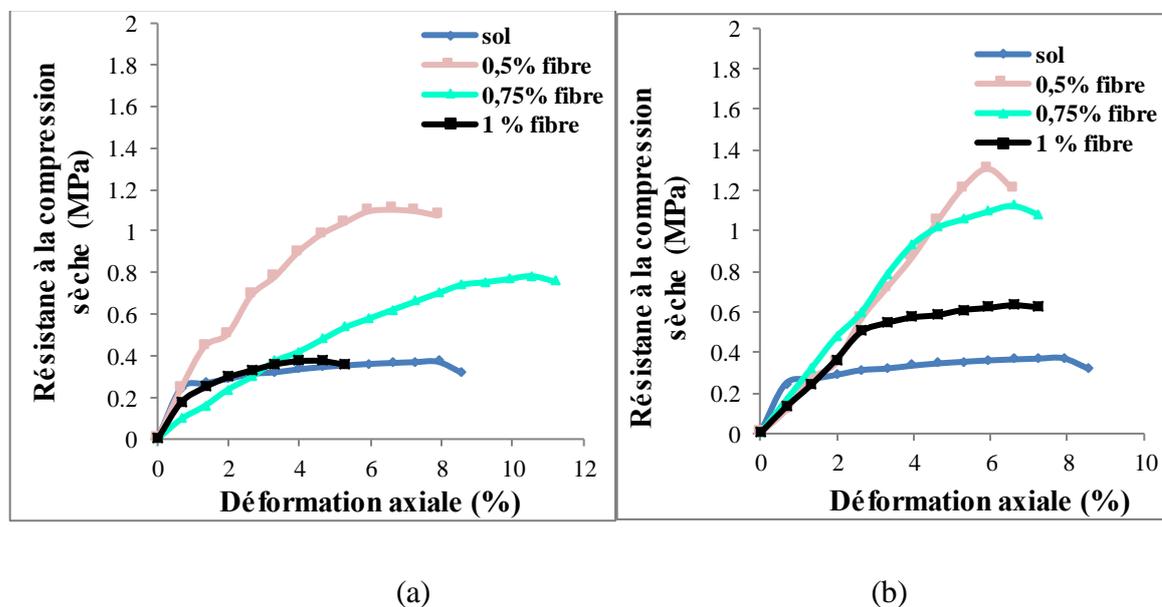


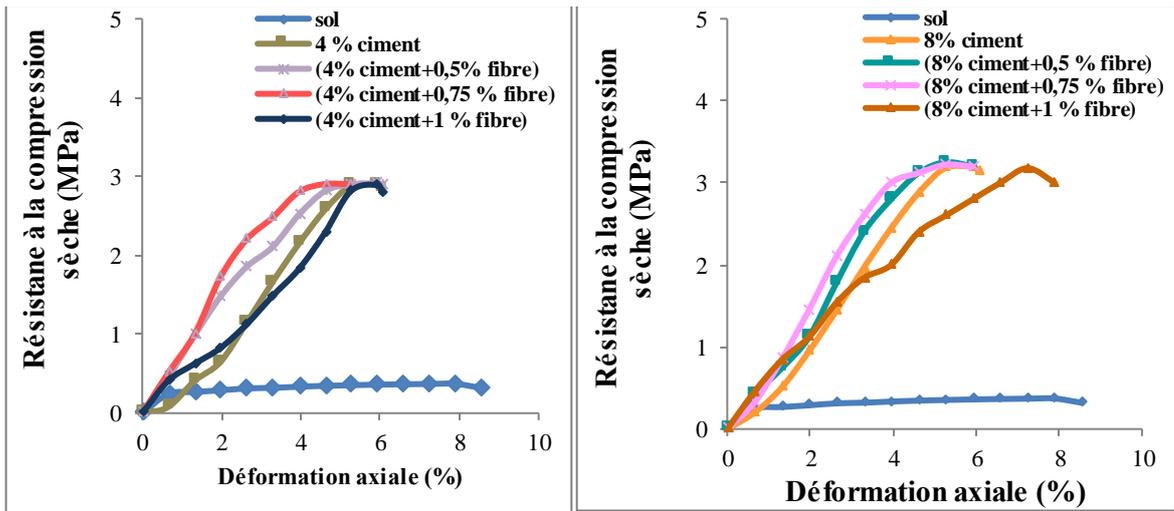
Figure 3.31 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de fibres additionnée. (a- 7 jours. b- 28 jours).

Les résultats montrent une augmentation de la résistance des échantillons de terre traités par l'ajout de 0,5%, 0,75%, et 1% de paille de blé. Néanmoins, cette augmentation de la résistance est inversement proportionnelle à la teneur en fibre additionnée. Cela est le cas aussi pour les échantillons de terre traités et laissés pour une période de cure de 7 à 28 jours. Les plus grandes valeurs de la résistance à la compression sont obtenues pour les échantillons de terre renforcés avec 0.5 % de paille de blé, après une période de cure de 28 jours.

Il est important de noter qu'il n'a pas été possible de mesurer la résistance à la compression à l'état humide, pour les échantillons de terre renforcés par les fibres seules, en raison de leur grande détérioration qui a entraîné un changement significatif de la forme des éprouvettes, rendant impossible leur écrasement.

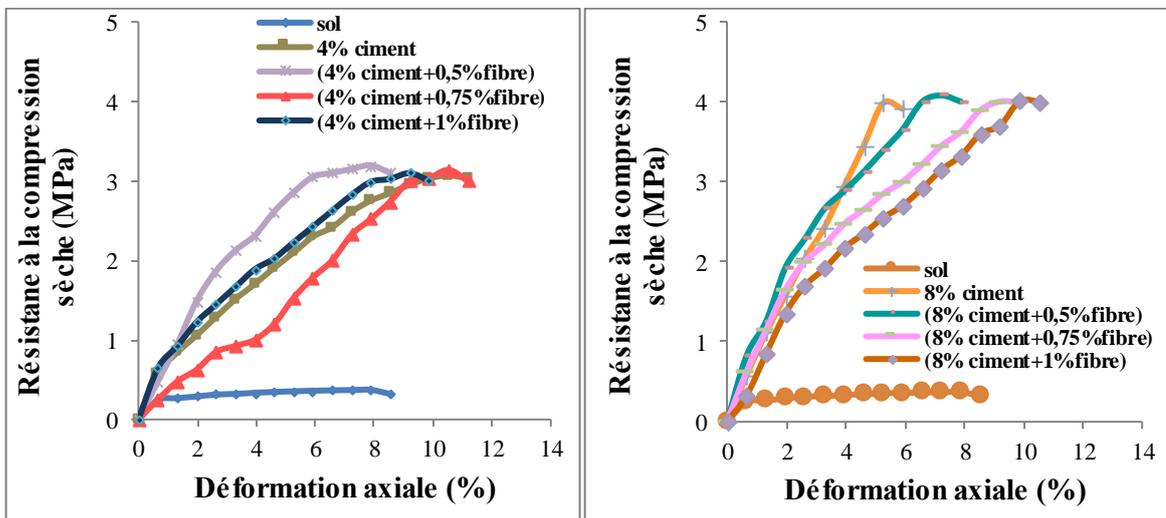
3.3.2.7. Mélange (terre – ciment – fibres de paille de blé)

Les résultats de l'essai de la résistance à la compression des échantillons de terre à base du sol limoneux traités à 4 % et 8 % du ciment et renforcés avec différentes teneurs en fibres (0.5 %, 0.75 % et 1 %) sont donnés dans la figure 3.32.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 3.32 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus fibres additionnée.

a- (4 % ciment + fibre) à 7 jours. b- (8% ciment + fibre) à 7 jours.

c- (4 % ciment + fibre) à 28 jours. d- (8 % ciment + fibre) à 28 jours.

Les résultats montrent qu'aucun gain de résistance n'est obtenu lorsqu'on ajoute la paille de blé aux échantillons de terre traités à 4 % et 8 % de ciment à 7 et 28 jours. Les valeurs de résistance à la compression sont presque les mêmes pour les échantillons de terre traités à 4 % ciment et 8 % ciment et renforcés avec différentes proportions de fibres de paille de blé, après 7 et 28 jours. à titre d'exemple, les valeurs de la résistance sont de 4.078 MPa, 4.002 MPa et 4.005 Ma pour les échantillons de terre traités à 8 % ciment et renforcés avec 0.5 %, 0.75 % et 1 %, respectivement. La résistance des échantillons de terre, ayant

subi une cure de 28 jours, est supérieure à celle des échantillons de terre ayant subi une cure de 7 jours.

Les résultats de la variation de la résistance à la compression humide, en fonction de la quantité de paille rajoutée, pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de ciment, à 7 et 28 jours de cure, sont donnés dans la figure 3.33.

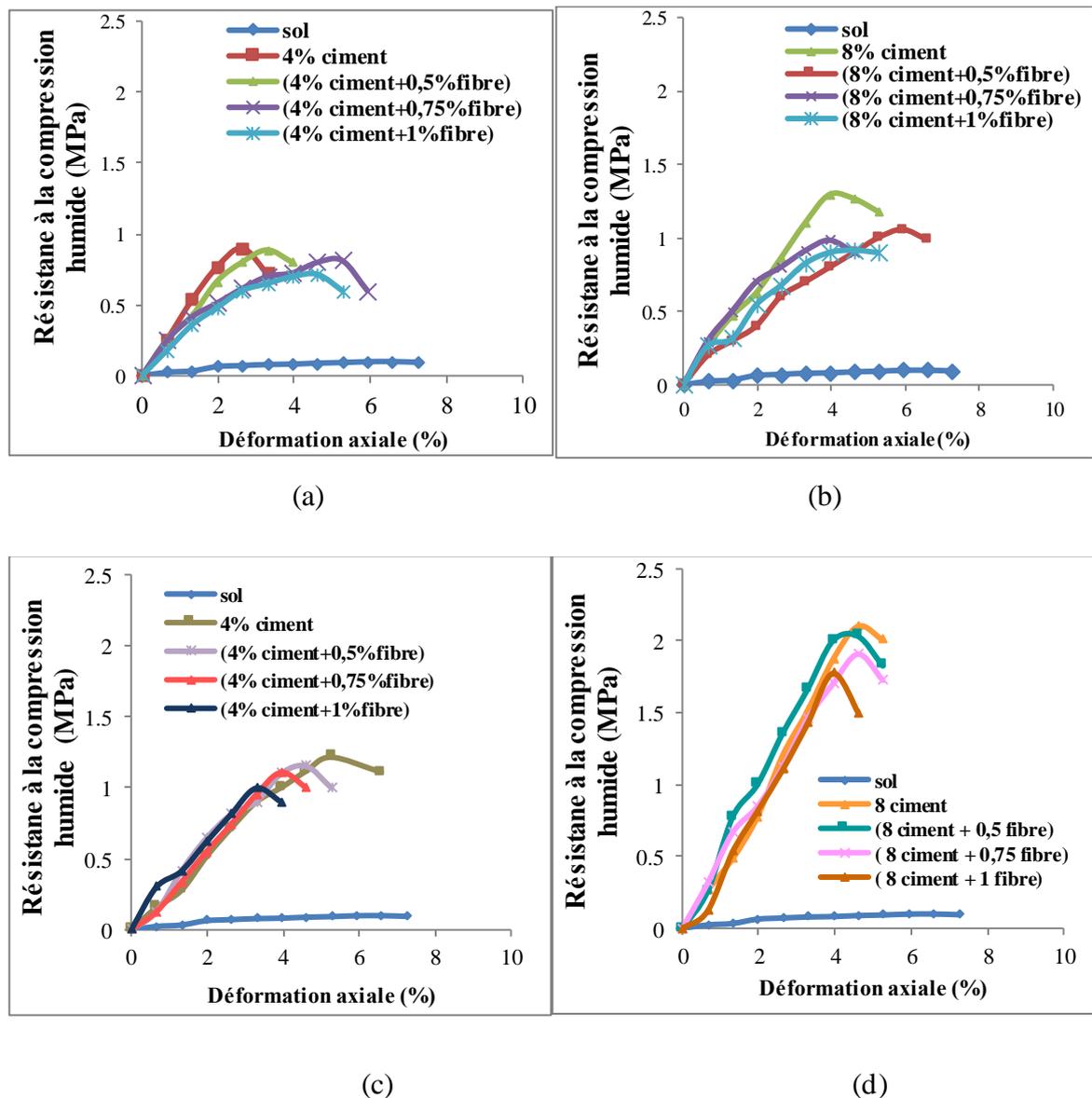


Figure 3.33 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de ciment plus fibres additionnée.

- a- (4 % ciment + fibre) à 7 jours. b- (8 % ciment + fibre) à 7 jours
 c- (4 % ciment + fibre) à 28 jours. d- (8 % ciment + fibre) à 28 jours.

La figure 3.33 montre une diminution de la résistance à la compression humide pour l'ensemble des échantillons de terre traités à 4 % et 8 % de ciment et renforcés avec 0.5 %,

0.75 % et 1 % de fibres de paille de blé pour les deux périodes de cure. Les plus grandes valeurs de la résistance à la compression sont enregistrées pour la terre traitée à 8 % du ciment. La plus grande valeur de résistance est enregistrée par les échantillons de terre traités à 8 % de ciment et renforcés par 0.5 % de la paille.

3.4. Essai de durabilité

3.4.1. Essai d'humification – séchage

Pour étudier l'effet des différents additifs sur le cycle humidification - séchage des échantillons de terre à base de sol limoneux, l'essai a été réalisé selon la norme (ASTM D 559), après une cure de 7 et 28 jours, pour les échantillons de terre à base de sol limoneux mélangés avec différents pourcentages de ciment, chaux, laitier et fibre de paille de blé, utilisés dans cette étude.

3.4.1.1. Mélange (terre– laitier)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

Les cycles effectués dans le test de saturation-séchage pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 %, 8 % et 12 % de laitier pour les deux périodes de cure, sont dans la figure 3.34.

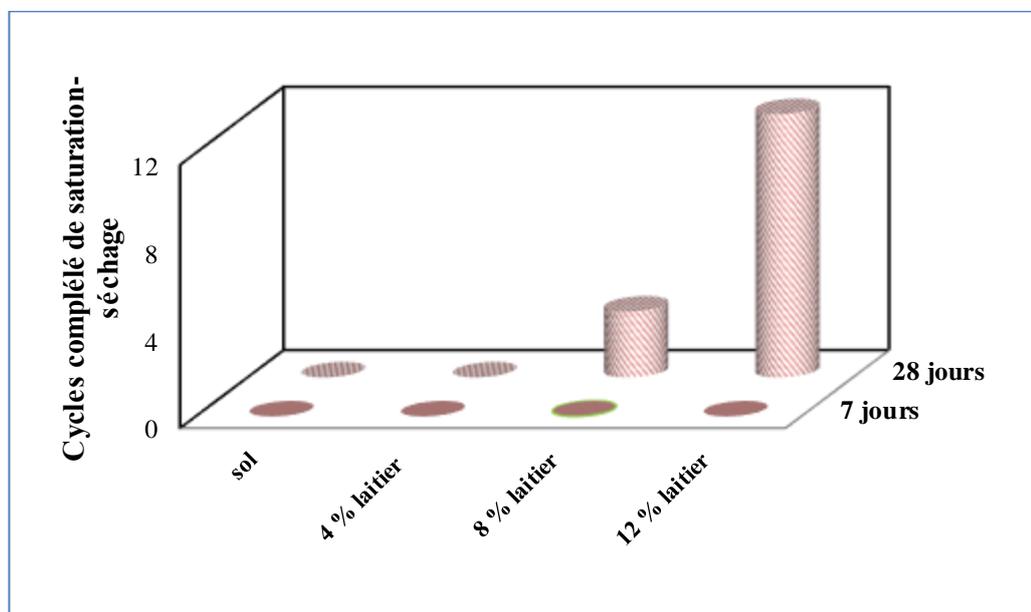


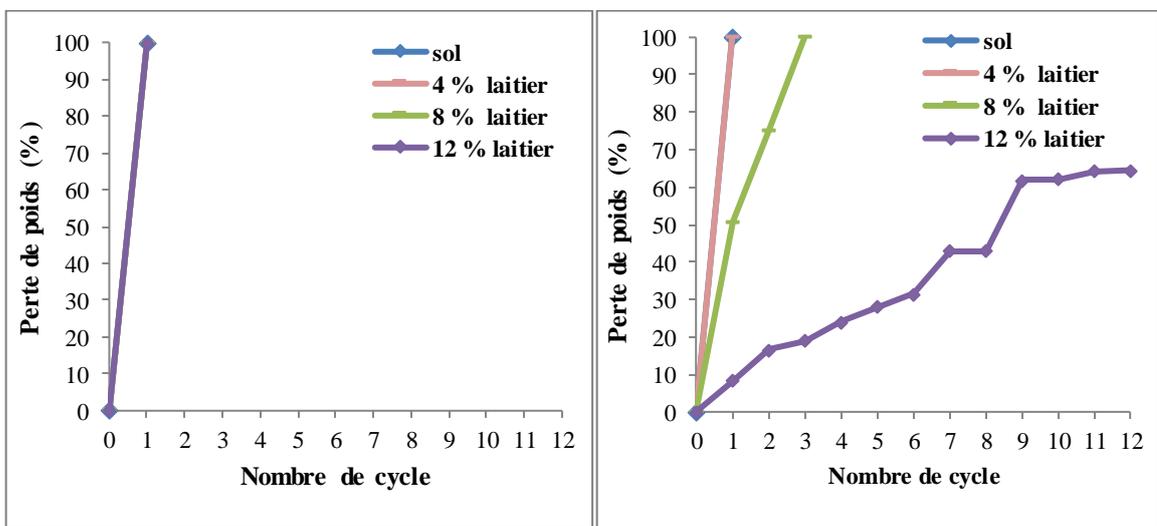
Figure 3.34 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au laitier.

D'après les résultats, l'ensemble des échantillons de terre à base de sol limoneux traités au laitier seul, présentent un comportement similaire à ceux des échantillons de terre

non traités. En effet, à l'exception de l'échantillon de terre traité avec 8 % de laitier à 28 jours, qui a survécu aux trois premiers cycles et celui traité à 12 % de laitier à 28 jours qui a survécu aux douze cycles, le reste des échantillons se sont effondrés juste après la première phase.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la variation de la perte de poids après l'essai humidification-séchage des échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 %, 8 % et 12 % de laitier et ayant subi une cure de 7 et 28 jours, sont illustrés dans la figure 3.35.



(a)

(b)

Figure 3.35 : Variation de la perte de poids de bloc de terre en fonction du laitier additionné. (a-7 jours. b- 28 jours)

Les résultats montrent que les échantillons de terre à base de sol limoneux, non traités et traités au laitier, subissent une perte de poids de 100 % dès le premier cycle, après une cure de 7 jours. Il convient également de noter que le pourcentage de perte de poids diminue lorsque la période de cure augmente. Les échantillons de terre stabilisés à 12 % de laitier subissent une perte de poids de 64,55 % après 28 jours de cure.

3.4.1.2. Mélange (terre– ciment)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

Les cycles complétés dans l'essai d'humidification - séchage des échantillons de terre à base de sol limoneux traités avec 4 %, 8 % et 12 % de ciment à 7 jours et 28 jours sont donnés dans la figure 3.36.

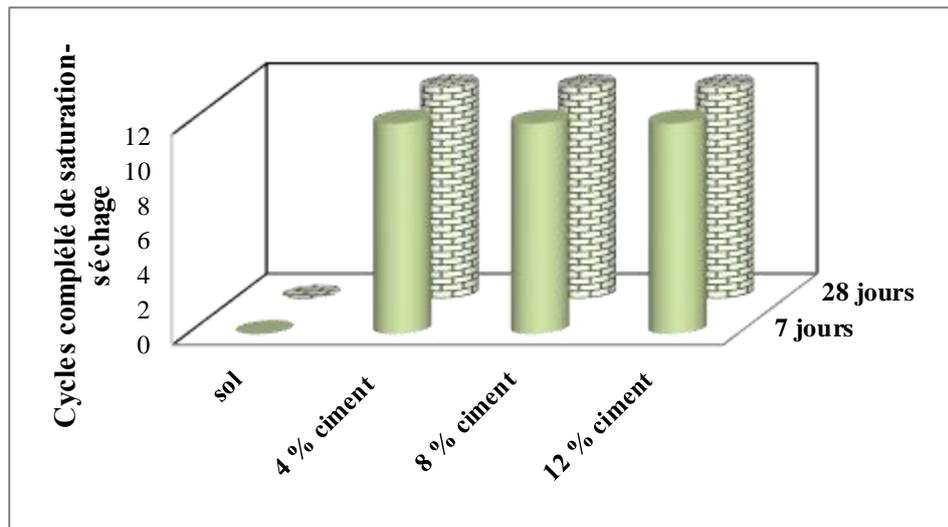
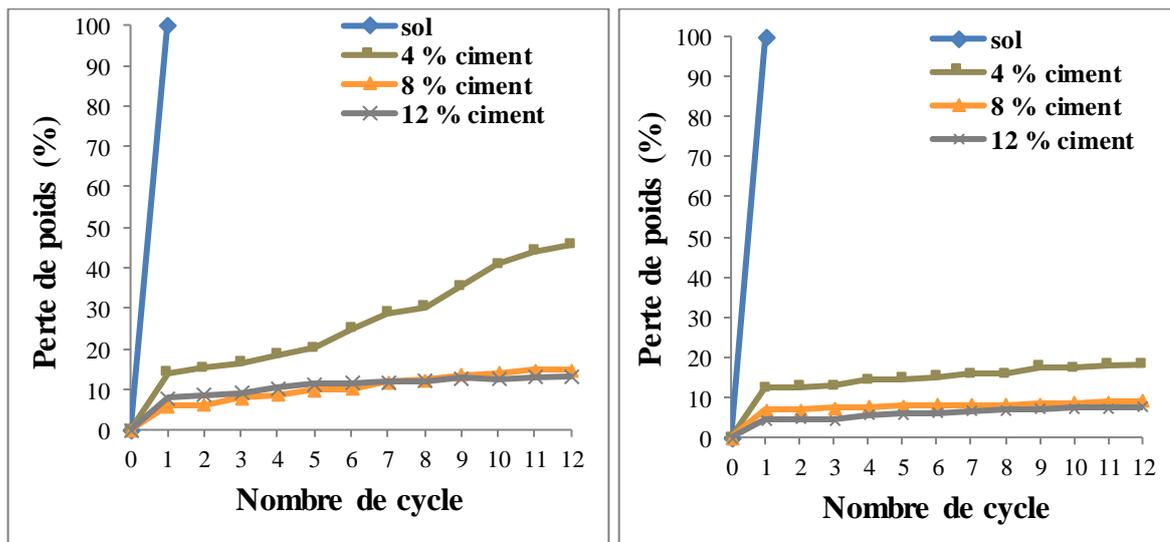


Figure 3.36 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au ciment.

Les résultats présentés montrent que tous les échantillons de terre traités au ciment ont survécu à 12 cycles, pour les deux périodes de cure, malgré l'agressivité de ce test

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats du taux de perte de poids après l'essai humidification-séchage pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités au ciment à 7 et 28 jours sont présentés à la figure 3.37.



(a)

(b)

Figure 3.37: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en ciment additionnée. (a- 7 jours. b- 28 jours).

Les résultats donnés dans la figure ci-dessus montrent une forte augmentation de la perte de poids jusqu'à une certaine valeur durant le premier cycle, suivie d'une augmentation progressive, avec l'augmentation du nombre de cycles, pour les échantillons traités à 4 %, 8 % et 12 % de ciment. La perte de poids diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment et la période de cure. Seul, les échantillons cimentés à 8 % et 12 % ayant subi une cure de 28 jours, ont enregistré des valeurs de perte de poids inférieures à 10 %.

3.4.1.3. Mélange (terre – ciment - laitier)

- Cycle complété après l'essai humidification -séchage

Les cycles complétés pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités aux différentes combinaisons de ciment plus laitier, dans le test d'humidification – séchage, après 7 et 28 jours de cure, sont donnés dans la figure 3.38.

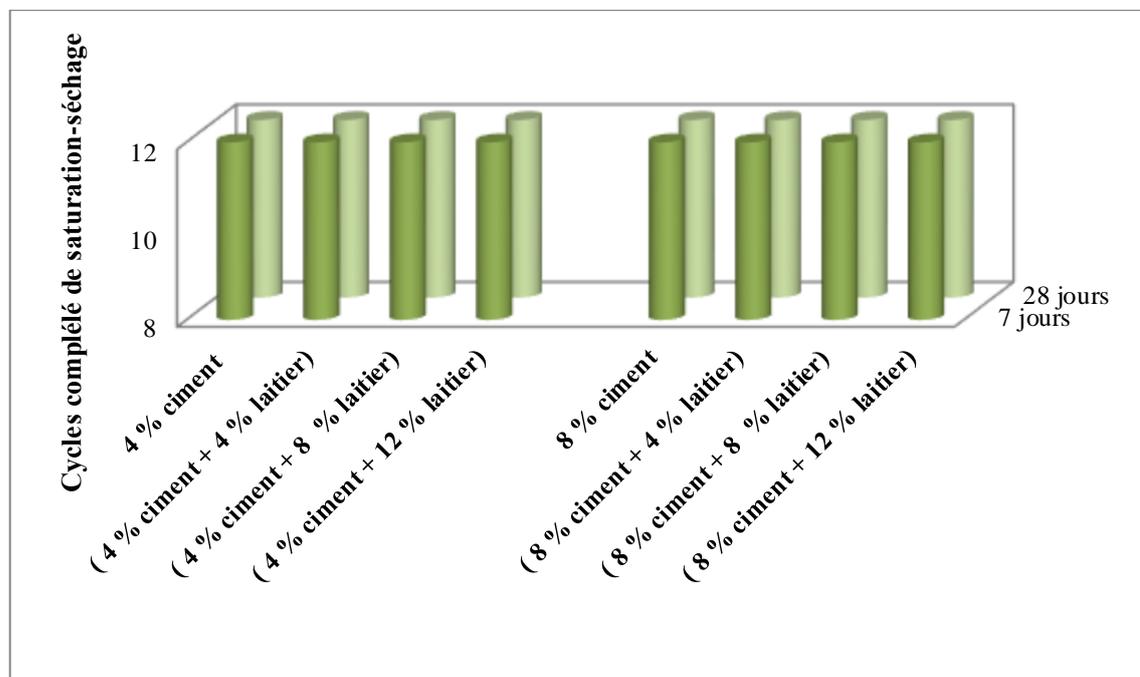


Figure 3.38 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au ciment et au laitier.

On remarque que tous les échantillons de terre à base de sol limoneux traités au mélange (ciment-laitier) ont survécu aux douze cycles de saturation-séchage pour les deux périodes de cure 7 et 28 jours.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats du taux de perte de poids après l'essai humidification-séchage pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités au ciment à 7 et 28 jours, sont présentés sur la figure 3.39.

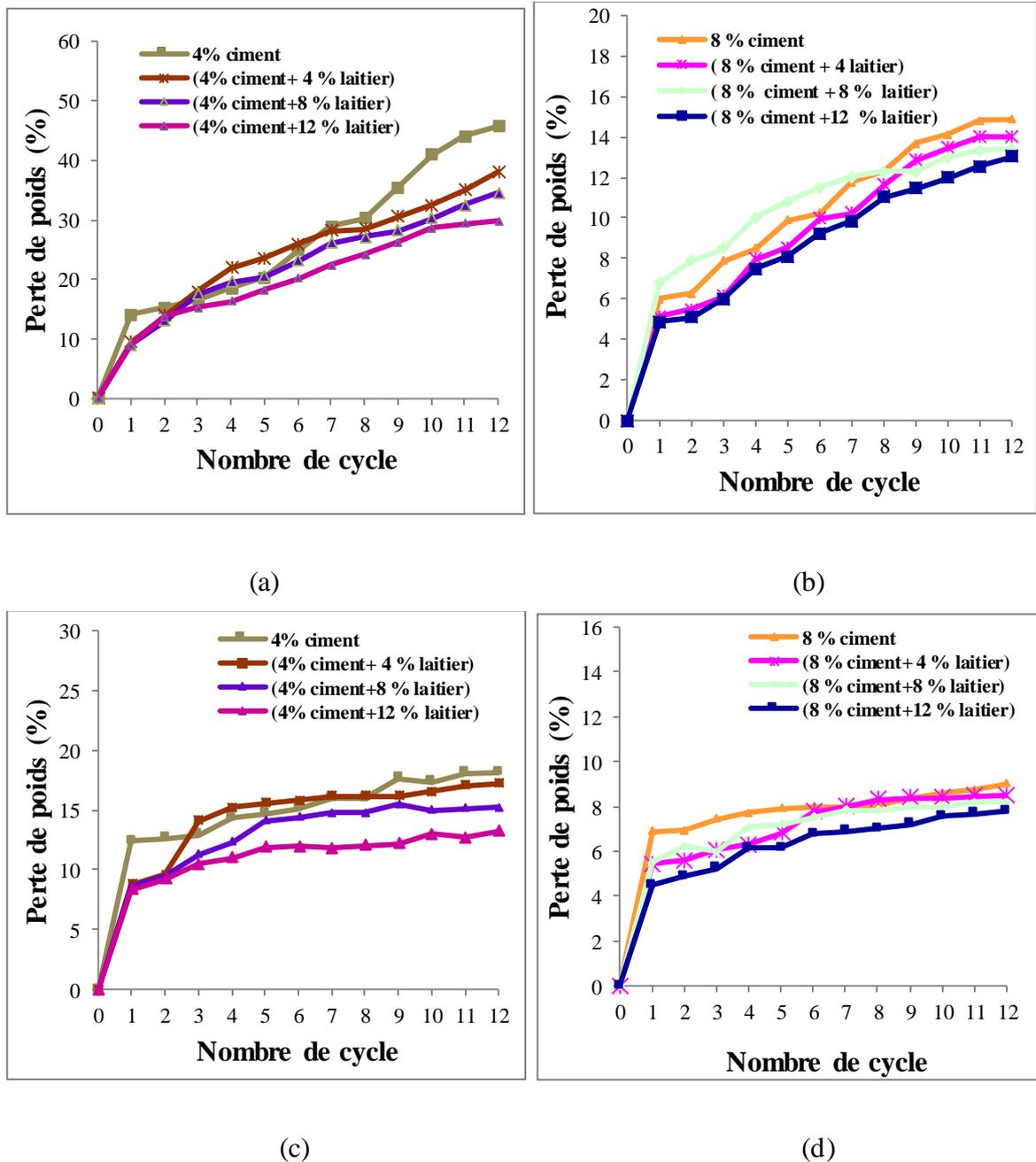


Figure 3.39 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de ciment plus laitier.

- a- (4 % ciment + laitier) 7 jours. b. (8 % ciment + laitier) 7 jours. c. (4 % ciment + laitier) 28 jours. d. (8 % ciment + laitier) 28 jours.

En ce qui concerne la perte de poids en fonction de la quantité de ciment et de laitier ajoutée, les résultats donnés dans la figure 3.39- (a-b) montrent, pour les deux échantillons de terre cimentés à (4 %, 8 %) et mélangés à 4, 8 et 12 % de laitier, une forte augmentation de la perte de poids jusqu'à une certaine valeur au cours du premier cycle, suivie d'une augmentation progressive des valeurs de perte de poids, avec l'augmentation du nombre de cycles.

Par contre, une tendance à une diminution de la perte de poids, avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange (terre sol - ciment), est aussi observée pour les échantillons de terre cimentés à 4 % et 8 % de ciment à 7 et 28 jours de cure. Les échantillons de terre stabilisés à 8 % de ciment et ceux mélangés à différentes teneurs en laitier (figure 3.39 (b)), présentent des valeurs de perte de poids plus faibles. À mesure que la période de cure augmente, pour tous les échantillons de terre, une nouvelle diminution de la perte de poids avec l'augmentation de la teneur en laitier est observée.

En outre, la forte augmentation dans l'allure des courbes est suivie d'une augmentation progressive, vers une perte de masse presque constante, avec l'augmentation du nombre de cycles (figure 3.39 (c, d)). Cette tendance est plus prononcée avec les échantillons de terre à base de sol limoneux cimentés à 8 % de ciment et mélangés avec une proportion différente de laitier (Figure 3.39 (d)). Les valeurs de perte de poids, pour tous les échantillons de terre cimentés avec 8 % de ciment plus laitier, sont inférieures à 10 %.

3.4.1.4. Mélange (terre – chaux)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

Les cycles complétés pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités à 4 %, 8 % et 12 % de chaux, dans le test saturation-séchage, sont illustrés dans la figure 3.40.

Les résultats obtenus montrent que les échantillons de terre à base de sol limoneux, stabilisé avec différents teneurs en chaux et ayant subis 7 et 28 jours de cure, ont survécu aux douze cycles d'humidification – séchage.

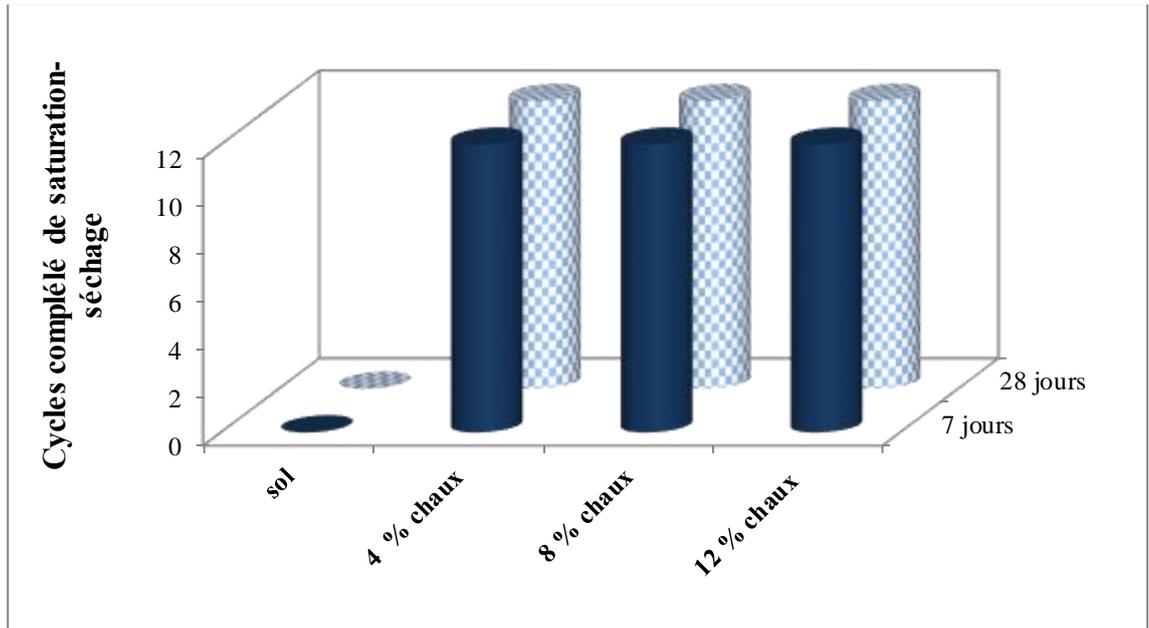
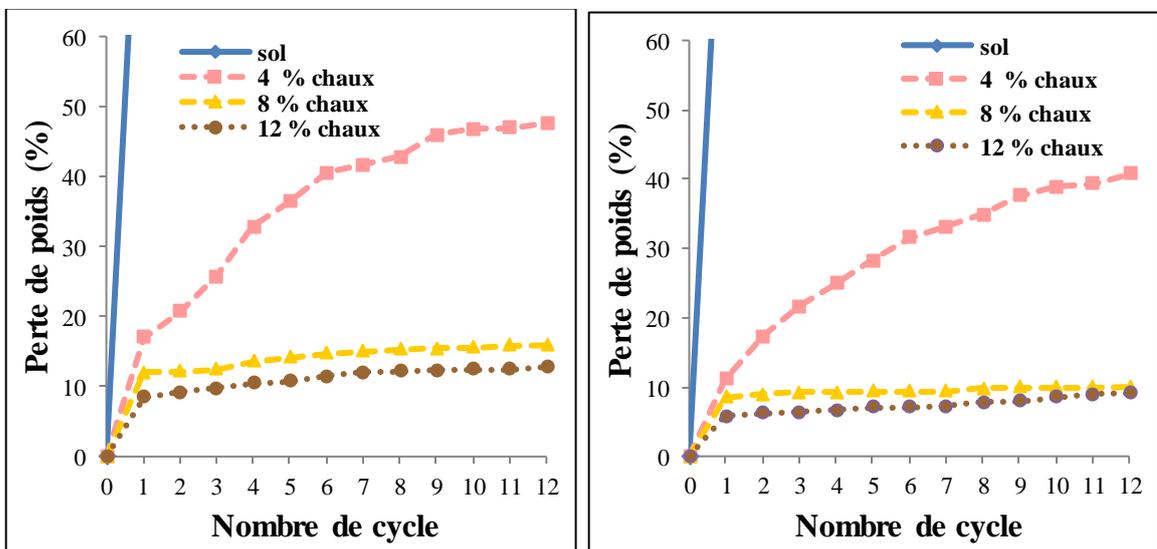


Figure 3.40 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage.

Les résultats obtenus, après l'essai de mouillage-séchage pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités à la chaux seule, sont donnés dans la figure 3.41.



(a)

(b)

Figure 3.41: Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en chaux additionnée. (a-7 jours. b- 28 jours).

Les résultats présentés dans la figure montrent que pour les échantillons de terre traités avec 4 % de chaux, la perte de poids augmente progressivement avec le nombre de

cycles, tandis que pour les échantillons de terre traités avec 8 % et 12 % de chaux, la perte de poids augmente rapidement jusqu'à une certaine valeur, suivie d'une augmentation progressive des valeurs de perte de poids avec l'augmentation du nombre de cycles, à 7 et 28 jours. Comme pour le cas du traitement des échantillons de terre à base de sol limoneux au ciment, une tendance à une diminution de la perte de poids avec l'augmentation de la teneur en chaux dans le mélange (terre – chaux), est observée à 7 et 28 jours. Par contre, l'augmentation de la période de cure entraîne une nouvelle diminution de la perte de poids.

3.4.1.5. Mélange (terre– chaux - laitier)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

Les cycles complétés pour les échantillons de terre à base du sol limoneux traités à 4 %, et 8 % de chaux seule et 4 %, et 8 % de chaux plus laitier, dans le test saturation-séchage, sont illustrés dans la figure 3.42.

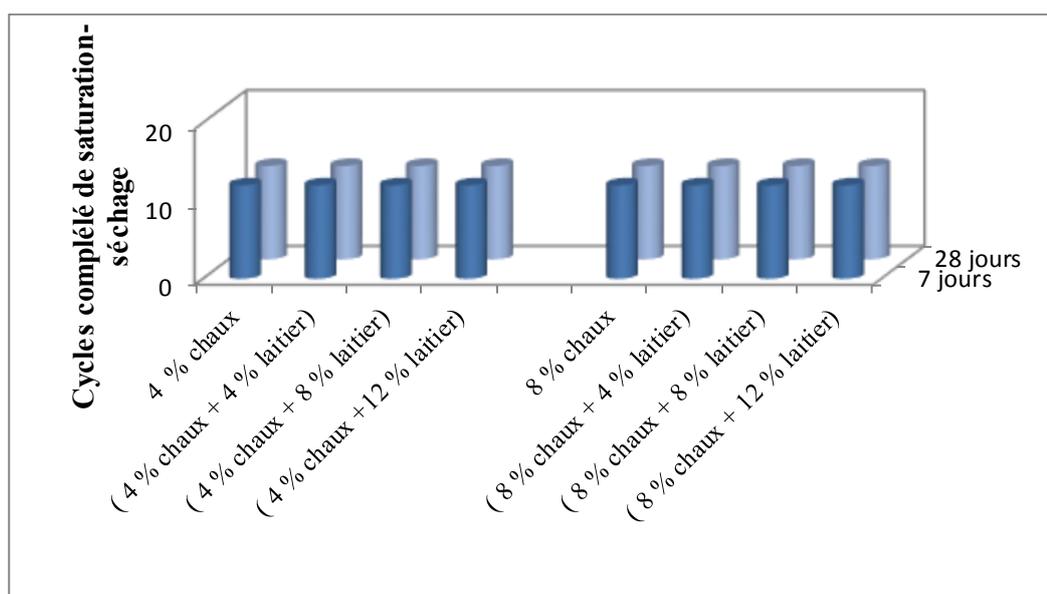


Figure 3.42 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux plus laitier.

À la lumière des résultats présentés, on peut voir que tous les échantillons de terre traités avec le mélange (chaux-laitier) ont survécu aux douze cycles d'humidification – séchage.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la variation de la perte de poids, des échantillons de terre à base de sol limoneux traités avec 4 % et 8 % de chaux seule et 4 % et 8 % de chaux, associée avec différentes teneurs en laitier, sont présentés sur la figure 3.43.

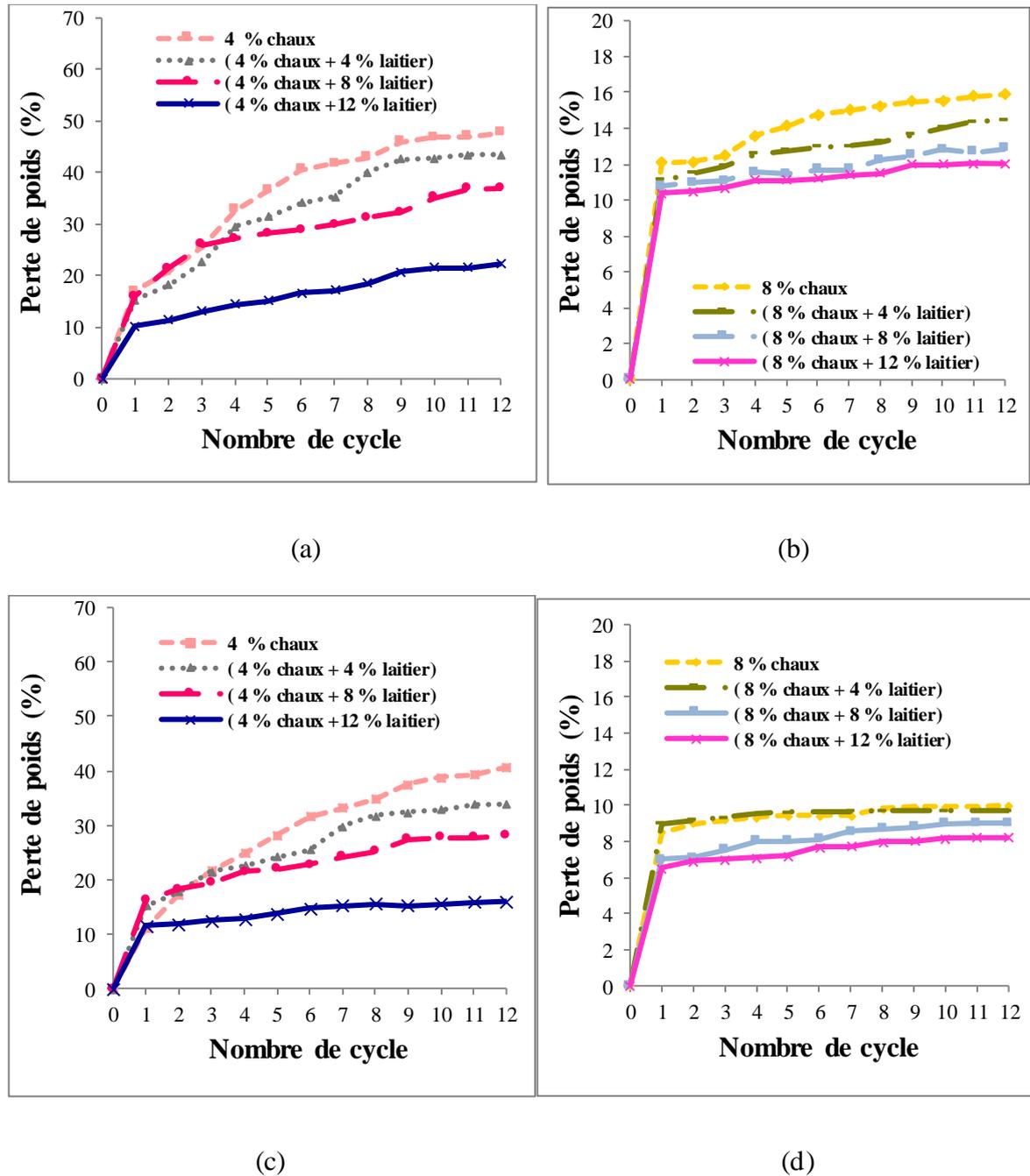


Figure 3.43 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en chaux plus laitier additionnée.

- a- (4 % chaux + laitier) 7 jours. b- (8% chaux + laitier) 7 jours. c- (4 % chaux + laitier) 28 jours. d-(8 % chaux + fibre) 28 jours.

Comme pour le mélange (terre – ciment –laitier), la même allure dans l'évolution de la perte de poids, en fonction du nombre de cycles est observée, pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 % et 8 % de chaux et mélangés à 4 % et 8 % et 12 % de laitier, ayant subi une période de cure de 7 jours et 28 jours. Une évolution rapide de la perte de poids jusqu'à une certaine valeur au cours du premier cycle, suivie d'une évolution progressive jusqu'au douzième cycle, est observée. Avec l'augmentation de la période de cure, cette progression dans l'allure des courbes tend à être constante, avec l'augmentation du nombre de cycles. Une tendance à la diminution de la perte de poids, avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (terre - chaux), l'augmentation de la teneur en chaux et la période de cure, est observée. Les échantillons de terre traités à 8 % de chaux et mélangés avec 4 % et 8 % et 12 % de laitier, ayant subi une période de cure de 28 jours, présentent les valeurs les plus faibles de la perte de poids. Ces valeurs sont inférieures à 10 %.

3.4.1.6. Mélange (terre – fibres de paille de blé)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

Les cycles complétés pour les échantillons de terre à base de sol limoneux mélangés avec différents pourcentages de fibres de paille de blé, sont présentés dans la figure 3.44.

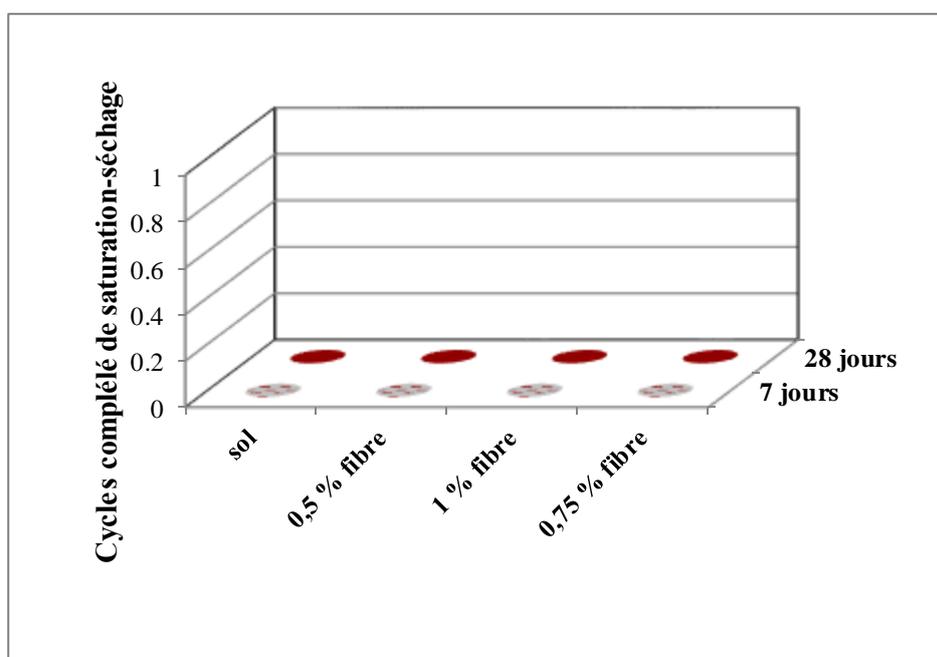
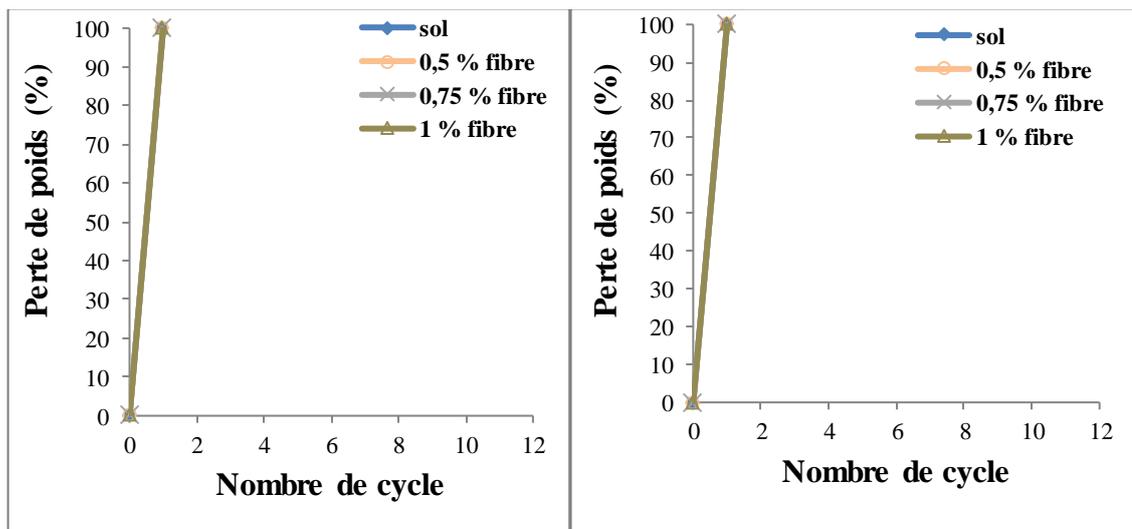


Figure 3.44 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la paille.

Comme le montre la figure 3.43, les blocs de terre à base de sol limoneux traitée avec des fibres de paille de blé, présentent le même comportement que la terre non traitée. Ils se sont effondrés juste après la 1^{ère} phase de saturation, avant l'achèvement du 1^{ère} cycle.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

La perte de poids des échantillons de terre à base de sol limoneux mélangée avec différents pourcentages de fibres de paille de blé, après deux cycles de séchage-humidification, est illustrée dans la figure 3.45.



(a)

(b)

Figure 3.45 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur en fibres. a- 7 jours. b-28 jours.

Les résultats présentés sur cette figure montrent que les échantillons de terre renforcés par les fibres en paille de blé subissent une perte de poids de 100 % dès le premier cycle, à 7 jours et 28 jours de cure.

3.4.1.7. Mélange (terre- ciment- fibres de paille de blé)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

Les cycles de saturation-séchage complétés après le traitement avec de la paille de blé et du ciment sont illustrés à la figure 3.46. Les résultats montrent que tous les échantillons de terre traités avec le mélange (ciment – fibres) ont survécu aux 12 cycles d'humidification - séchage

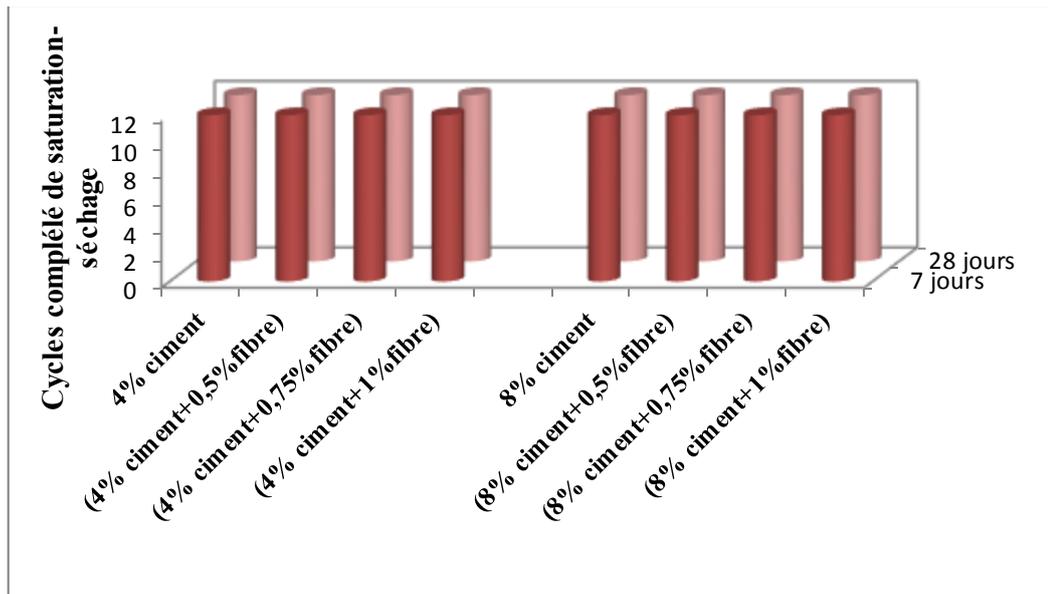
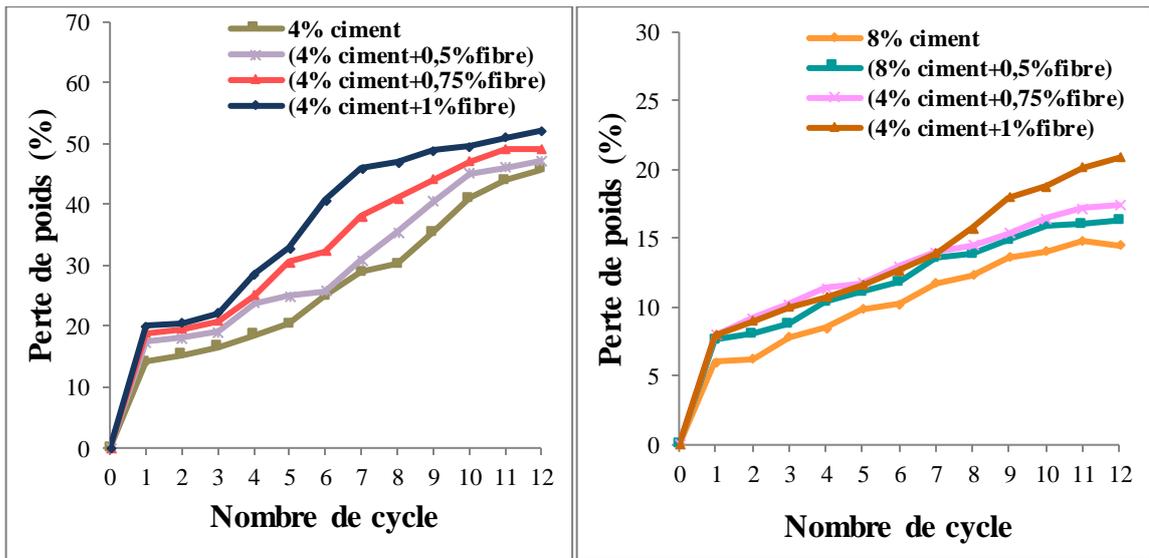


Figure 3.46 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la paille plus du ciment.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

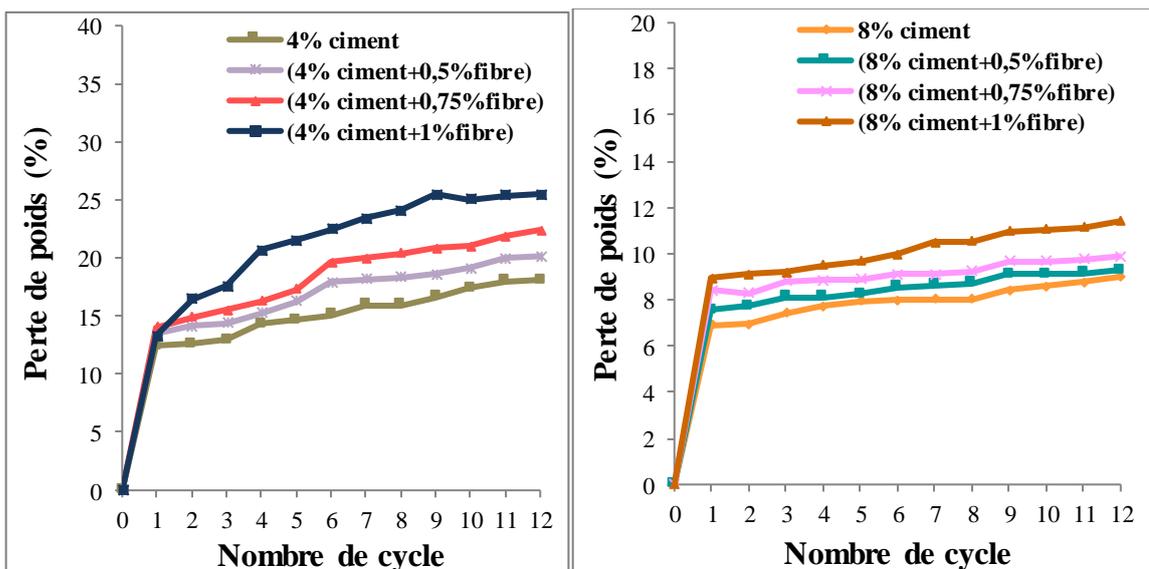
L'influence du mélange (ciment-fibres) sur la perte de poids des échantillons de terre à base de sol limoneux, après le test humidification – séchage, est illustrée dans la figure 3.47.

Comme on peut le voir sur la figure 3.47 (a, b), pour les échantillons de terre stabilisés à (4 %, 8 %) de ciment et mélangés avec 0.5 %, 0.75 % et 1% de fibres de paille de blé, la même allure que celle observée pour les blocs traités au mélange (ciment - laitier) est marquée pour les échantillons traités au mélange (ciment - fibres). Il y a une forte augmentation des valeurs de la perte de poids jusqu'à une certaine valeur, suivie d'une augmentation progressive de ces valeurs, avec l'augmentation du pourcentage en poids des fibres en paille de blé et du nombre de cycles. Une tendance à une augmentation de la perte de poids, avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille de blé dans le mélange (terre – ciment), est aussi observée pour les blocs de terre traités à 4 %, 8 % de ciment, après une période de cure de 7 et 28 jours. Avec l'augmentation de la période de cure, une diminution de la perte de poids, est enregistrée avec l'augmentation du nombre de cycles et du pourcentage de ciment. Les valeurs de la perte de poids pour les blocs de terre, traitée à 8 % du ciment et mélangée avec (0.5 %, 0.75 %) de fibres de paille de blé, sont inférieures à 10 %.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 3.47 : Variation de la perte de poids pour la terre à base de sol limoneux en fonction de la teneur ciment et de fibres additionnée.

- a. (4 % ciment + fibre) 7 jours. b. (8 % ciment+ fibre) 7jours. c. (4 % ciment +fibre) 28 jours. d. (8 % ciment + fibre) 28 jours.

3.4.2. Essai d'absorption capillaire

Le test d'absorption capillaire a été réalisé selon la norme (XP 13 - 901), sur les échantillons de terre à base de sol limoneux seuls et mélangés avec les mêmes pourcentages d'additifs utilisés dans les sections précédentes.

3.4.2.1. Mélange (terre– laitier)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire, issus des tests réalisées sur des échantillons de terre à base de sol limoneux, seuls et mélangés avec différentes teneurs en laitier, sont données dans le tableau 3.4.

Note: Les traits dans le tableau indiquent l'absence de résultat dû à l'effondrement de la surface des échantillons de terre-au contact de l'eau.

Tableau 3.4 : Variation de l'absorption capillaire en fonction du laitier ajouté.

	Absorption capillaire (cm.s^{-0,5})×10⁻²	
	7 jours	28 jours
Sol	-	-
4 % laitier	-	-
8 % laitier	-	1,5
12 % laitier	-	0,9

Des valeurs du coefficient d'absorption capillaire, obtenues à partir de tests effectués sur les échantillons de terre à base de sol limoneux traités au laitier, présentées dans le tableau 3.4, il en ressort clairement qu'à l'exception des échantillons de terre traités à 8 % et 12 % de laitier, à 28 jours de cure, l'ajout du laitier seul n'a eu aucun effet sur la diminution l'absorption capillaire du reste des échantillons traités et laissés pour une cure de 7 et 28 jours (figure 3.48). Les valeurs présentées, dans le tableau ci-dessus, montrent une réduction du coefficient d'absorption à 1,5 (cm.s^{-0,5}) × 10⁻² et 0,9 (cm.s^{-0,5}), des échantillons de terre à base de sol limoneux traités par l'ajout de 8 % et 12 % de laitier respectivement, après 28 jours de cure.



Figure 3.48 : Effondrement de surface des échantillons du sol limoneux pendant l'essai d'absorption.

3.4.2.2. Mélange (terre – ciment)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire issues du test réalisé sur des échantillons de terre à base de sol limoneux, seuls et mélangés avec différentes teneurs en ciment, sont données dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Variation de l'absorption capillaire en fonction du ciment ajouté.

Sol	Absorption capillaire ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-0,5}$) $\times 10^{-2}$	
	7 jours	28 jours
	-	-
4 % ciment	2,26	0,7
8 % ciment	2,06	0,5
12 % ciment	2	0,58

Les résultats montrent que l'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment pour les deux périodes de cure. L'augmentation de la période de 7 à 28 jours a plus d'effet sur la réduction des valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre traités. En effet, une diminution de l'absorption capillaire à $2,26 (\text{cm}\cdot\text{s}^{-0,5})\times 10^{-2}$, $2,06 (\text{cm}\cdot\text{s}^{-0,5})\times 10^{-2}$ et $2 (\text{cm}\cdot\text{s}^{-0,5})\times 10^{-2}$ par l'ajout de 4%, 8% et 12% de ciment est observée à 7 jours de cure. Cette diminution est d'autant plus importante, comme le montre les valeurs du coefficient d'absorption dans le tableau ci-dessus, avec l'augmentation de la période de cure.

3.4.2.3. Mélange (terre – ciment - laitier)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire issues du test réalisé sur des échantillons de terre à base de sol limoneux seuls et mélangés avec différentes teneurs en ciment et du mélange (ciment- laitier), sont données dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Variation de l'absorption capillaire en fonction du ciment plus laitier ajouté.

Absorption capillaire (cm.s^{-0,5})×10⁻²		
	7 jours	28 jours
4 % ciment	2,26	0,7
(4 % ciment + 4 % laitier)	2,19	0,65
(4 % ciment + 8 % laitier)	2,15	0,57
(4 % ciment + 12 % laitier)	2,12	0,45
8 % ciment	2,06	0,5
(8 % ciment + 4 % laitier)	1,98	0,49
(8 % ciment + 8 % laitier)	1,9	0,45
(8 % ciment + 12 % laitier)	1,5	0,42

Une diminution de l'absorption capillaire, avec l'ajout de laitier à différents dosages de ciment est remarquée, par rapport à celle obtenue en ajoutant le ciment seul à 7 jours). Une plus grande diminution de l'absorption capillaire est observée à 28 jours.

3.4.2.4. Mélange (terre – chaux)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire issues du test réalisé sur des échantillons de terre à base de sol limoneux, seuls et mélangés avec différentes teneurs en chaux, sont données dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de la chaux ajouté.

Absorption capillaire (cm.s^{-0,5})×10⁻²		
	7 jours	28 jours
Sol	-	-
4 % chaux	3,4	0,8
8 % chaux	2,65	0,3
12 % chaux	2,13	0,15

Une diminution de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol limoneux traités à la chaux est observée avec l'augmentation de la teneur en chaux, après 7 et 28 jours de cure. Cette diminution devient plus importante avec l'augmentation de la période de cure.

3.4.2.5. Mélange (terre– chaux - laitier)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire issues du test réalisé sur des échantillons de terre à base de sol limoneux, mélangés avec différentes teneurs en chaux et du mélange (chaux- laitier), sont données dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de la chaux plus laitier ajouté.

Absorption capillaire (cm.s^{-0,5})×10⁻²		
	7 jours	28 jours
4 % chaux	3.4	0.8
(4 % chaux+ 4 % laitier)	3.12	0.7
(4 % chaux+ 8 % laitier)	3.01	0.44
(4 % chaux + 12 % laitier)	2.99	0.31
8 % chaux	2.65	0.3
(8 % chaux+ 4 % laitier)	2.44	0.27
(8 % chaux + 8 % laitier)	2.15	0.25
(8 % chaux + 12 % laitier)	2.01	0.16

Les résultats montrent que le coefficient d'absorption capillaire des échantillons traités avec le mélange (chaux - laitier) est inférieur à celui des échantillons traités avec la chaux seule. Une diminution de l'absorption peut également être observée avec l'augmentation de la durée de cure de 7 jours à 28 jours.

3.4.2.6. Mélange (terre– fibres de paille de blé)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire issus des test réalisé sur des échantillons de terre à base de sol limoneux seuls et mélangés avec différentes teneurs de fibres de paille de blé, sont données dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Variation de l'absorption capillaire en fonction de fibres ajoutées.

	Absorption capillaire (cm.s^{-0,5})×10⁻²	
	7 jours	28 jours
Sol	-	-
0,5 % fibre	-	-
0,75 % fibre	-	-
1 % fibre	-	-

Les résultats obtenus montrent qu'avec l'ajout des fibres de paille de blé seules, les surfaces des blocs s'effondrent au contact de l'eau. La tendance dans le comportement est similaire à celle observée pour les échantillons de terre non traités.

3.4.2.7. Mélange (terre– ciment - fibre)

Les valeurs du coefficient de l'absorption capillaire issues du test réalisé sur des échantillons de terre à base de sol limoneux seul et mélangé avec différentes teneurs en ciment et du mélange (ciment-fibres de paille de blé), sont données dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Variation de l'absorption capillaire en fonction du ciment plus fibre ajouté.

Sol	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
	-	-
4% ciment	2.26	0.7
(4 % ciment +0,5% fibre)	3.05	0.78
(4 % ciment+0,75% fibre)	3.12	0.8
(4 % ciment+1% fibre)	3.48	0.92
8% ciment	2.06	0,5
(8 % ciment + 0,5% fibre)	2.12	0,58
(8 % ciment + 0,75% fibre)	0,24	0,74
(8 % ciment + 1% fibre)	2.5	0,79

L'augmentation de la teneur en fibre entraîne une augmentation de l'absorption capillaire par rapport aux échantillons de terre stabilisés avec du ciment seul pour les deux temps de durcissement. En général, l'ajout de 0 à 0,5%, 0,75% et 1% de paille de blé plus 8% de ciment augmente l'absorption capillaire de 2,06 (cm .s^{-0,5}) × 10⁻² à 2,12 (cm .s^{-0,5})×10⁻², 2,42 (cm .s^{-0,5})×10⁻², 2,5 (cm .s^{-0,5})×10⁻² respectivement.

3.5. Synthèse des résultats du traitement de la terre à base de sol limoneux avec différents additifs

Il existe différentes normes qui suggèrent différents critères pour évaluer les performances des blocs en termes de résistance et de durabilité. Dans la plupart des normes internationales, la norme indienne (IS : 1725-1982) [18], la norme brésilienne [19], la norme régionale africaine [20], la norme néo-zélandaise (NSZ) [21] et la norme française (XP P 13-901) [22], la valeur minimale recommandée, pour la résistance à la compression à l'état sec est de 2 MPa. La valeur minimale de résistance à la compression à l'état humide est

supérieure ou égale à 1 MPa. Cid-Falceto et al (2012) [188] résume les valeurs minimales de résistance à la compression sèche et humide requises pour les blocs de terre comprimés dans la figure 3.48 selon différentes normes internationales.

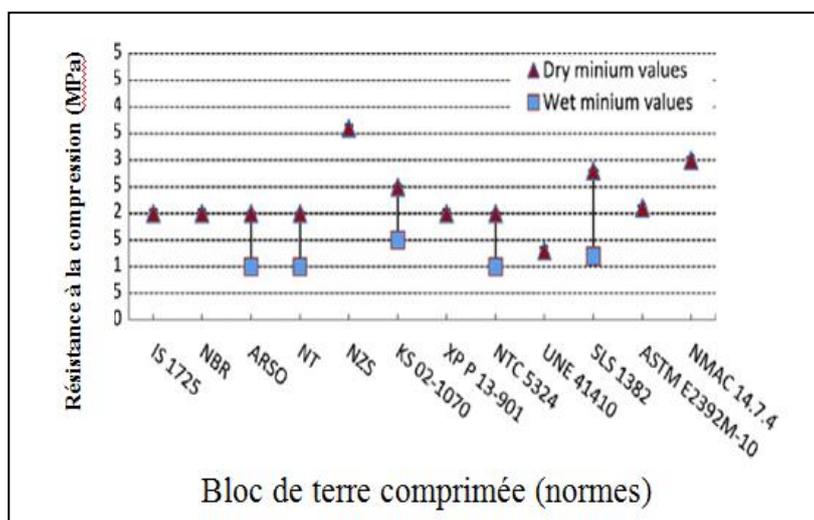


Figure 3.49 : Valeurs minimales de résistance à la compression sèche et humide dans toutes les normes internationales (CEB).

De plus, il y a diverses normes proposent différents tests de laboratoire pour étudier la durabilité des blocs de terre, notamment, le test humidification - séchage, le test d'érosion et le test d'abrasion. La limite recommandée de la perte de poids, après le test d'humidification – séchage, pour la construction en terre selon la norme ASTM D559 [182] est de 5 % pour tout climat avec une pluviosité annuelle supérieure à 500 mm et de 10 % pour les climats secs avec une pluviosité annuelle inférieure à 500 mm, alors que la norme africaine (WD-ARS 1333) [189], indique que la perte de masse maximale ne doit pas dépasser les 15 %. En ce qui concerne le test d'érosion, selon les normes de la Nouvelle-Zélande [21] et du Zimbabwe [190], la valeur minimale recommandée est exprimée par un indice d'érodabilité qui doit être inférieur à 5 ou une profondeur d'érosion inférieure à 120 mm (D120 mm). D'autres normes limitent l'érosion du bloc à moins de 10 mm, comme dans la norme indienne IS 1725 [29]. En ce qui concerne l'absorption capillaire, la norme NF XP 13-901 exige une valeur maximale de $20 \text{ (cm.s}^{-0.5}) \times 10^{-2}$.

Les tableaux 3.8, 3.9 et 3.10 résument les résultats obtenus dans la première partie, concernant la terre à base de sol limoneux. A partir de ces tableaux, les optimums de différentes combinaisons obtenus par l'essai de la résistance à la compression, l'essai – humidification-séchage et l'absorption capillaire sont dégagés.

Tableau 3.11 : Optimisation des résultats de la terre à base de sol limoneux traité par le laitier, le ciment et le mélange (ciment-laitier)

Limon + ciment +laitier	la résistance à la compression uniaxiale		Essai humidification – séchage			Absorption capillaire		Remarque
	28 jours	Remarque	Cycles complétés	Perte de poids (%) après 12 cycle	Remarque (La perte de poids doit)			
Sol	0,49	Échoué (RCU< 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	échoué	échoué
4 % laitier	0,991	Échoué (RCU< 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	échoué	échoué
8% laitier	1,115	Échoué (RCU< 2 Mpa)	2	-	Échoué (perte de poids >10 %)	1,5	Passé	échoué
12 % laitier	2,076	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	64,55	Échoué (perte de poids >10 %)	0,9	passé	échoué
4 % ciment	3,068	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	18,12	Échoué (perte de poids >10 %)	0,7	Passé	échoué
(4 %ciment +4 % laitier)	3,548	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	17,19	Échoué (perte de poids >10 %)	0,65	Passé	échoué
(4% ciment + 8% laitier)	4,085	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	15,18	Échoué (perte de poids >10 %)	0,57	Passé	échoué
(4% ciment +12% laitier)	5,009	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	13,20	Échoué (perte de poids >10 %)	0,45	Passé	échoué
8%ciment	3,979	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	9	Passé (perte de poids <10 %)	0,5	Passé	Passé
(8 %ciment + 4% laitier)	4,252	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	8,50	Passé (perte de poids < 10 %)	0,49	Passé	passé
(8 %ciment +8% laitier)	5,365	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	8,2	Passé (perte de poids < 10 %)	0,45	Passé	Passé
(8% ciment +12% laitier)	6,019	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	7,8	Passé (perte de poids <10 %)	0,42	Passé	Passé
12 ciment	4,546	Passé (RCU> 2 Mpa)	12	7.5	Passé (perte de poids <10 %)	0,58	Passé	Passé
Conclusion: Les combinaisons qui ont une résistance à la compression à 28 jours supérieurs à 2 MPa avec une perte de poids après 12 cycles inférieur à 10 % sont :8 ciment / (8 ciment + 4 laitier)/ (8 ciment +8 laitier)/(8 ciment +12 laitier)								

Tableau 3. 12 : Optimisation des résultats de la terre à la base de sol limoneux traité par le laitier, la chaux et mélange (chaux-laitier)

Limon + chaux +laitier	la résistance à la compression uniaxiale		Essai humidification – séchage			Absorption capillaire		Remarque
	28 jours	Remarque	Cycles complétés	Perte de poids (%) après 12 cycle	Remarque			
Sol	0,4	Échoué (RCU < 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	échoué	échoué
4 % laitier	0,991	Échoué (RCU < 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	échoué	échoué
8 % laitier	1,115	Échoué (RCU < 2 Mpa)	2	-	Échoué (perte de poids >10 %)	1.5	Passé	échoué
12 % laitier	2,076	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	64,55	Échoué (perte de poids >10 %)	0.9	Passé	échoué
4% chaux	3,258	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	40,67	Échoué (perte de poids >10 %)	0,8	Passé	échoué
(4 % chaux +4 %laitier)	3,555	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	33,85	Échoué (perte de poids >10 %)	0,7	Passé	échoué
(4 % chaux + 8 % laitier)	3,781	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	28	Échoué (perte de poids >10 %)	0,44	Passé	échoué
(4 %chaux +12 % laitier)	3,994	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	16	Échoué (perte de poids >10 %)	0,31	Passé	échoué
8 % chaux	3,012	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	10	Passé (perte de poids <10 %)	0,3	Passé	passé
(8% chaux+4 % laitier)	3,373	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	9,8	Passé (perte de poids < 10 %)	0,27	Passé	Passé
(8 % chaux +8 % laitier)	3,595	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	9,6	Passé (perte de poids < 10 %)	0,25	Passé	Passé
(8 % chaux +12 %laitier)	3,789	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	8,2	Passé (perte de poids <10 %)	0,16	Passé	Passé

Conclusion: Les combinaisons qui ont une résistance à la compression à 28 jours supérieurs à 2 MPa avec une perte de poids après 12 cycles inférieur à 10 % sont :8 chaux /(8 chaux + 4 laitier)/ (8 chaux +8 laitier)/(8 chaux +12 laitier)

Tableau 3.13 : Optimisation des résultats de la terre à base de sol limoneux traité par les fibres en paille de blé et le mélange

(Ciment-fibres en paille de blé)

<i>Limon + fibre +ciment</i>	la résistance à la compression uniaxiale		Essai humidification – séchage			Absorption capillaire		Remarque
	28 jours	Remarque	Cycles complétés	Perte de poids (%) après 12 cycles	Remarque			
Sol	0,4	Échoué (RCU < 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	-	échoué
0.5 % fibre	1.307	Échoué (RCU < 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	-	échoué
0.75 % fibre	1.123	Échoué (RCU < 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	-	échoué
1 % fibre	0.633	Passé (RCU > 2 Mpa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	-	-	échoué
4 % ciment	3.068	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	18,12	Échoué (perte de poids >10 %)	0.7	passé	échoué
(4 % ciment +0.5 % fibre)	3.195	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	20,15	Échoué (perte de poids >10 %)	0,5	Passé	échoué
(4% ciment +0.75 %fibre)	3.138	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	21,42	Échoué (perte de poids >10 %)	0.75	passé	échoué
(4% ciment +1 % fibre)	3.098	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	25,47	Échoué (perte de poids >10 %)	0.79	Passé	échoué
8% ciment	3.979	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	9.01	Passé (perte de poids <10 %)	0,5	passé	Passé
(8% ciment +0.5 % fibre)	4.078	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	9,16	Passé (perte de poids < 10 %)	0.58	Passé	Passé
(8 % ciment +0.75 %fibre)	4.005	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	9,59	Passé (perte de poids < 10 %)	0.74	passé	passé
(8% ciment +1 % fibre)	4.002	Passé (RCU > 2 Mpa)	12	11,41	Échoué (perte de poids >10 %)	0.79	Passé	échoué
Conclusion: Les combinaisons qui ont une résistance à la compression à 28 jours supérieurs à 2 MPa avec une perte de poids après 12 cycles inférieur à 10 % sont : 8 ciment / (8 ciment +0.5 % fibre) / (8 ciment + 0.75 % fibre)								

3.6. Effet des optimums des additifs sur les blocs de terre à base de sol limoneux

Pour mettre en évidence la performance et la durabilité des blocs dans une structure de maçonnerie nous avons réalisé les essais de durabilité (essais d'érosion, la résistance à l'abrasion, le retrait et le gonflement) et les essais thermiques sur les blocs issues des meilleures formulations obtenues à partir de la première partie.

3.6.1. Essai d'érosion

NOTE : Le test d'érosion a été réalisé sur les blocs de terre à base de sol limoneux, stabilisés par ajout, de différents additifs utilisés dans cette étude. Les teneurs et la combinaison des additifs, adoptées pour la confection de blocs de terre stabilisée, sont seulement celles ayant permis aux échantillons de terre stabilisée, données dans la partie précédente, de vérifier les valeurs minimales recommandées par les différents tests, à savoir, le test de résistance, de perte de poids et d'absorption capillaire

Le test d'érosion est un test empirique développé par le Commonwealth, Organisation de recherche scientifique et industrielle (CSIRO), conformément à la norme australienne, pour simuler l'action de la pluie. Les blocs de terre sont soumis à l'essai d'érosion après une cure de 7 et 28 jours.

3.6.1.1. Mélange (terre - ciment – laitier)

La variation des taux d'érosion des blocs de terre à base de sol limoneux, stabilisés au ciment et au mélange (ciment-laitier), ayant subi une cure de 7 et 28 jours, est donnée dans la figure 3.50.

Les résultats montrent que l'addition d'une quantité de laitier au mélange (terre-ciment) entraîne une réduction du taux d'érosion de la terre à base de sol limoneux à 7 et 28 jours de cure. Cette réduction est beaucoup plus prononcée avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange et de la période de cure. Comme observé, en augmentant la teneur en laitier dans le mélange (terre – ciment), l'érosion en surface des blocs de terre à base de sol limoneux, traités à (8 % ciment + 8 % laitier) et (8 % ciment + 12 % laitier) à 28 jours de cure, s'est réduite à zéro.

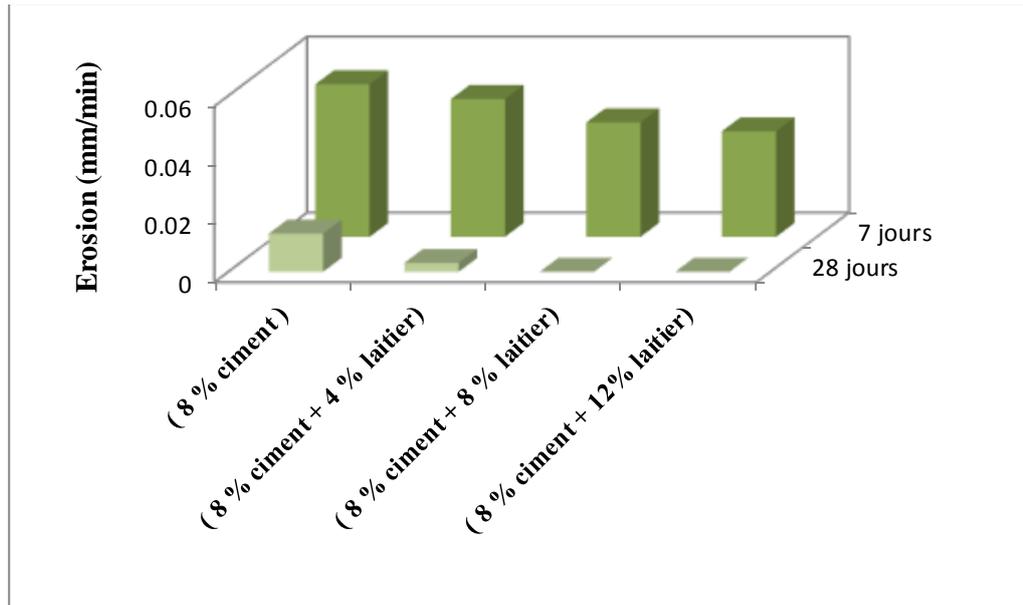


Figure 3.50 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (ciment -laitier).

3.6.1.2. Mélange (terre - chaux – laitier)

Les résultats de l'essai d'érosion sur les blocs de terre à base de sol limoneux traités à la chaux /ou au mélange (chaux - laitier) à 7 et 28 jours de cure, sont présentés dans la figure 3.51.

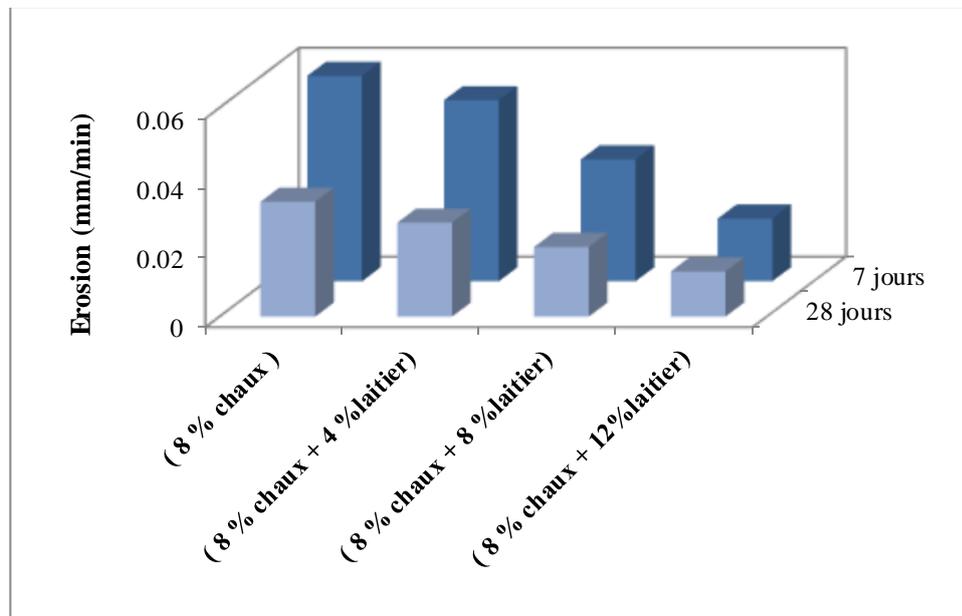


Figure 3.51 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (chaux -laitier).

La même allure dans l'évolution du taux d'érosion de la terre à base de sol limoneux, traitée à la chaux et au mélange (chaux-laitier) comme dans le cas du traitement au ciment et au mélange (ciment- laitier), est observée. Une diminution du taux d'érosion avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (terre-chaux) à 7 et 28 jours de cure est remarquée. Cette diminution augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier et de la période de cure. Le bloc de terre stabilisé le plus résistant, est celui présentant la teneur maximale en laitier dans le mélange (terre-chaux) et ayant subi une cure de 28 jours.

3.6.1.3. Mélange (terre - ciment – fibre)

Les résultats de la variation du taux de l'érosion de la terre à base de sol limoneux, en fonction de la teneur en ciment et en ciment avec différentes proportions de fibres de paille de blé (0.5 et 0.75%), à 7 et 28 jours de cure, sont illustrés dans la figure 3.52.

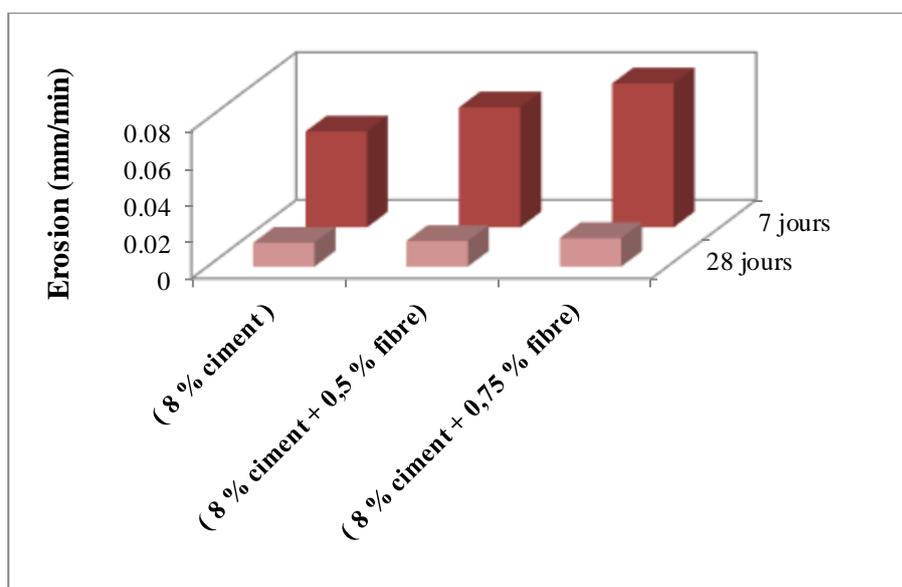


Figure 3.52 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (ciment- fibre).

L'inclusion de fibres de paille de blé dans le mélange (ciment - terre) contribue à l'augmentation du taux d'érosion des blocs par rapport aux blocs stabilisés au ciment seul, à 7 et 28 jours de cure. Avec l'augmentation de la période de cure, le taux d'érosion subi par les échantillons de terre à base de sol limoneux, stabilisés au ciment et au mélange (ciment-fibres de paille de blé), est beaucoup moins important que celui obtenu à 7 jours de cure. Néanmoins, l'allure de l'augmentation du taux d'érosion avec l'augmentation de la proportion de fibres de paille de blé dans le mélange (terre-ciment) persiste.

3.6.2. Essai d'abrasion

Le test de résistance à l'abrasion illustre l'érosion des blocs à base de sol limoneux sous l'action abrasive du vent de sable, en essayant de simuler les conditions dans les zones sèches et arides.

3.6.2.1. Mélange (terre-- ciment – laitier)

L'influence du dosage en ciment et du ciment plus laitier sur le coefficient d'abrasion des blocs à base de sol limoneux traités à différents âges, est illustrée dans la figure 3.53.

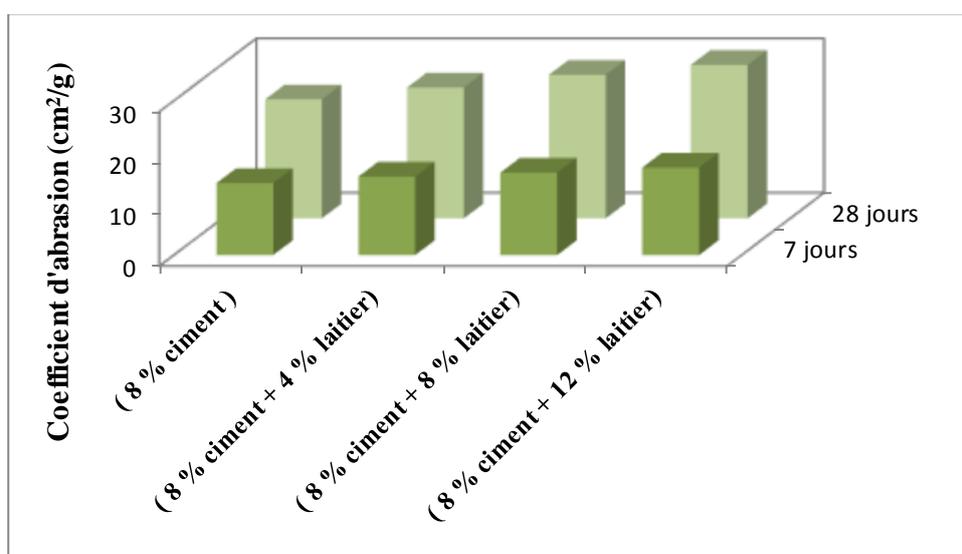


Figure 3.53 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (ciment –laitier).

L'analyse des résultats montre que le coefficient d'abrasion augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (ciment - laitier). L'augmentation de l'érosion est de 13.97 cm²/g à 17 cm²/g lorsque la teneur en laitier varie de 0 à 12 % de laitier. L'allongement de la période de cure de 7 jours à 28 jours fait passer le coefficient d'abrasion de 17 cm²/g à 29.84 cm²/g pour les blocs traités à 8 % de ciment plus 12 % de laitier. Cette valeur est supérieure à la valeur du coefficient minimum recommandé par les normes (NF XP 13-901) lequel est de 2.

3.6.2.2. Mélange (terre - chaux – laitier)

La figure 3.54 présente la variation de la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol limoneux stabilisés à la chaux et au mélange (chaux - laitier) à 7 et 28 jours de cure.

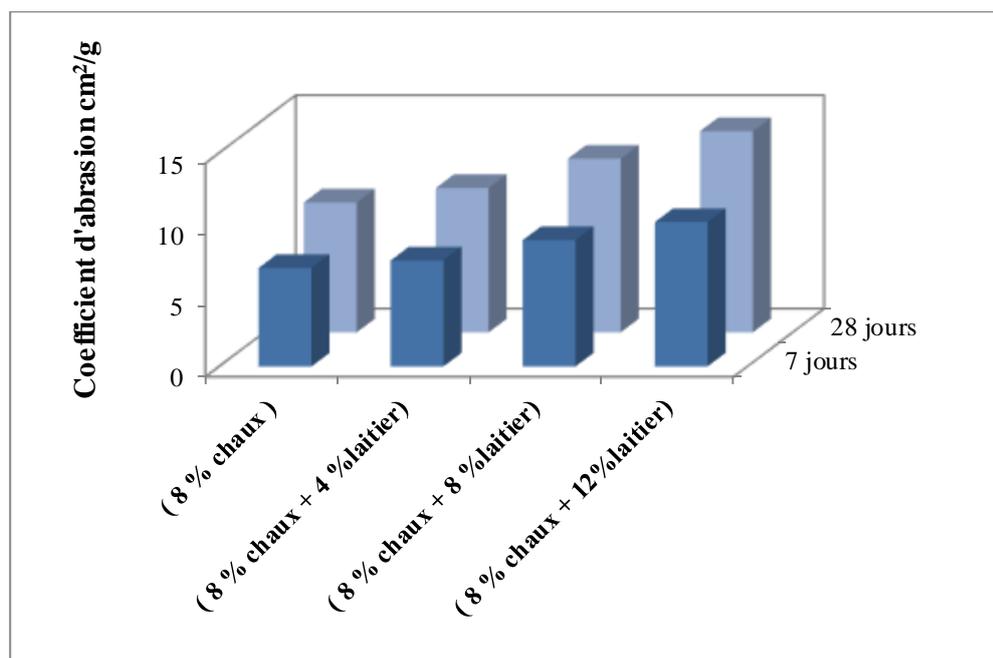


Figure 3.54 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (chaux –laitier).

En ce qui concerne l'effet de l'ajout de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la résistance à l'abrasion des blocs à base de sol limoneux, les résultats donnés dans la figure ci-dessus montrent qu'il y a une augmentation du coefficient d'abrasion par l'ajout de 8 % de chaux pour les deux temps de cure 7 et 28 jours. Une augmentation supplémentaire du coefficient d'abrasion est obtenue par les blocs de terre traités à 8 % de chaux, contenant la plus grande valeur de laitier et ayant subi une plus grande valeur de cure. À titre d'exemple, une augmentation de 6.92 cm²/g à 10.15 cm²/g est obtenue pour les échantillons traités à 8 % de chaux et mélangés avec 12 % de laitier à 7 jours de cure. Pour la même teneur en chaux et du mélange (chaux – laitier), et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours, le coefficient d'abrasion du bloc de terre augmente de 10.15 cm²/g à 14.14 cm²/g.

3.6.2.3. Mélange (terre - ciment – fibres de paille de blé)

La figure 3.55 présente l'évolution de la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol limoneux, stabilisés au ciment et au mélange de (fibres en paille de blé- ciment) pour les deux périodes de cure, 7 et 28 jours.

Une augmentation dans la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol limoneux stabilisé au ciment et au mélange (ciment-fibres de paille de blé), à 7 et 28 jours

de cure, est observée. Cette augmentation est d'autant plus grande en augmentant la période de cure. Par exemple, l'addition de 0.5 % et 0.75 % améliore la résistance à l'abrasion de 13.57 cm²/g à 14.35 cm²/g, par rapport aux blocs traités au ciment seul. Le prolongement de la période de cure de 7 à 28 jours augmente la résistance à l'abrasion de 15.01 cm²/g à 25.05 cm²/g pour les blocs traités à 8 % de ciment plus 0.75 % de fibres.

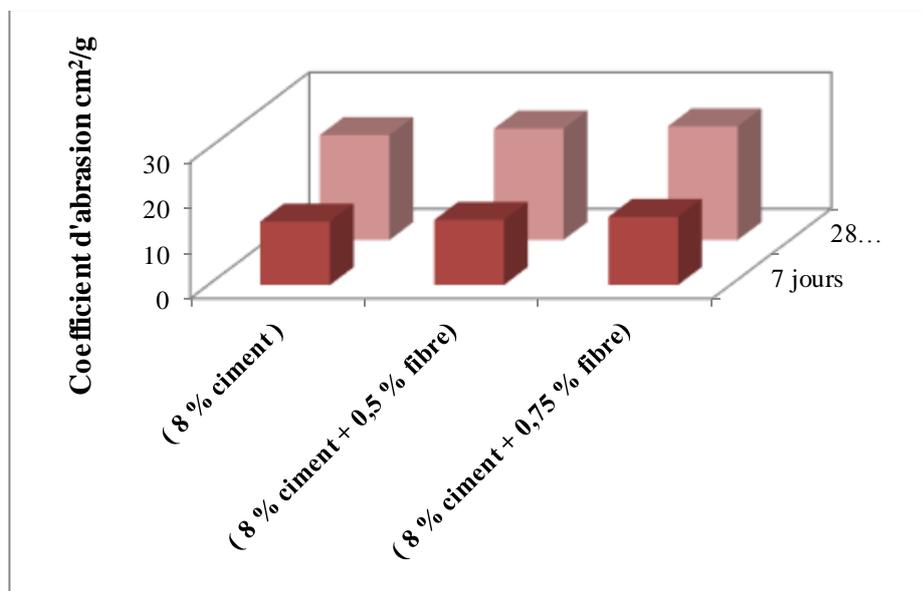


Figure 3.55 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (ciment -fibre).

3.6.3. Essai de gonflement

Afin d'évaluer le gonflement d'un sol limoneux destiné à être utilisé comme matériau de construction, le test a été effectué selon la norme française XP13-901. Après une cure de 7 et 28 jours, les échantillons testés ont été immergés dans l'eau pendant quatre jours. Après les quatre jours d'immersion, le gonflement total des spécimens testés a été mesuré, ce qui a permis de déterminer le taux de gonflement du sol.

3.6.3.1. Mélange (terre– ciment – laitier)

La variation du taux de gonflement des blocs de terre à base de sol limoneux, stabilisés au ciment et au mélange (ciment - laitier), à 7 et 28 jours de cure, est illustrée à la figure 3.56.

Les résultats obtenus montrent une réduction significative du gonflement pour les blocs de terre traités avec le mélange (ciment - laitier) à 7 jours de cure. Le gonflement

diminue de, 0.129 % à 0.094 %, 0.066 % et 0.035 %, pour les blocs de terre traités au ciment seul et mélangés avec 4 %, 8% et 12 % de laitier respectivement.

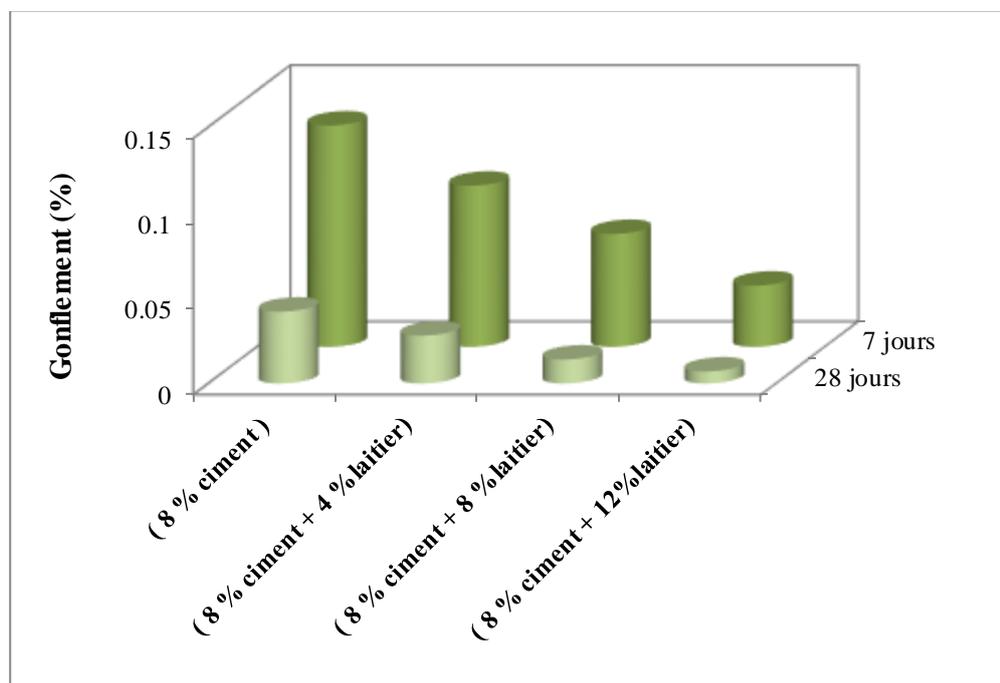


Figure 3.56 : Variation du taux de gonflement en fonction du mélange (ciment –laitier).

Cette réduction devient plus importante avec l'augmentation de la période de cure de 7 jours à 28 jours. En termes de valeur, il est observé une réduction de 0.035 % à 0.007 % respectivement, pour les blocs stabilisés au mélange de 8 % de ciment et 8 % de ciment plus 12 % de laitier lorsque la période de cure augmente de 7 jours à 28 jours.

3.6.3.2. Mélange (terre – chaux– laitier)

La variation du taux de gonflement des blocs de terre à base de sol limoneux, stabilisés à la chaux et au mélange (chaux-laitier) à 7 et 28 jours de cure est présentée dans la figure 3.57.

D'après les résultats illustrés dans cette figure, on remarque une diminution considérable du gonflement avec l'augmentation des teneurs en additifs, chaux seule, (chaux-laitier) et de la période de cure. Comme il peut se voir sur la figure, le gonflement du bloc de terre stabilisée à base du mélange de 8 % de chaux (pour l'ensemble des teneurs en laitier) présente des valeurs inférieures à celle des blocs à base de 8 % de chaux seule, à 7 et 28 jours de cure. Par contre, une réduction importante du gonflement avec l'augmentation de la période de cure est observée. Par exemple, une diminution des valeurs du gonflement

de, 0.069 % à 0.034 % et de 0.2 à 0.125%, pour le mélange de 8 % de chaux et 8 % de chaux plus 12 % de laitier est obtenue, respectivement, à 28 et 7 jours de cure.

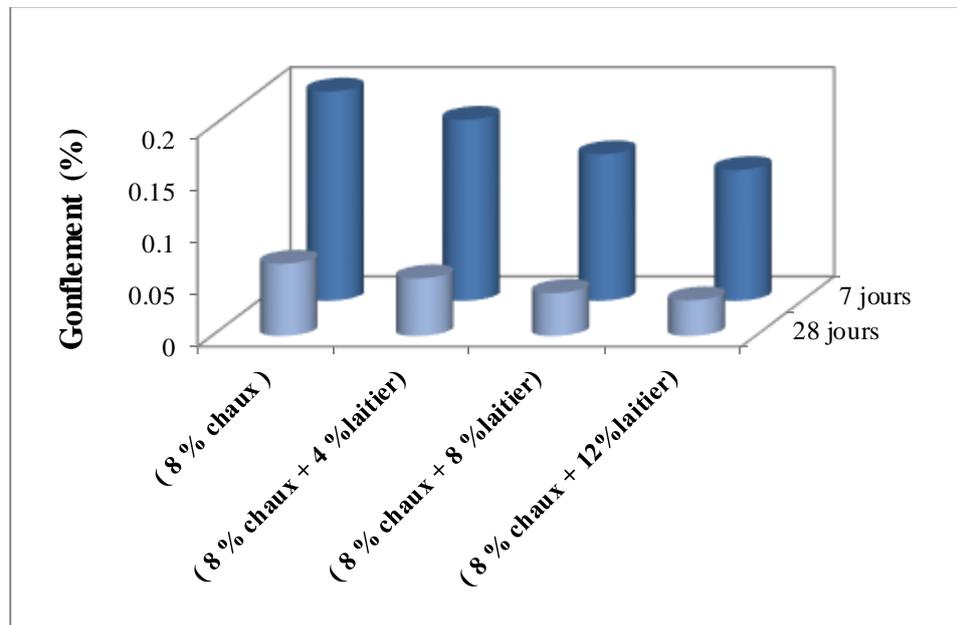


Figure 3.57 : Variation du taux de gonflement en fonction du mélange (chaux –laitier).

3.6.3.3. Mélange (terre – ciment – fibres de paille de blé)

L'évolution du gonflement des blocs de terre à base de sol limoneux, stabilisés au ciment et au mélange (ciment- fibres en paille de blé) à 7 et 28 jours de cure, est illustrée dans la figure 3.58.

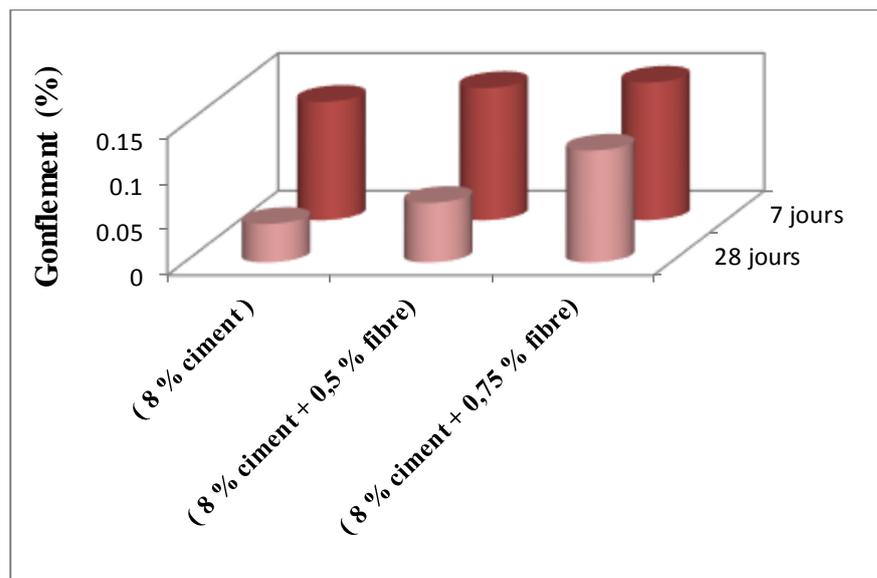


Figure 3.58 : Variation du taux de gonflement en fonction du mélange (ciment –fibre).

Les résultats illustrés montrent une augmentation du taux de gonflement par l'ajout de fibres en paille aux échantillons de terre à base de sol limoneux stabilisés à 8 % de ciment, à 7 et 28 jours de cure. L'introduction d'une teneur en fibres en paille de blé dans le mélange (terre-ciment), induit une augmentation du taux de gonflement avec l'augmentation de la quantité de paille de blé rajoutée, à 7 et à 28 jours de cure. L'augmentation de la période de cure, à 28 jours, diminue ce taux d'évolution du gonflement avec l'augmentation de la quantité de paille de blé dans le mélange (terre-ciment)

3.6.4. Essai de retrait

Le test consiste à suivre l'évolution du raccourcissement de la longueur de l'échantillon de bloc de terre en fonction du temps à l'aide d'un pied à coulisse selon la norme NF XP- 13-901.

3.6.4.1. Mélange (terre – ciment – laitier)

La figure 3.59 présente l'évolution du retrait des blocs à base de sol limoneux traités à 8 % de ciment et 8 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier en fonction du temps à 28 jours de cure.

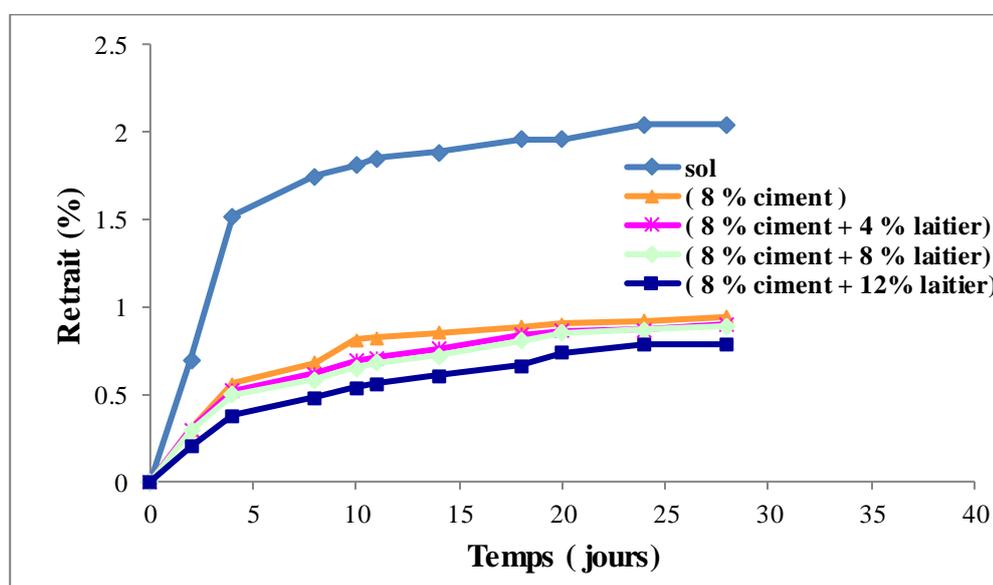


Figure 3.59 : Évolution de retrait en fonction du mélange (ciment –laitier) et du temps de cure.

Le retrait augmente avec l'augmentation du temps de séchage. Cette augmentation du retrait est plus prononcée dans les quatre premiers jours, puis tend à se stabiliser pour devenir constante après 14 jours. Ce que l'on peut également remarquer, c'est que le retrait

du bloc stabilisé au ciment, diminue de façon considérable avec l'incorporation d'une quantité de ciment en comparaison avec le bloc de terre à base de sol limoneux non traité. Cette augmentation est d'autant plus prononcée avec l'ajout au ciment d'une quantité de laitier. En effet, le retrait diminue avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange (terre-ciment) pour une quantité de ciment fixe.

3.6.4.2. Mélange (terre – chaux – laitier)

La figure 3.60 présente l'évolution du retrait des blocs à base de sol limoneux traités à 8 % de chaux plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier en fonction du temps à 28 jours de cure.

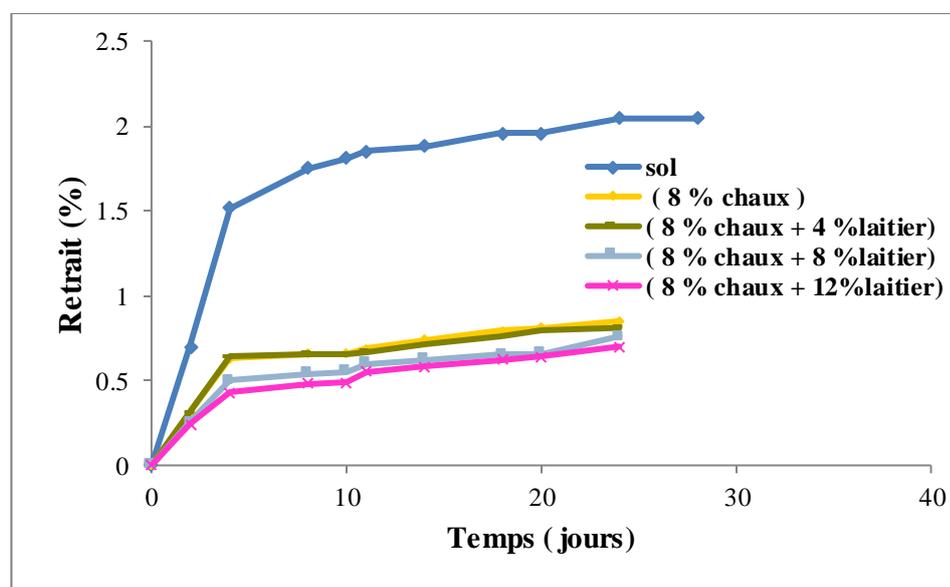


Figure 3.60 : Évolution de retrait en fonction du mélange (chaux -laitier) et du temps de cure.

Comme pour le cas de la terre à base de sol limoneux stabilisée au mélange (ciment-laitier), un retrait important est enregistré pour les blocs de terre stabilisés à la chaux et mélange (chaux-laitier), pendant les quatre premiers jours, puis tend à se stabiliser. Une diminution significative du retrait pour la terre à base de sol limoneux stabilisée avec 8 % de chaux est observée. Une diminution encore plus importante de retrait est observée, avec l'ajout d'une teneur en laitier au mélange (terre-ciment). En effet, pour une valeur de ciment fixe, une augmentation de la proportion de laitier entraîne une plus grande diminution dans le retrait des blocs de terre. Le bloc de terre stabilisée avec un mélange de (8 % ciment-12 % laitier) subit le taux de retrait le plus faible.

3.6.4.3. Mélange (sol – ciment – fibre)

L'évolution du retrait des blocs à base de sol limoneux traités à 8 % de chaux et 8 % de chaux plus (0.5 % et 0.75 %) de fibres de paille de blé, à 28 jours de cure, est illustrée dans la figure 3.61.

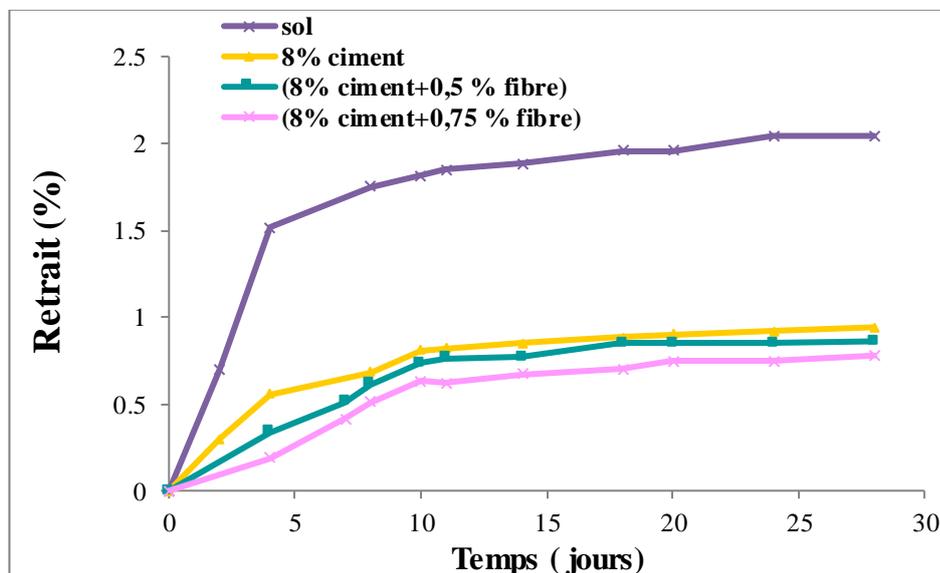


Figure 3.61 : Évolution de retrait en fonction du mélange (ciment – fibre) et du temps de cure.

D'après les résultats obtenus, le retrait diminue avec l'augmentation à la fois de la proportion de ciment et celle des fibres de paille de blé dans le mélange (ciment-paille de blé). Cependant, le fait de mélanger une proportion de ciment avec une proportion de fibres entraîne une réduction supplémentaire avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans le mélange. Le bloc de terre stabilisé avec un mélange de (8 % ciment - 0.75 % paille de blé), subit le taux de retrait le plus faible.

3.6.5. Essai de conductivité thermique

3.6.5.1. Mélange (terre – ciment – laitier)

La figure 3.62 présente la variation de la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol limoneux traités à 8 % de ciment et 8 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier à 28 jours de cure. Les résultats montrent que la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol limoneux stabilisés à 8 % de ciment et 8 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier, augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (terre - ciment). L'augmentation est de 1.08 W/m.K à 1.112 W/m.K, 1.172 W/m.K et 1.226 W/m.K par l'ajout de 0, 4 %, 8 % et 12 % de laitier plus 8 % de ciment.

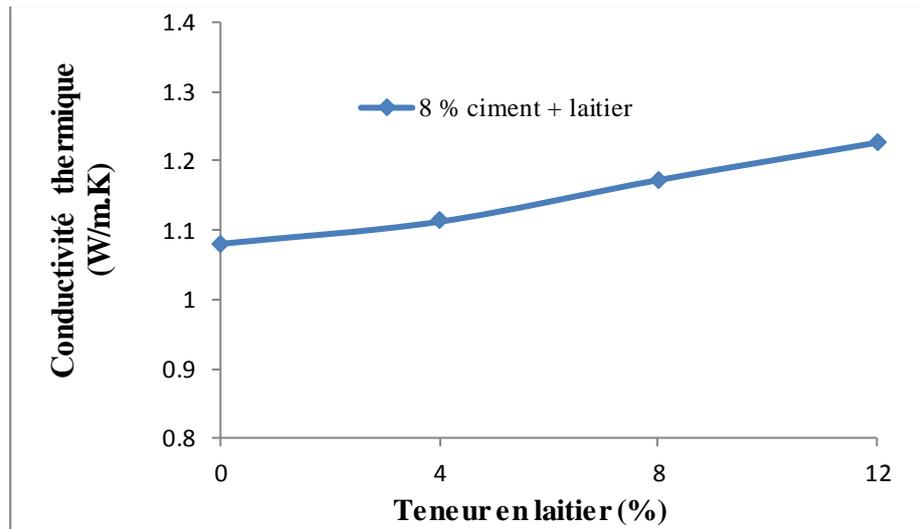


Figure 3.62 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (ciment – laitier).

3.6.5.2. Mélange (terre– chaux – laitier)

La variation de la conductivité thermique des blocs à base de sol limoneux traités à 8 % de chaux et 8 % de ciment plus (4 %, 8 % et 12 %) de laitier, à 28 jours de cure, est donnée dans la figure 3.63.

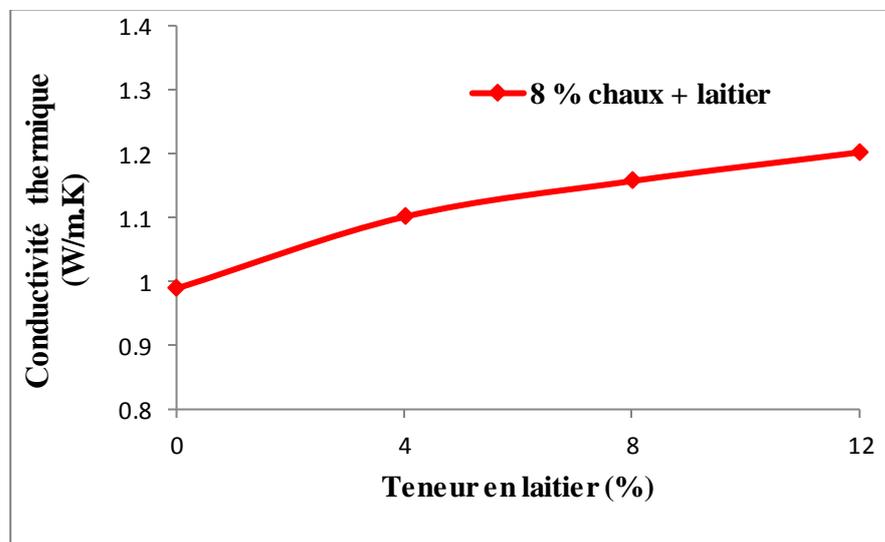


Figure 3.63 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (chaux- laitier).

Comme pour le cas de la terre traitée au ciment, les résultats montrent une augmentation de la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol limoneux traités à la chaux et au mélange (chaux- laitier), avec l'accroissement de la teneur du laitier dans le

mélange (terre-chaux). En termes de valeur, une augmentation de 0.989 W/m.K à 1.101 W/m.K, 1.157 W/m.K et 1.202 W/m.K par l'ajout de 8 % de chaux mélangé avec 0 , 4 %, 8 % et 12 % de laitier est observée.

3.6.5.3. Mélange (terre – ciment- fibres de paille de blé)

La variation de la conductivité thermique des blocs à base de sol limoneux traités à 8 % de ciment et 8 % de ciment plus (0.5 % et 0.75 %) de fibres de paille de blé, à 28 jours de cure, est donnée dans la figure 3.64.

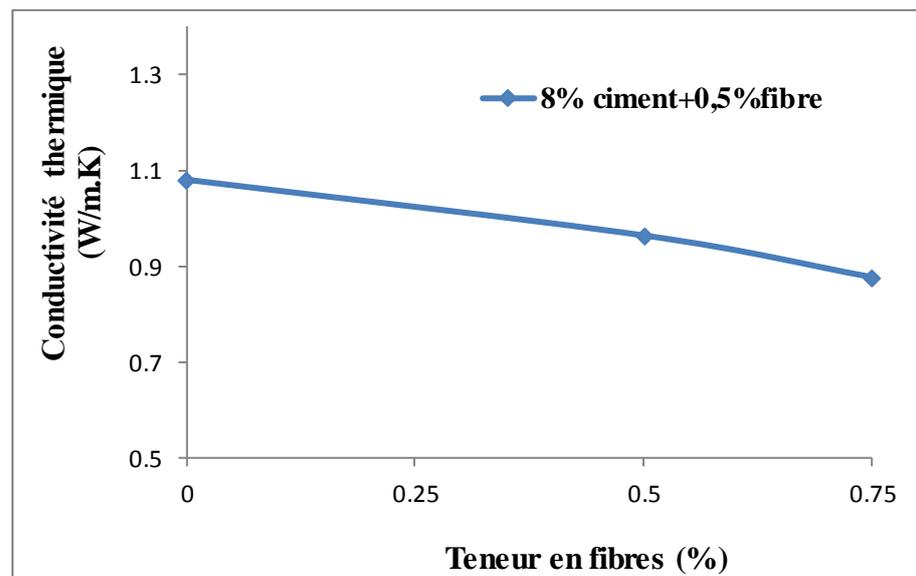


Figure 3.64 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (ciment –fibre).

Les résultats obtenus indiquent que la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol limoneux traités diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres dans le mélange (ciment-fibres en paille de blé). L'ajout de 0.5 % et 0.75 % de fibres à 8 % de ciment diminue la conductivité thermique de 1.08 W/m.K à 0.964 W/m.K et 0.877 W/m.K.

B. Terre à base de sol argileux

Comme pour le cas précédent, avec la terre à base de sol limoneux, cette partie dévoile les différents résultats obtenus lors des essais effectués sur une terre à base de sol argileux.

3.7. Essais physico-chimiques

3.7.1. Granulométrie

Les résultats des essais d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentation effectués sur la terre à base de sol argileux sont présentés dans la figure 3.65.

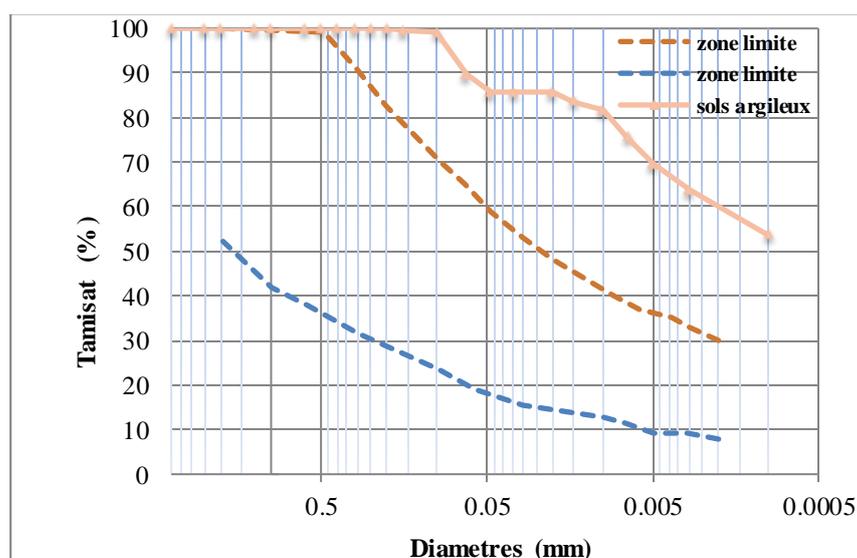


Figure 3.65 : Courbes granulométriques de sol argileux.

Les résultats obtenus indiquent que la terre à base de sol argileux est constituée principalement d'une fraction argileuse de 58 %, limoneuse de 31 %, et sableuse de 11 %. Contrairement à la terre à base de sol limoneux, la courbe granulométrique de la terre à base de sol argileux se situe en dehors de la zone limite recommandée par la norme des blocs de terre comprimée XP P 13-901. Cette norme est recommandée pour un sol destiné à la fabrication du BTC.

3.7.2. Composition minéralogique

Le diffractogramme obtenu lors de l'essai de diffraction aux rayons X effectué sur la terre à base de sol argileux est donné dans la figure 3.66.

Les résultats montrent que la terre à base de sol argileux est essentiellement composée d'un taux appréciable de calcite (61 %), avec une faible teneur de quartz (2 %). La partie

argileuse est représentée par de la kaolinite, avec une teneur de (28 %) et de la muscovite, avec une teneur de (9 %).

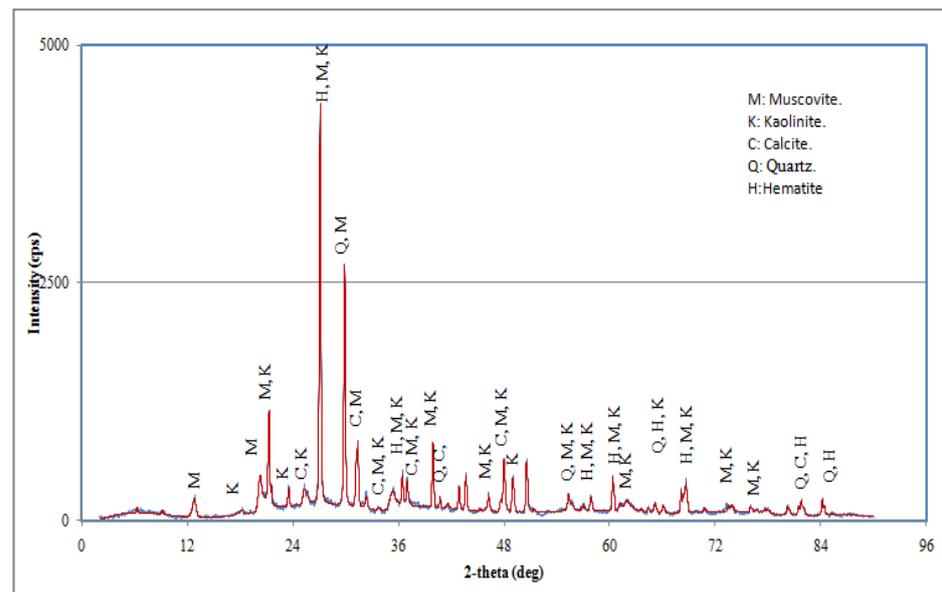


Figure 3.66 : Spectre de la DRX de sol argileux.

3.7.3. Observations microscopiques par MEB

L'image obtenue de l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la terre à base de sol argileux est donnée dans la figure 3.67.

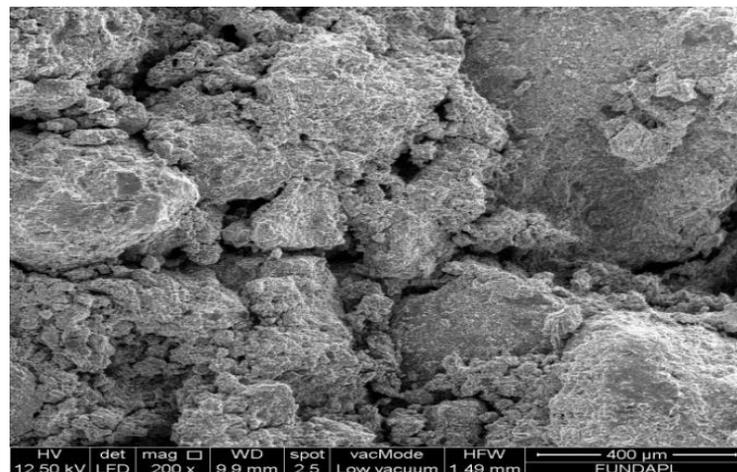


Figure 3.67 : Observation microscopique de sol argileux par MEB.

Au regard de l'observation en MEB de la morphologie du sol argileux, on note la présence de quelques pores et de microfissures.

3.7.4. Limites d'Atterberg

3.7.4.1. Terre à base de sol argileux

Les résultats des limites d'Atterberg obtenus concernant, la terre à base de sol argileux étudié sont présentés dans le tableau 3.14.

Tableau 3.14 : Limites d'Atterberg de la terre à base de sol argileux étudié

	Limite de retrait (%)	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)
Terre à base de sol argileux	17	49.15	25.58	23.57

La projection des résultats du test de plasticité sur les nomogrammes de plasticité, montrant les zones recommandées de l'indice de plasticité par rapport à la limite de liquidité, montre que le sol argileux se situe presque dans les limites les mieux adaptées pour les blocs de terre comprimée (norme XPP13-901) (figure 3.68)

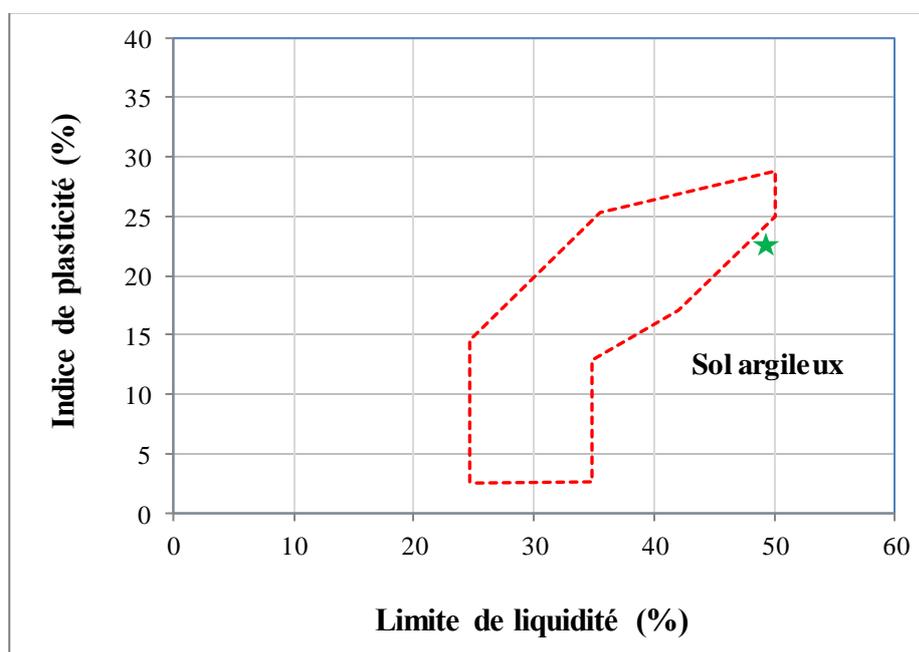
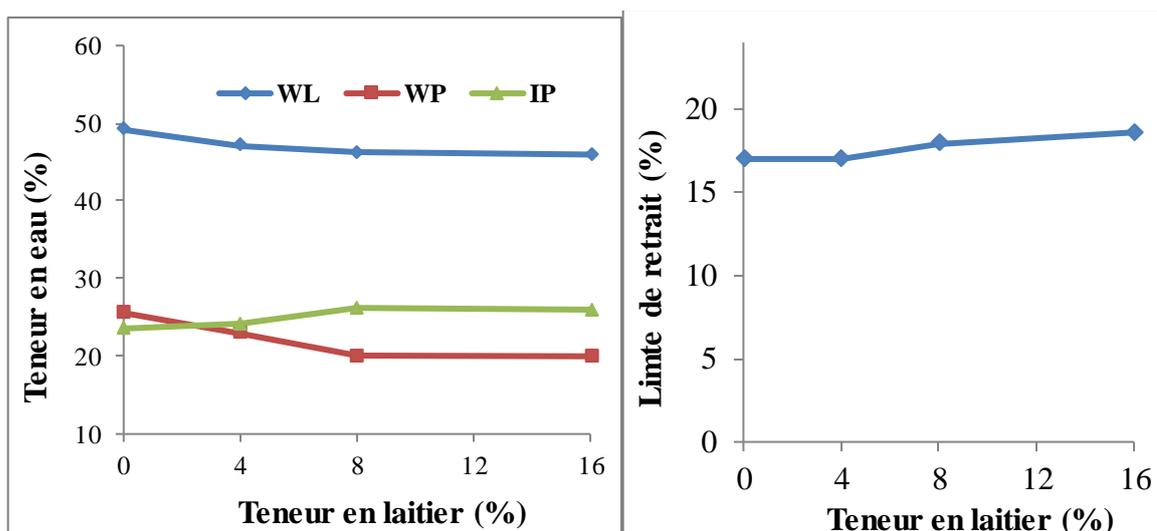


Figure 3. 68 : Diagramme de plasticité (la norme XPP 13-901).

3.7.4.2. Mélange (terre— laitier)

La figure 3.69 illustre l'évolution des limites d'Atterberg pour la terre à base de sol argileux traité avec diverses quantités de laitier (4 %, 8 % et 16 %).



(a) (b)
Figure 3.69 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de laitier additionnée. (a- WL, WP et IP. b- Ws).

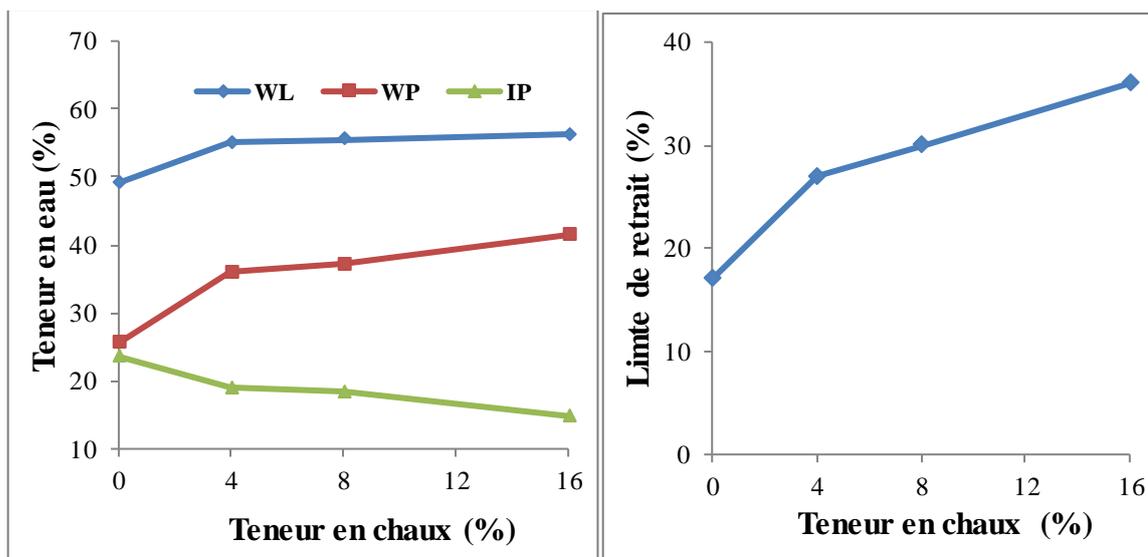
Les résultats montrent une diminution de la limite liquide et de la limite de plasticité avec une augmentation de l'indice de plasticité, avec l'augmentation de la teneur en laitier. L'augmentation de l'indice de plasticité est de l'ordre de 10 % pour le sol argileux traité à 16 % de laitier.

Pour ce qui est des limites de retrait (Ws), les résultats montrent une augmentation, d'environ 9 %, après l'ajout de 16 % de laitier, est observée.

3.7.4.3. Mélange (terre – chaux)

La variation de la limite de liquidité, de plasticité, de l'indice de plasticité et de la limite de retrait, en fonction de la quantité de chaux ajoutée, est illustrée dans la figure 3.70.

Contrairement à ce qui est obtenue dans le cas précédent en utilisant le laitier comme ajout, une augmentation de la limite de liquidité et de plasticité est observée après l'ajout de la chaux. Cette augmentation est respectivement de 49,15 % à 55 %, 55,5 % et 56,3 % et de 25,58 % à 35,99 %, 37,13 % et 41,48 % pour l'ajout de 0 %, 4 %, 8 % et 16 % de chaux pour la limite de liquidité et la limite de plasticité respectivement. Ces variations de la limite de liquidité et de la limite de plasticité entraînent une diminution de l'indice de plasticité.



(a)

(b)

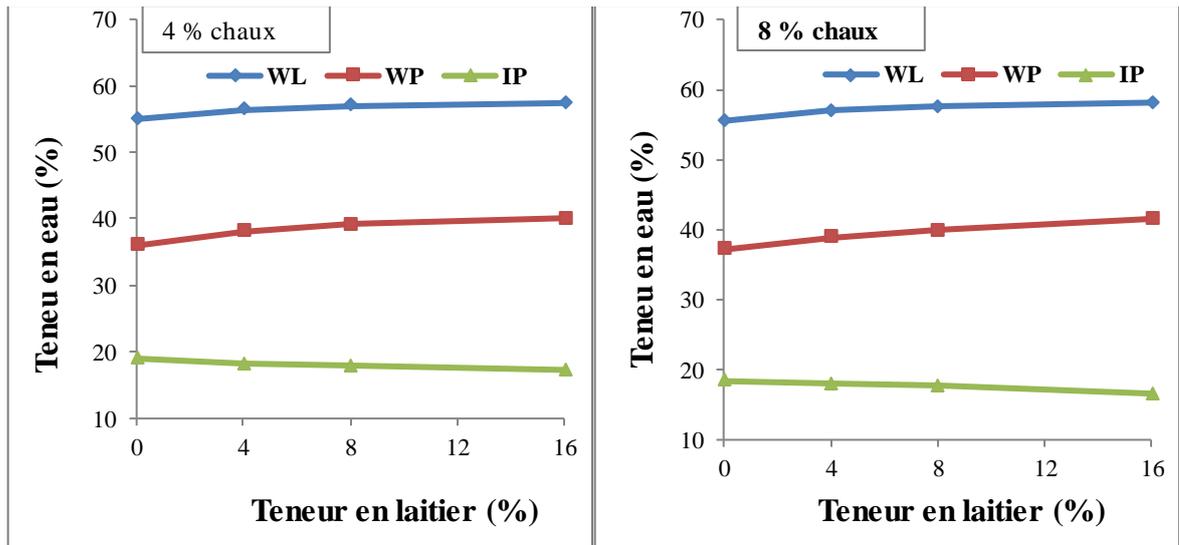
Figure 3.70 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de la chaux additionnée. (a- WL, WP et IP. b- Ws.)

La variation de la limite de retrait en fonction des différentes quantités de chaux utilisées montre une évolution progressive de la limite avec l'augmentation de la quantité de chaux rajoutée. L'addition de la chaux augmente la limite de retrait, indiquant une diminution du potentiel de retrait du sol. L'ajout de 16 % de chaux augmente la limite de retrait de 36 % (figure 3.70 – b).

3.7.4.4. Mélange (terre – chaux – laitier)

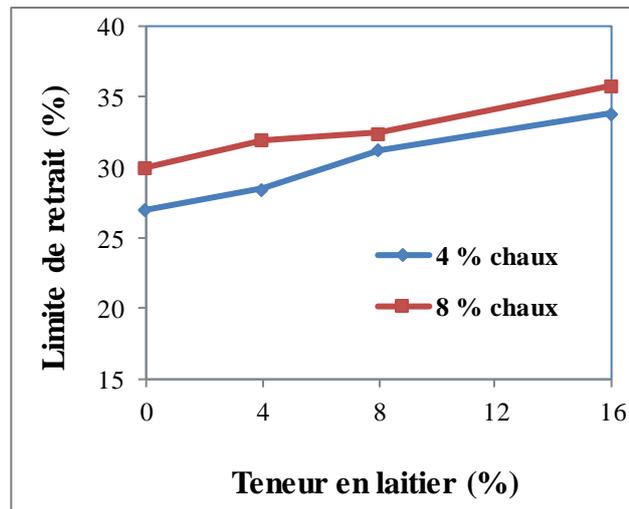
Les résultats des limites d'Atterberg de la terre à base de sol argileux, traitée avec 4 % et 8 % de chaux et mélangée avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier sont présentés dans la figure 3.71.

Les résultats montrent que l'incorporation de laitier dans le mélange (argile - chaux) entraîne une augmentation de la limite de liquidité, de la limite de plasticité et, par conséquent, une diminution de l'indice de plasticité de 18,01 % à 17,7 % et 16,59 %, lorsque la teneur en laitier varie de 4 %, 8 % à 16 % pour le sol traité à 8 % de chaux. D'autre part, les résultats obtenus pour la limite de retrait, donnés dans la figure 3.71(c), montrent une augmentation de la limite de retrait avec l'augmentation de la teneur en laitier pour le sol traité à 4 % et 8 % de chaux. Les valeurs des limites de retrait sont prononcées pour le sol traité à 8 % de chaux et mélangé avec différentes teneurs en laitier.



(a)

(b)



(c)

Figure 3.71: Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux plus laitier additionnée.

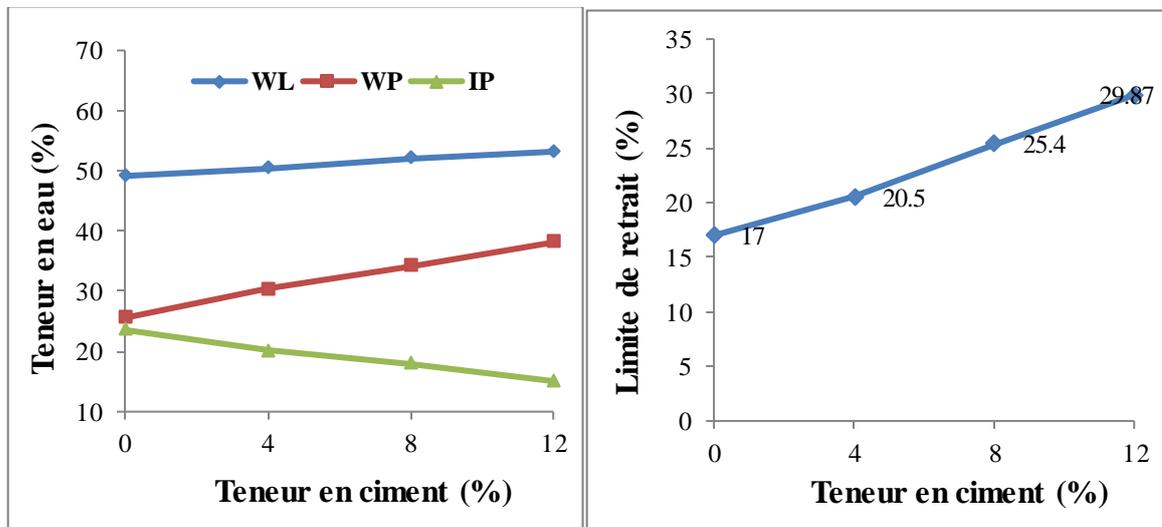
a- WL WP et IP (4 % chaux +laitier). b- WL, WP et IP (8 % chaux + laitier). c- Ws (4 % chaux +laitier, 8 % chaux + laitier).

3.7.4.5. Mélange (terre – ciment)

Les résultats de la variation des limites d'Atterberg pour la terre à base de sol argileux, traitée à 4 %, 8 % et 12 % de ciment sont représentés sur la figure 3.72.

Les résultats montrent que la limite de liquidité et la limite de plasticité passent respectivement de 49,15 % à 53,18 % et de 25,58 % à 38,11 % avec l'augmentation de la

quantité de ciment de 0 à 12 %, ce qui se traduit par une baisse significative de l'indice de plasticité de 23,57 % à 15,07 %.



(a)

(b)

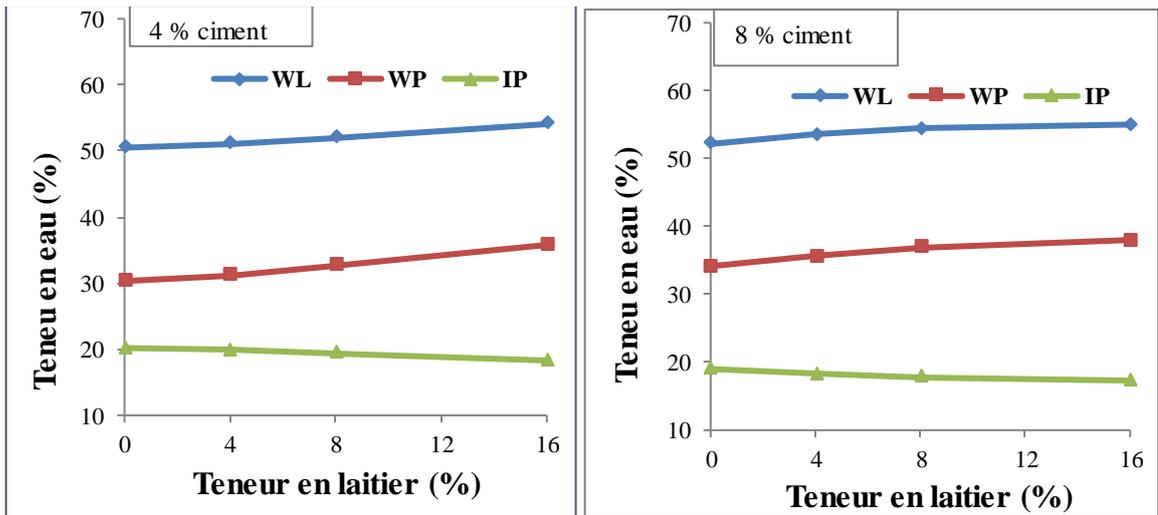
Figure 3.72 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée. a- WL, WP et IP. b- Ws.

En ce qui concerne la limite de retrait, la figure 3.72 – (b) montre une augmentation progressive de la limite de retrait en fonction de la quantité de ciment ajoutée. L'addition de 4 %, 8 % et 12 % de ciment entraîne une augmentation de la limite de retrait de 20.5 % à 25.4 %, 29.87%.

3.7.4.6. Mélange (terre – ciment –laitier)

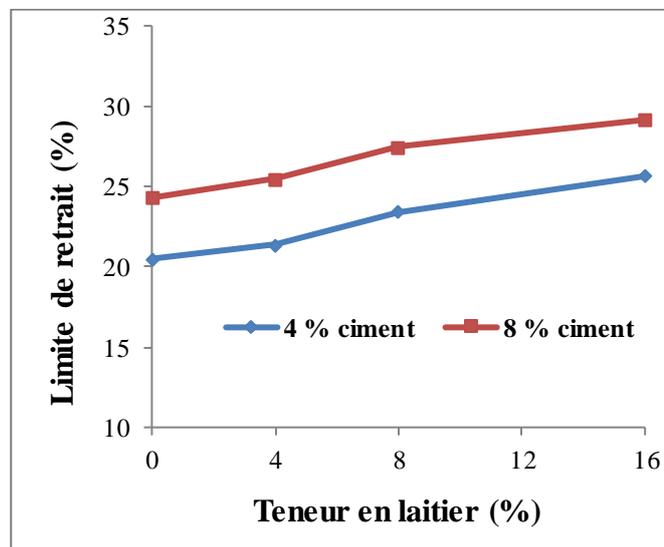
Les résultats de la variation des limites d'Atterberg de la terre à base de sol argileux traitée avec 4 %, 8 % de ciment et mélangée avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier sont donnés dans la figure 3.73.

Comme l'indique la figure 3.73 (a), une augmentation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité, avec une diminution de l'indice de plasticité, est observée avec l'augmentation de la teneur en laitier, pour la terre traitée à 4 % et 8 % de ciment. La terre traitée à 8 % de ciment et mélangée à 4 %, 8 % et 16 % de laitier montre une réduction plus prononcée dans la plasticité, par rapport au sol traité à 4 % de ciment et mélangé à 4 %, 8 % et 16 % de laitier.



(a)

(b)



(c)

Figure 3.73 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.

a- WL, WP et IP (4 % ciment + laitier). b- WL, WP et IP (8 % ciment + laitier).

La figure 3.73- (b) représente les résultats de la variation de la limite de retrait en fonction du laitier ajouté pour la terre à base de sol argileux traité à 4 %, 8 % de ciment. On constate que la limite de retrait augmente avec l'augmentation de la quantité de laitier pour la terre traitée à 4 % et 8 % de ciment. La progression dans les valeurs de la limite de retrait en fonction de la quantité du laitier rajoutée est plus prononcée pour la terre traitée à 8 % de ciment. À titre d'exemple, les limites de retrait de la terre traitée à 8 % de ciment et mélangée à 4 %, 8 % et 16 % de laitier sont respectivement, de l'ordre de 24.47 %, 27.44 % et 29.15

%, tandis que pour la terre traitée à 4 % de ciment et mélangée à 4 %, 8 % et 16 % de laitier, les valeurs passent de 21.39 % à 29.45 et % 25.64 %.

3.8. Essai mécanique

3.8.1. Essai Proctor

3.8.1.1. Terre à base de sol argileux

Les résultats des essais de compactage à l'énergie Proctor Modifié de la terre à base de sol argileux sont présentés sur la figure 3.74.

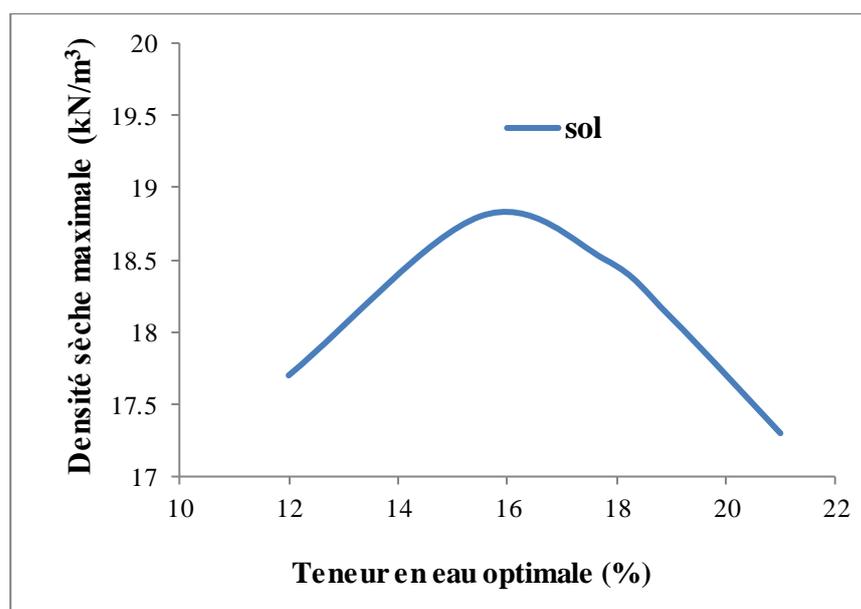


Figure 3.74 : Courbe Proctor de sol de base.

Les résultats montrent que la densité sèche maximale de la terre à base de sol argileux est 18,9 kN/m³ pour une teneur en eau optimale de 16,3 %.

3.8.1.2. Mélange (terre– laitier)

Les résultats des essais de compactage utilisant la méthode Proctor Modifiée pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités au laitier sont présentés à la figure 3.75.

L'ajout de laitier à la terre à base de sol argileux entraîne une réduction de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale, et ce pour le même effort de compactage. La teneur en eau optimale est passée de 16,3 % à 14,8 %, tandis que la densité sèche maximale, passe de 18,9 kN/m³ à 19,3 kN/m³ lorsque la teneur en laitier varie de 0 % à 16 %.

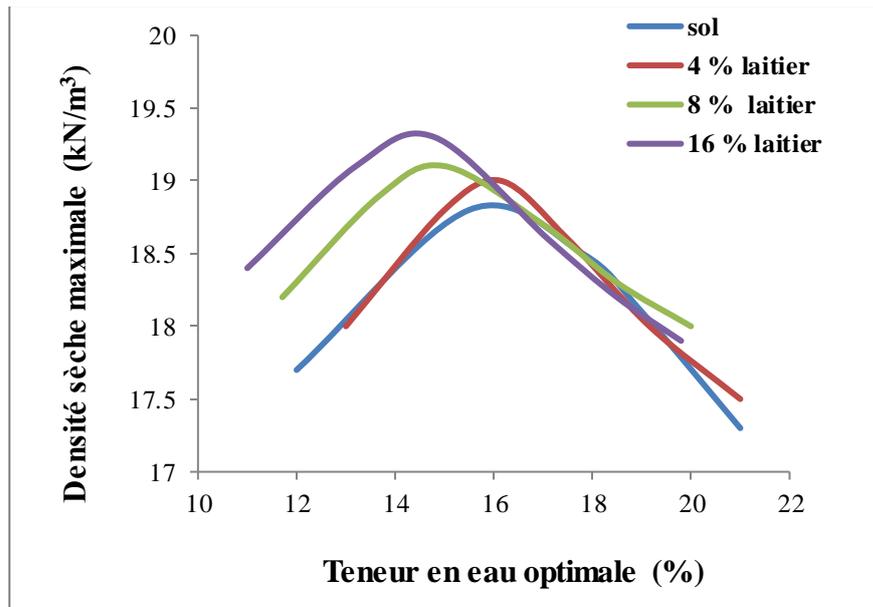


Figure 3.75 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de laitier additionnée.

3.8.1.3. Mélange (terre – chaux)

La réalisation du test Proctor sur des échantillons de terre à base de sol argileux traités avec différentes quantités de chaux a permis de tracer les courbes données dans la figure 3.76.

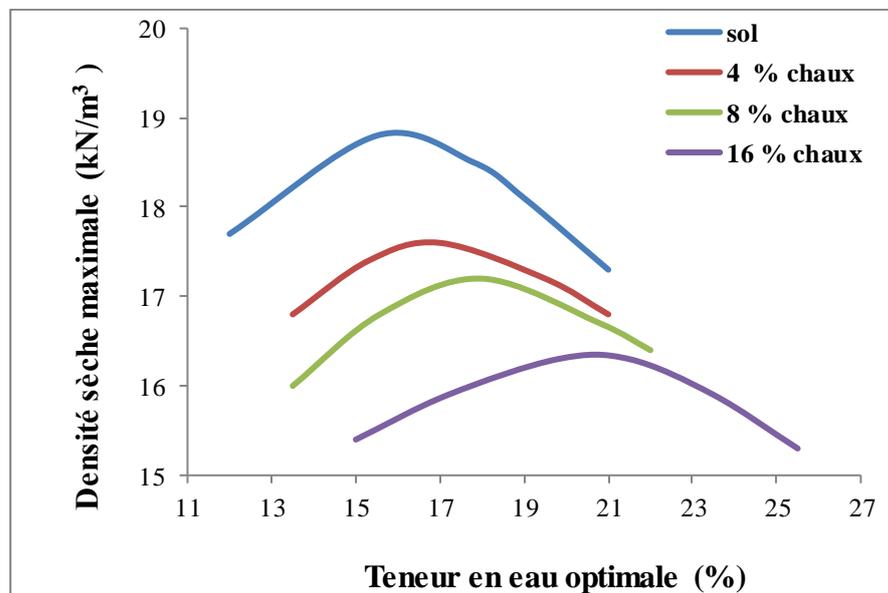


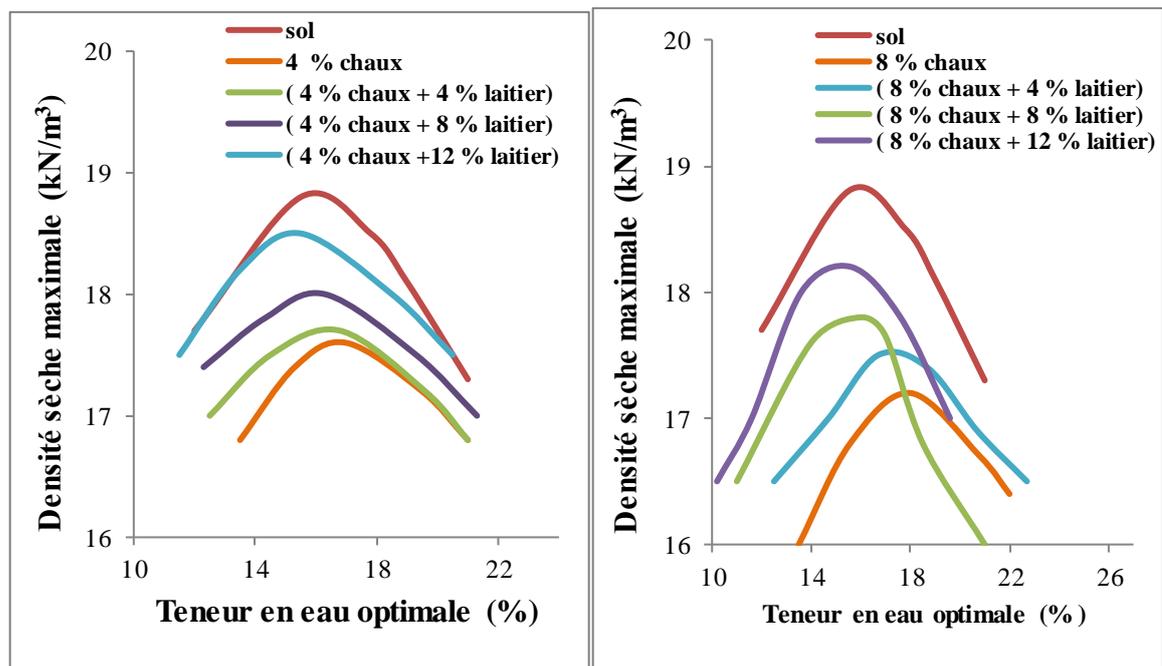
Figure 3.76 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de chaux additionnée.

Les résultats montrent qu'en ajoutant de la chaux à la terre à base de sol argileux, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente, et ce pour le même

effort de compactage. On peut voir qu'une augmentation du pourcentage de chaux de 0 à 16 %, entraîne une diminution de la densité de $18,9 \text{ kN/m}^3$ à $16,3 \text{ kN/m}^3$ et une augmentation de la teneur en eau de 16,3 % à 20,9 %.

3.8.1.4. Mélange (terre – chaux –laitier)

L'effet de l'addition du laitier sur les caractéristiques de compactage de la terre à base de sol argileux, traitée à 4 % et 8 % de chaux et 4 % et 8 % de chaux avec différentes teneurs en laitier est présenté dans la figure 3.77.



(a)

(b)

Figure 3.77 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.
a- (4 % chaux + laitier). b- (8 % chaux +laitier).

Une augmentation de la densité sèche maximale avec une diminution de la teneur en eau optimale est observée avec l'augmentation de la teneur en laitier, pour une teneur en chaux constante de 4 % et 8 %. Par exemple, la densité passe de $17,2 \text{ kN/m}^3$ à $18,5 \text{ kN/m}^3$ lorsque la teneur en laitier varie de 0 à 16 % pour une teneur en chaux fixe de 8 %. L'augmentation la plus prononcée de la densité sèche maximale est obtenue pour le sol traité à 4 % de chaux plus 4 %, 8 % et 16 % de laitier.

3.8.1.5. Mélange (terre – ciment)

Les courbes présentées dans la figure 3.78 présentent l'effet du ciment sur les caractéristiques de compactage de la terre à base de sol argileux.

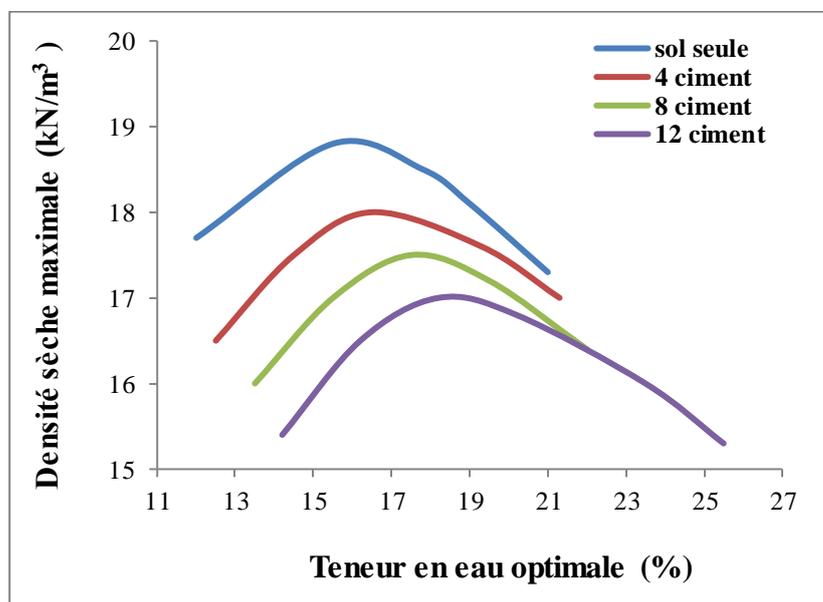


Figure 3.78 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de ciment additionnée.

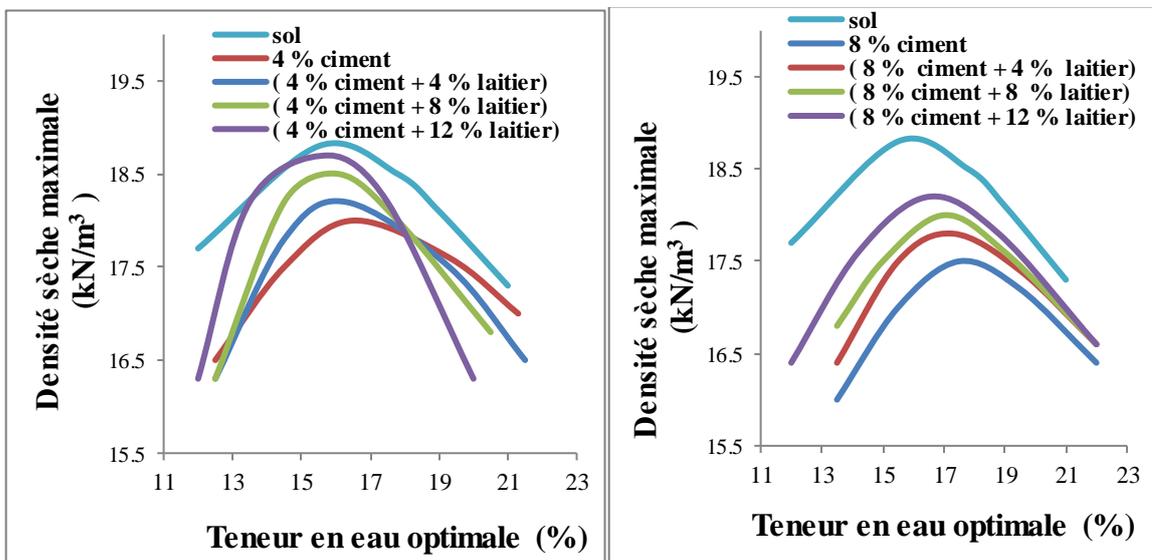
Comme pour les sols traités à la chaux, la même tendance est observée pour les échantillons traités au ciment. Une augmentation de la teneur optimale en eau et une réduction de la densité sèche maximale sont observées pour les différents échantillons étudiés.

3.8.1.6. Mélange (terre – ciment – laitier)

Les résultats des essais de compactage effectués sur la terre à base de sol argileux traitée à 4 % et 8 % de ciment et à 4 % et 8 % de ciment plus une quantité de laitier ajoutée sont donnés dans la figure 3.79.

Les valeurs montrent que la tendance à la variation de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale, en fonction de la quantité de laitier rajoutée à la terre à base de sol argileux, traitée à 4 % et 8 % de ciment, suit approximativement la même allure que la variation en fonction du mélange (chaux-laitier) donnée précédemment. En effet, une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale, avec l'augmentation de la teneur en laitier pour une teneur en ciment constante, est observée.

La plus grande valeur de la densité sèche maximale est obtenue pour le sol traité à 4 % de ciment plus 4 %, 8 % et 16 % de laitier.



(a)

(b)

Figure 3.79 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée.
a- (4 % ciment + laitier). b- (8 % ciment + laitier).

3.8.1.7. Mélange (terre – fibres de paille de blé)

L'influence des fibres de paille de blé sur les caractéristiques de compactage de la terre à base de sol argileux est illustrée dans la figure 3.80.

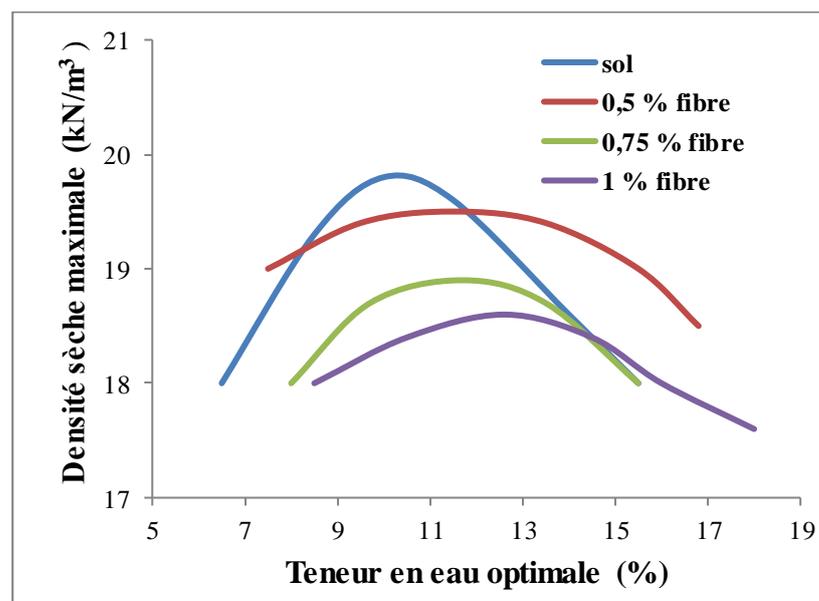
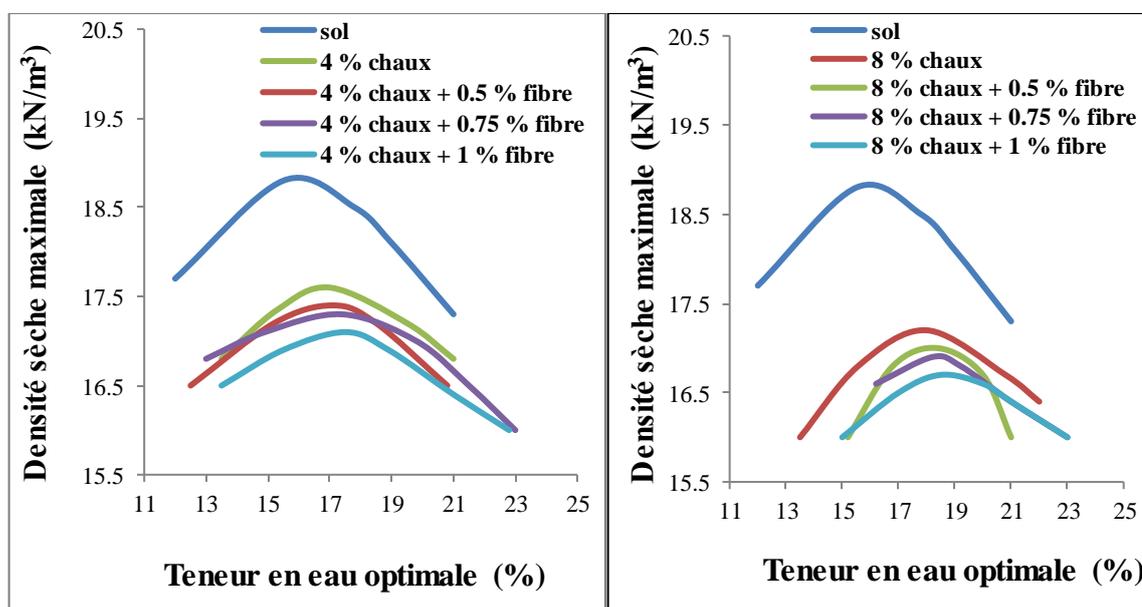


Figure 3.80 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de fibres additionnée.

Les résultats montrent que l'addition de proportions (0 à 1 %) de fibres de paille de blé diminue la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimale. Dans ce cas, la diminution de la densité par rapport à la terre non traitée est de 2,6 %, 4 % et 6,3 % pour une teneur en fibres en paille de blé de 0,5 %, 0,75 % et 1 % respectivement.

3.8.1.8. Mélange (terre - chaux – fibre)

Les résultats de l'essai de compactage effectué sur la terre à base de sol argileux, traitée à 4 % et 8 % de chaux et à 4 % et 8 % de chaux contenant 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres de paille de blé, sont donnés dans la figure 3.81.



(b)

(c)

Figure 3.81 : Courbe Proctor en fonction de la quantité des additifs additionnée
a- (4 % chaux + laitier). b- (8 % chaux + laitier).

Une augmentation de la teneur en eau optimale, suivie d'une diminution de la densité sèche maximale, avec l'augmentation de la quantité de fibres de paille de blé pour la terre à base de sol argileux traitée à 4 % et 8 % de chaux, est observée.

3.8.2. Essai de compression uniaxiale

Comme dans le cas de la terre à base de sol limoneux, l'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur les échantillons de terre à base de sol argileux selon la norme française NF P 94-077. La résistance à la compression pour les échantillons de terre à base de sol argileux, a été déterminée pour le matériau non stabilisés et stabilisés après 7 et 28

jours de cure. Après la période de cure, les éprouvettes de matériau, ont été écrasées à l'état sec et à l'état humide, après une imbibition de 24 heures dans l'eau.

3.8.2.1. Mélange (terre – laitier)

Les résultats obtenus pour les échantillons de terre à base de sol argileux traité avec différents pourcentages de laitier 4 %, 8 % et 16 % ajoutés, après une période de cure de 7 et 28 jours sont présentés à la figure 3.82.

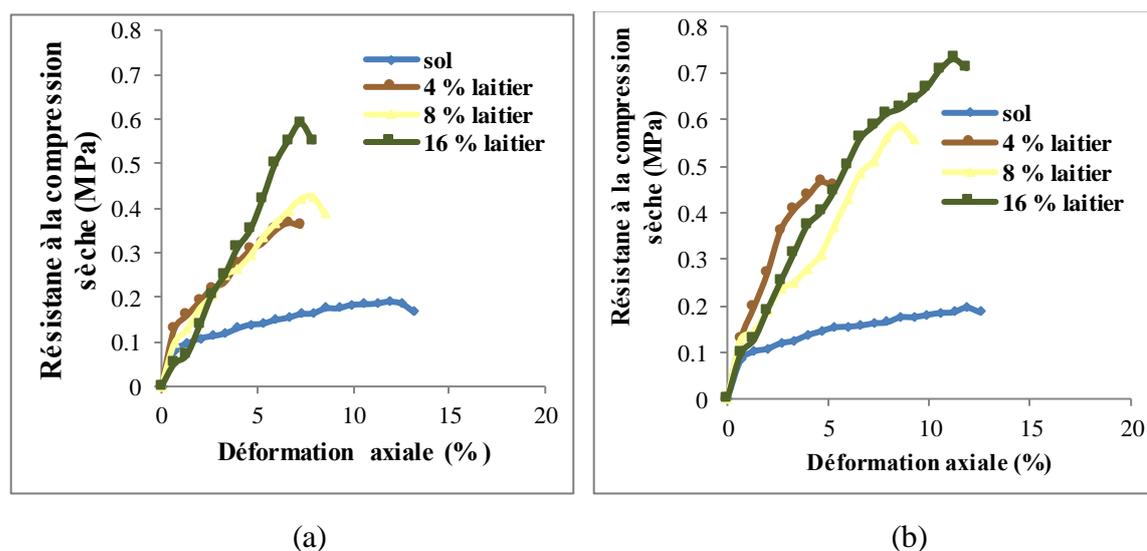


Figure 3.82 : Évolution de la résistance à la compression sèche pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier additionnée
a- 7 jours, b- 28 jours.

Les résultats révèlent que la résistance à la compression sèche, pour les échantillons de terre, augmente jusqu'à un optimum représentant le seuil de résistance puis diminue subitement après la rupture. Un gain de la résistance en fonction de l'ajout d'une quantité de laitier est obtenu. En effet, une augmentation de la résistance de la terre à base de sol argileux avec l'augmentation de la proportion de laitier est observée à 7 et 28 jours de cure.

Pour ce qui est de la résistance à la compression à l'état humide, les résultats sont donnés dans la figure 3.83.

La même évolution dans l'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en laitier est observée pour les deux périodes de cure de 7 et 28 jours. Néanmoins, les valeurs de la résistance à l'état humide sont inférieures à celles données pour les blocs à l'état sec.

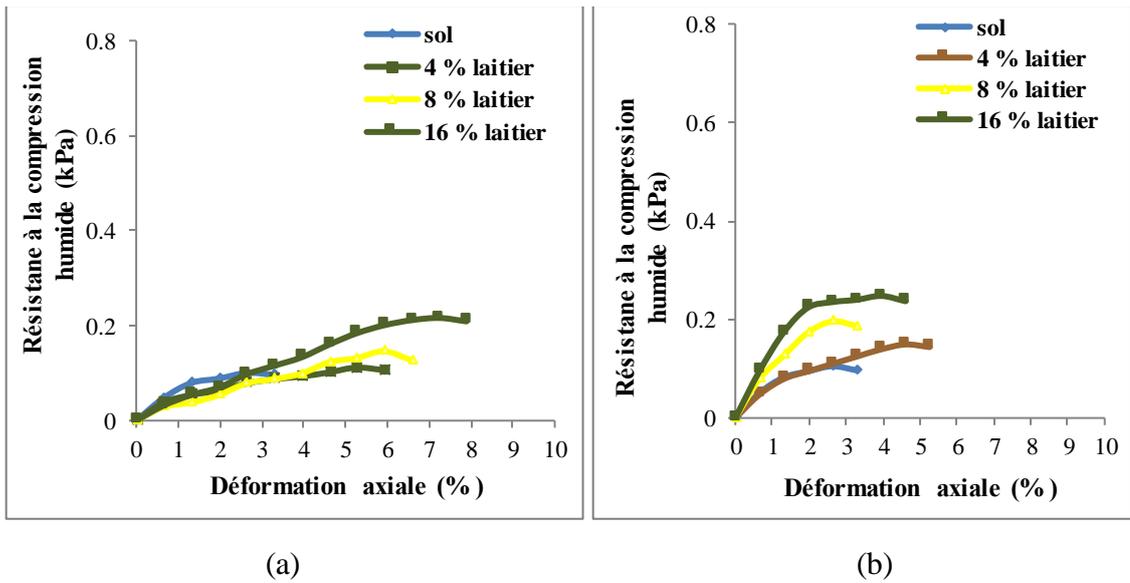


Figure 3.83 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier additionnée.
a- 7 jours, b- 28 jours.

3.8.2.2. Mélange (terre – chaux)

Les résultats de l'évolution de la résistance à la compression des échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 %, 8 % et 16 % de chaux en fonction de la période de cure sont illustrés dans la figure 3.84.

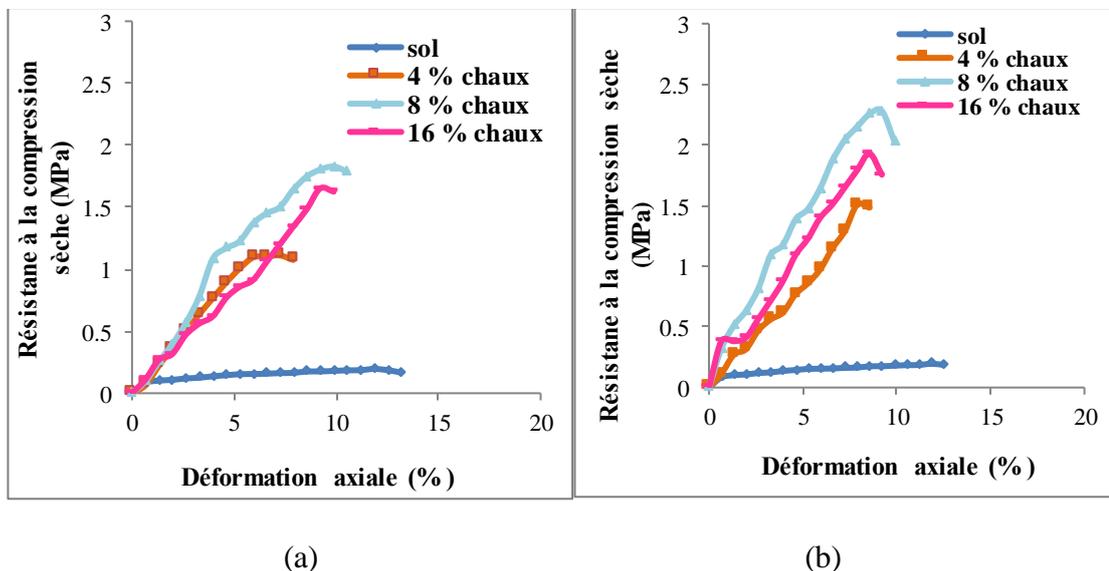


Figure 3.84 : Évolution de la résistance à la compression pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux additionnée.
a- 7 jours. b- 28 jours

Contrairement au cas précédent, la résistance à la compression uniaxiale de la terre à base de sol argileux augmente avec l'augmentation de la quantité de chaux dans le mélange (sol- chaux), jusqu'à une certaine quantité, puis au-delà de cette quantité, la résistance de

terre diminue pour les deux périodes de cure de 7 et 28 jours. La valeur de la quantité de chaux optimale permettant d'avoir des résistances sèches maximales est égale à 8 % pour la terre à base de sol argileux.

La figure 3.85 illustre la variation de la résistance à la compression humide, pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités et trempés dans l'eau pendant 24 heures, après avoir subi une cure de 7 et 28 jours.

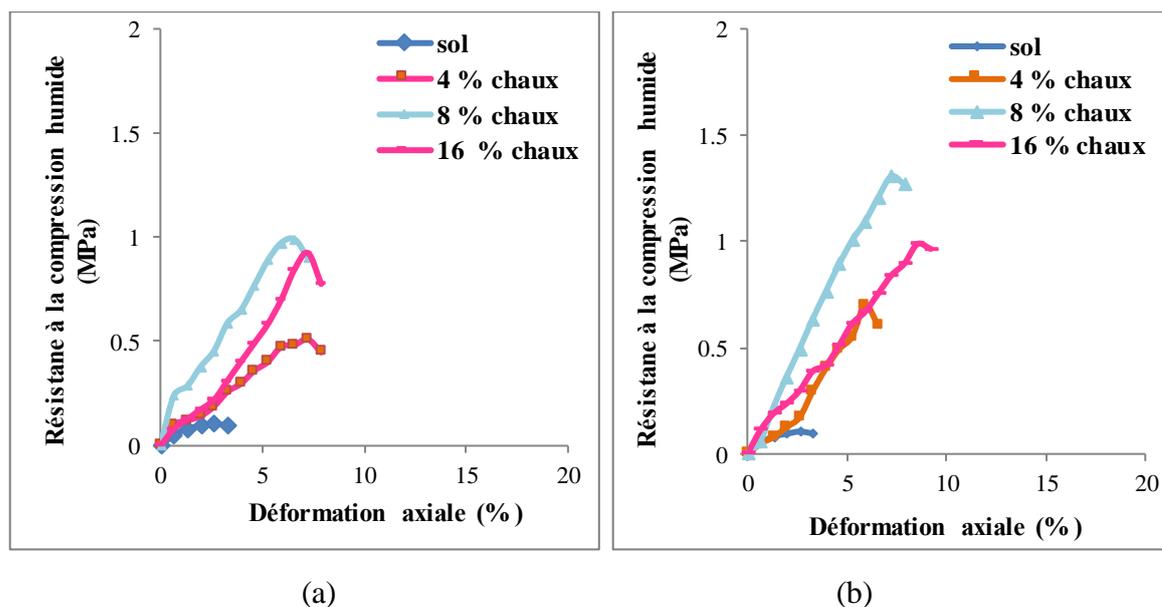


Figure 3.85 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux additionnée.
a- 7 jours, b- 28 jours.

On constate que, comme pour le cas de la résistance à la compression sèche, la même tendance est observée pour la résistance à la compression humide. La résistance à la compression uniaxiale, pour les échantillons de terre traités à la chaux, augmente avec l'augmentation de la quantité de chaux rajoutée, jusqu'à un certain seuil, (8 %), appelé valeur optimale de la chaux. Au-delà de ce seuil, la résistance des échantillons diminue. De plus, les résultats montrent, qu'avec la même quantité de chaux, les valeurs de la résistance à la compression humide sont inférieures à celles de la résistance à la compression sèche.

3.8.2.3. Mélange (terre – chaux – laitier)

L'évolution de la résistance à la compression uniaxiale des échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % et 8 % de chaux et à 4 % et 8 % de chaux, mélangés avec des proportions de 0 %, 4 %, 8 % et 16 % de laitier, compressés à l'état sec et humide, après

avoir subi une cure de 7 jours et 28 jours, est donnée dans les figure 3.86 et 3.87 respectivement.

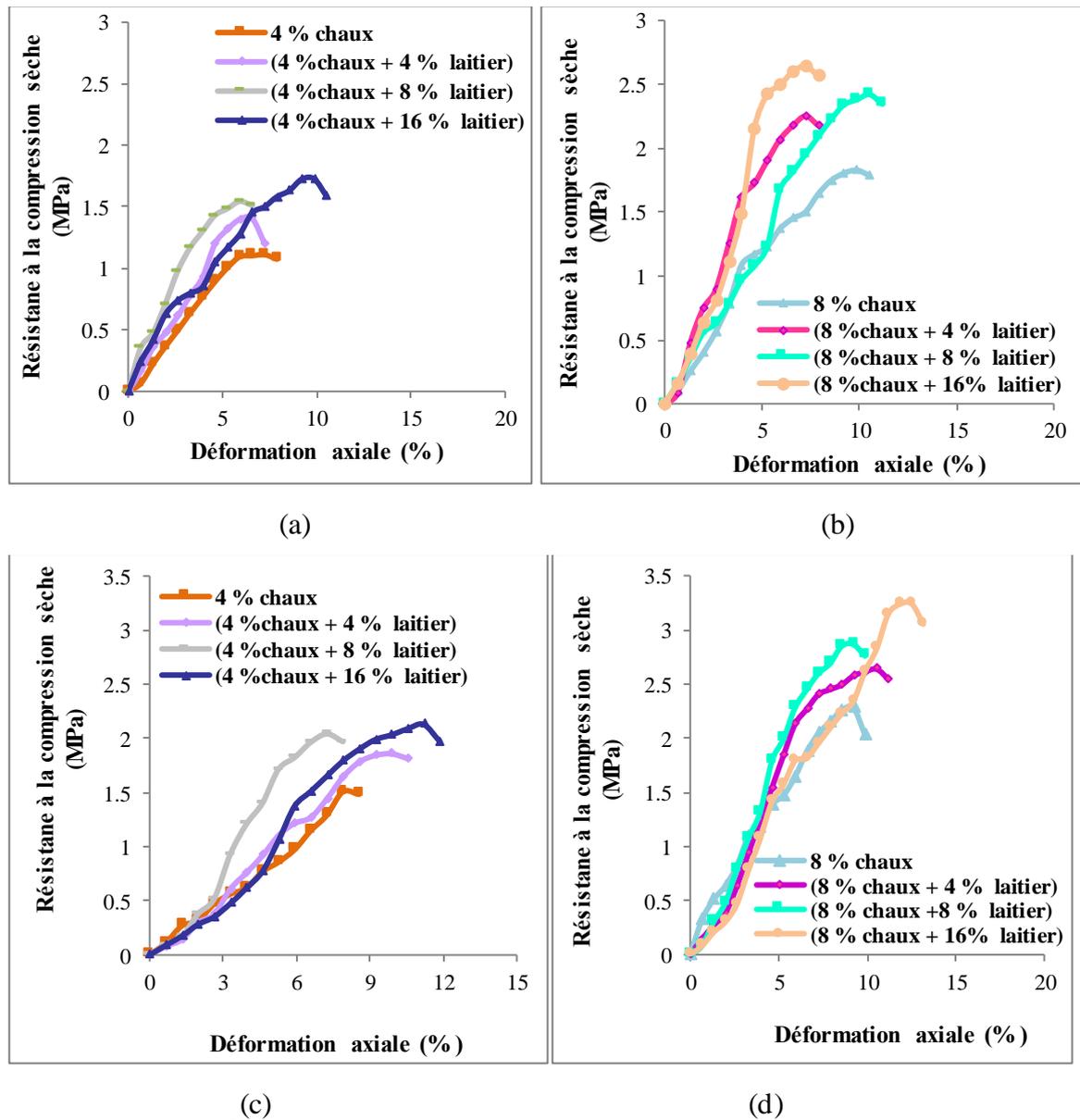


Figure 3.86 : Évolution de la résistance à la compression pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux et de laitier additionnée. a-(4 % chaux + laitier) à 7 jours. b- (8 % chaux +laitier) à 7 jours. c-(4 % chaux + laitier) à 28 jours. d- (8 % chaux + laitier) à 28 jours.

La figure 3.86 montre une augmentation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux, traitée à 4 % et 8 % de chaux, avec l'augmentation de la teneur en laitier de 0 à 16 % pour les échantillons de terre ayant subi une cure de 7 jours et 28 jours. Les échantillons traités à 8 % de chaux et mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier, montrent une résistance plus importante par rapport aux autres échantillons. Avec une cure de 28 jours, les valeurs de la résistance à la compression de 2.27 MPa, 2.64 MPa, 2.85 MPa et 3.27 MPa

pour les échantillons traités à 8 % de chaux et mélangés avec 0%, 4 %, 8 % et 16 % de laitier, sont respectivement observées. Les valeurs de la résistance augmentent avec la cure.

Pour ce qui est des résultats des essais de la résistance à la compression humide après 7 et 28 jours de cure, ils sont donnés dans la figure 3.87.

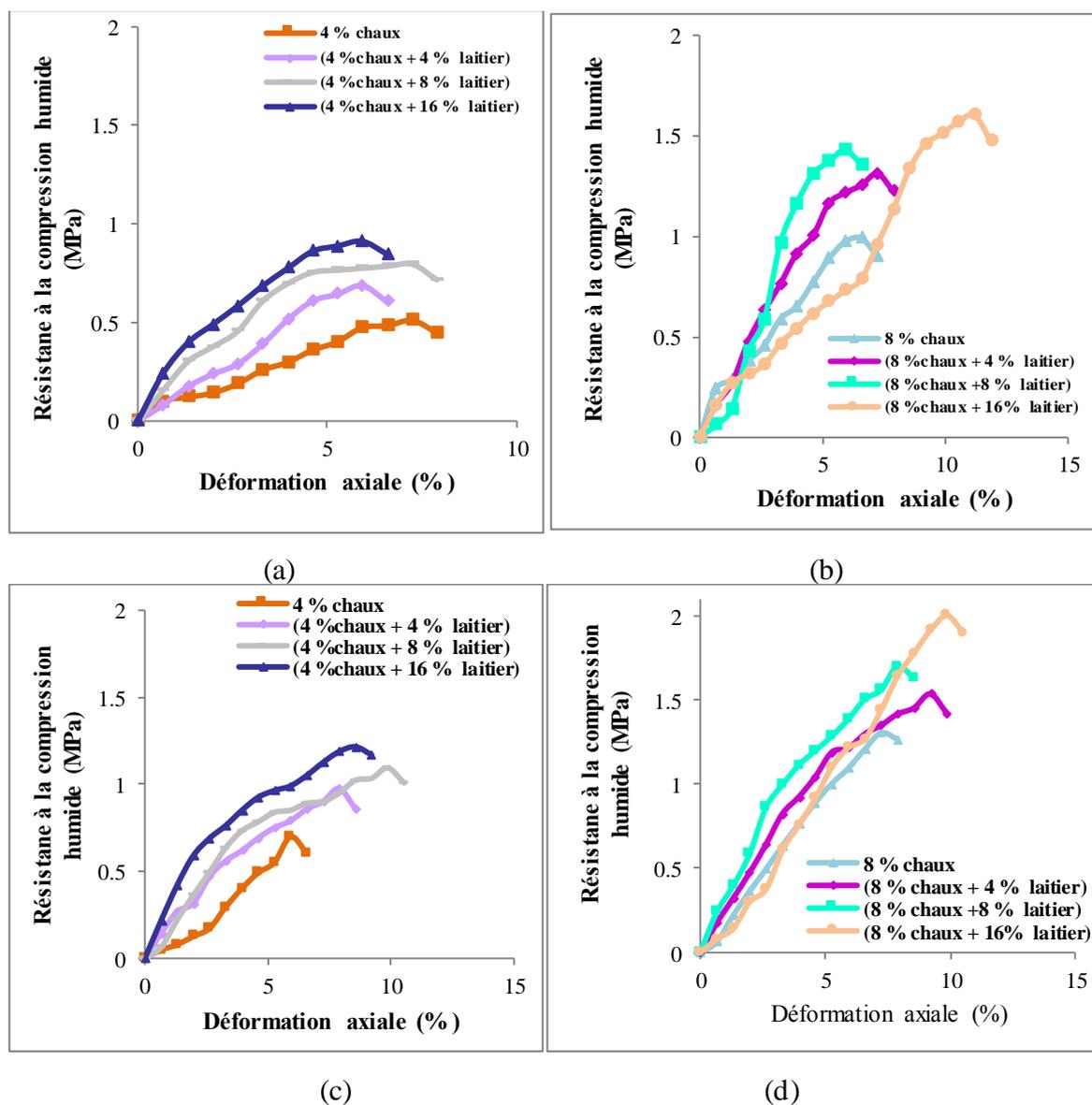


Figure 3.87 : Évolution de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux et de laitier additionnée.

a- (4% chaux + laitier) à 7 jours. b- (8 % chaux +laitier) à 7 jours
c-(4 % chaux + laitier) à 28 jours. d- (8 % chaux + laitier) à 28 jours.

Les courbes présentent la même allure que celle de la résistance à la compression sèche. Une augmentation de la résistance, avec l'augmentation de la quantité de laitier

rajoutée, pour l'échantillon traité à 4 %, 8 % de chaux est observée, pour les deux périodes de cure. Néanmoins, les valeurs de la résistance à la compression obtenues à 7 jours et 28 jours à l'état humide sont inférieures à celles obtenues à l'état sec. La résistance à la compression a été réduite après l'immersion dans l'eau. La résistance passe de 2.85 MPa à 1.7 MPa et de 3,27 MPa à 2,01 MPa pour les échantillons traités à 8 % de chaux et mélangés à 8 %, 16 % de laitier respectivement, après une période de cure de 28 jours.

3.8.2.4. Mélange (terre – ciment)

Les résultats de l'essai de résistance à la compression des échantillons de terre à base de sol argileux traités au ciment après 7 et 28 jours de cure, sont présentés à la figure 3.88.

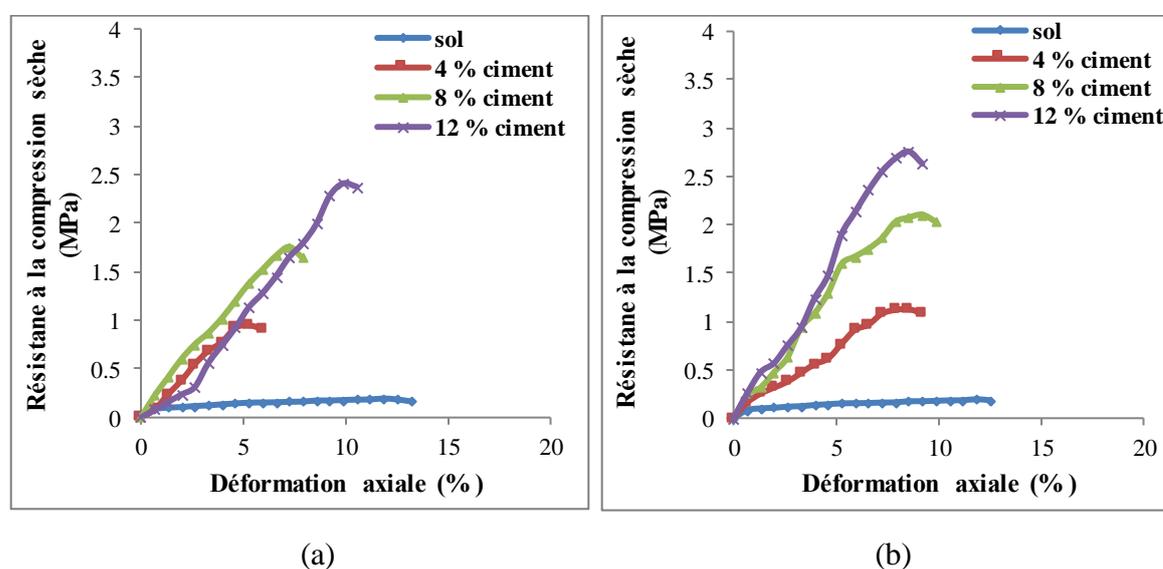


Figure 3.88 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment additionnée.
a-7 jours, b- 28 jours.

Les résultats indiquent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment et de la période de cure. À titre indicatif, l'ajout de 4%, 8% et 12% de ciment à 7 jours donne des résistances de 0,949 MPa, 1,756 MPa, 2,408 MPa, par rapport à une terre non traitée qui a une résistance de 0,195 MPa. Le prolongement de la période de cure à 28 jours entraîne une amélioration de la résistance à 1,12 MPa, 2,105 MPa et 2,751 MPa respectivement, en ajoutant la même teneur en ciment.

En ce qui concerne l'effet du ciment sur la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux, les valeurs obtenues montrent que la résistance augmente avec

l'augmentation de la teneur en ciment et la période de cure. Les résultats sont présentés dans la figure 3.89.

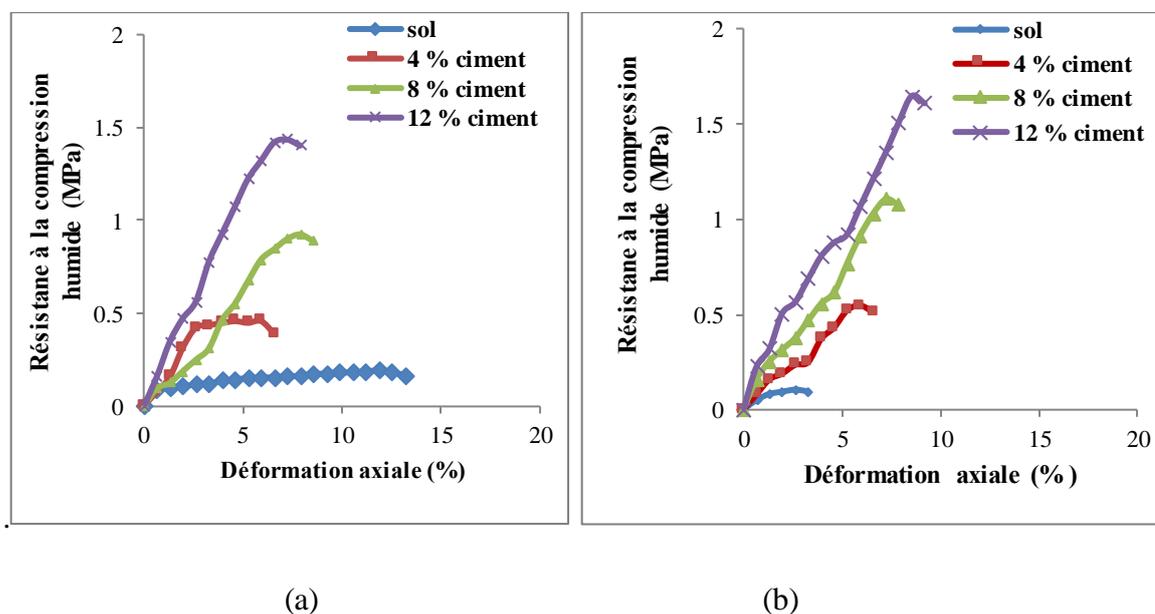


Figure 3. 89 : Évolution de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment additionnée.
a- 7 jours. b- 28 jours.

En termes de valeur, à 7 jours de cure, la résistance augmente de 0,105 MPa à 0,459 MPa, 0,925 MPa et 1,435 MPa en ajoutant 0 %, 4 %, 8 % et 12 % de ciment. Les valeurs de la résistance à la compression à l'état humide sont inférieures à celles obtenues à l'état sec pour les deux périodes de 7 jours et 28 jours.

3.8.2.5. Mélange (terre – ciment – laitier)

La variation de la résistance à la compression, en fonction de la quantité de laitier ajoutée aux échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de chaux, pour les deux périodes de cure, est représentée dans la figure 3.90.

Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression, avec l'augmentation de la quantité de laitier, pour l'ensemble des échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de ciment, pour les deux périodes de cure de 7 jours et 28 jours. Les plus importantes valeurs de la résistance à la compression sont observées à 28 jours, pour tous les échantillons étudiés. Les échantillons, traités avec 8 % de ciment et mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier, présentent les résistances les plus importantes par

rapport aux autres mélanges étudiés, avec des valeurs de résistance respectivement de 2.451 MPa, 2.771 MPa et 2.954 MPa.

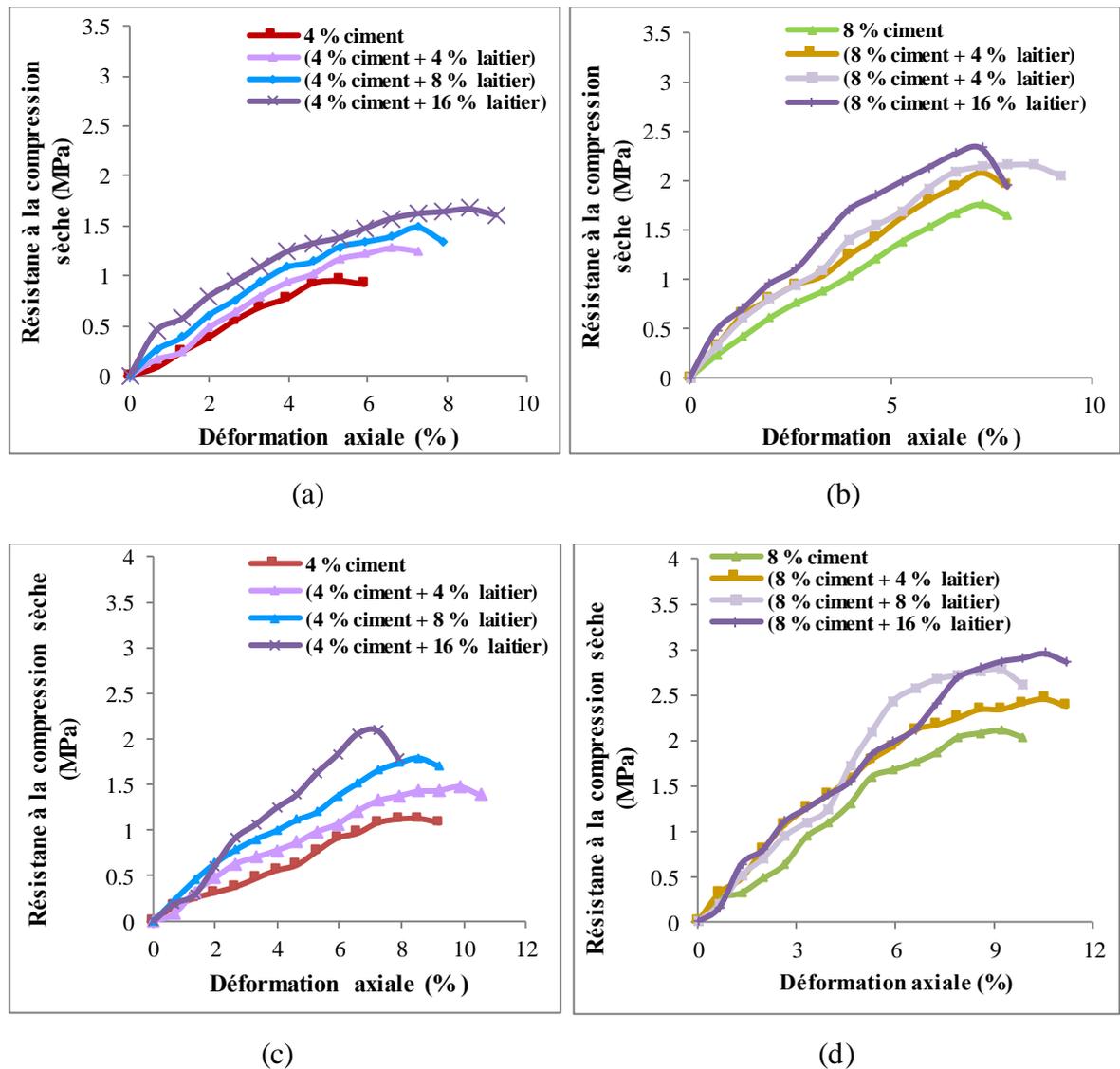


Figure 3.90 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.

a- (4% ciment + laitier) à 7 jours. b- (8 % ciment +laitier) à 7 jours

c-(4 % ciment + laitier) à 28 jours. d- (8 % ciment + laitier) à 28 jours.

Comme pour le cas de la résistance à la compression à l'état sec, la même allure est observée pour la résistance à la compression humide. Ceci est bien montré dans la figure 3.91.

La résistance à la compression humide augmente en fonction de la quantité de laitier ajoutée pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de ciment, pour les deux périodes de cure.

À 28 jours, le rajout de 4 %, 8 % et 16 % de laitier à 4 % de ciment augmente la résistance de 1.301 MPa à 1.55 MPa et 1.69 MPa. La plus importante valeur de la résistance à la compression est obtenue pour les échantillons traités à 8 % de ciment et mélangés avec différentes teneurs en laitier après avoir subi une cure de 28 jours. Les valeurs de la résistance à la compression humide sont inférieures à celle de la résistance à la compression sèche pour tous les échantillons traités avec le mélange (ciment - laitier).

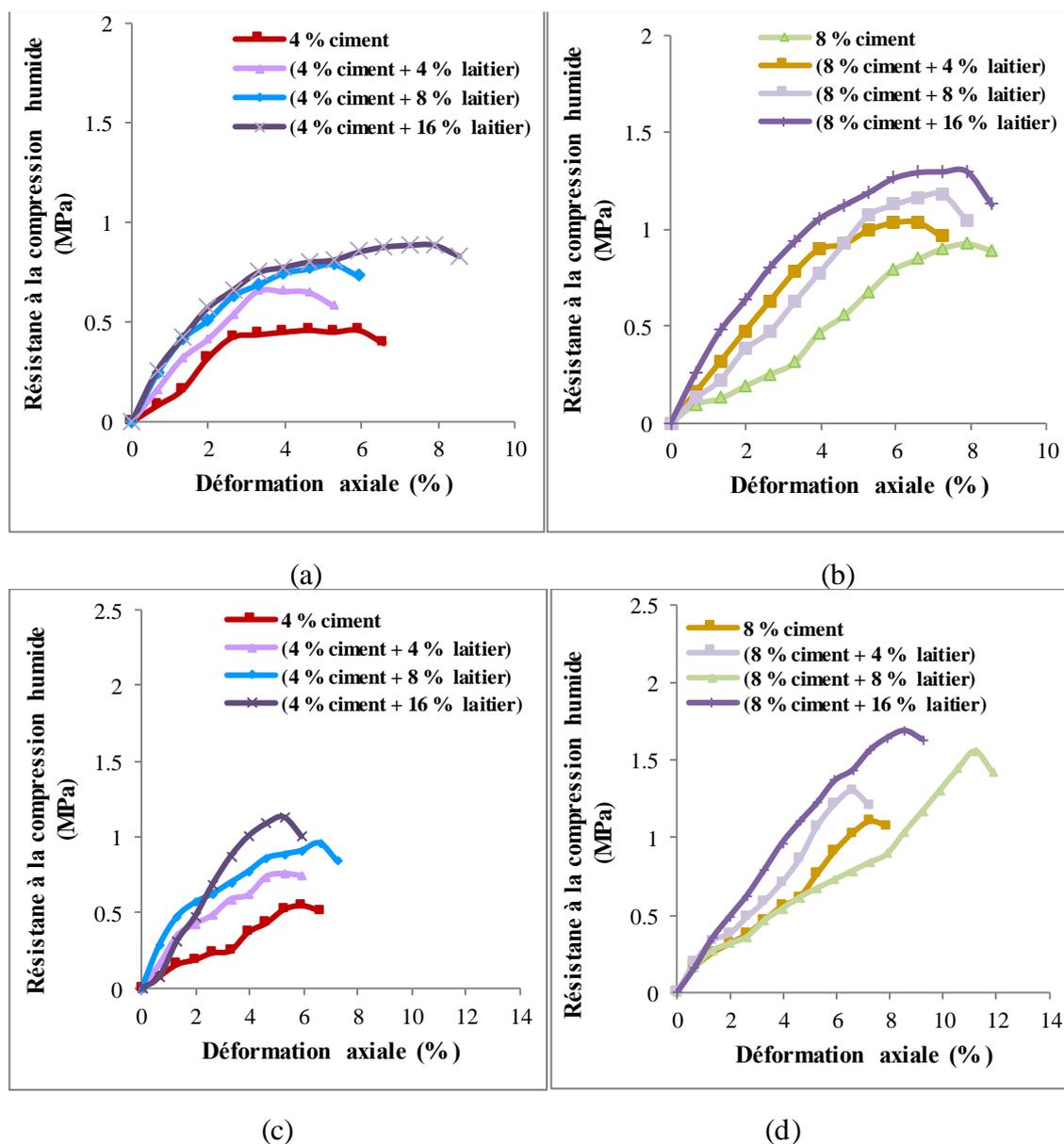


Figure 3.91 : Évolution de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment plus laitier additionnée.
 a- (4 % ciment + laitier) à 7 jours. b- (8 % ciment + laitier) à 7 jours.
 c- (4 % ciment + laitier) à 28 jours. d- (8 % ciment + laitier) à 28 jours.

3.8.2.6. Mélange (terre – fibres de paille de blé)

Les mêmes procédures établies pour la réalisation des échantillons traités à la chaux, au ciment, au laitier et à leur mélange, ainsi que celles pour la réalisation de l'essai de compression uniaxiale, ont été suivies pour la préparation et la réalisation de l'essai de compression sur des blocs de terre renforcés par les fibres en paille de blé.

Les résultats de l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de paille de blé des blocs de terre à base de sol argileux, ayant subi une période de cure de 7 et 28 jours, sont donnés dans la figure 3.92.

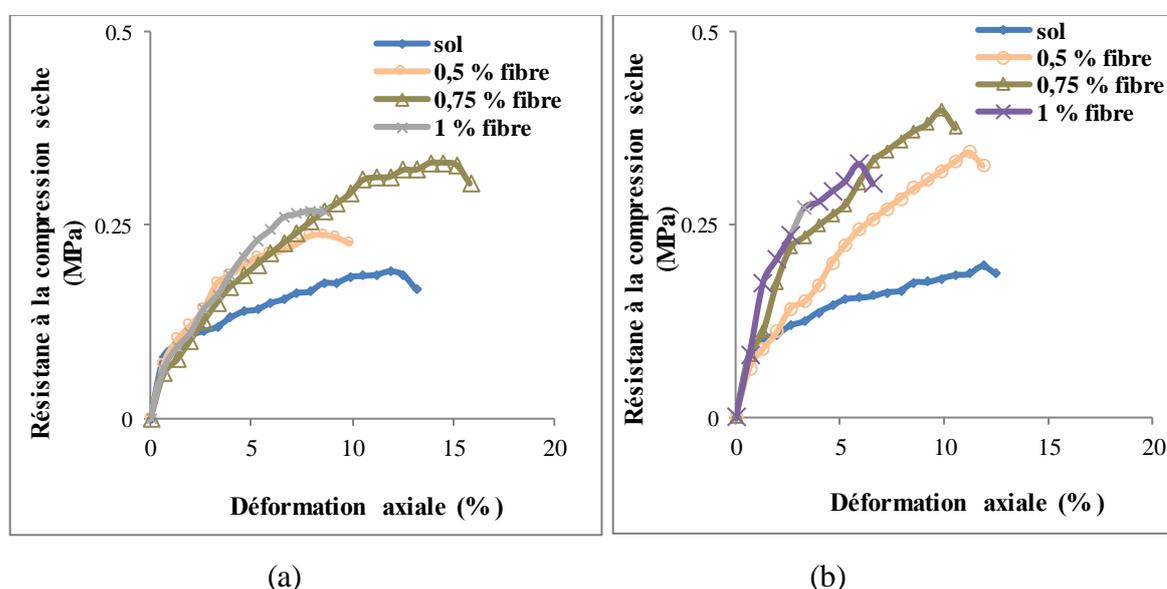


Figure 3.92 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de fibres en paille de blé additionnée.
a- 7 jours. b- 28 jours.

Une augmentation de la résistance à la compression est observée avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille de blé, jusqu'à une teneur de 0.75 %. Au-delà de cette valeur, la résistance montre une réduction dans les valeurs obtenues pour les blocs ayant subi une cure de 7 jours et 28 jours. Néanmoins, les valeurs des résistances à 28 jours sont supérieures à celles obtenues à 7 jours.

En ce qui concerne la résistance à la compression humide, les échantillons renforcés par les fibres de paille de blé présentent une perte de masse importante, de sorte que la résistance à la compression humide ne peut pas être mesurée.

3.8.2.7. Mélange (terre– chaux – fibre de paille de blé)

Les résultats de la variation de la résistance à la compression uniaxiale pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de ciment et mélangés avec 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres de paille de blé, ayant subi une cure de 7 jours et 28 jours, à l'état sec et humide, sont donnés respectivement dans les figures 3.93 et 3.94.

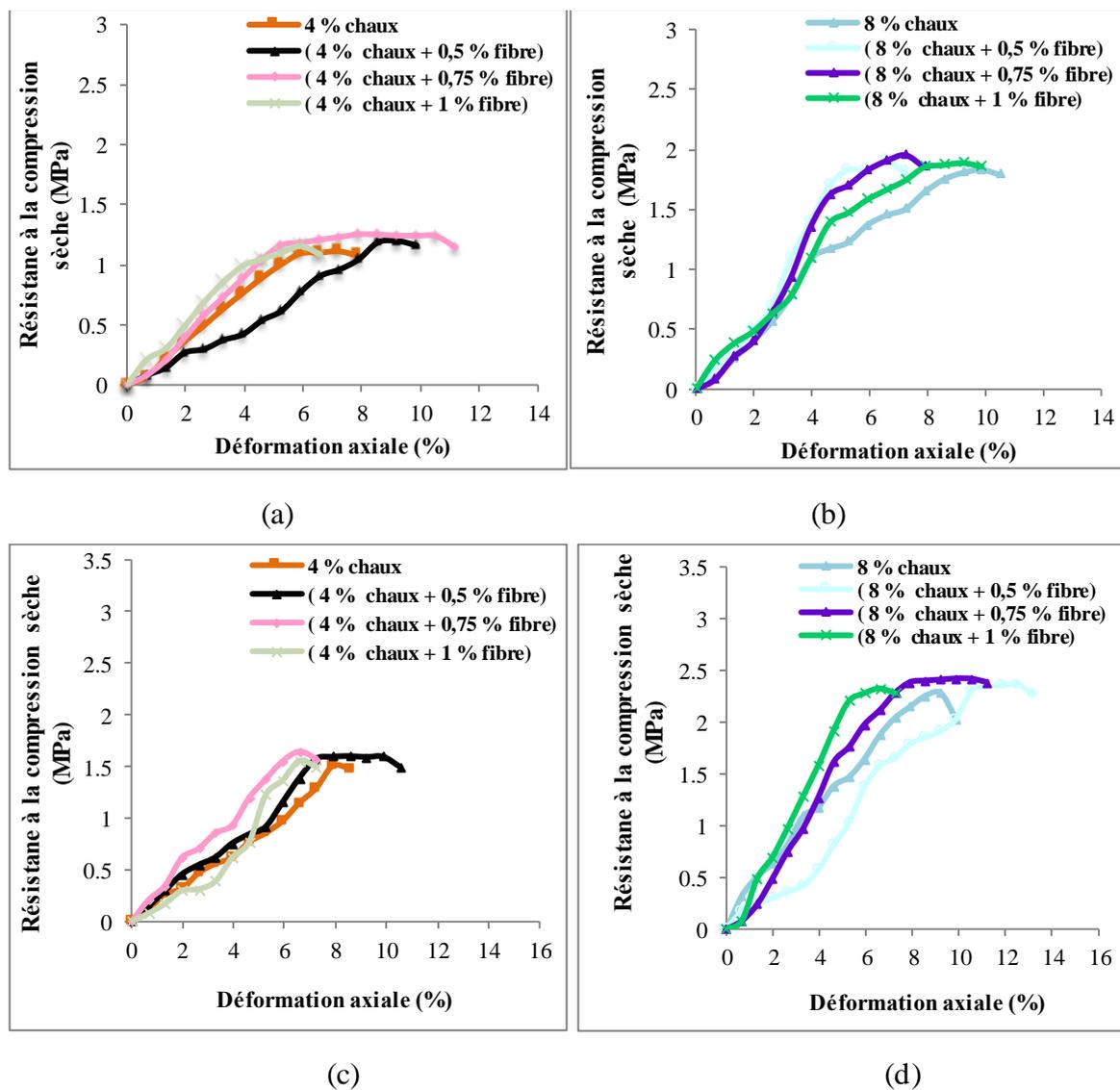


Figure 3.93 : Évolution de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de chaux plus fibres additionnée pour le sol argileux.

- a- (4 % chaux + fibres) à 7 jours. b- (8 % chaux + fibres) à 7 jours
c- (4 % chaux + fibres) à 28 jours. d- (8 % chaux + fibres) à 28 jours.

Les résultats montrent que, comme dans le cas des sols limoneux, aucun gain significatif de résistance pour la terre à base de sol argileux n'est obtenu en mélangeant de la chaux avec différentes teneurs en fibres en paille de blé. Les résultats présentés à la figure

3.93 montrent que les valeurs de résistance à la compression sont presque les mêmes pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de chaux et renforcés avec différentes proportions de fibres pour les deux périodes de cure. Les valeurs de la résistance augmentent avec la teneur en chaux et la période de cure.

La variation de la résistance à la compression humide en fonction de la quantité de fibres ajoutée est illustrée dans la figure 3.94.

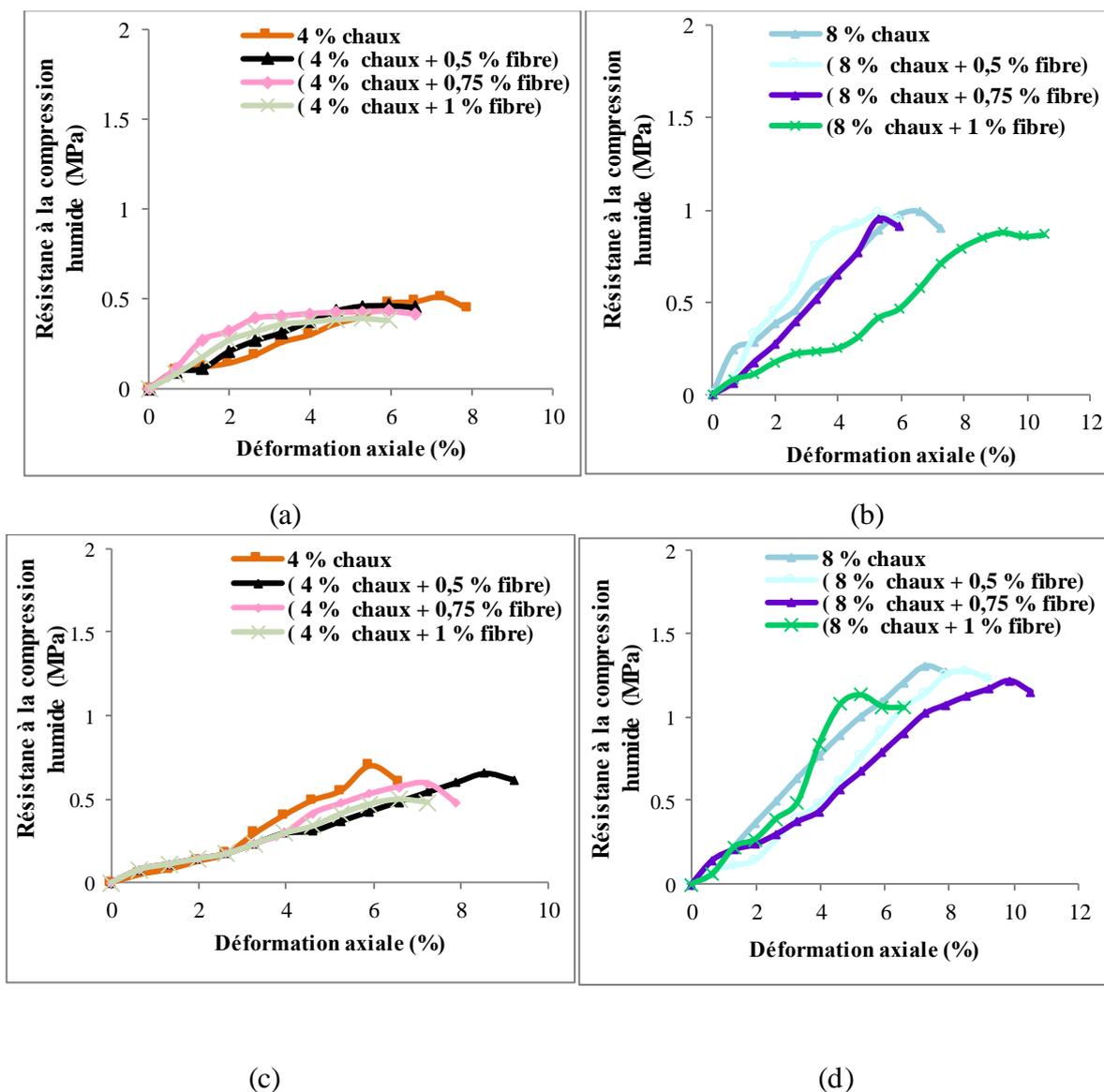


Figure 3.94: Évolution de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité de chaux plus fibres en paille de blé additionnée
 a - (4% chaux + fibres) à 7 jours. b - (8 % chaux + fibres) à 7 jours.
 c - (4 % chaux + fibres) à 28 jours. d - (8 % chaux + fibres) à 28 jours.

Les résultats montrent qu'il y a une diminution de la résistance humide de la terre à base de sol argileux, avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille de blé pour tous les

échantillons testés, par rapport aux échantillons sans fibres en paille de blé. La résistance des échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 8% de chaux et différentes teneurs en fibres de paille de blé, diminue de 1,31 MPa à 1,25, 1,2 et 1,1 MPa pour les échantillons traités avec 0, 0.5 %, 0.75 % et 1 % respectivement, à 28 jours de cure. De plus, une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la période de cure, est observée. Néanmoins, les valeurs de la résistance à la compression à l'état humide restent inférieures à celles obtenues à l'état sec, pour les deux périodes de cure de 7 et 28 jours.

3.9. Essais de durabilité

3.9.1. Essai humification – séchage

La même procédure d'essai que celle du traitement de la terre à base de sol limoneux a été suivie pour le traitement de terre à base de sol argileux. La terre à base de sol argileux a été mélangée avec les mêmes pourcentages étudiés dans la partie de la résistance à la compression.

3.9.1.1. Mélange (terre – laitier)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

La figure 3.95 montre les cycles complétés pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités par l'addition de 0 %, 4 %, 8 % et 12 % de laitier, dans le test d'humidification -séchage, après une période de cure de 7 jours et 28 jours.

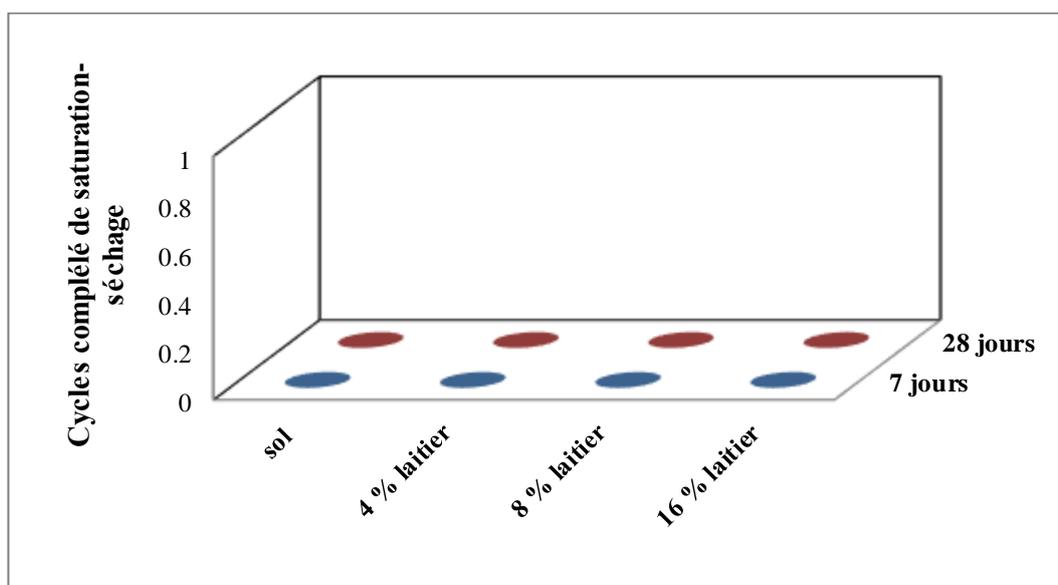


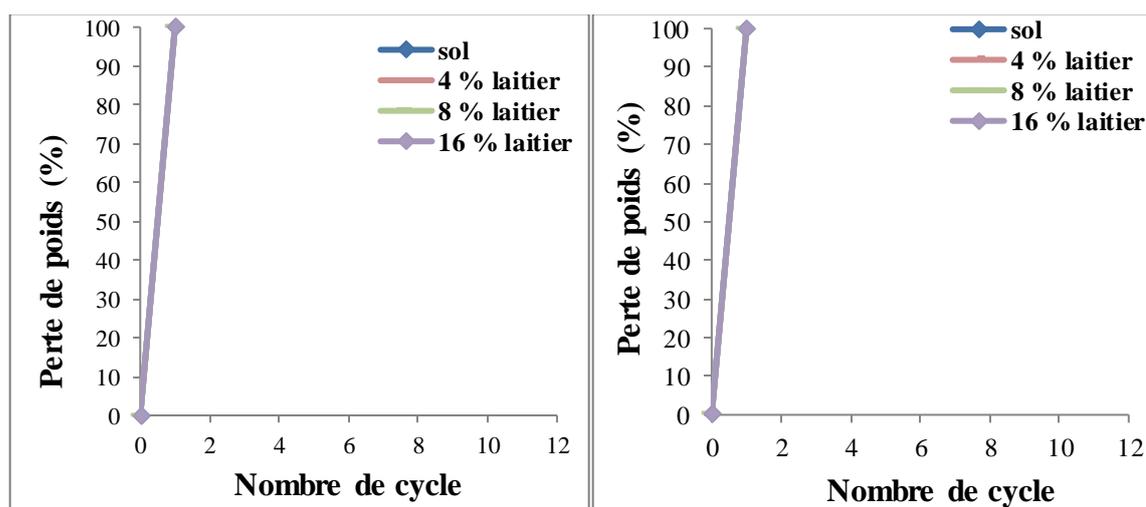
Figure 3.95 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au laitier.

D'après les résultats, on peut constater que les échantillons de terre à base de sol argileux non traités et traités au laitier seul n'ont achevé le cycle et se sont effondrés juste après la 1^{ère} phase de saturation, avant l'achèvement du 1^{ère} cycle pour les deux périodes de cure.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la perte de poids lors du test d'humidification -séchage sur des échantillons de terre à base de sol argileux traités au laitier, après une cure de 7 et 28 jour, sont présentés dans la figure 3.96.

Au regard des résultats de la perte de poids lors du test d'humidification-séchage sur la terre à base de sol argileux à 07 jours, les échantillons de terre non traités et traités au laitier ont eu une perte de 100 % dès le premier cycle. Aucun changement dans les résultats de la perte de poids n'a été observé avec l'augmentation de la période de cure.



(a) (b)
Figure 3.96 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en laitier additionnée. (a- 7 jours. b- 28 jours).

3.9.1.2. Mélange (terre– chaux)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

La figure 3.97 montre les cycles complétés dans le test d'humidification - séchage par les blocs de terre à base de sol argileux traités à 4 %, 8 % et 16 % après une période de cure de 7 et 28 jours.

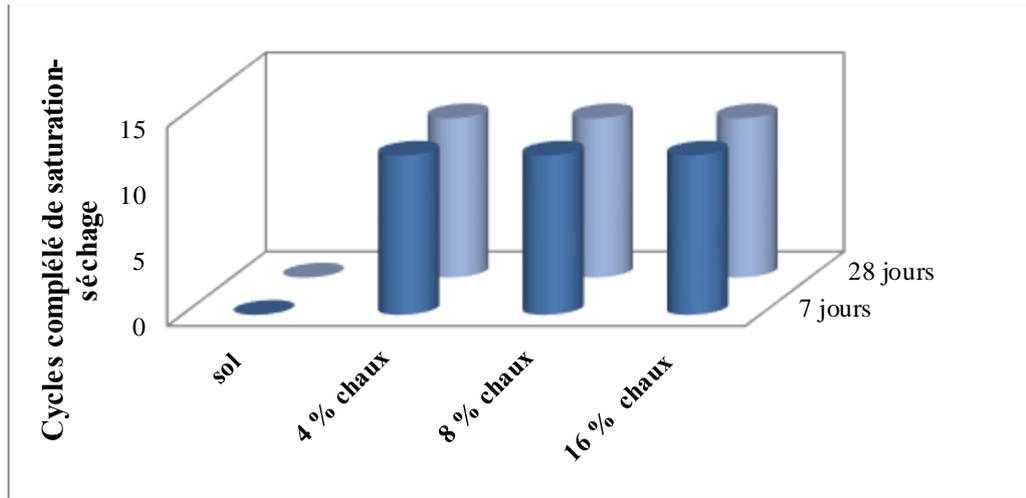


Figure 3.97 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux.

Les résultats présentés dans la figure 3.96 montrent que tous les échantillons traités à la chaux ont survécu aux 12 cycles d'humidification séchage pour les deux périodes de cure de 7 jours et 28 jours

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats du taux de perte de poids après l'essai humidification-séchage pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à la chaux, après une cure de 7 et 28 jours, sont présentés dans la figure 3.98.

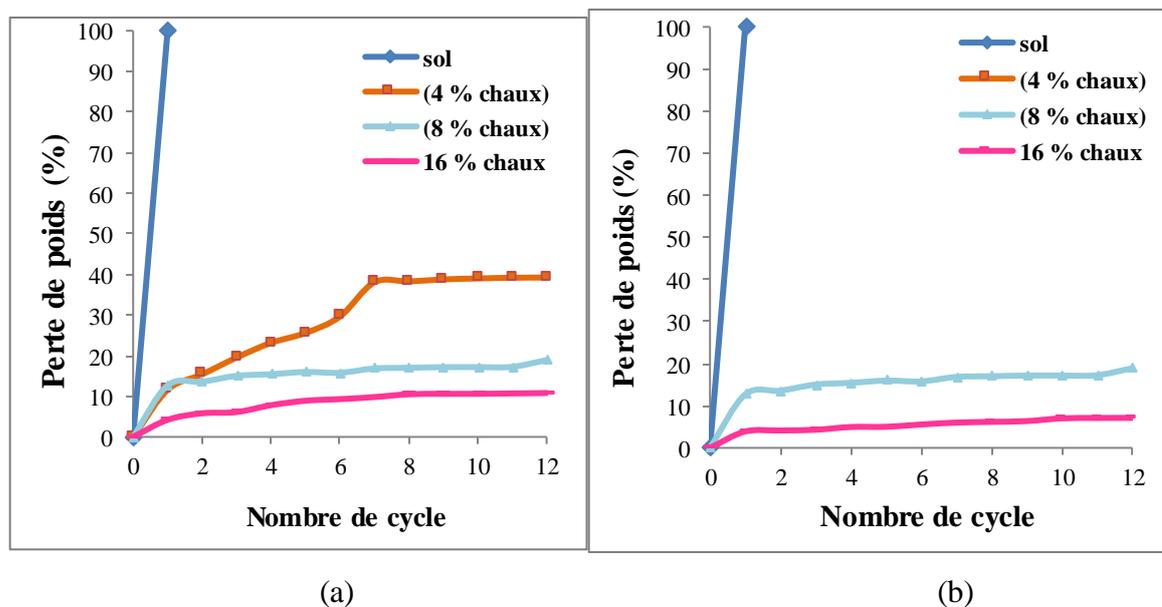


Figure 3.98 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux additionnée.

a. 7 jours. b- 28 jours.

D'après la figure donnée ci-dessus, une augmentation progressive de la perte de poids est observée avec l'augmentation du nombre de cycles pour les échantillons ayant subi une cure de 7 jours et 28 jours. Comme il peut se voir sur la figure 3.98, une diminution de la perte de poids avec l'augmentation de la teneur en chaux dans le mélange (sol – chaux) est observée à 7 jours et 28 jours de cure. Cette perte de poids est plus prononcée en augmentant la période de cure de 7 jours à 28 jours. À titre d'exemple, une diminution de la perte de poids de 24,27 %, 18,91 % et 6 % en ajoutant 4 %, 8 % et 16 % de chaux à 28 jours est remarquée. Néanmoins, à l'exception des échantillons de terre traités à 16 % de chaux à 28 jours, l'ensemble des échantillons traités à 7 jours et 28 jours présentent une valeur de perte de poids supérieure à 10 %, valeur limite recommandée pour les blocs de terre comprimée.

3.9.1.3.Mélange (terre – chaux –laitier)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

La figure 3.99 montre les cycles complétés dans le test d'humidification – séchage des échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 %, 8 % de chaux et à 4 %, 8 % de chaux additionnée à différentes quantités de laitier, après un période de cure de 7 et 28 jours.

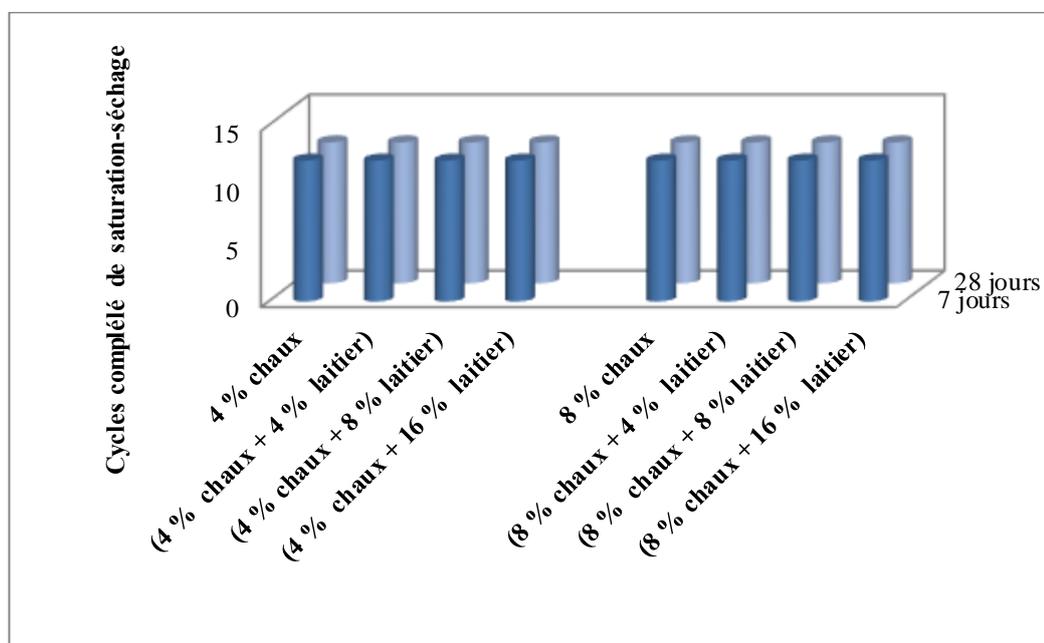


Figure 3.99 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux et au laitier.

Les résultats présentés dans la figure 3.99 montrent que tous les échantillons traités à la chaux et au laitier ont survécu aux 12 cycles d'humidification séchage pour les deux périodes de cure de 7 jours et 28 jours.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la perte de poids après le test d'humidification – séchage des échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 %, 8 % de chaux et à 4 %, 8 % de chaux mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier, après une cure de 7 et 28 jours, sont présentés dans la figure 3.100.

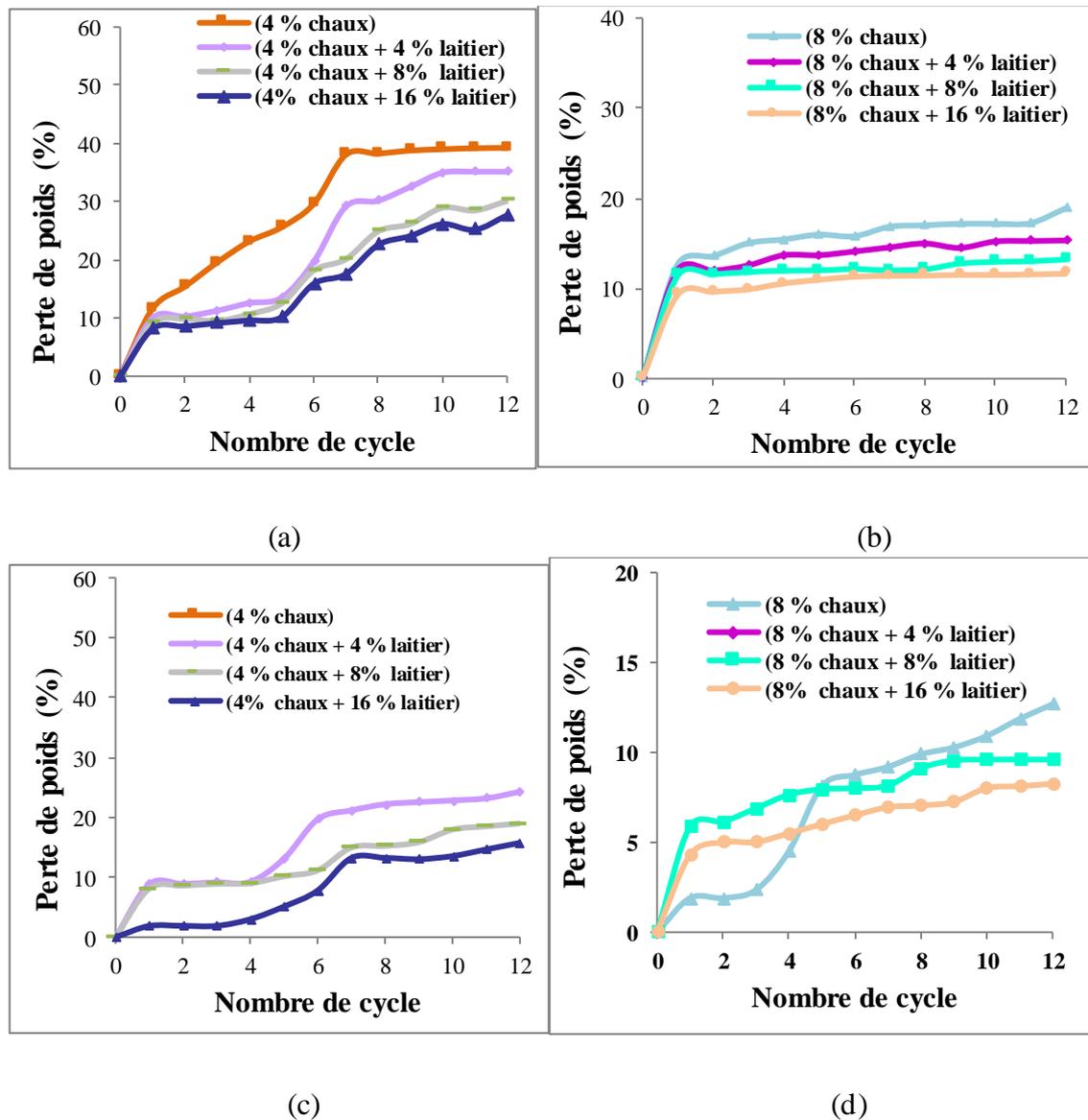


Figure 3. 100 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux plus laitier additionnée.

a- (4 % chaux+ laitier) 7 jours. b. (8 % chaux+ laitier) 7 jours.

c-(4 % chaux + laitier) 28 jours. d-(8 % chaux + laitier) 28 jours.

Les résultats donnés dans la figure 3.100 montrent une augmentation rapide de la perte de poids jusqu'à une certaine valeur durant le premier cycle, suivie d'une évolution rapide jusqu'au deuxième cycle, pour l'ensemble des échantillons de terre traités à 4 % de chaux et mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier à 7 jours et 28 jours. En augmentant la teneur en laitier et la période de cure, pour la terre traitée à 8 % de chaux, l'évolution de la perte de poids au delà du premier cycle tend à se stabiliser, avec l'augmentation du nombre de cycles. Une tendance à une diminution de la perte de poids, avec l'augmentation du pourcentage de laitier dans le mélange (sol – chaux), est bien observée pour l'ensemble des échantillons de terre traités à 4 % et 8 % de chaux, à 7 jours et 28 jours de cure. Cette diminution est plus prononcée avec l'augmentation de la teneur en chaux, en laitier et de période de cure. En effet, tous les échantillons traités à 8 % de chaux et 4 %, 8 % et 16 % de laitier présentent des valeurs de perte de poids inférieures à 10 %, valeur minimale recommandée pour les échantillons de terre comprimée.

3.9.1.4. Mélange (terre – ciment)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

La figure 3.101 montre les cycles complétés pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités au ciment- dans l'essai d'humidification – séchage après une période de cure de 7 et 28 jours.

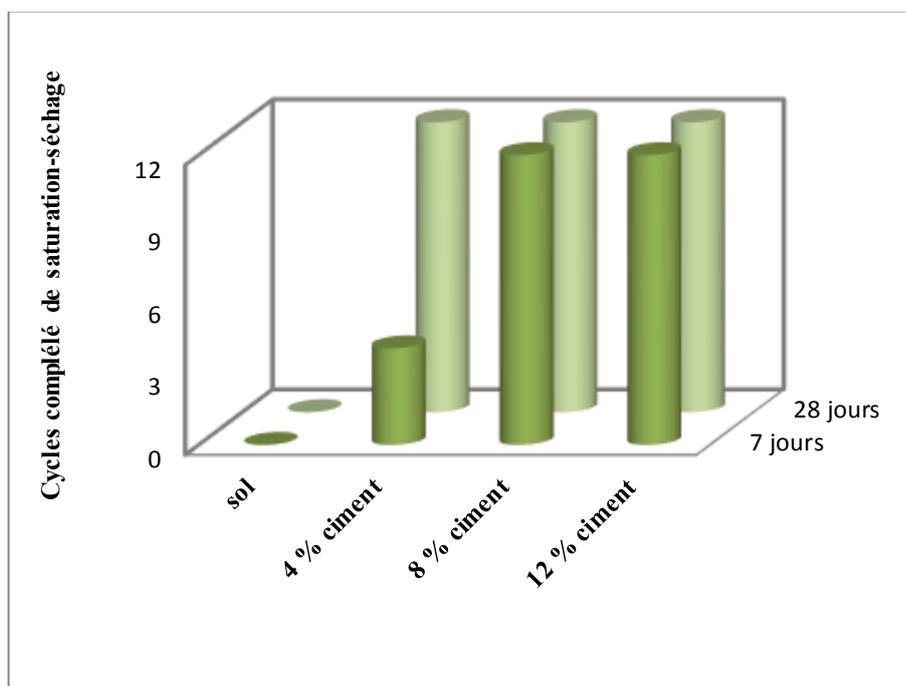


Figure 3.101 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement au ciment.

Les résultats montrent que les échantillons traités avec 8 et 12 % de ciment ont survécu aux 12 cycles, tandis que les échantillons traités avec 4 % de ciment n'ont survécu qu'à 4 cycles. En ce qui concerne l'effet du durcissement, toutes les combinaisons montrent le même comportement sur le même nombre de cycles, à l'exception des blocs de terre traités avec 4% de ciment qui ont subi un changement dans le nombre de cycles et qui ont survécu aux 12 cycles à 28 jours.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la perte de poids après l'essai humidification- séchage sur les échantillons de terre à base de sol argileux traités au ciment après une cure de 7 et 28 jours sont présentés dans la figure 3.102.

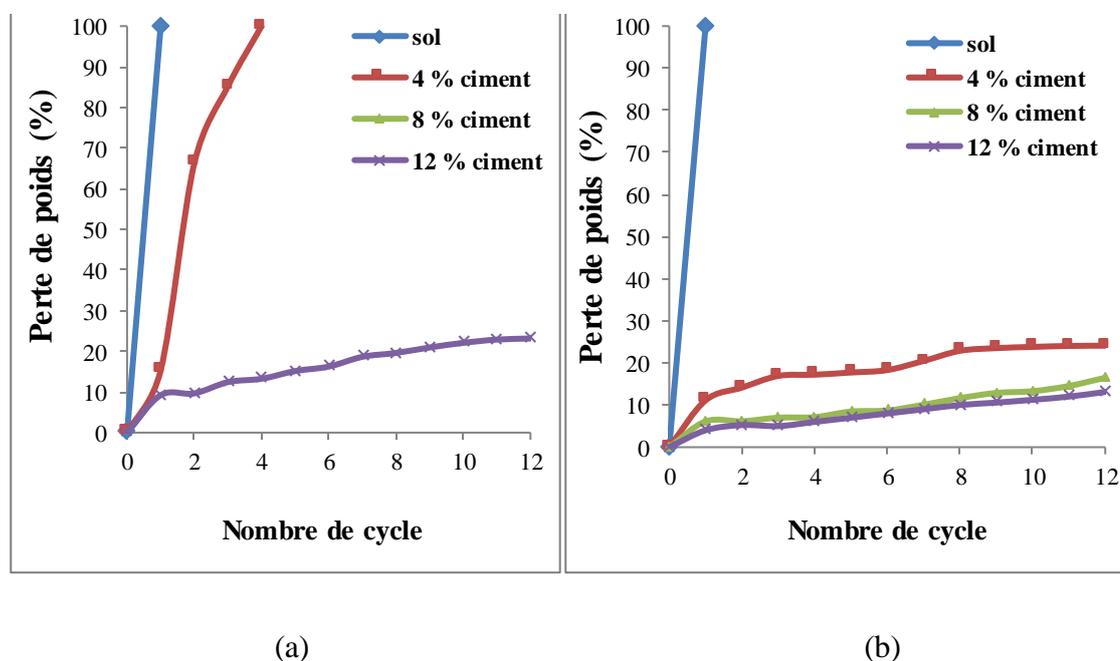


Figure 3.102 : Variation de la perte de bloc de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en ciment additionnée.

a- 7 jours. b- 28 jours.

On peut voir sur les courbes que la perte de poids augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de cycles. À la fin des cycles, les échantillons traités avec 4 % de ciment subissent une perte de 100 % au cours du 4^{ème} cycle, alors que la perte de poids est de 31,01 % et 18,41 % pour les échantillons traités avec 8 % et 12 % de ciment. Une tendance à une diminution de la perte de poids, avec l'augmentation de la teneur en ciment et de la période de cure, est observée. En effet, lorsque la période de cure est prolongée de 7 jours à 28 jours et avec l'augmentation de la teneur en ciment, les valeurs de perte de poids deviennent 24,1 %, 16,49 % et 13,12 % avec l'ajout de 4 %, 8 % et 12 % de ciment

respectivement. Néanmoins, l'ensemble des valeurs de perte de poids obtenues, à 7 jours et 28 jours de cure, sont supérieures à 10 %, valeur minimale recommandée pour les blocs de terre comprimée.

3.9.1.5. Mélange (terre – ciment –laitier)

- Cycle complété après l'essai humidification-séchage

La figure 3.103 présente les cycles complétés dans l'essai humidification-séchage pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de ciment et 4 % et 8 % de ciment mélangés avec différentes teneurs en laitier, après une cure de 7 et 28 jours.

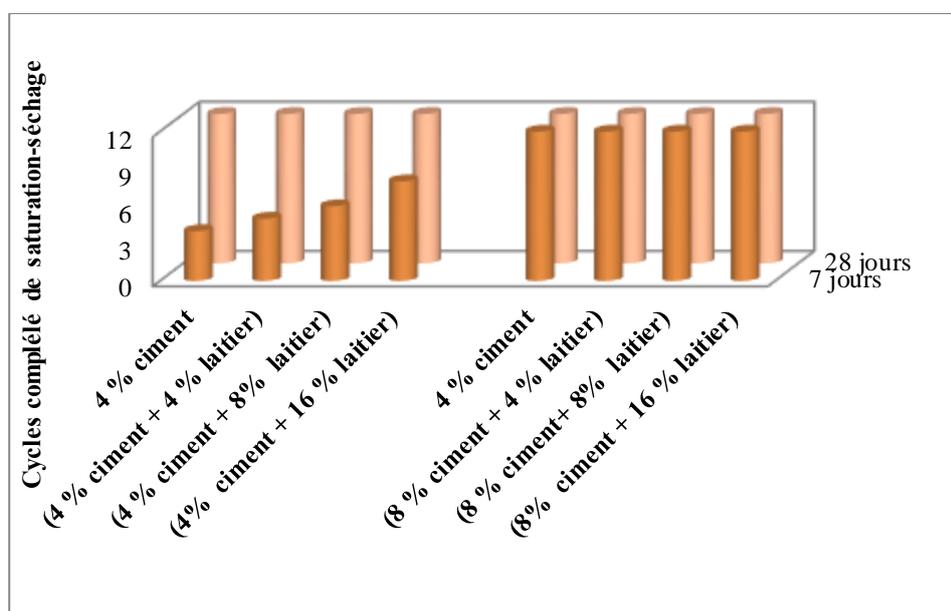


Figure 3.103 : Cycles de saturation-séchage après traitement au ciment et au mélange (ciment- laitier).

Il ressort clairement, d'après les résultats, qu'à 7 jours, les échantillons cimentés, à 4 % et ceux cimentés à 4 % et mélangés à 4 %, 8 % et 16 % de laitier, n'ont pas survécu aux 12 cycles et se sont effondrés avant d'avoir complété le 4^{ème} cycle, le 5^{ème} cycle, le 6^{ème} cycle et le 8^{ème} cycle respectivement. En revanche, les échantillons cimentés à 8 % et ceux cimentés à 8 % et mélangés à 4 %, 8 % et 16 % de laitier ont survécu aux 12 cycles. Cette figure montre également les cycles complétés par l'ensemble des combinaisons dans le test humidification- séchage après 28 jours de cure. Les échantillons de terre à base de sol argileux montrent un changement dans le nombre de cycles pour les échantillons cimentés à 4 % et ceux cimentés à 4 % et mélangés à 4 %, 8 % et 16 % de laitier ayant survécu aux 12 cycles.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la variation de la perte de poids en fonction de la quantité du laitier additionnée pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % du ciment et 4 % et 8 % de ciment mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier , après une cure de 7 et 28 jours sont donnés dans la figure 3.104.

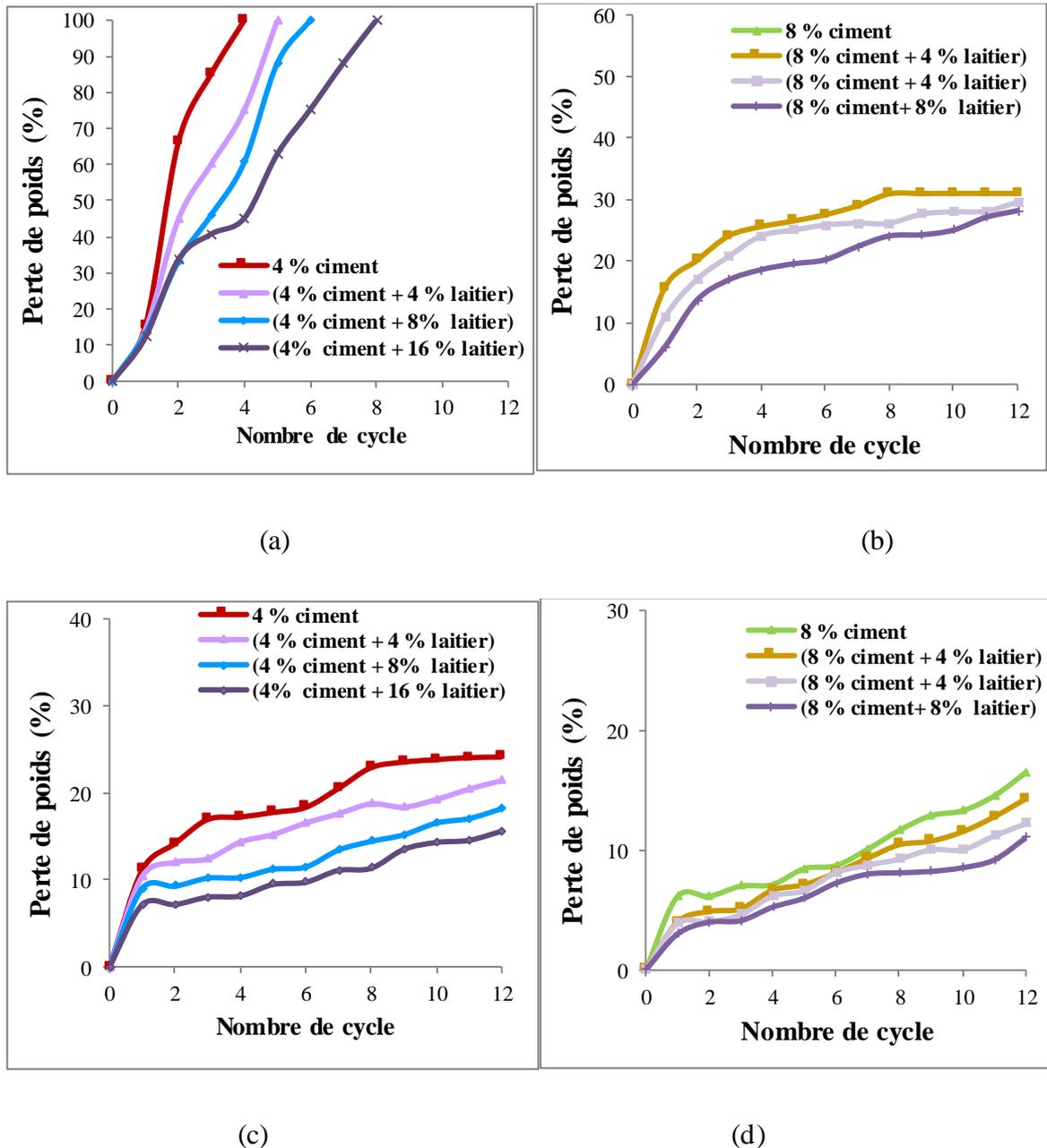


Figure 3.104 : Variation de la perte de poids des blocs de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en ciment plus laitier additionnée.

a- (4 % ciment + laitier) 7 jours. b- (8 % ciment+ laitier) 7jours.

c- (4 % ciment + laitier) 28 jours. d- (8 % ciment+ laitier) 28 jours.

À l'exception des échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % de ciment et mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier à 7 jours de cure, qui ont subi une perte de poids de 100 %, l'ensemble des échantillons traités à 4 % de ciment plus laitier à 28 jours, 8 % de ciment plus laitier à 7 jours et 28 jours présentent une évolution similaire de la progression de la perte de poids, en fonction du nombre de cycles, à celle donnée par les échantillons de terre à base de sol argileux, traités à la chaux et au laitier. Une augmentation rapide de la perte de poids jusqu'à une certaine valeur au premier cycle, suivie d'une évolution progressive jusqu'au douzième cycle est constatée. Une tendance à une diminution de la perte de poids avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (sol – ciment), de la teneur en ciment et de la période de cure est observée. Les plus faibles valeurs de la perte de poids sont enregistrées par les échantillons traités à 8 % de ciment et mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier. Néanmoins, les valeurs sont toutes supérieures à 10 %, valeur minimale recommandée pour les blocs de terre comprimée.

3.9.1.6. Mélange (terre – fibres de paille de blé)

- Cycles complétés après l'essai humidification-séchage

La figure 3.105 montre les cycles complétés dans l'essai humidification- séchage des échantillons de terre à base de sol argileux traités par l'addition de différentes teneurs en fibres de paille de blé, après une cure de 7 et 28 jours.

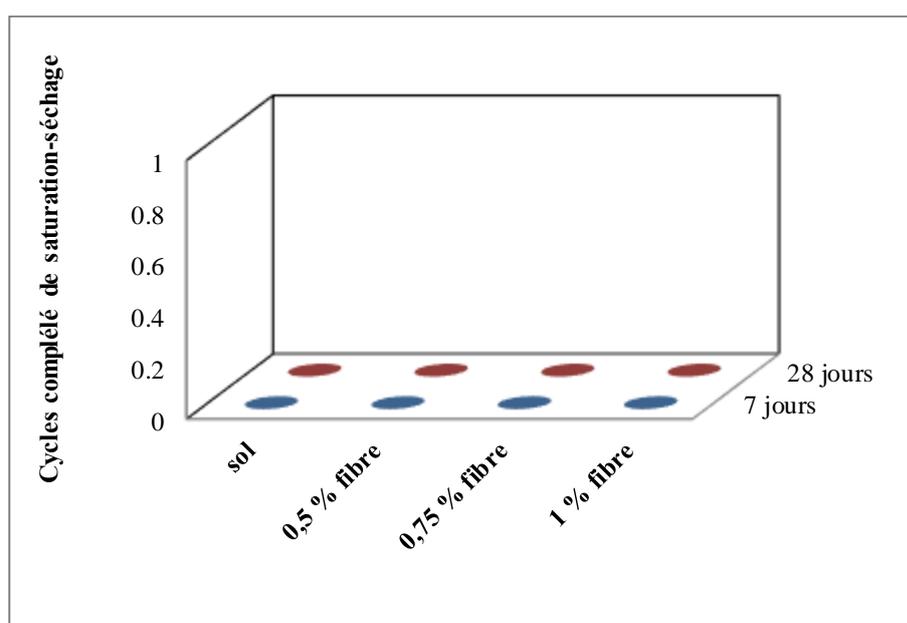


Figure 3.105 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement par les fibres de paille de blé.

D'après les résultats, l'ajout de fibres de paille de blé, ainsi que le prolongement de la période de cure, n'ont aucun effet sur l'augmentation de la résistance à la perte de poids de la terre à base de sol argileux. Aucune combinaison n'a survécu du cycle complet du test.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

La variation de la perte de poids après les cycles saturation-séchage des échantillons de la terre à base de sol argileux renforcés par les fibres en paille de blé, après une cure de 7 et 28 jours, est illustrée dans la figure 3.106.

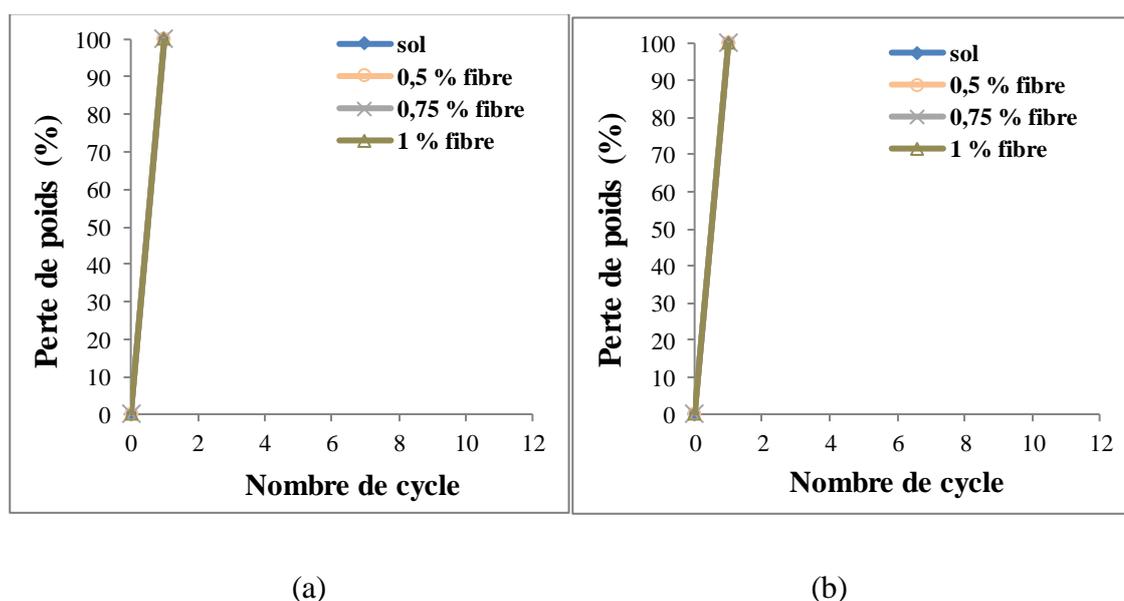


Figure 3.106 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en fibres de paille de blé additionnée.

a – 7 jours.

b- 28 jours.

En ce qui concerne la perte de poids, en fonction de la fibre en paille de blé de la terre à base de sol argileux, les résultats donnés montrent que les échantillons renforcés avec de fibres seules subissent une perte de 100% avant de terminer le 1^{er} cycle. Dans l'ensemble, la cinétique de la variation de la perte de poids est similaire pour les deux périodes de cure.

3.9.1.7. Mélange (terre – chaux – fibres de paille de blé)

- Cycles complétés après l'essai humidification-séchage

La figure 3.107 montre les cycles complétés dans l'essai humidification -séchage des échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4% et 8% de chaux et à 4 % et 8 % de chaux mélangés à différentes teneurs en fibres de paille de blé, après une période de cure de 7 jours et 28 jours. Les résultats montrent que l'ensemble des échantillons stabilisés à (4

%, 8 %) de chaux et à 4 % et 8 % de chaux mélangée avec (0.5 %, 0.75 % et 1 %) de fibres sont survécus aux douze cycles pour les deux temps de cure.

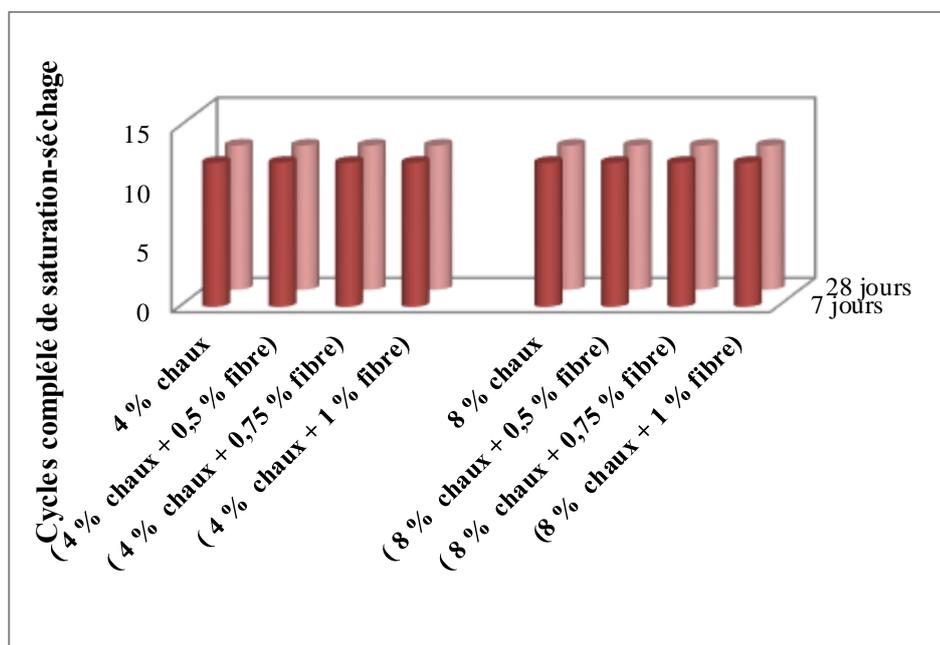


Figure 3.107 : Cycles de saturation-séchage complétés après traitement à la chaux et à la chaux plus fibres en paille de blé paille.

- Perte de poids après l'essai humidification-séchage

Les résultats de la variation de la perte de poids des échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de chaux, et à 4 % et 8 % de chaux mélangés à différentes teneurs en fibres de paille de blé après une cure de 7 et 28 jours, sont donnés dans la figure 3.108.

La même allure de l'évolution de la perte de poids, en fonction du nombre de cycles, mentionnée précédemment pour le cas des échantillons à base de sol argileux, traités au mélange de ciment, de chaux et de laitier. Avec l'ajout de fibres, comparé à l'ajout du laitier au mélange (terre - ciment) / (terre - chaux), l'évolution de la perte de poids en fonction de la teneur en fibres en paille de blé s'inverse par rapport à celle du laitier. En effet, les résultats montrent que la perte de poids de la terre à base de sol argileux augmente avec l'augmentation de la teneur de fibres de paille de blé dans le mélange (sol - chaux). Cela est valable pour l'ensemble des échantillons, traités à 4%, 8% de chaux et mélangés avec 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres, à 7 jours et 28 jours de cure. Néanmoins, une augmentation de la teneur en chaux à 8 % et du temps de cure à 28 jours entraînent une diminution de la perte

de poids pour les échantillons renforcés avec une proportion de 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres de paille de blé. En effet, les blocs traités à 8 % de chaux et 0.5 % de fibre présentent des valeurs de perte de poids inférieures à la limite minimale recommandée pour les blocs de terre comprimée.

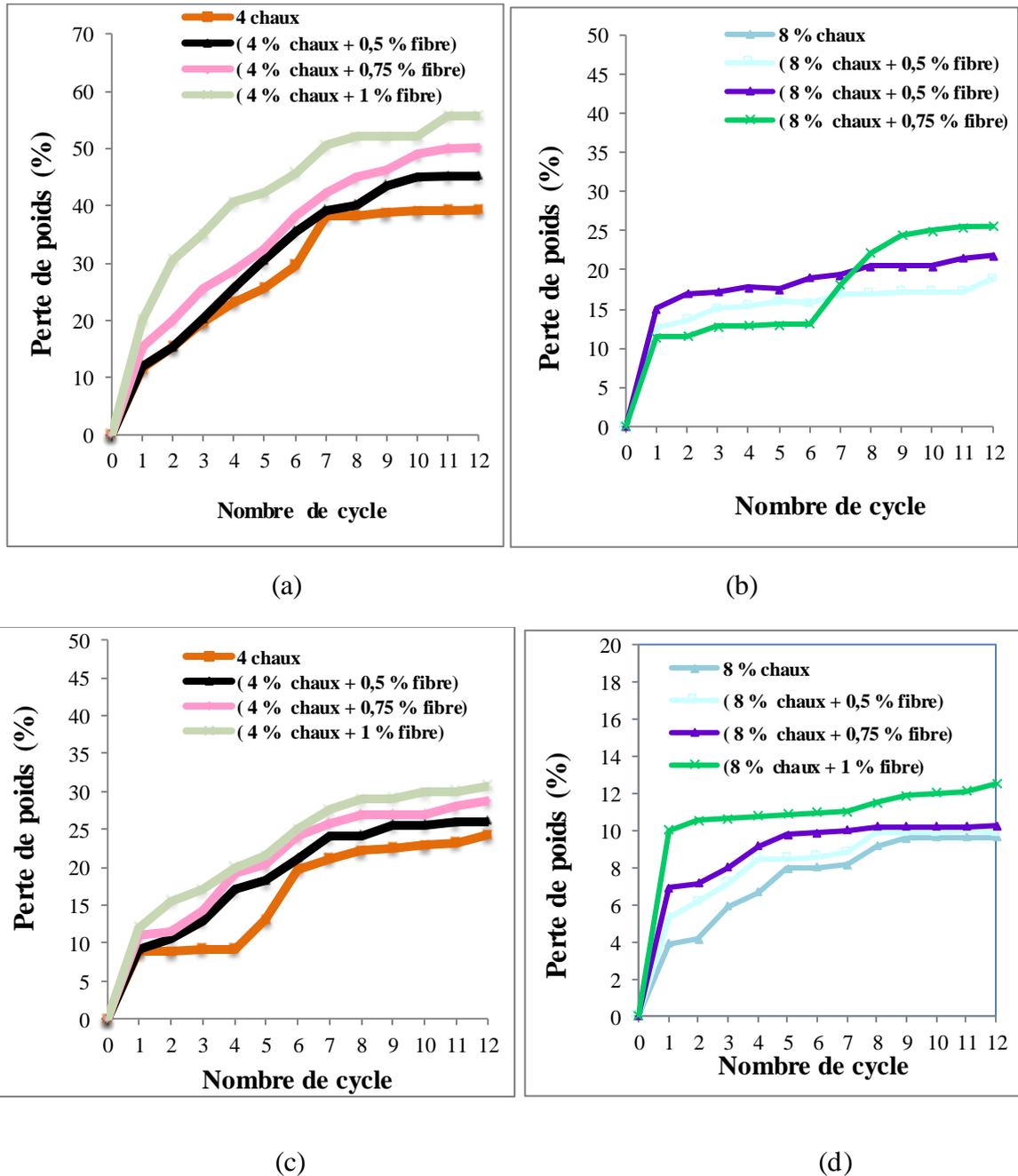


Figure 3.108 : Variation de la perte des blocs de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux plus fibres de paille de blé additionnée.

- a- (4 % chaux+ fibre) 7 jours. b. (8 % chaux+ fibre) 7 jours.
 c. (4 % chaux + fibre) 28 jours. d. (8 % chaux+ fibre) 28 jours.

3.9.2. Essai d'absorption capillaire

Pour étudier l'effet des différents additifs sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux, la terre a été mélangée avec les mêmes pourcentages étudiés dans les parties précédentes.

3.9.2.1. Mélange (terre – laitier)

Les valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité de laitier ajoutée, sont données dans le tableau 3.14.

Tableau 3.14 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du laitier ajouté.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
sol	0,16	0,09
4 % laitier	0,15	0,085
8 % laitier	0,145	0,08
16 % laitier	0,135	0,07

En ce qui concerne les valeurs de l'absorption capillaire obtenues après rajout d'un pourcentage de laitier, les valeurs des résultats obtenus données dans le tableau 3.15, montrent une réduction marginale de l'absorption capillaire par le rajout de laitier, après une cure de 7 et 28 jours. Une réduction des valeurs de l'absorption capillaire avec l'augmentation de la cure, est observée.

3.9.2.2. Mélange (terre–chaux)

Les valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux, en fonction du dosage en chaux, pour différents temps de cure, sont présentées dans le tableau 3.15.

Tableau 3.15 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction de la chaux ajoutée.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
sol	0,16	0,09
4 % chaux	0,12	0,08
8 % chaux	0,105	0,07
16 % chaux	0,06	0,03

D'après les valeurs des résultats obtenus pour l'absorption capillaire, données dans le tableau ci-dessus, il apparaît que l'absorption capillaire diminue avec l'ajout d'une quantité de chaux. De plus, une réduction de l'absorption capillaire avec l'augmentation de la cure est observée

3.9.2.3. Mélange (terre – chaux – laitier)

Le tableau 3.16 regroupe les valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base du sol argileux, en fonction de la quantité de chaux et du mélange (chaux laitier) ajouté, après un cure de 7 et 28 jours.

Tableau 3.16 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du mélange (chaux - laitier) ajouté.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
4 % chaux	0,12	0,08
(4 % chaux + 4 % laitier)	0,11	0,07
(4 % chaux + 8 % laitier)	0,1	0,055
(4 % chaux +16 % laitier)	0,085	0,04
8 % chaux	0,105	0,07
(8 % chaux + 4 % laitier)	0,085	0,05
(8 % chaux + 8 % laitier)	0,08	0,03
(8 % chaux + 16 % laitier)	0,075	0,01

Sur la base de ces résultats, on a observé une diminution de la valeur de l'absorption capillaire avec l'ajout d'une quantité de laitier au mélange (terre-chaux) comparée à celle obtenue avec l'ajout de la chaux seule à 7 et à 28 jours de cure. Cette diminution croît avec l'augmentation de la quantité de chaux dans le mélange (terre-chaux), de la quantité de laitier dans les échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % et 8 % de chaux et du temps de cure.

3.9.2.4. Mélange (terre – ciment)

Les valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base du sol argileux, en fonction du dosage en ciment, pour différents temps de cure, sont présentés dans le tableau 3.17.

Tableau 3.17: Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du ciment ajouté.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
sol	0,16	0,09
4 % ciment	0,14	0,085
8 % ciment	0,115	0,08
12 % ciment	0,09	0,04

Les valeurs de l'absorption capillaire obtenues des résultats, après rajout d'une teneur en ciment aux échantillons de terre à base de sol argileux, données dans le tableau 3.13, montrent une réduction de l'absorption capillaire par le rajout du ciment après une cure de 7 et 28 jours. De plus, une réduction des valeurs de l'absorption capillaire, avec l'augmentation de la cure, est observée.

3.9.2.5. Mélange (terre – ciment - laitier)

Les valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité de ciment et du mélange (ciment-laitier) ajoutée, après une cure de 7 et 28 jours, sont données dans le tableau 3.18.

Tableau 3.18: Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du mélange (ciment-laitier) ajouté.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
4 % ciment	0,14	0,085
(4 % ciment + 4 % laitier)	0,135	0,075
(4 % ciment + 8 % laitier)	0,12	0,065
(4 % ciment + 16 % laitier)	0,105	0,055
8 % ciment	0,115	0,08
(8 % ciment + 4 % laitier)	0,1	0,06
(8 % ciment + 8 % laitier)	0,09	0,05
(8 % ciment + 16 % laitier)	0,085	0,03

Une diminution de la valeur de l'absorption capillaire avec l'ajout d'une quantité de laitier au mélange (terre-ciment) comparé à celle obtenu avec l'ajout du ciment seul à 7 et à 28 jours de cure est constatée. Cette diminution croît avec l'augmentation de la quantité

de ciment dans le mélange (terre-ciment), de la quantité de laitier dans les échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % et 8 % de ciment et du temps de cure.

3.9.2.6. Mélange (terre – fibres de paille de blé)

Les valeurs de l'absorption capillaire en fonction de la quantité de fibres de paille de blé ajoutée, pour les échantillons de terre à base de sol argileux sont données dans le tableau 3.19.

Tableau 3.19 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction de fibres de paille de blé ajoutée.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
Sol	0,16	0,09
0,5 % fibre	0,18	0,11
0,75 % fibre	0,21	0,14
1 % fibre	0,225	0,16

Les résultats présentés sur le tableau 3.19 montrent que l'addition de fibres augmente l'absorption capillaire pour les deux temps de cure. L'augmentation est de 22 (cm.s^{-0,5}) ×10⁻², 55,5 × (cm.s^{-0,5}) ×10⁻², 77 (cm.s^{-0,5})×10⁻² pour les rajouts de (0.5%, 0.75% et 1%) de fibres.

Les valeurs de l'absorption capillaire obtenues des résultats, après rajout d'une teneur en fibres de paille de blé aux échantillons de terre à base de sol argileux, donnés dans le tableau 3.19, montrent une augmentation de l'absorption capillaire par le rajout de fibres après une cure de 7 et 28 jours. De plus, une réduction des valeurs de l'absorption capillaire, avec l'augmentation de la cure, est observée.

3.9.2.7. Mélange (terre – chaux – fibres de paille de blé)

Les valeurs de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux, en fonction de la quantité de chaux et du mélange (chaux-fibres en paille de blé) ajoutés, après une cure de 7 et 28 jours, sont données dans le tableau 3.20.

Les valeurs de l'absorption capillaire obtenues des résultats du test, après rajout d'une teneur de (4 % et 8 %) chaux et d'une teneur de chaux (4 % et 8 %) mélangée avec différentes teneurs en fibres de paille de blé, aux échantillons de terre à base de sol argileux, sont données dans le tableau 3.20. Les résultats montrent une diminution de la valeur de

l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux, avec l'ajout d'une quantité de chaux seul, laquelle augmente avec la teneur en chaux et la période de cure. Par contre, par l'introduction d'une quantité de fibres au mélange (terre-chaux), une augmentation de la valeur de l'absorption capillaire, avec l'augmentation de la teneur de fibres de paille de blé, pour les différentes teneurs en chaux et les deux temps de cures est constatée. Des valeurs moindres de l'absorption capillaire sont enregistrées par les échantillons de terre à base de sol argileux, traités au mélange (chaux-fibres en paille de blé), ayant subi une cure de 28 jours.

Tableau 3.20 : Valeurs de l'absorption capillaire en fonction du mélange (chaux- fibres de paille de blé) ajouté.

	Absorption capillaire (cm.s ^{-0,5})×10 ⁻²	
	7 jours	28 jours
sol	0,16	0,09
4% chaux	0,12	0,08
(4 % chaux 0,5% fibre)	0,13	0,09
(4 % chaux+0,75% fibre)	0,146	0,11
(4 % chaux+1% fibre)	0,16	0,135
8 % chaux	0,105	0,07
(8 % chaux 0,5% fibre)	0,119	0,08
(8 % chaux+0,75% fibre)	0,132	0,095
8 % chaux+1% fibre)	0,145	0,115

3.10. Synthèse des résultats du traitement du sol argileux aux différents additifs :

Comme pour le cas de la terre à base de sol limoneux, au regard des résultats obtenus dans cette partie, nous allons faire ressortir les optimums des combinaisons, à partir de l'effet des différents stabilisants sur la résistance à la compression, la durabilité (la perte de poids, l'absorption capillaire) de la terre à base de sol argileux, pour l'utiliser comme matériau de construction, tout en respectant les différentes normes internationales déjà mentionnées dans le paragraphe 3.5. Ces combinaisons seront soumises aux essais d'érosion, d'abrasion, de gonflement, de retrait et de la conductivité thermique. Les tableaux 3.21, 3.22 et 3.23 résument les résultats obtenus pour le mélange (chaux –laitier), (chaux –fibre), et (ciment – laitier) respectivement.

Tableau 3 .21: Optimisation des résultats de sol argileux traité par chaux, laitier et mélange (chaux-laitier)

Argile + chaux+laitier	la résistance à la compression uniaxiale		Essai humidification – séchage			Absorption capillaire		OBS
	28 jours	Remarque	Cycles complétés	Perte de poids (%) après 12 cycle	Remarque			
Sol	0,198	Échoué (RCU<2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,09	échoué	échoué
4 % laitier	0,465	Échoué (RCU<2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,085	échoué	échoué
8 % laitier	0,587	Échoué (RCU<2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,08	Passé	échoué
16 % laitier	0,729	Échoué (RCU<2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,07	passé	Échoué
4 % chaux	1,5	Échoué (RCU<2 MPa)	12	24,27	Échoué (perte de poids >10 %)	0,08	Passé	échoué
(4 % chaux + 4 % laitier)	1,85	Échoué (RCU<2 MPa)	12	18,98	Échoué (perte de poids >10 %)	0,07	passé	échoué
(4 % chaux + 8 % laitier)	2	Passé (RCU> 2 MPa)	12	15,75	Échoué (perte de poids >10 %)	0,055	Passé	échoué
(4 % chaux +16 % laitier)	2,13	Passé (RCU> 2 MPa)	12	12,67	Échoué (perte de poids >10 %)	0,04	Passé	échoué
8 % chaux	2,27	Passé (RCU> 2 MPa)	12	9,6	Passé (perte de poids <10 %)	0,07	passé	passé
(8 % chaux + 4 % laitier)	2,64	Passé (RCU> 2 MPa)	12	8,25	Passé (perte de poids < 10 %)	0,05	Passé	Passé
(8 % chaux + 8 % laitier)	2,85	Passé (RCU> 2 MPa)	12	7,12	Passé (perte de poids < 10 %)	0,03	passé	passé
(8 % chaux + 16 % laitier)	3,27	Passé (RCU> 2 MPa)	12	6,5	Passé (perte de poids <10 %)	0,01	Passé	Passé
16 % chaux	1,92	Échoué (RCU< 2 MPPa)	12	5.12	Passé (perte de poids <10 %)	0,03	passé	échoué

Conclusion: Les combinaisons qui ont une résistance à la compression à 28 jours supérieurs à 2 MPa avec une perte de poids après 12 cycles inférieur à 10 % sont : **8 % chaux / (8 % chaux + 4 % laitier)/ (8 % chaux +8 % laitier)/(8 % chaux +16 %laitier)**

Tableau 3.22 : Optimisation des résultats de sol argileux traité par chaux, fibre et mélange (chaux-fibre).

argile+chaux +fibre	la résistance à la compression uniaxiale		Essai humidification – séchage			Absorption capillaire		RMQ
	28 jours	Remarque	Cycles complétés	Perte de poids (%) après 12 cycles	Remarque			
0,5 fibre	0,343	Échoué (RCU< 2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,11	passé	échoué
0,75 fibre	0,398	Échoué (RCU< 2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,14	Passé	échoué
1 fibre	0,325	Échoué (RCU< 2 MPa)	-	-	Échoué (perte de poids >10 %)	0,16	Passé	échoué
4 chaux	1,5	Échoué (RCU< 2 MPa)	12	24,27	Échoué (perte de poids >10 %)	0,08	passé	échoué
(4 chaux + 0,5 fibre)	1,59	Échoué (RCU< 2 MPa)	12	25,98	Échoué (perte de poids >10 %)	0,09	passé	échoué
(4 chaux + 0,75 fibre)	1,64	Échoué (RCU< 2 MPa)	12	28,75	Échoué (perte de poids >10 %)	0,11	Passé	échoué
(4 chaux + 1 fibre)	1,55	Passé (RCU> 2 MPa)	12	30,67	Échoué (perte de poids >10 %)	0,135	Passé	échoué
8 chaux	2,27	Passé (RCU> 2 MPa)	12	9,6	Passé (perte de poids <10 %)	0,07	passé	passé
(8 chaux + 0,5 fibre)	2,37	Passé (RCU> 2 MPa)	12	9,85	Passé (perte de poids < 10 %)	0,08	Passé	Passé
(8 chaux + 0,75 fibre)	2,45	Passé (RCU> 2 MPa)	12	10,25	Passé (perte de poids < 10 %)	0,095	passé	passé
(8 chaux + 1 fibre)	2,3	Passé (RCU> 2 MPa)	12	12,5	Passé (perte de poids <10 %)	0,115	Passé	échoué
Conclusion: Les combinaisons qui ont une résistance à la compression à 28 jours supérieurs à 2 MPa avec une perte de poids après 12 cycles inférieur à 10 % sont : 8% chaux /(8 % chaux + 0.5 %fibre)/								

Tableau 3.23 : Optimisation des résultats de sol argileux traité par ciment, laitier et mélange (ciment-laitier)

argile +ciment +laitier	la résistance à la compression uniaxiale		Essai humidification – séchage			Absorption capillaire		RMQ
	28 jours	Remarque	Cycles complétés	Perte de poids (%) après 12 cycle	Remarque			
4 % ciment	1,12	Échoué (RCU<2 MPa)	12	24,1	Échoué (perte de poids >10%)	0,085	passé	échoué
(4 % ciment + 4 % laitier)	1,475	Échoué (RCU<2 MPa)	12	21,39	Échoué (perte de poids >10%)	0,075	passé	échoué
(4 % ciment + 8 % laitier)	1,789	Échoué (RCU<2 MPa)	12	18,16	Échoué (perte de poids >10%)	0,065	Passé	échoué
(4 % ciment + 16 % laitier)	2,085	Passé (RCU> 2 MPa)	12	15,58	Échoué (perte de poids >10%)	0,055	Passé	échoué
8 % ciment	2,105	Passé (RCU> 2 MPa)	12	16,49	Échoué (perte de poids >10%)	0,08	passé	échoué
(8 % ciment + 4 % laitier)	2,451	Passé (RCU> 2 MPa)	12	14,29	Échoué (perte de poids >10%)	0,06	Passé	échoué
(8 % ciment + 8 % laitier)	2,774	Passé (RCU> 2 MPa)	12	12,21	Échoué (perte de poids >10%)	0,05	passé	échoué
(8 % ciment + 16 % laitier)	2,954	Passé (RCU> 2 MPa)	12	11,04	Échoué (perte de poids >10%)	0,03	Passé	échoué
12 % ciment	2,751	Passé (RCU> 2 MPa)	12	12.84	Échoué (perte de poids >10%)	0,04	passé	échoué

²Conclusion: Les combinaisons qui ont une résistance à la compression à 28 jours supérieurs à 2 Mpa avec une perte de poids après 12 cycles inférieur à 10 % sont : **0**

3.11. Effet des optimums des additifs sur les blocs de terre à base de sol argileux

3.11.1. Essai d'érosion

L'essai d'érosion sous pression a été effectué pour déterminer la résistance du bloc aux conditions de précipitations continues. Le sol argileux a été mélangé avec les optimums des résultats obtenus dans la première partie.

Note : Il est à noter, que les blocs de terre à base de sol argileux, non traités, se sont complètement désintégrés.

3.11.1.1. Mélange (terre – chaux – laitier)

La figure 3.109 présente les résultats obtenus lors des essais d'abrasion effectués sur des échantillons de terre à base de sol argileux stabilisés au laitier et au mélange (chaux-laitier).

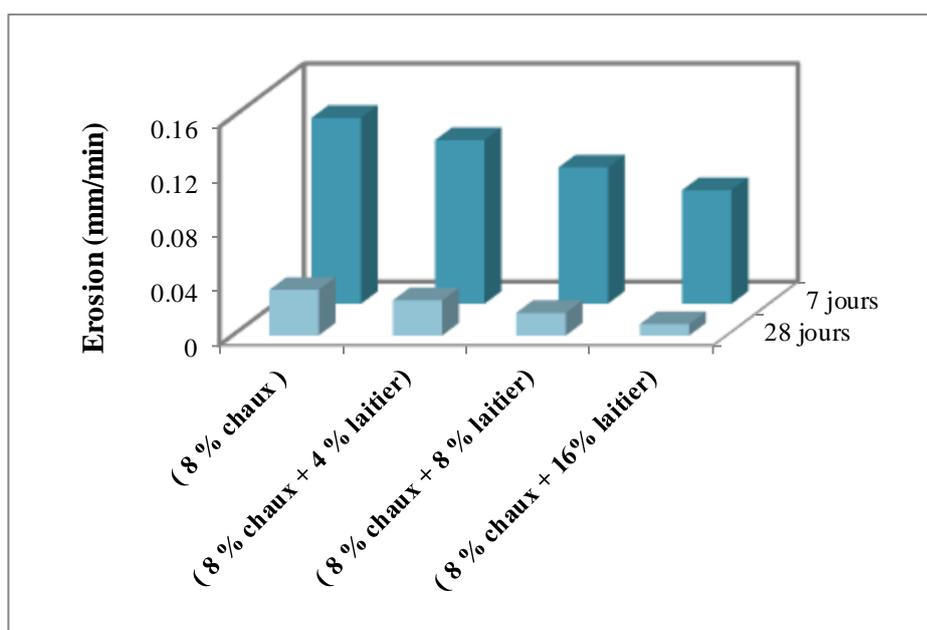


Figure 3.109 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (chaux -laitier).

Les résultats montrent une diminution du taux d'érosion avec l'addition d'une proportion de laitier au mélange (terre-chaux) à 7 et à 28 jours de cure. Cette diminution dans le taux d'érosion est beaucoup plus prononcée avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (chaux-laitier) et de la période de cure. En termes de valeur, le taux d'érosion est d'environ de 0,1 (mm/min) et 0,008 (mm/min) pour les blocs traités à 8 % de chaux et mélangés avec 8 % et 12 % de laitier respectivement, à 28 jours.

3.11.1.2. Mélange (terre– chaux – fibre en paille de blé)

La variation de l'érosion en fonction de la quantité de chaux et du mélange (chaux-fibre), pour les blocs de terre à base de sol argileux, est illustrée à la figure 3.110.

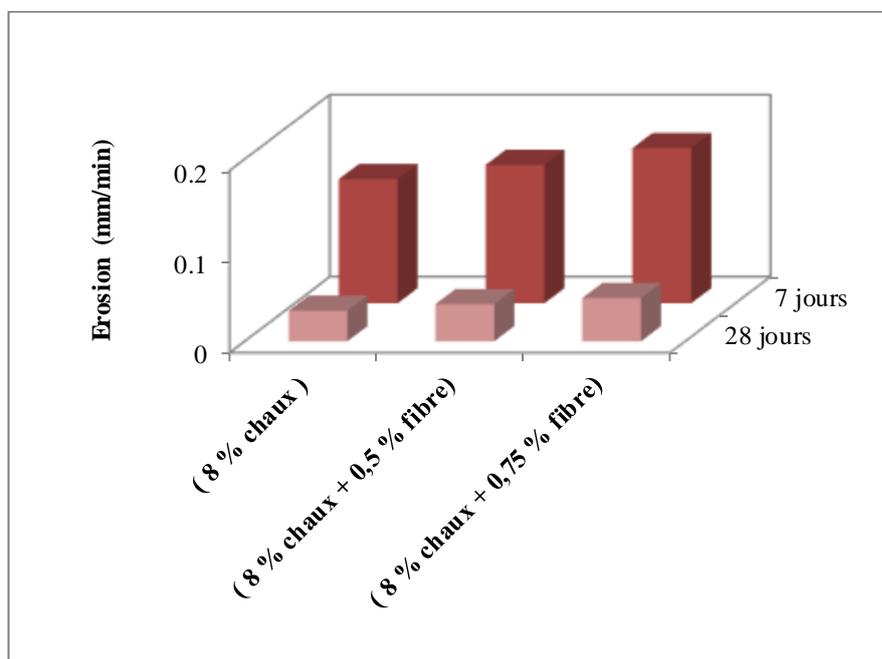


Figure 3.110 : Variation du taux d'érosion des blocs stabilisés au mélange (chaux - fibres).

Pour l'effet de la fibres de paille de blé sur l'érosion du bloc de terre à base de sol argileux, stabilisé au mélange (chaux - paille de blé), la figure 3.109, montre une augmentation de l'érosion avec l'ajout de paille de blé aussi bien à 7 et 28 jours de cure. Une diminution du taux d'érosion avec l'augmentation de la période de cure est observée.

3.11.2. Essai d'abrasion

3.11.2.1. Mélange (terre -chaux –laitier)

La figure 3.111 illustre l'évolution de la résistance à l'abrasion de la terre à base de sol argileux, en fonction de la teneur en chaux et du mélange (chaux-laitier).

En ce qui concerne l'effet de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur l'abrasion des blocs de terre à base de sol argileux, les résultats montrent qu'il y a une augmentation du coefficient d'abrasion, avec l'augmentation de la teneur en laitier, dans le mélange (chaux-laitier), pour les deux temps de cure. Les valeurs du coefficient d'abrasion obtenues par l'ensemble des blocs de terre à base de sol argileux, après 28 jours de cure, sont supérieures à celle obtenues, à 7 jours de cure.

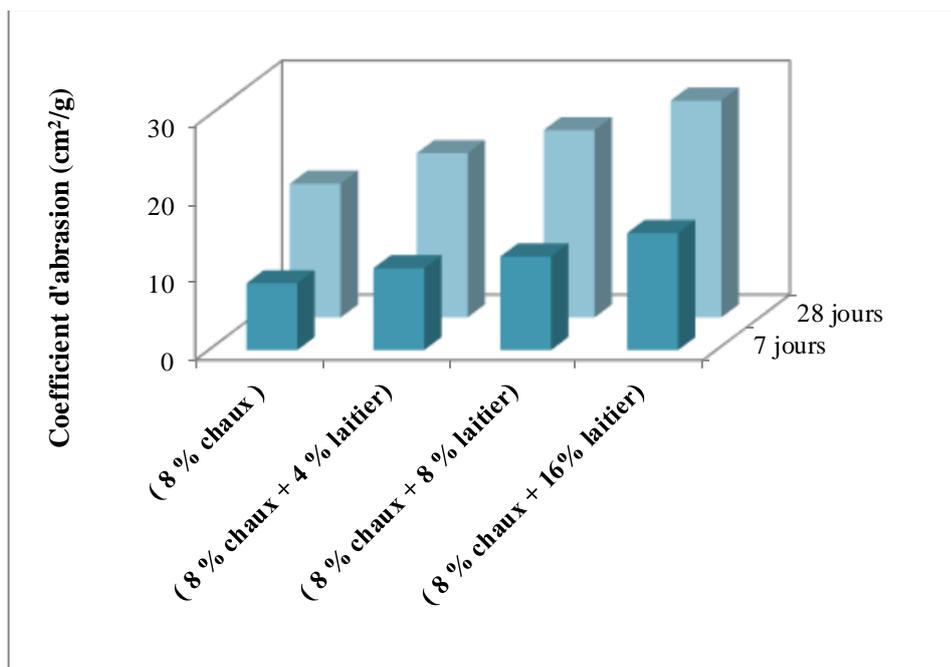


Figure 3.111 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (chaux– laitier).

3.11.2.2. Mélange (terre– chaux – fibres de paille de blé)

La variation de la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol argileux en fonction de la chaux et du mélange (chaux – fibre) est illustrée à la figure 3.112.

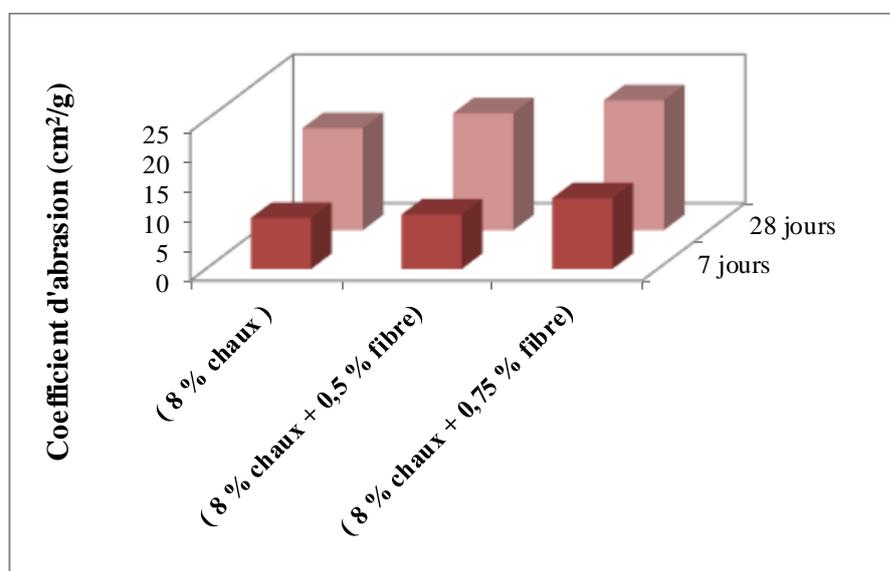


Figure 3.112 : Coefficient d'abrasion pour les blocs stabilisés au mélange (chaux – fibres)

L'inclusion de fibres a un effet positif sur la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol argileux. En effet, d'après les résultats donnés dans la figure 3.112, une

augmentation du coefficient d'abrasion avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille de blé dans le mélange (chaux - fibres de paille de blé) est enregistrée. Les valeurs du coefficient d'abrasion obtenues après une cure de 28 jours sont supérieures à celles obtenus à 7 jours pour l'ensemble des blocs de terre à base de sol argileux stabilisés.

3.11.3. Essai de gonflement

Afin d'évaluer le gonflement du bloc de terre à base de sol argileux destiné à être utilisé comme matériau de construction, le test a été effectué selon la norme française XP13-901. Après une cure de 7 et 28 jours, les blocs de terre testés ont été immergés dans l'eau pendant quatre jours. Après les quatre jours d'immersion, le gonflement total des blocs d'essai a été mesuré, ce qui a permis de déterminer le taux de gonflement du bloc de terre.

3.11.3.1. Mélange (terre- chaux – laitier)

Les résultats représentés sur la figure 3.113 illustrent la variation du gonflement, par immersion dans l'eau, des blocs à base de sol argileux en fonction de la teneur en chaux et du mélange (chaux –laitier).

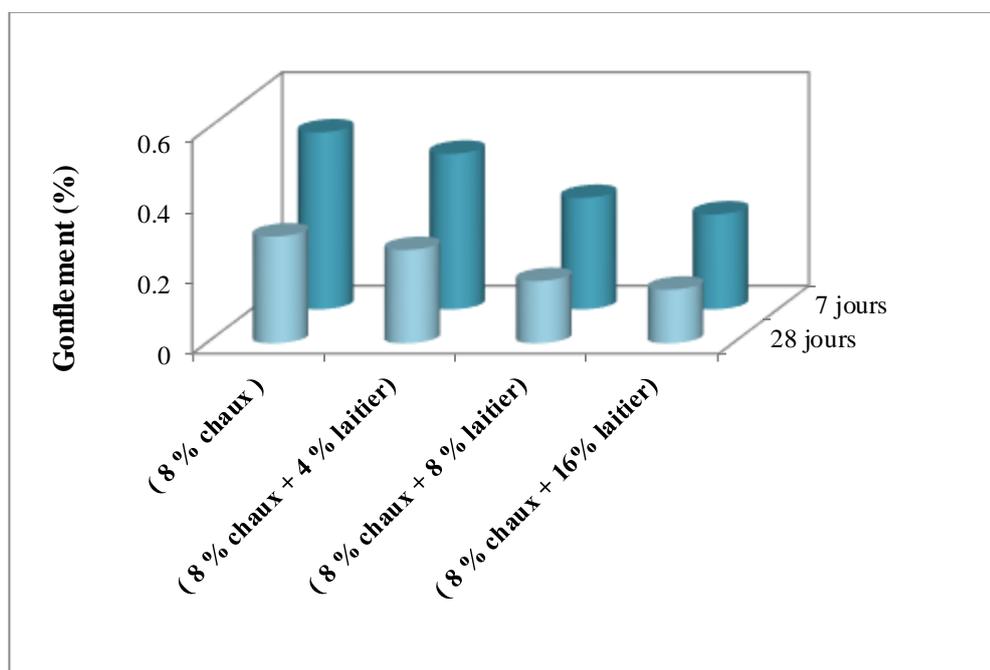


Figure 3.113 : Taux de gonflement des blocs stabilisée au mélange (chaux –laitier).

Après 96 heures d'immersion dans l'eau, une diminution du gonflement avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (chaux-laitier), est observée, après 7 et 28 jours de cure. Les taux de gonflement obtenus, après une cure de 28 jours, sont

inférieurs à ceux obtenus à 7 jours, pour l'ensemble des blocs de terre à base de sol argileux stabilisée.

3.11.3.2. Mélange (terre – chaux – fibres de paille de blé)

La variation du taux de gonflement des blocs de terre à base de sol argileux, en fonction de la teneur en chaux et de la chaux avec différentes teneurs en fibres en paille de blé, est illustrée à la figure 3.114.

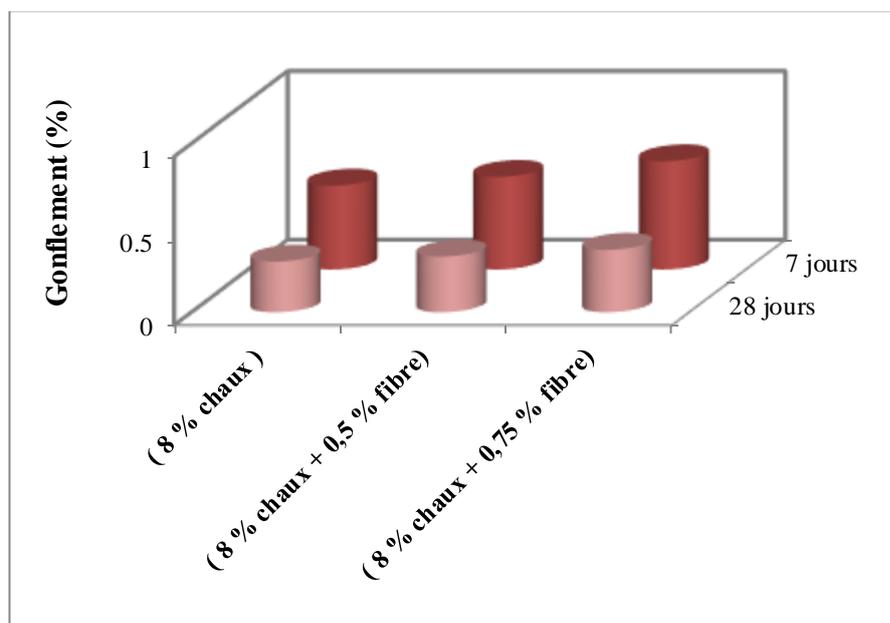


Figure 3.114 : Taux de gonflement des blocs stabilisés au mélange (chaux –fibres).

Les résultats présentés, dans la figure ci-dessus, montrent une augmentation du taux de gonflement des blocs de terre à base de sol argileux, avec l'ajout de fibres en paille de blé dans le mélange (chaux-fibres) après une cure de 7 et 28 jours. Les taux de gonflement obtenus après une cure de 28 jours, sont inférieurs à ceux obtenus à 7 jours, pour l'ensemble des blocs de terre à base de sol argileux stabilisée. La valeur de gonflement la plus faible est celle des blocs contenant 0,5% de fibres et 8% de chaux à 28 jours de cure, tandis que la valeur la plus élevée est celle des blocs de terre contenant 0,75% de fibres et 8% de chaux à 7 jours de cure.

3.11.4. Essai de retrait

3.11.4.1. Mélange (terre – chaux –laitier)

La figure 3.115 illustre la variation de retrait des blocs de terre à base de sol argileux, en fonction de la chaux mélangée avec différentes teneurs en laitier.

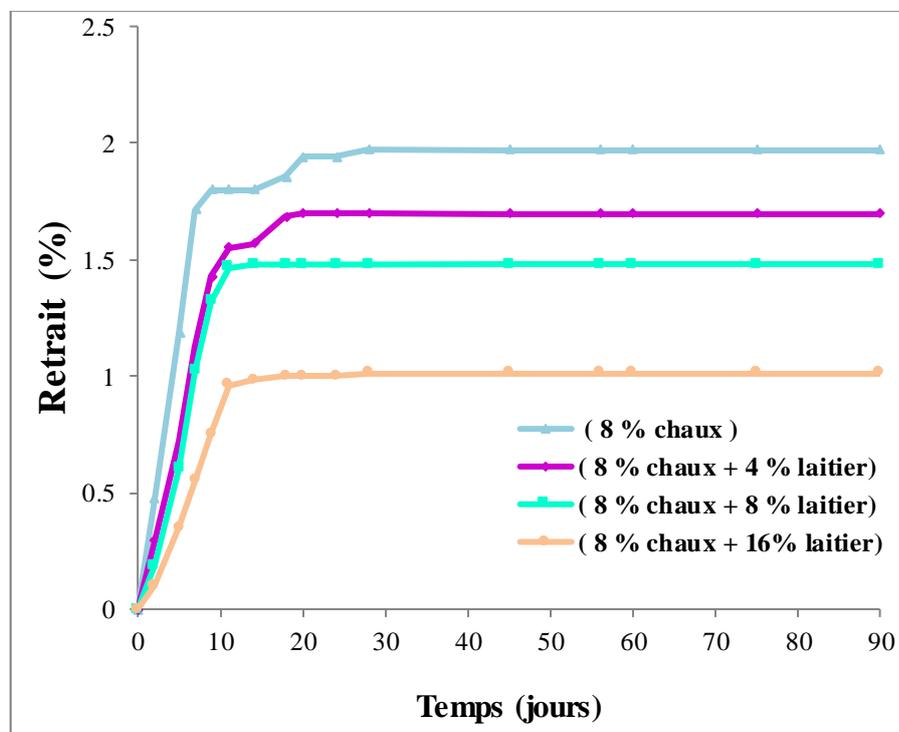


Figure 3.115 : Évolution de retrait en fonction du mélange (chaux -laitier) et du temps de cure.

Les résultats montrent que le retrait de la terre à base de sol argileux, traité à la chaux et au mélange (chaux-laitier), augmente avec l'augmentation du temps de séchage. Cette augmentation du retrait est plus prononcée pendant les dix premiers jours, puis tend à se stabiliser et à devenir constante après 15 jours. Il en ressort clairement d'après les résultats obtenus, que l'ajout d'une quantité de laitier au mélange (chaux-terre) entraîne une diminution du retrait. Ce dernier augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (terre-chaux). En effet, le plus faible taux de retrait est enregistré par le bloc de terre à base de sol argileux, traité au mélange (8 % chaux-16 % laitier).

3.11.4.2. Mélange (terre – chaux –fibres de paille de blé)

La figure 3.116 illustre la variation de retrait des blocs de terre à base de sol argileux, en fonction de la chaux et du mélange (chaux-fibres de paille de blé).

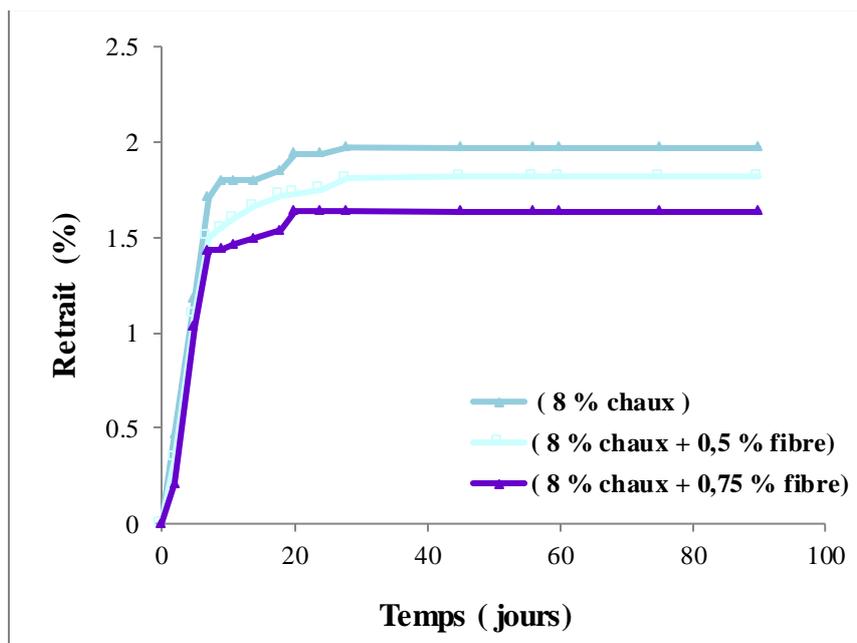


Figure 3.116 : Évolution de retrait en fonction du mélange (chaux - fibre) et du temps de cure.

Le retrait enregistré pour les blocs de terre à base de sol argileux, traités à la chaux seule, est plus élevé que celui des blocs de terre, traités avec un mélange (chaux-fibre de paille de blé). En effet, la valeur du retrait est réduite de manière significative par l'ajout d'un faible pourcentage de fibres en paille de blé. La valeur du retrait des blocs de terre à base de sol argileux diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille de blé dans le mélange (chaux-fibres de paille de blé).

3.11.5. Essai de conductivité thermique

La conductivité thermique est la propriété d'un matériau à conduire la chaleur. La conductivité thermique des matériaux de construction fait référence à l'efficacité énergétique, à l'environnement intérieur et au confort thermique des bâtiments.

3.11.5.1. Mélange (terre- chaux -laitier)

La variation de la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol argileux, traitée à 8 % de chaux et 8 % de chaux mélangée à différentes teneurs en laitier, est donnée dans la figure 3.117.

Les résultats montrent que la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol argileux, traitée au mélange (chaux -laitier), augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier pour les blocs traités à 8 % de chaux.

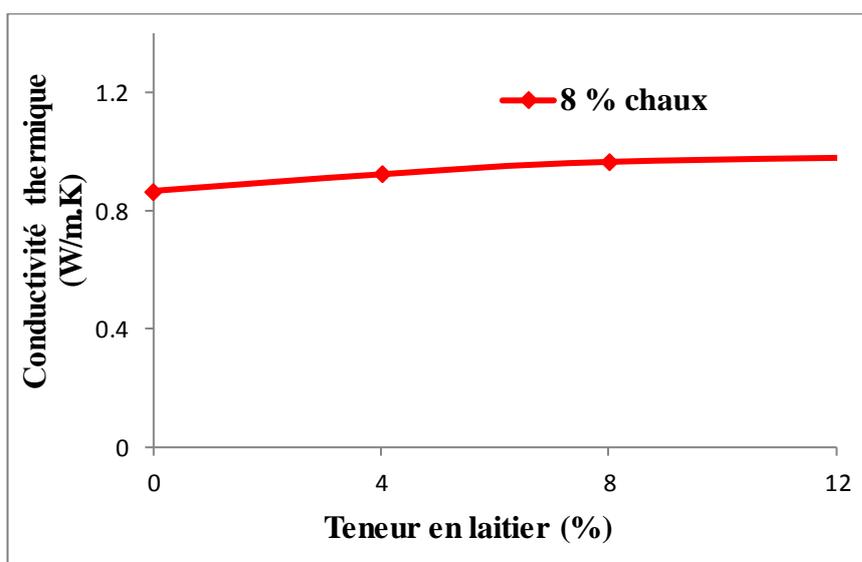


Figure 3.117 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (chaux – laitier)

3.11.5.2. Mélange (terre – chaux – fibres)

La variation de la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol argileux traitée à 8 % de chaux et 8 % de chaux mélangée à différentes teneurs de fibres de paille, est donnée dans la figure 3.118.

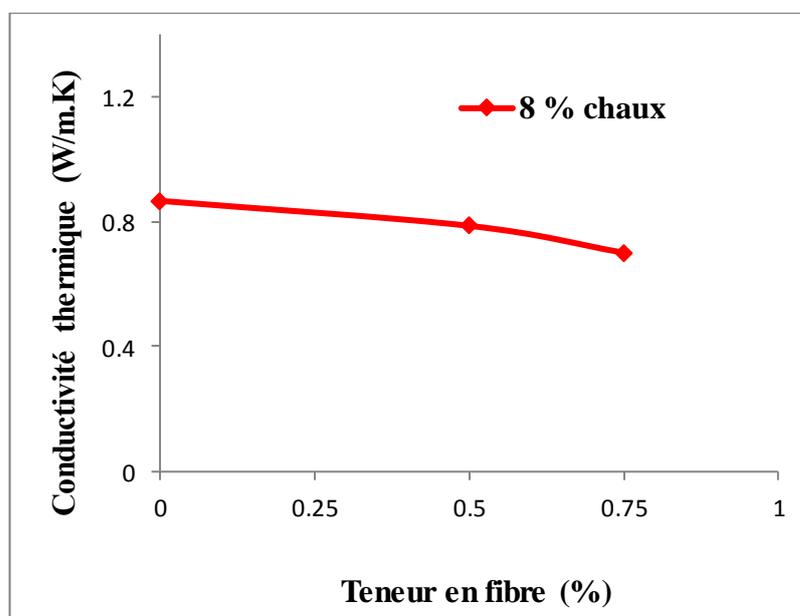


Figure 3.118 : Variation de la conductivité thermique en fonction du mélange (chaux – fibres)

Les résultats obtenus pour la conductivité thermique des blocs de terre à base de sol argileux traitée au mélange (chaux-fibres en paille de blé), montrent une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en fibres dans le mélange. À titre d'exemple, l'ajout de 0,5 % et 0,75 % de fibres à 8 % de chaux fait passer la conductivité thermique de 0,867 W/m.K à 0,787 W/m.K et 0,701 W/m.K.

3.12. Conclusion

Sur la base des résultats obtenus lors des différents tests physiques et mécaniques, effectués sur les échantillons de terre à base de sol limoneux et argileux traités avec différentes combinaisons d'additifs, les conclusions suivantes peuvent être déduites

- La plasticité de la terre à base de sol limoneux et de sol argileux, diminue par l'ajout de laitier, de ciment et de la chaux, seuls, ou une combinaison de (ciment/ou chaux-laitier).
- Le retrait de la terre à base de sol limoneux et de sol argileux, diminue par l'addition de laitier, de ciment et de chaux, seul, ou d'une combinaison de (ciment/ou chaux-laitier).
- La densité sèche maximale augmente et la teneur en eau optimale diminue après l'ajout du laitier seul ou combiné avec la chaux ou le ciment à la terre à base de sol limoneux et argileux. Au contraire, une diminution de la densité sèche maximale, avec l'augmentation de la teneur en eau optimale, sont obtenues, après addition de ciment, de chaux, de fibres en paille de blé, seuls, ou d'une combinaison (ciment/ou chaux-fibres en paille de blé), aussi bien à la terre à base de sol limoneux et argileux.
- La résistance à la compression à l'état sec et humide, de la terre à base de sol limoneux et argileux, augmente avec l'addition, de laitier, de ciment de chaux, d'une combinaison de (ciment/ou chaux -laitier) et de façon moins importante avec les fibres de paille de blé (seuls). Cette résistance, augmente avec l'augmentation de la cure de 7 à 28 jours.
- La perte de poids de la terre à base de sol limoneux et argileux diminue avec l'addition de ciment, de chaux, seuls ou d'une combinaison de (ciment/ou chaux-laitier) et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours. Au contraire, une augmentation de la perte du poids est obtenue l'addition de laitier, de fibres en paille de blé, seuls, ou de combinaison de (ciment/ou chaux-fibres en paille de blé), aussi bien à la terre à base de sol limoneux et argileux.

-L'absorption capillaire, de la terre à base de sol limoneux et argileux, diminue avec l'addition de ciment, de chaux, seuls ou de combinaison de (ciment/ou chaux- laitier) et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours. Au contraire, une augmentation de l'absorption capillaire est obtenue par l'addition de fibres de paille de blé, seuls, ou combinées avec du ciment et de la chaux, respectivement avec la terre à base de sol limoneux et la terre à base de sol argileux. L'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux et argileux diminue après l'addition du laitier seul, principalement avec l'augmentation de la cure.

-L'érosion de la terre à base de sol limoneux et argileux diminue avec l'addition d'une combinaison (ciment- laitier) à la terre à base de sol limoneux, (chaux- laitier) aussi bien à la terre à base de sol limoneux et argileux et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours. Au contraire, une augmentation de l'érosion est obtenue par l'addition de fibres de paille de blé, combinées au ciment ou à la chaux respectivement pour la terre à base de sol limoneux et pour la terre à base de sol argileux.

- L'abrasion de la terre à base de sol limoneux et argileux diminue avec l'addition d'une combinaison (ciment- laitier), (chaux-laitier), (ciment-fibres de paille de blé) à la terre à base de sol limoneux et (chaux- laitier), (chaux-fibres de paille de blé), à la terre à base de sol argileux et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours.

- Le taux de gonflement de la terre à base de sol limoneux et argileux diminue, avec l'addition d'une combinaison (ciment- laitier), (chaux-laitier) à la terre à base de sol limoneux et (chaux- laitier) à la terre à base de sol argileux et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours. Au contraire, une augmentation du taux de gonflement est obtenue par l'addition de fibres de paille de blé, combinées avec du ciment ou de la chaux respectivement pour la terre à base de sol limoneux et pour la terre à base de sol argileux.

-Le retrait de la terre à base de sol limoneux et argileux diminue avec l'addition d'une combinaison (ciment- laitier), (chaux-laitier), (ciment-fibres de paille de blé), à la terre à base de sol limoneux, (chaux- laitier), (chaux-fibres de paille de blé) à la terre à base de sol argileux et avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours.

-La conductivité thermique de la terre à base de sol limoneux et argileux augmente avec l'addition d'une combinaison (ciment- laitier), (chaux-laitier), à la terre à base de sol limoneux et (chaux- laitier) à la terre à base de sol argileux et avec l'augmentation de la

période de cure de 7 à 28 jours. Au contraire, une diminution de la conductivité thermique est obtenue par l'addition de fibres de paille de blé, combinées au ciment ou à la chaux respectivement pour la terre à base de sol limoneux et pour la terre à base de sol argileux.

CHAPITRE IV : DISCUSSIONS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, une discussion des résultats obtenus dans le chapitre précédent sera établie afin de rassortir les principaux résultats obtenus au cours de cette étude et pouvoir les discutés avec ceux obtenus dans la littérature.

4.2. Terre à base de sol limoneux

4.2.1. Effet des ajouts sur la résistance à la compression

-Effet du laitier, ciment et mélange (ciment-laitier) sur la résistance à la compression

La figure 4.1 montre l'effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment - laitier) sur la résistance à la compression sèche des échantillons de terre à base de sol limoneux après une cure de 7 et 28 jours.

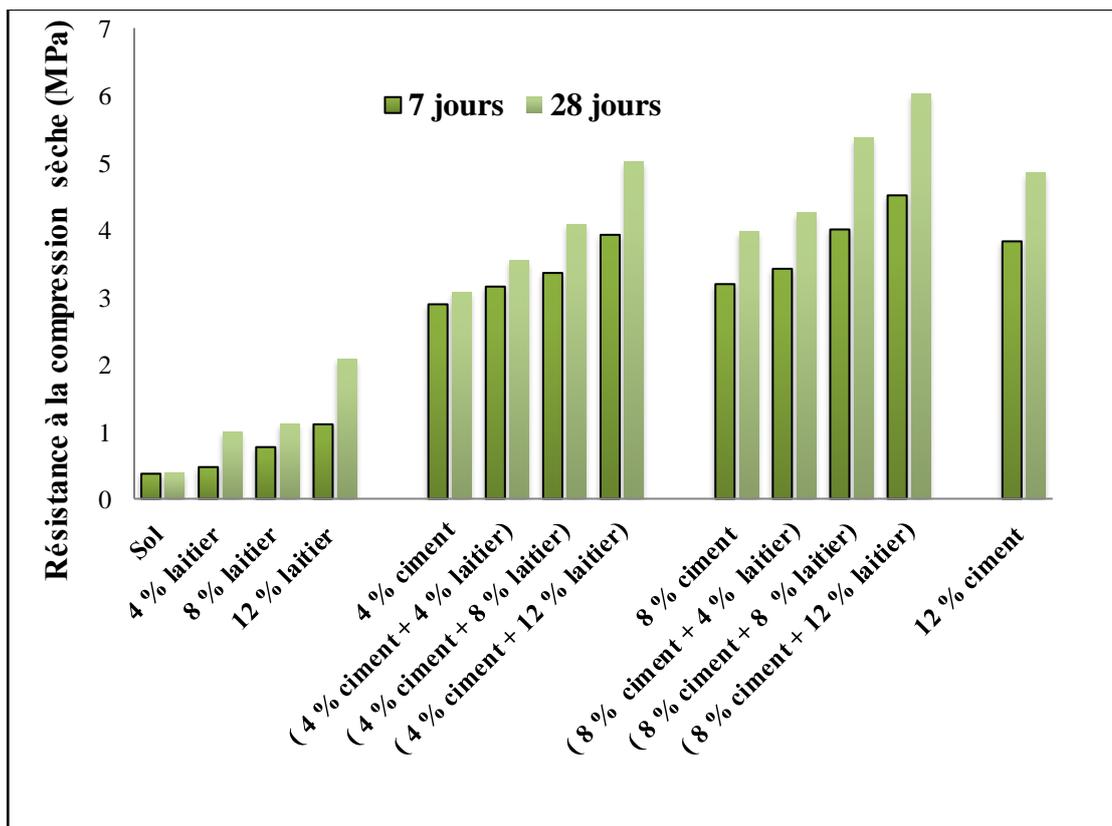


Figure 4.1 : Variation de la résistance à la compression de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) ajoutée et du temps de cure.

D'après les résultats présentés, il n'y a pas de changement significatif dans la résistance des échantillons de terre à base de sol limoneux traités avec du laitier seul à 7 jours. Toutefois, de 7 à 28 jours, la résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à une valeur de 8 % avec une valeur plus prononcée à 12 %. L'amélioration de la résistance peut s'expliquer par le développement des composés cimentaires entre le CAO_H présent dans la terre et la pouzzolane présente dans le laitier [137]. Des études antérieures rapportés dans la littérature, concernant le traitement des sols avec du laitier ont montré, que le laitier a un degré d'hydratation minimal en raison de son faible PH. Pour être efficace en termes de stabilisation des sols, il doit être activé avec un activateur approprié pour rompre sa phase vitreuse [127, 142].

Concernant l'effet du ciment, sur la résistance à la compression sèche à 7 jours et 28 jours, les changements qui se produisent après l'ajout du ciment à la terre à base de sol limoneux, et qui sont issus des réactions d'hydratation et des réactions pouzzolaniques du ciment à long terme, donnent des agents cimentaires, qui, en durcissant avec la cure, rendent le sol plus rigide et plus résistant. La résistance à la compression à l'état sec augmente avec la quantité de ciment ajoutée. Les grandes performances mécaniques enregistrées pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités avec une teneur élevée en ciment et avec une plus grande période de cure, pourraient être associées à la plus grande quantité de composés cimentaires formés. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés dans d'autres études pour l'objet d'étudier l'effet du ciment sur la résistance des sols limoneux traités au ciment [9].

Par ailleurs, comme il peut se voir d'après cette figure, la résistance à la compression augmente avec la teneur en laitier, pour différents dosages de ciment et le temps de cure. Le gain de résistance du mélange ternaire (terre - ciment - laitier) est principalement dû à la formation de composés cimentaires, (silicate de calcium hydraté (C-S-H) et aluminat de calcium hydraté (C-A-H)) et à un excès d'hydroxyde de calcium, dû à l'hydratation du ciment. Le laitier contient des matières siliceuses et alumineuses très réactives, sous une forme finement divisée, appelée pouzzolane. Ces matériaux pouzzolaniques, en présence d'eau, réagissent avec l'hydroxyde de calcium, libéré lors de l'hydratation du ciment, pour former des composés (gel C-S-H) aux propriétés cimentaires [149]. D'après les résultats obtenus, un meilleur rendement est donné lorsque le laitier est mélangé à 8 % de ciment pendant les deux périodes de cure. Cependant, les échantillons stabilisés avec 4 % de ciment

plus 12 % de laitier montrent une résistance plus élevée que les échantillons de terre à base du sol limoneux stabilisés avec 8 % de ciment et 8 % de ciment plus 4 % de laitier. D'autre part, les valeurs de résistance à la compression de tous les échantillons de terre cimentés (4 % et 8 %) et de ceux cimentés et mélangés avec différentes teneurs en laitier sont supérieures à 2 MPa. Des résultats similaires ont été rapportés dans une étude antérieure, quant à l'effet du laitier sur la résistance d'un sol argileux traité au mélange (ciment - laitier). Il a été noté que la résistance à la compression du sol augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange [148].

-Effet du laitier, ciment et mélange (ciment – laitier) sur la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux

La figure 4.2 montre l'effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment au laitier) sur la résistance à la compression après une cure de 7 et 28 jours et une imbibition de 24 heures.

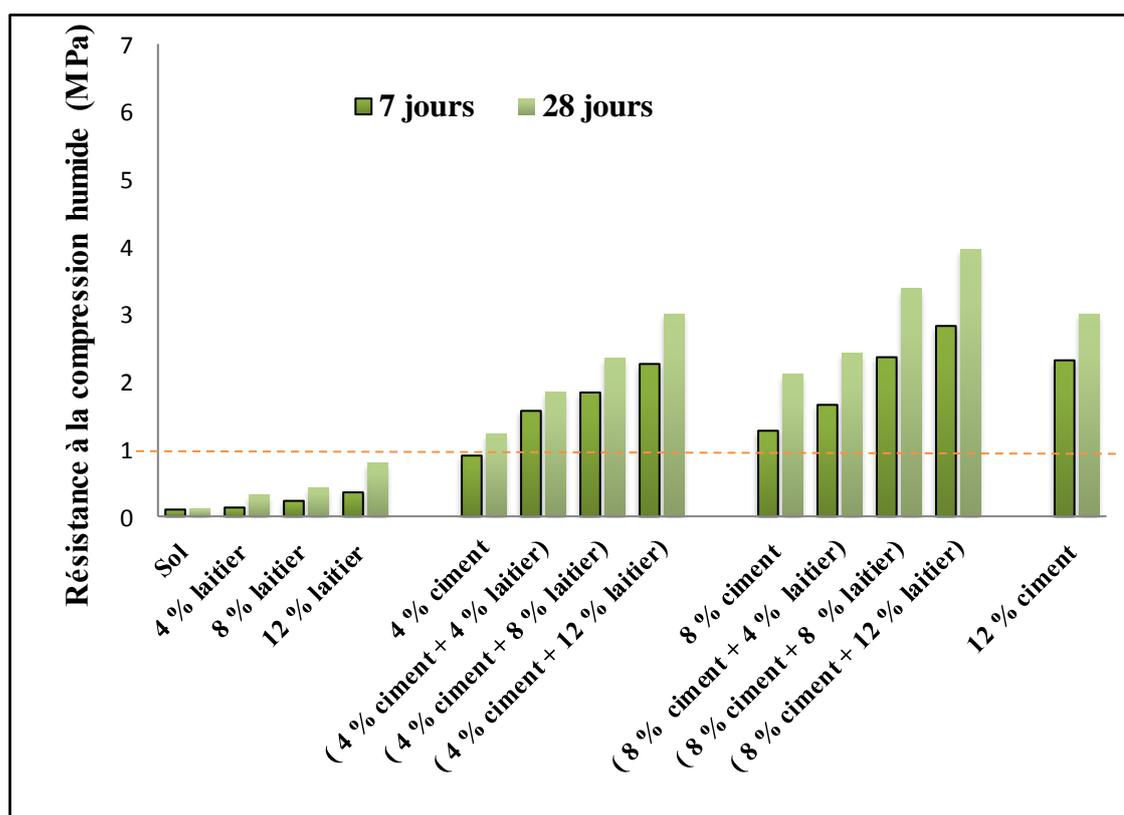


Figure 4.2 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de laitier, de ciment et de mélange (ciment-laitier) ajoutée et du temps de cure.

L'évolution de la résistance uniaxiale à l'état humide présente la même allure dans la variation des valeurs de la résistance que celle de la résistance à l'état sec, mais avec des

valeurs de résistances inférieures. La résistance est réduite après 24 heures d'imbibition, toutefois, les valeurs de la résistance humide de la terre traitée sont plus élevées que celles de la terre non traitée. L'ajout du ciment et du mélange (ciment – laitier) augmente la résistance à l'eau des échantillons de terre à base de sol limoneux par rapport aux échantillons de terre non traités.

-Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier)

La figure 4.3 montre l'effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la résistance à la compression sèche après 7 et 28 jours de cure.

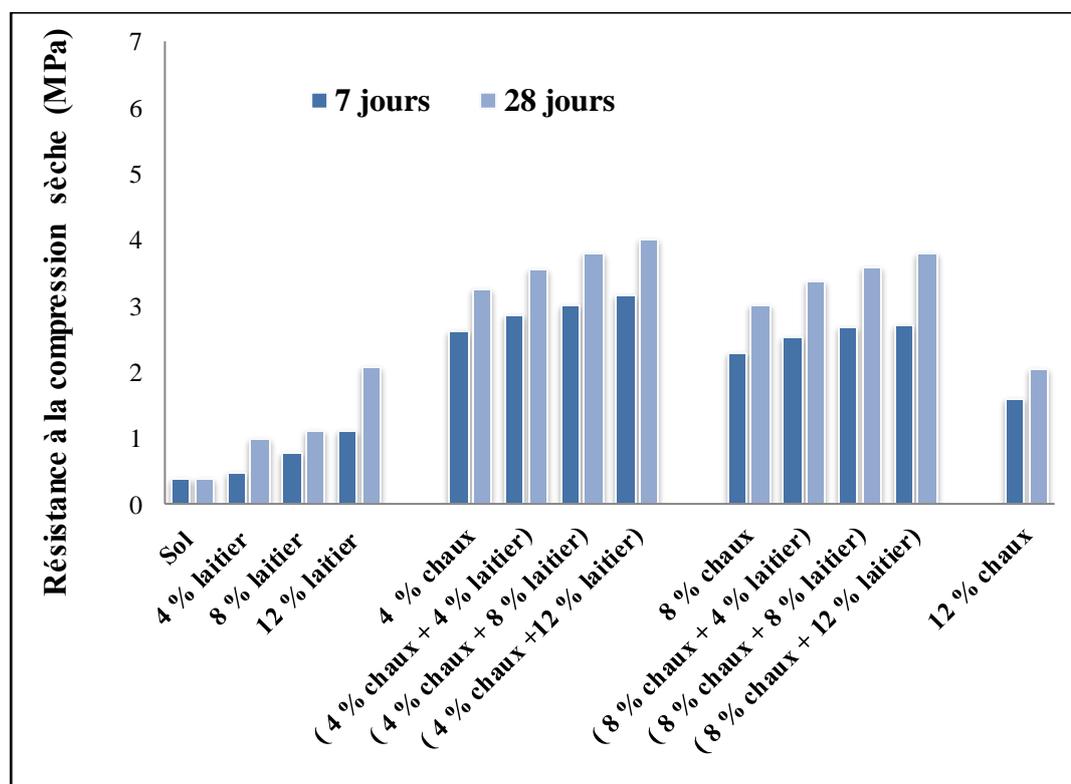


Figure 4.3 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et du temps de cure.

Concernant la variation de la résistance à la compression de la terre à base de sol limoneux, en fonction de l'addition d'une quantité croissante de chaux, les résultats obtenus montrent une augmentation de la résistance avec l'addition de 4 % et 8 % de chaux respectivement à 7 et 28 jours de cure. Néanmoins, cette augmentation n'est pas proportionnelle à l'augmentation de la teneur en chaux ajouté. En effet, au-delà de 4% de chaux, les échantillons de terre montrent une diminution dans leurs résistances. Cette teneur

en chaux est dite optimale. En effet, plusieurs études faites sur des sols traités à la chaux, ont démontré que l'augmentation de la résistance à la compression du sol, n'est pas proportionnel à l'augmentation de la teneur en chaux dans le sol [191, 63]. Il a été noté que cette augmentation de la résistance du sol est due à différentes réactions chimiques entre les minéraux argileux présents dans le sol et la chaux ajoutée qui vont lier les particules argileuses entre elles. Au-delà de la quantité optimale, aucun effet sur l'augmentation de la résistance du sol n'est observé. Cela s'explique par les caractéristiques de la chaux elle-même qui ne possède ni cohésion, ni angle de frottement appréciable [63]. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres travaux ayant fait l'objet d'étudier l'effet de la chaux sur la résistance à la compression des sols limoneux [192-193]

En ce qui concerne le mélange (chaux- laitier), les résultats obtenus montrent une augmentation de la résistance à la compression sèche avec l'augmentation de la teneur en laitier et de la période de cure, pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de chaux. Les échantillons traités avec 4 % de chaux et différentes teneurs en laitier présentent la résistance à la compression la plus élevée. Cette augmentation dans la résistance peut s'expliquer par la formation des aluminates de calcium et des aluminosilicates de calcium issus de la réaction pouzzolanique entre la chaux, le laitier et les minéraux argileux de la terre. En effet, l'ajout de la chaux produit plus d'hydroxyde de calcium pour réagir avec le laitier et augmente donc la résistance des mélanges. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres études sur l'effet du mélange (chaux - laitier) sur la résistance à la compression à l'état sec [143, 145, 194].

-Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux- laitier) sur la résistance à la compression humide des échantillons de terre à base de sol limoneux

La figure 4.4 montre la variation de la résistance à la compression humide en fonction du dosage de laitier pour différentes teneurs en chaux après une cure de 7 et 28 jours et une imbibition pendant 24 heures.

Il en est de même pour ce qui est de l'évolution de la résistance à la compression humide à 7 jours et 28 jours, pour les échantillons traités à 4 % et 8 % de chaux, comme pour le cas à l'état sec, mais avec des résistances plus faibles. Cela est dû au fait que les blocs de terre à base de sol limoneux comprimée perdent leur cohésion lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, entraînant la diminution de leur résistance, après immersion dans l'eau [195]. Toutefois, le traitement des échantillons de terre, à base de sol limoneux à la chaux et au mélange (chaux-

laitier) augmente leur résistance à l'eau. La plupart des échantillons traités montrent une résistance à l'état humide supérieure à 1 MPa.

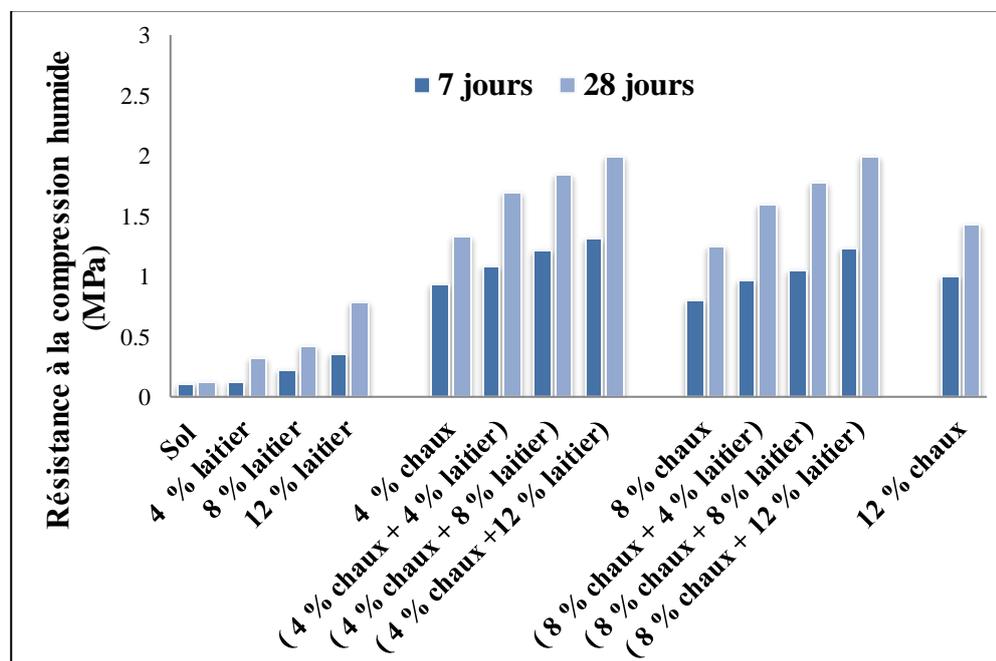


Figure 4.4 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et du temps de cure.

-Effet des fibres en paille de blé et mélange (ciment – fibres en paille de blé) sur la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression sèche des échantillons de terre à base de sol limoneux, en fonction du dosage de fibres de paille de blé et du mélange (ciment – fibres de paille de blé) et des différentes périodes de cure, sont présentés dans la figure 4.5.

Les résultats illustrés dans la figure 4.5 montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres en paille de blé, jusqu'à un optimum (0,5 %), pour la terre à base de sol limoneux, à 7 jours et 28 jours de cure. Au-delà de cette valeur, la résistance diminue. L'augmentation de la résistance à la compression des échantillons de terre renforcés avec l'addition d'une proportion de fibres en paille de blé, par rapport aux échantillons de terre non renforcés, est attribuée d'une part, à une meilleure adhérence de la matrice de la terre aux fibres et, d'autre part, au fait que la combinaison des fibres en paille de blé et de la matrice de la terre empêche la propagation des fissures dans les blocs, car les fibres en paille de blé forment des ponts entre les fissures et contribuent

ainsi à l'amélioration de la résistance. Par contre, la diminution de la résistance au-delà d'une certaine teneur en fibres de paille de blé (0.5%) est due au fait que les fibres commencent à se nouer et à se chevaucher, ce qui entraîne une réduction de la cohésion avec la terre et une rupture de sa matrice. Il est également probable que la présence d'un plus grand nombre de pores, due à l'augmentation de la teneur en fibres, puisse entraîner une réduction de la résistance [196].

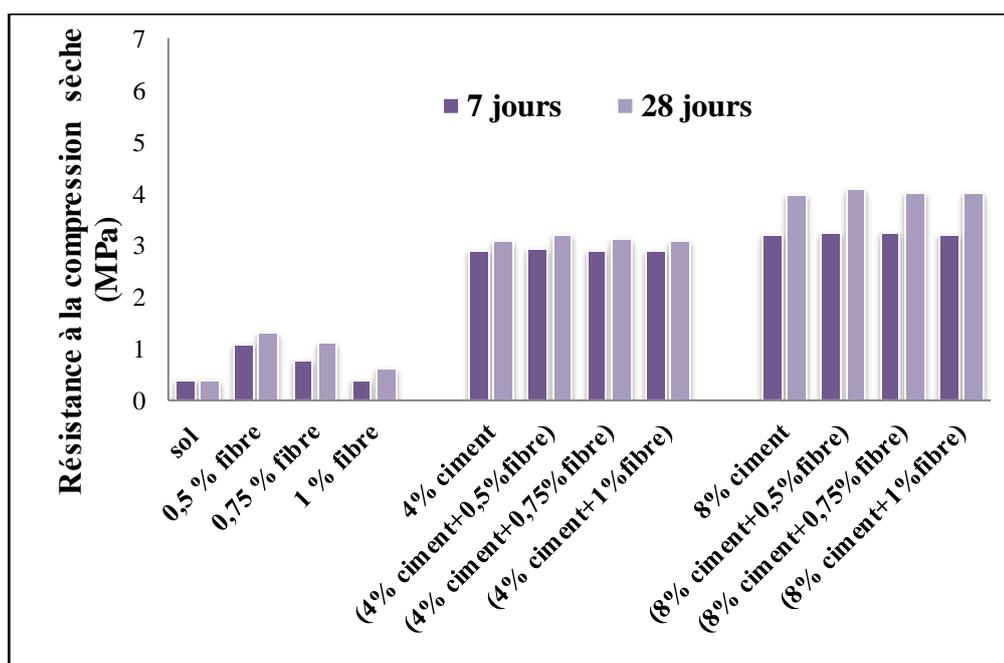


Figure 4. 5 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de fibres en paille de blé et de mélange (ciment -fibre de paille de blé) ajoutée et du temps de cure.

Pour ce qui est du mélange (ciment – fibres de paille de blé), les résultats ne montrent aucun gain de résistance à la suite de l'ajout de fibre au mélange (ciment- terre), pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités à 4 % et 8 % de ciment. Le gain de la résistance par rapport aux échantillons de terre non traités, est dû principalement à l'action du ciment (la formation de silicate de calcium hydraté et aluminat hydraté). Il est clair que la teneur en paille de blé, en présence du ciment, ne semble pas avoir d'effet sur les caractéristiques de résistance des blocs de terre comprimée. Les échantillons cimentés à (4 % et 8 %) et ceux cimentés et renforcés par (0.5 %, 0.75 % et 1 %) présentent des valeurs de la résistance à la compression supérieures à 2 MPa (valeur minimale de la résistance à la compression sèche recommandée pour les blocs de terre comprimée). Ces résultats sont conformes à ceux observés dans une étude ayant fait l'objet d'étude de l'effet de fibres

(fibres de sisal) sur la résistance des blocs de terre comprimée (BTC), à base de sol argileux [169].

-Effet de fibre et mélange (ciment – fibre) sur la résistance à la compression humide

La figure 4.6 présente l'effet du mélange (ciment-fibre) sur la résistance à la compression humide des échantillons de terre à base de sol limoneux pour les deux périodes de cure.

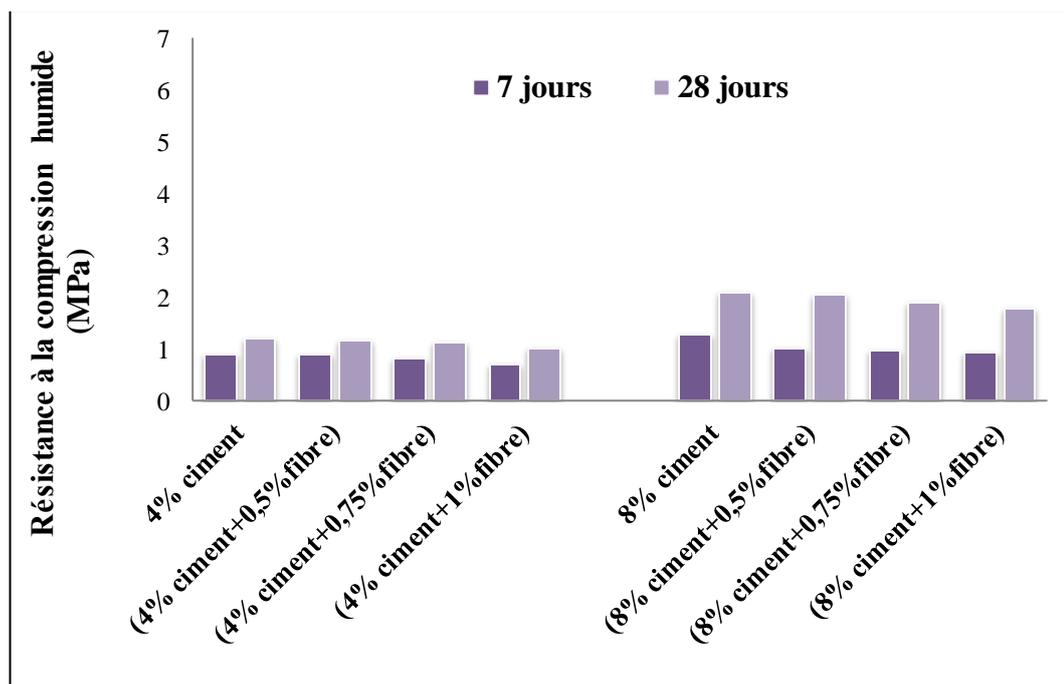


Figure 4. 6 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol limoneux en fonction de la quantité de fibres en paille de blé et de mélange (ciment –fibre de paille de blé) ajoutée et du temps de cure.

Il faut noter que la résistance à la compression humide des échantillons de terre traités aux fibres n'a pas pu être mesurée, en raison de la forte perte de masse. Les résultats montrent une tendance vers une diminution de la résistance à la compression humide, avec l'augmentation de la teneur en fibres dans le mélange (terre à base de sol limoneux – ciment), à 7 et 28 jours de cure. La présence de fibres dans les échantillons a un effet négatif sur la résistance à la compression humide. La valeur maximale de la résistance à la compression humide pour la terre à base de sol limoneux traitée au mélange (ciment -fibres de paille de blé) est enregistrée pour l'échantillon de terre traité avec 8% de ciment et 0,5 % de fibres, tandis que la valeur la plus faible est donnée par l'échantillon de terre traité avec 4% de ciment et 0,5% de fibres. Les échantillons cimentés avec (4% et 8%) et ceux cimentés et

renforcés avec (0,5, 0,75 et 1%) présentent des valeurs de résistance à la compression supérieures à 1 MPa (la valeur minimale de la résistance à la compression humide recommandée pour les blocs de terre). Ces résultats sont en concordance avec ceux de [171], où dans son étude sur les (BTC) à base de ciment ou de chaux et avec l'ajout de fibres de palmier dattier, l'auteur a conclu que la présence de la teneur en fibres de palmier dattier a un effet négatif en présence du ciment ou de la chaux sur la résistance humide.

- Comparaison entre l'effet du ciment, du mélange (ciment-laitier), de la chaux et du mélange (chaux –laitier)-

La résistance à la compression de la terre à base de sol limoneux traitée au ciment, au mélange (ciment-laitier), à la chaux et au mélange (chaux-laitier) est donnée dans la figure 4.7.

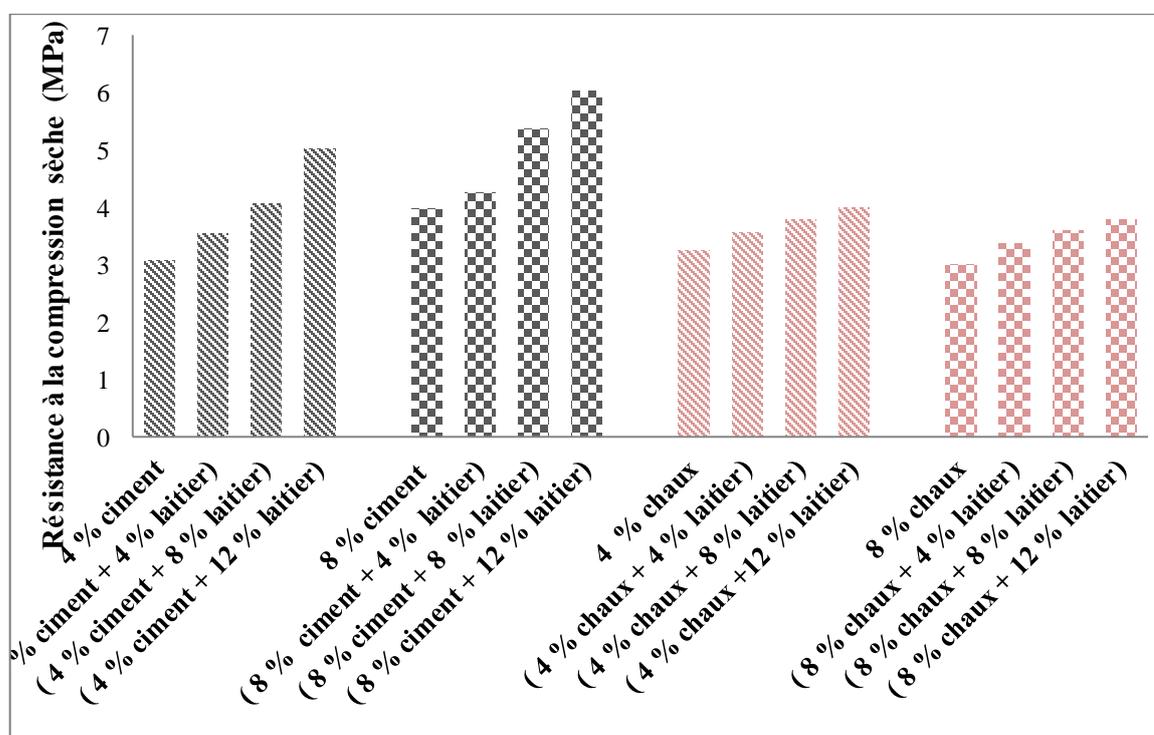


Figure 4.7 : Comparaison entre l'effet du ciment, de la chaux, du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur la résistance à la compression à l'état sec.

Les résultats montrent que la résistance à la compression des obtenue par les échantillons de terre à base de sol limoneux stabilisés au ciment et au mélange (ciment - laitier) est plus grande que celle obtenu par ceux traités à la chaux et au mélange (chaux – laitier).

4.2.2. Effet des ajouts sur la durabilité

La durabilité des structures en terre caractérise leur capacité à se maintenir en cours d'utilisation, fonction pour laquelle elles ont été conçues. Les structures en terre doivent être capables de résister non seulement aux charges auxquelles elles sont soumises, mais aussi aux facteurs environnementaux tels que, la circulation de l'eau, les cycles d'humidification et de séchage, l'absorption capillaire, l'érosion, l'abrasion, le retrait, le gonflement) auxquels elles peuvent être soumises.

4.2.2.1. Cycle humidification-séchage

-Effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur la perte de poids

La figure 4.8 montre l'effet du dosage en laitier, ciment et mélange (ciment - laitier) sur les pertes de poids pour les échantillons de terre à base de sol limoneux après douze cycles de mouillage/séchage des blocs de terre, pour différentes durées de cure (7, 28 jours).

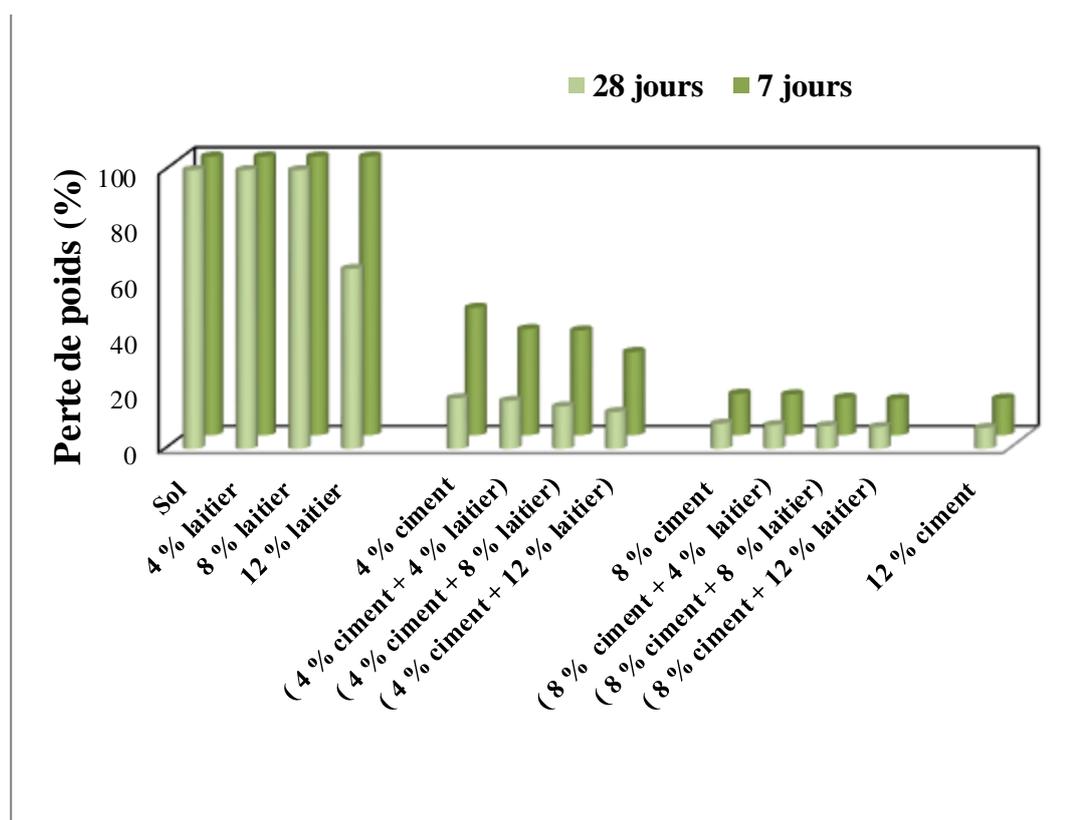


Figure 4.8 : Effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.

Premièrement, pour ce qui est du laitier, les échantillons de terre se sont effondrés avant l'achèvement du 12^{ème} cycle à 7 jours. Le prolongement de la durée de cure, de 7 à 28

jours, a permis de diminuer la perte de poids pour les échantillons de terre traités à 12 % de laitier. Cela confirme que l'introduction du laitier seul dans la terre à base de sol limoneux ne permet pas le développement de liaisons cimentaires assez fortes entre les éléments constituant la matrice de la terre. En outre, l'augmentation de la perte de poids, avec l'augmentation du nombre de cycles, est due, d'une part, à la dissolution des phases hydratées et à l'endommagement des liaisons cimentaires, ce qui entraîne un mélange de structure poreuse et de matrice fragile, et d'autre part, au remplissage des vides par l'eau, ce qui provoque une contre-pression et un ramollissement de l'échantillon lors du mouillage et un retrait lors du séchage. Ces phénomènes entraînent la désintégration des matériaux présents, ce qui se traduit par une perte de poids accrue [197].

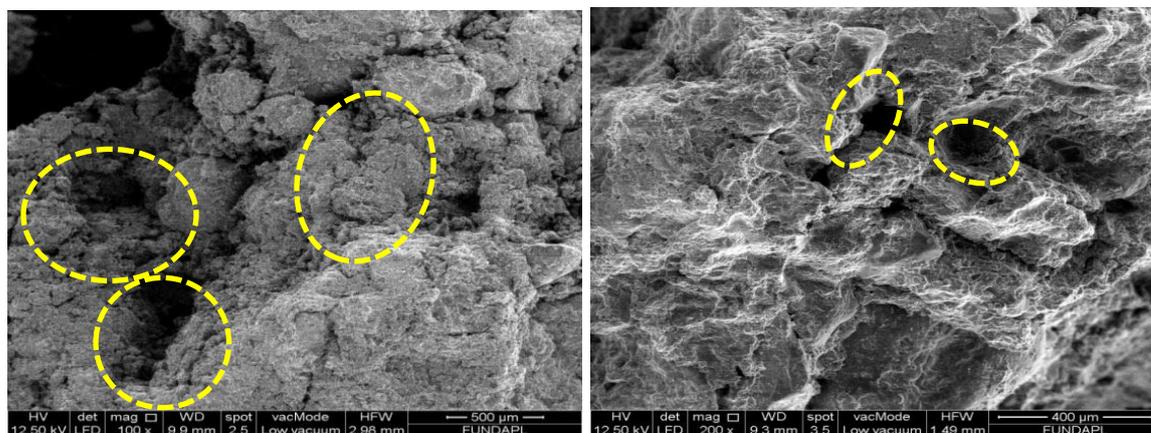
Par contre, l'addition du ciment aux échantillons de terre entraîne une diminution de la perte de poids qui devient plus appréciable avec l'augmentation de la quantité de ciment et de la période de cure. Cette diminution est attribuée à la formation des produits de cimentation engendrée par la réaction pouzzolanique entre la terre à base de sol limoneux et le ciment qui remplit les vides et empêche l'eau de s'infiltrer dans l'échantillon de terre.

Pour le mélange du ciment et du laitier, et grâce aux résultats présentés dans la figure 4.8, on peut voir que l'ajout de laitier aux échantillons de terre cimentés à (4%, 8%) a un effet favorable sur la réduction de la perte de poids. La réduction de la perte de poids est proportionnelle à la teneur des additifs ajoutés et de la période de cure pour les échantillons de terre à base de sol limoneux traités. Cette réduction dans la perte de poids est principalement due au fait, comme déjà mentionné, que le laitier est un matériau pouzzolanique, qui en présence d'eau, réagit avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment pour former des composés (gel C-S-H) aux propriétés cimentaires pour remplir les vides et les pores.

Ces faits, mentionnés ci-dessus sont bien visible sur les photos obtenues lors de l'observation au microscope électronique à balayage (MEB), de lames minces effectuées sur des échantillons de terre à base de sol limoneux, non traités et traités au ciment et au mélange (ciment laitier), donnés respectivement dans la figure 4. 9 (a, b et c).

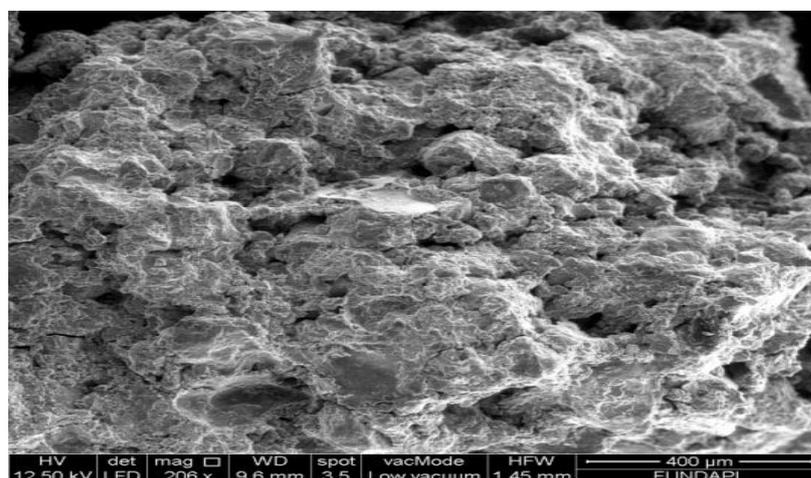
En effet, l'observation de lames minces, confectionnées à partir d'échantillons de terre à base de sol limoneux non traités au (MEB), montre que la terre présente une structure hétérogène, avec quelques fissures et de larges pores (figure 4. 9 - a). Cette structure est

responsable de la détérioration des échantillons de terre non traités avant l'achèvement du 12^{ème} cycle.



(a)

(b)



(c)

Figure 4. 9 : Photos de terre à base de sol limoneux, prises à partir du Microscopie Électronique à Balayage (MEB).

a- terre non traité. b- (terre +8 % ciment). c-(terre +8 % ciment+12 % laitier).

En ce qui concerne les échantillons de terre à base de sol limoneux traités au ciment, par rapport aux échantillons de terre non traités, une structure interne plus dense et plus homogène est observée, elle comprend des agglomérations d'agrégats de sol formées à la suite du phénomène de floculation (figure 4.9 - b). Les agglomérations d'agrégats remplissent les macropores inter-agrégats et diminuent la proportion de pores.

Par contre, en ajoutant du laitier au mélange (terre - ciment), la structure devient plus homogène, avec une diminution de la taille des pores, due à la production de silicate de calcium hydraté, créé par des réactions pouzzolaniques. Ces produits remplissent les pores

(les pores inter-agrégats) et créent une texture de surface en nid d'abeille qui conduit à l'apparition de très petits pores, (figure 4.9-c).

En outre, les valeurs de la perte de poids à 28 jours, pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, cimentés à 8 % et ceux cimentés à 8 % et mélangés avec différentes teneurs en laitier, sont inférieures à 10 %, valeur de la limite maximale recommandée pour la perte de poids.

-Effet de la chaux et de mélange (chaux-laitier) sur la perte de poids

La variation de la perte de poids, après le test d'humidification-séchage, des échantillons de terre à base de sol limoneux traités à la chaux ou au mélange (chaux - laitier), après une période de cure de 7, 28 jours, est présentée dans la figure 4.10.

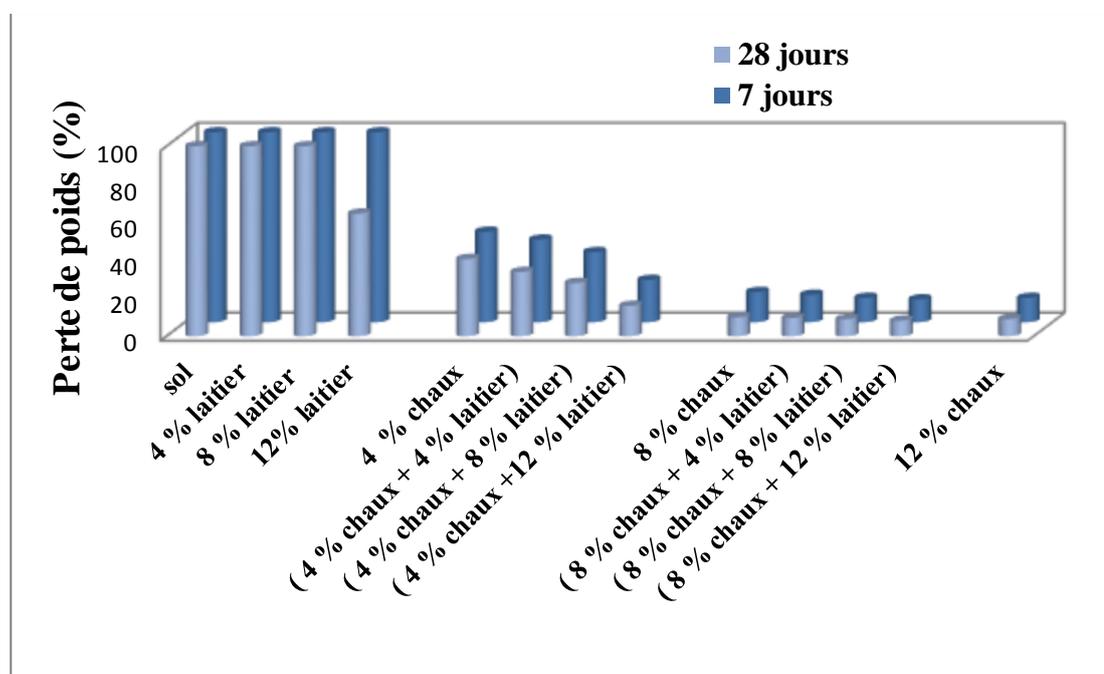


Figure 4.10 : Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.

Comme pour le cas du mélange (ciment – laitier), une diminution de la perte de poids est observée avec l'augmentation de la teneur en chaux et la quantité en laitier dans le mélange (terre – chaux), à 7 et 28 jours de cure. Cette diminution est d'autant plus prononcée avec l'augmentation de la période de séchage, comme déjà mentionné dans la section bibliographique, après chaque cycle de saturation-séchage, des fissures se produisent entraînant une perte de masse puis une accélération de la dégradation du sol. L'ajout de chaux

à une terre à base de sol limoneux réduit la propagation des fissures en formant des hydrates à la suite de la réaction pouzzolanique entre la chaux et les minéraux présents dans la terre. Cette réduction de perte de poids est moins prononcée avec une différence dans les valeurs de taux de perte de poids, obtenues pour les échantillons de terre traités à la chaux seule, par rapport à ceux traités par un mélange (chaux-laitier).

En effet, les résultats obtenus pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, traités avec un mélange (chaux- laitier), montrent leur effet favorable sur la perte de poids, après douze cycles de mouillage et de séchage. La tendance à la diminution de la perte de poids est fonction du dosage des ajouts et de la période de cure. Cette diminution devient plus importante avec l'augmentation du taux d'incorporation des ajouts, ce qui est clairement évident dans le cas du mélange (8 % de chaux et 12 % de laitier). La diminution significative de la perte de poids, avec l'augmentation du temps de cure, est principalement due au fait que les réactions pouzzolaniques dans le mélange (terre- chaux) / ou le mélange (terre-chaux-laitier) demandent plus de temps.

La figure 4.11 présente l'image (MEB) d'un échantillon de terre à base de sol limoneux non traité et un traité avec 8% de chaux plus 12% de laitier, ayant subi une cure de 28 jours.

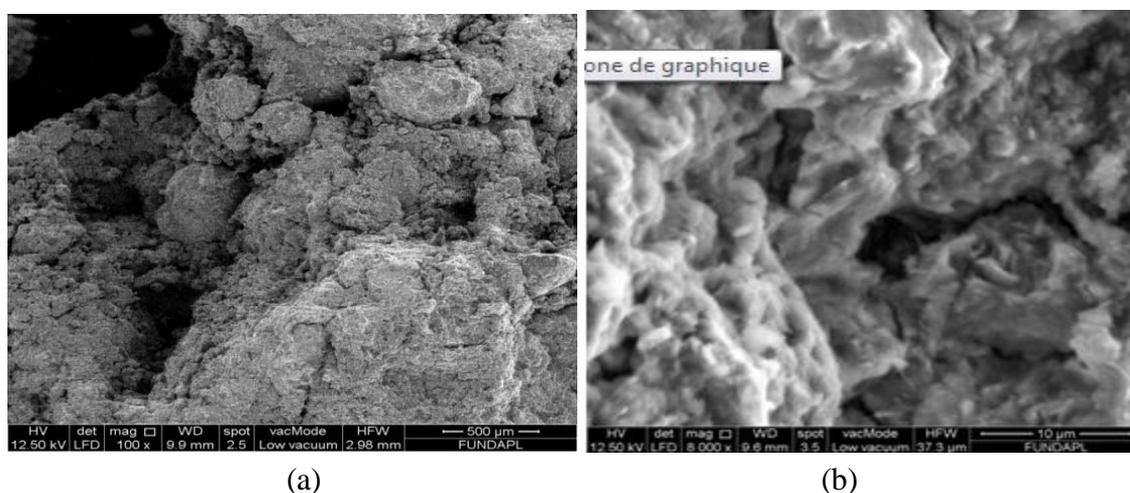


Figure 4.11 : Photos de terre à base de sol limoneux, prises à partir du Microscopie Électronique à Balayage (MEB). (a)- Terre non traitée. (b)- (Terre +8 % chaux+12 % laitier).

La figure, montre que le sol limoneux devient plus dense après l'ajout du mélange (chaux –laitier). Cette matrice dense est due à l'enrobage des produits de la réaction d'hydratation. L'agglomération des particules ayant une liaison importante est due à

l'apparition de l'hydratation de la chaux libre dans le sol, qui justifie l'augmentation de la cohésion du mélange.

-Comparaison entre le traitement au ciment et du mélange (ciment-laitier) et à la chaux et au mélange (chaux-laitier) de la terre à base de sol limoneux

Les résultats de la perte de poids, pour la terre à base de sol limoneux, traité au après une cure de 7 et 28 jours, sont donnés dans la figure 4.12.

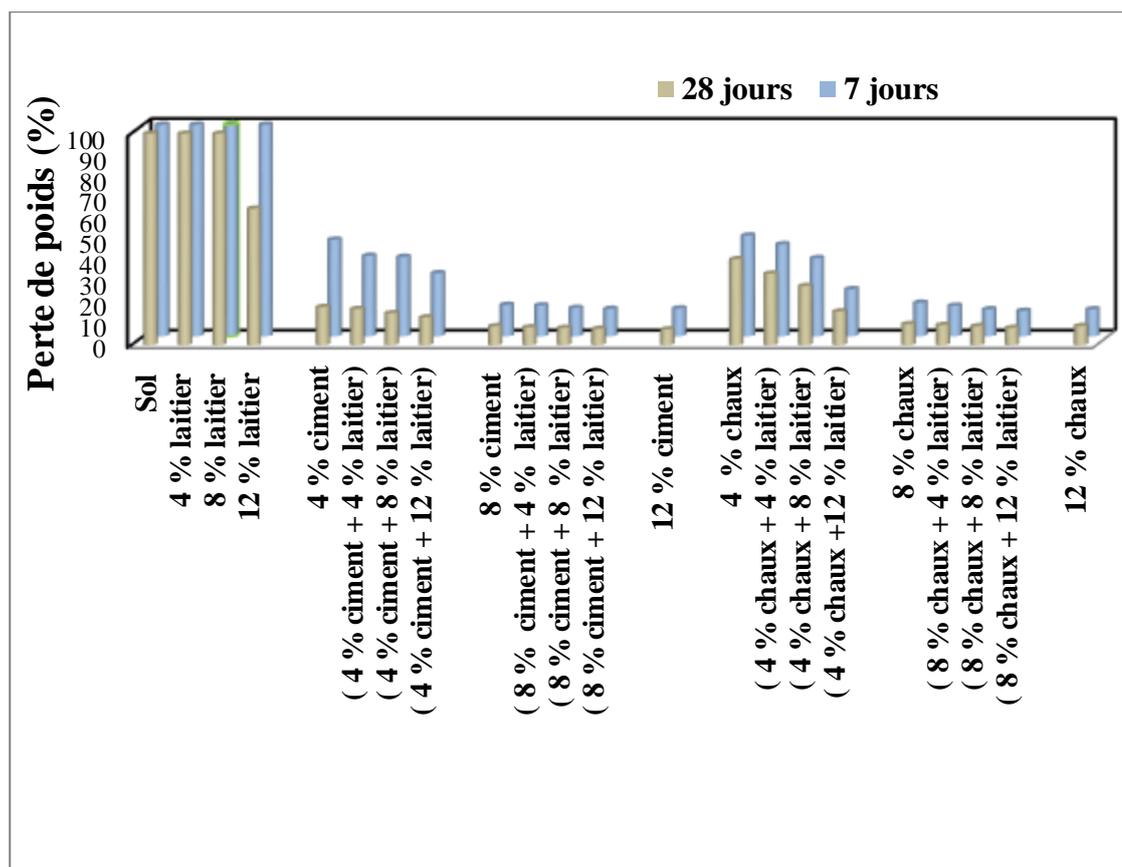


Figure 4.12 : Comparaison entre l'effet du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.

Comme il peut se voir sur la figure donnée ci-dessus, le traitement de la terre à base de sol limoneux au ciment et au mélange (ciment-laitier) a plus d'effet sur la réduction de sa perte de poids, durant le cycle humidification-séchage, que le traitement à la chaux et au mélange (chaux laitier) à 7 et 28 jours de cure. Seuls les échantillons traités à 12% de ciment, 12% de chaux, 8 % du ciment, 8% de chaux et 8% de ciment/ou chaux plus 4 %, 8 %, et 12 % de laitier présentent une perte de poids inférieure à 10 % (valeur minimale recommandée).

-Effet de fibres en paille de blé et du mélange (ciment - fibres) sur la perte de poids

La figure 4.13 montre l'effet des fibres de paille de blé et du mélange (fibres -ciment) sur la perte de poids pour les échantillons de terre à base de sol limoneux, après une période de cure de 7 et 28 jours.

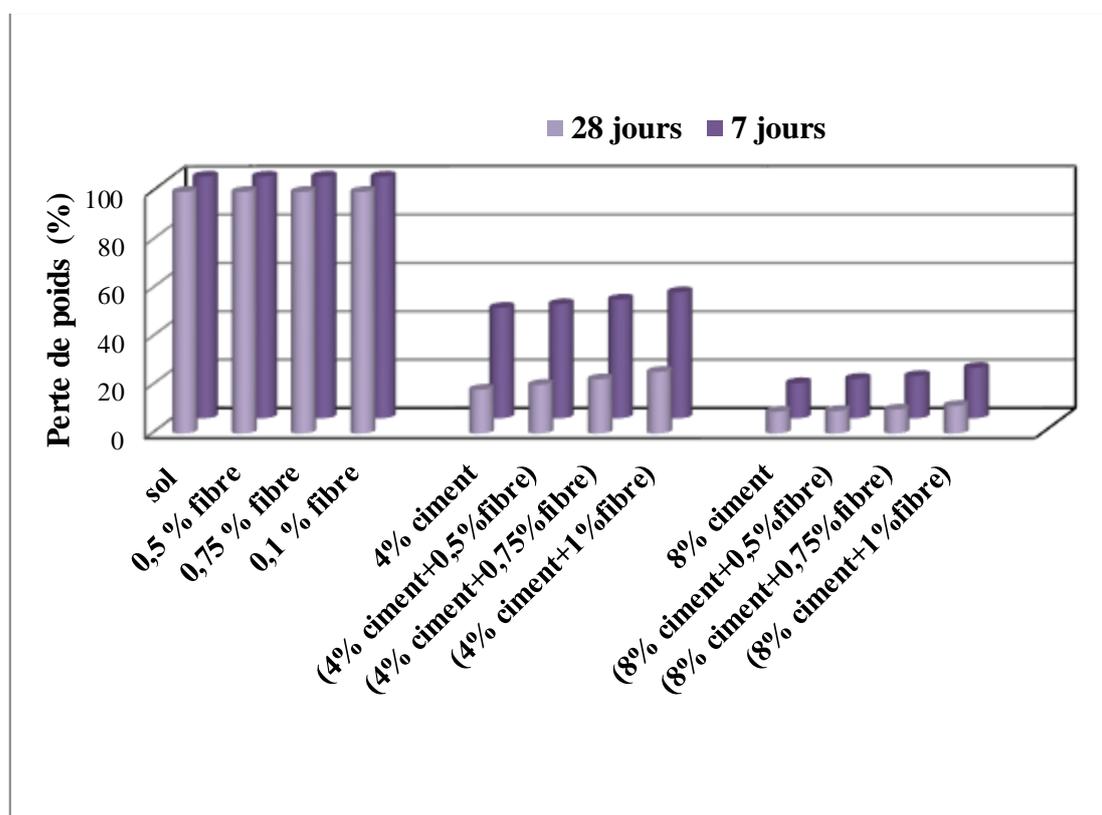


Figure 4.13 : Effet de fibres de paille de blé et du mélange (ciment - fibres de paille de blé) sur la perte de poids de la terre à base de sol limoneux.

L'ajout de fibres de paille de blé seuls n'a apporté aucune résistance à la perte de poids de la terre à 7 et 28 jours de cure. Une perte de poids de 100% est enregistrée par l'ensemble des échantillons de terre traité à 0.5, 0.5 et 1% de fibres en paille de blé après les deux périodes de cure. L'addition d'une teneur en fibres en paille de blé au mélange (terre -ciment) entraîne un accroissement de la perte de poids pour les échantillons de terre à base du sol limoneux traités à 4 % et 8 % du ciment. Cet accroissement est moins prononcé avec l'augmentation de la période de cure et la teneur en ciment. Les échantillons de terre stabilisés avec du ciment seul montrent une plus grande résistance aux cycles

humidification-séchage. L'ajout de fibres en paille de blé aux échantillons stabilisés au ciment, a un effet négatif sur la perte de poids.

Ce comportement peut s'expliquer par le fait que l'ajout de fibres à la matrice (terre à base de sol limoneux - ciment) provoque l'apparition de pores et de fissures qui ont permis à l'eau de s'infiltrer rapidement dans la matrice, entraînant une augmentation de la perte de poids. Cela est bien visible dans la figure 4.14.

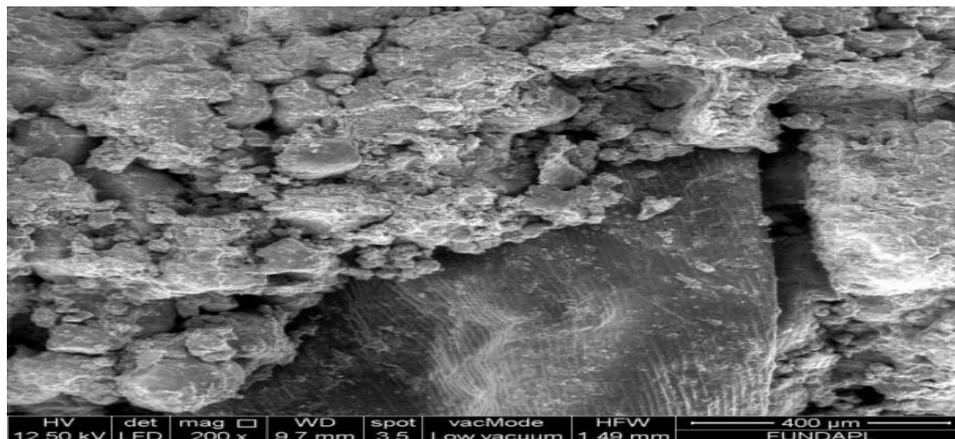


Figure 4.14 : Photos (MEB) de la terre à base de sol limoneux, traité à 8 % du ciment et renforcé par 0,5 % de la paille de blé,

- Corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids

La relation entre la résistance à la compression et la perte de poids pour des échantillons de terre à base de sol limoneux stabilisés par un mélange (ciment - laitier) et (chaux - laitier) est donnée dans la figure 4.15.

Les résultats obtenus pour les échantillons de terre à base de sol limoneux montrent que le taux de perte de poids dépend du niveau de résistance conçu par la réaction pouzzolanique avant le début des phases d'humidification. En effet, une corrélation négative entre la résistance à la compression et la perte de poids est observée. Le coefficient de corrélation des échantillons de terre à base de sol limoneux stabilisés avec le mélange (ciment - laitier) et le mélange (chaux - laitier) est respectivement de 0,908 et 0,881. Ces valeurs confirment qu'il existe une forte corrélation négative entre les deux propriétés. L'augmentation de la résistance à la compression semble entraîner une diminution de la perte de poids. Par exemple, l'augmentation de la teneur en laitier de 0 % à 16 % pour les échantillons traités à 8 % de ciment entraîne une augmentation de la résistance à la

compression de 3. 979 MPa à 6. 019 MPa, (soit une augmentation de 51,26 %), qui est compensée par une diminution de la perte de poids de 13%.

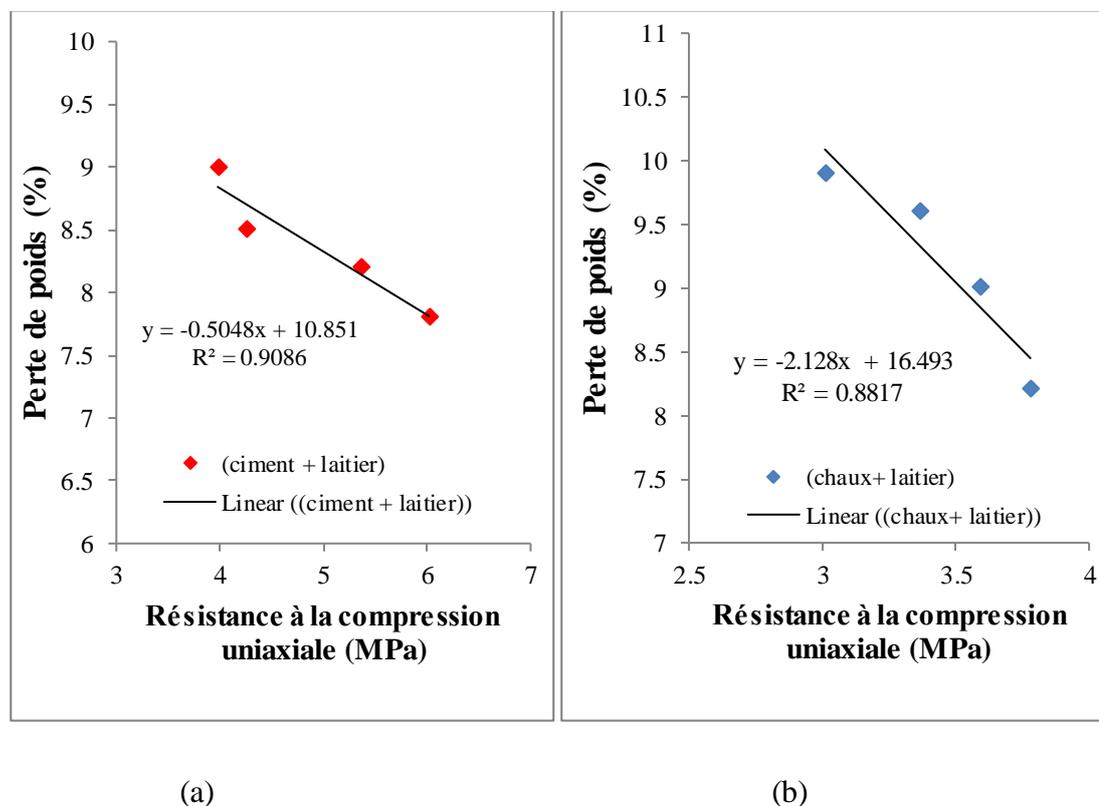


Figure 4.15 : Corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids pour la terre à base de sol limoneux traitée au mélange.
a- (ciment-laitier). b- (chaux-laitier).

4.2.2.2. Effet des ajouts sur l'absorption capillaire

Le deuxième paramètre important de la durabilité est la mesure de la pénétration de l'eau par action capillaire.

-Effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment - laitier)

Les résultats, donnant l'effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment - laitier) sur l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol limoneux, sont présentés à la figure 4.16.

Les résultats montrent que les échantillons de terre à base de sol limoneux, stabilisés avec du laitier seul, ne résistent pas au test d'absorption capillaire à 7 jours (la surface de l'échantillon a tendance à s'effondrer au contact de l'eau). Néanmoins, le prolongement de la période de cure entraîne une amélioration de la résistance à l'absorption capillaire. L'ajout de 8 % et 12 % de laitier, après une cure de 28 jours, réduit l'absorption capillaire de manière

significative, par rapport aux échantillons de terre non traités. En ce qui concerne l'effet du ciment, les résultats montrent que l'utilisation du ciment dans le traitement des échantillons de terre à base de sol limoneux entraîne une diminution de l'absorption capillaire. Cette diminution est plus prononcée avec l'augmentation du dosage en ciment et de la période de cure. Ces résultats confirment une fois encore ce qui a été rapporté dans la littérature sur l'effet du ciment sur l'absorption capillaire des blocs de terre comprimée [48]. L'ajout du ciment aide d'une part à cimenter les particules du sol et à remplir l'espace poreux du sol et, d'autre part, à empêcher la réorientation et la floculation des particules de sol, bloquant ainsi la formation de pores élargis et de fissures [37]. Cela est bien montré dans l'image MEB précédente (figure 4.9).

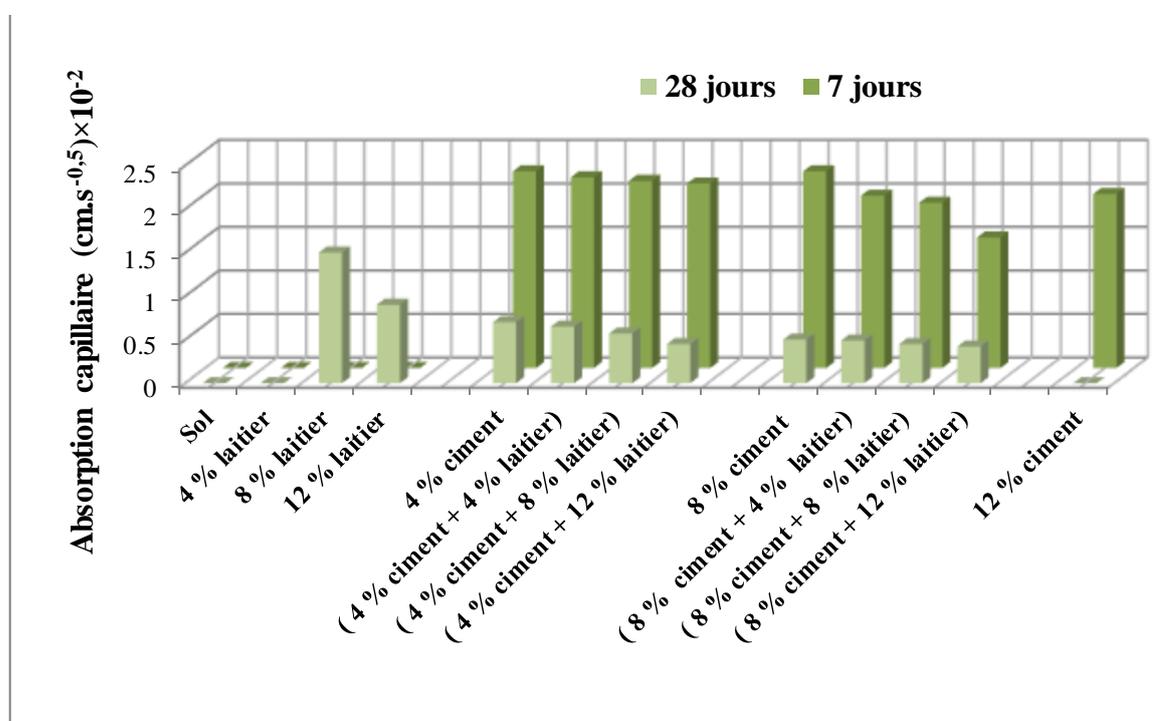


Figure 4.16 : Effet du laitier, du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.

À la lumière des résultats également présentés dans la figure 4.16, il est clair que le laitier, lorsqu'il est mélangé au ciment, contribue positivement à la réduction de l'absorption capillaire. Cette diminution est due à la formation des composés cimentaires qui résultent de la réaction dans le mélange ternaire (terre - ciment - laitier). Grâce à la formation de ces composés, les pores de la pâte et les interfaces entre la pâte sont remplis par ces ajouts et les pores capillaires sont réduits.

-Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux - laitier)

Les résultats donnant l'effet de laitier, de ciment et de mélange (ciment - laitier) sur l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol limoneux sont présentés à la figure 4. 17.

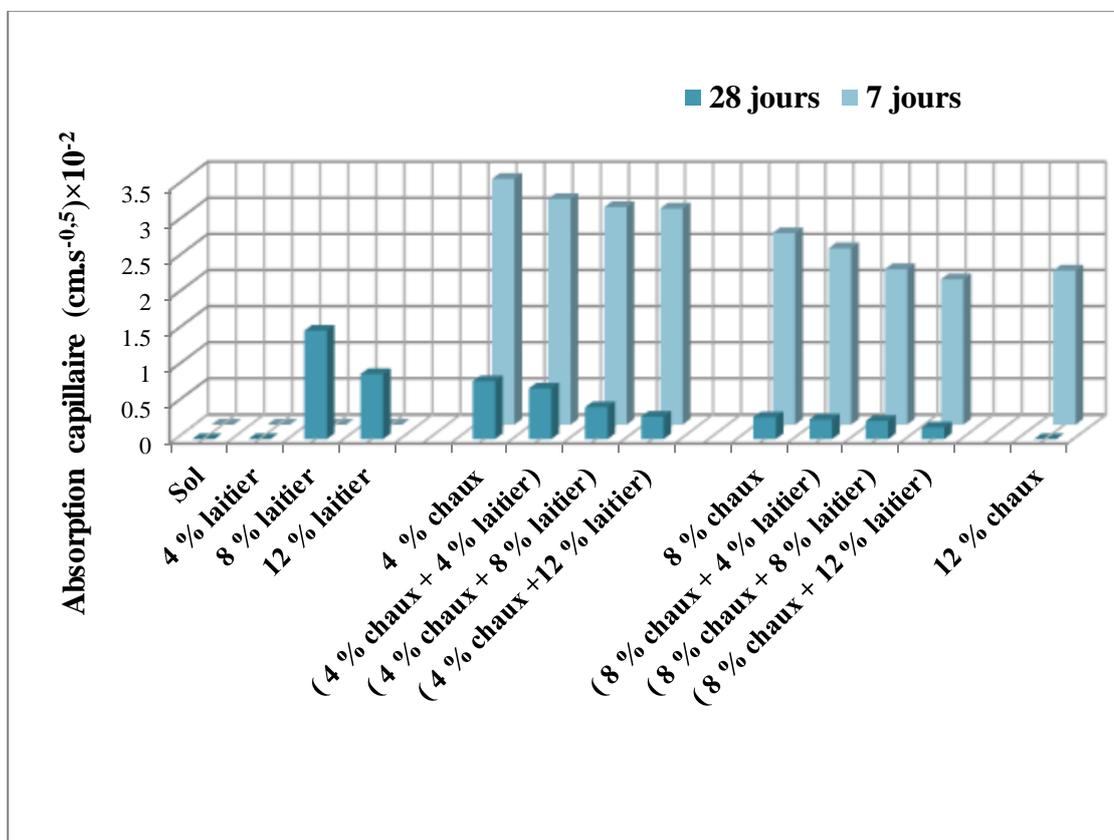


Figure 4.17 : Effet de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.

L'addition de la chaux à la terre à base de sol limoneux engendre une diminution de l'absorption capillaire. Le taux de réduction de l'absorption capillaire augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux. Une diminution supplémentaire de l'absorption capillaire avec l'augmentation de la période de cure est constatée. Ces résultats confirment une fois encore, ce qui a été rapporté dans la littérature sur l'effet de la chaux sur l'absorption capillaire des blocs de terre à base de sol argileux [49, 82].

Pour ce qui est du mélange (chaux-laitier), les résultats obtenus montrent l'effet favorable du mélange sur l'absorption capillaire. La tendance à une diminution de l'absorption capillaire est fonction de l'augmentation des dosages du laitier et la période de

cure. Les valeurs minimales de l'absorption capillaire sont obtenues par les échantillons stabilisés avec 8 % de chaux et mélangés avec différentes teneurs en laitier. En ce qui concerne le mélange (chaux - laitier), les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la teneur en laitier, dans le mélange (terre – chaux), améliore considérablement l'absorption capillaire, soulevant l'effet favorable de ces ajouts.

-Comparaison entre les résultats obtenus

Les résultats de l'absorption capillaire, pour la terre à base de sol limoneux, traitée au laitier, au ciment, à la chaux, aux mélanges (ciment-laitier) et (chaux -laitier), après une cure de 7 et 28 jours, sont donnés dans la figure 4.18.

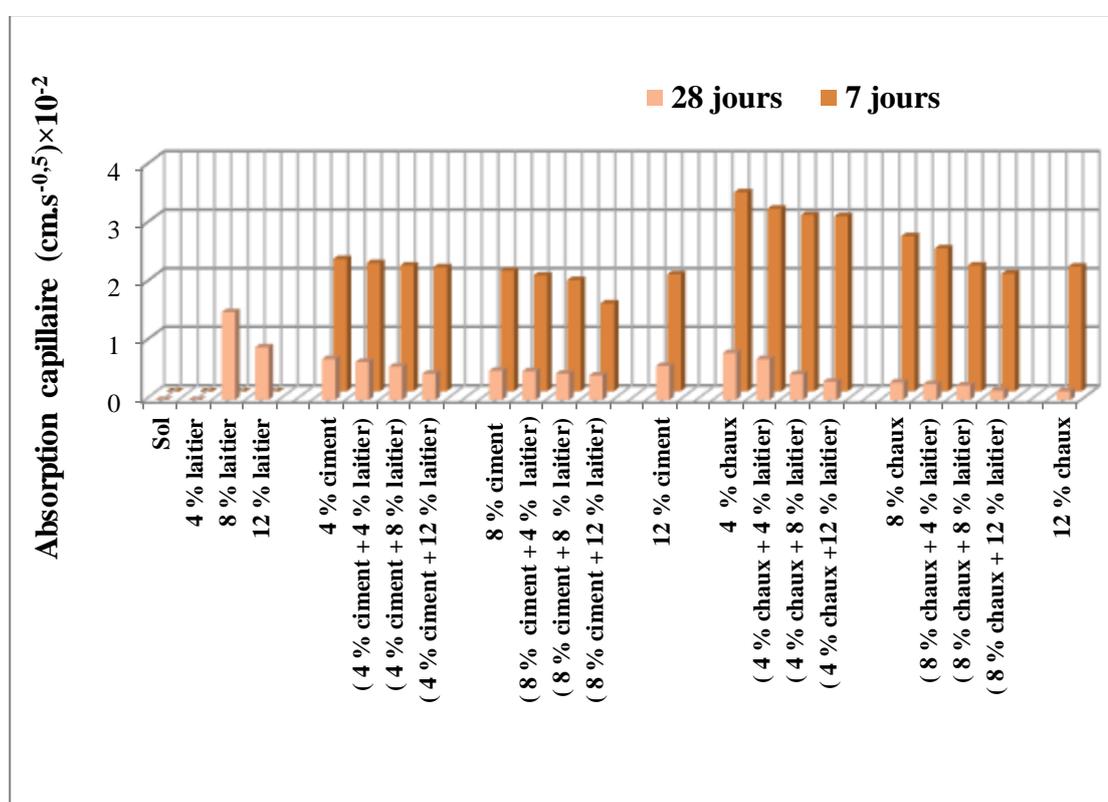


Figure 4.18 : Comparaison entre l'effet du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur l'absorption capillaire de la terre à base du sol limoneux.

Comme il peut se voir sur la figure donnée ci-dessus, la stabilisation de la terre à base de sol limoneux, à la chaux et au mélange (chaux-laitier), a plus d'effet sur la réduction de son absorption capillaire, que la stabilisation au ciment et au mélange (ciment-laitier) après 28 jours de cure.

-Effet des fibres en paille de blé et du mélange (ciment – fibres en paille de blé)

Les résultats présentés dans la figure 4.19 montrent l'effet des fibres en paille de blé et du mélange (ciment-fibre en paille de blé) sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.

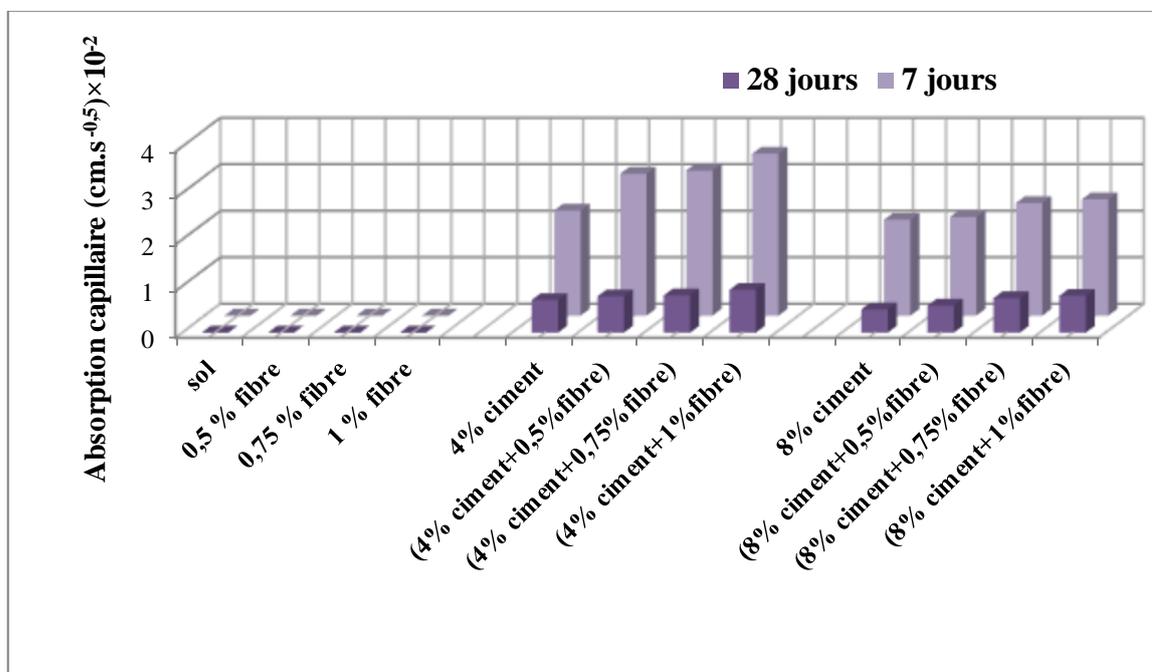


Figure 4.19 : Effet des fibres de paille de blé et du mélange (ciment-fibre en paille de blé) sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux.

Comme il peut se voir sur cette figure, les échantillons de terre à base de sol limoneux, renforcés avec différentes teneurs en fibres en paille de blé seules, ne résistent pas au test d'absorption capillaire à 7 et 28 jours de cure (la surface de l'échantillon a tendance à s'effondrer au contact de l'eau). L'addition de la fibre au mélange binaire (terre -ciment) augmente l'absorption capillaire de la terre à base de sol limoneux traitée à 4 et 8% de ciment, pour les deux périodes de cure. Par contre, cette augmentation est beaucoup moins prononcée avec l'augmentation de la période de cure de 7 à 28 jours et de la teneur en ciment de 4% à 8%.

L'augmentation de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol limoneux cimentés à 4 % et 8% et renforcés avec différentes teneurs en fibres de paille de blé peut être expliquée par l'accroissement des vides créés par la présence de fibres dans le mélange (terre à base de sol limoneux - ciment), et à la quantité d'eau absorbée par la cellulose dans les fibres, qui est due au volume des vides et à la quantité de matière

cellulosique présente dans la fibre. La nature absorbante des fibres crée un passage à travers les blocs de sol, permettant aux blocs d'absorber plus d'eau [196, 198]. Cela est bien matérialisé, en remarquant les photos des fibres de paille de blé obtenus par l'observation au microscope électronique à balayage, déjà présentées dans le deuxième chapitre, qui montrent que la surface de la paille de blé, utilisée dans cette étude, est lisse à l'extérieur, avec la présence des vide et de pores à l'intérieur, favorisant une absorption d'une plus grande quantité d'eau.

4.2.2.3. Effet des additifs sur l'érosion

La durabilité des blocs de terre à base de sol limoneux traitée au ciment, chaux, mélange (ciment-laitier), (chaux-laitier) et (ciment-fibre), a été étudiée au moyen de tests d'érosion. Les résultats sont donnés dans la figure 4.20.

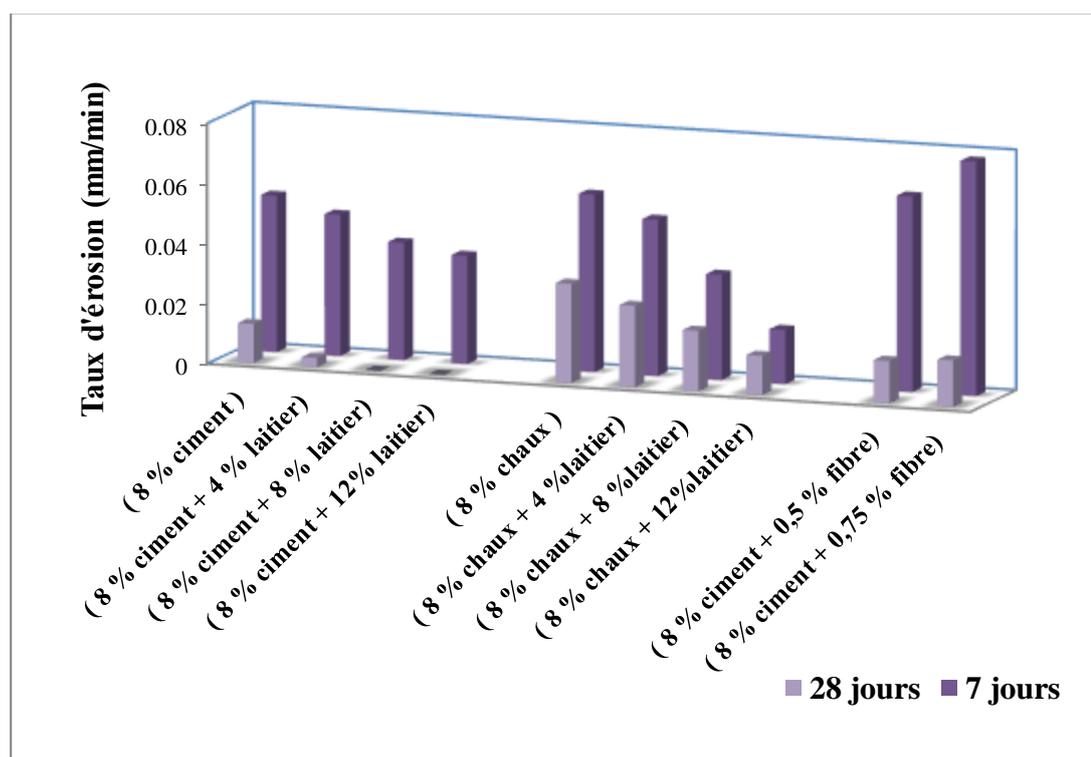


Figure 4. 20 : Effet des différents ajouts sur l'érosion de la terre à base de sol limoneux.

Il est à noter que, les résultats des essais d'érosion accélérée montrent une désintégration complète des échantillons non stabilisés. C'est-à-dire que les longueurs des blocs ont été entièrement pénétrées. Ceci est conforme aux prévisions en raison du comportement du mélange non traité au contact de l'eau.

Concernant le traitement au ciment et au mélange (ciment-laitier), les résultats montrent que le taux d'érosion diminue, pour atteindre des valeurs presque négligeables à 28 jours, pour les blocs de terre à base de sol limoneux, traitée avec 8 % de ciment et mélangée à 12 % de laitier. Après une période de cure de 28 jours, les blocs traités à 8 % du ciment montrent une valeur du taux d'érosion de 0.013 (mm/min). Pour les blocs à base de sol limoneux, traité à 8 % du ciment et mélangé avec 8 % et 12 % de laitier respectivement, l'aspect de la surface des échantillons est resté pratiquement intacte. Les blocs de terre à base de sol limoneux stabilisée ne montrent aucun signe visible de dégradation en surface. La figure 4.21 montre la surface des blocs à base de sol limoneux après l'essai d'érosion. les résultats sont en accord avec ceux rapportés par certains chercheurs qui ont conclu que le rajout du ciment au bloc de terre à base de sol argileux ou (argileux-sableux) diminue l'érosion à des valeurs négligeables [51-53].

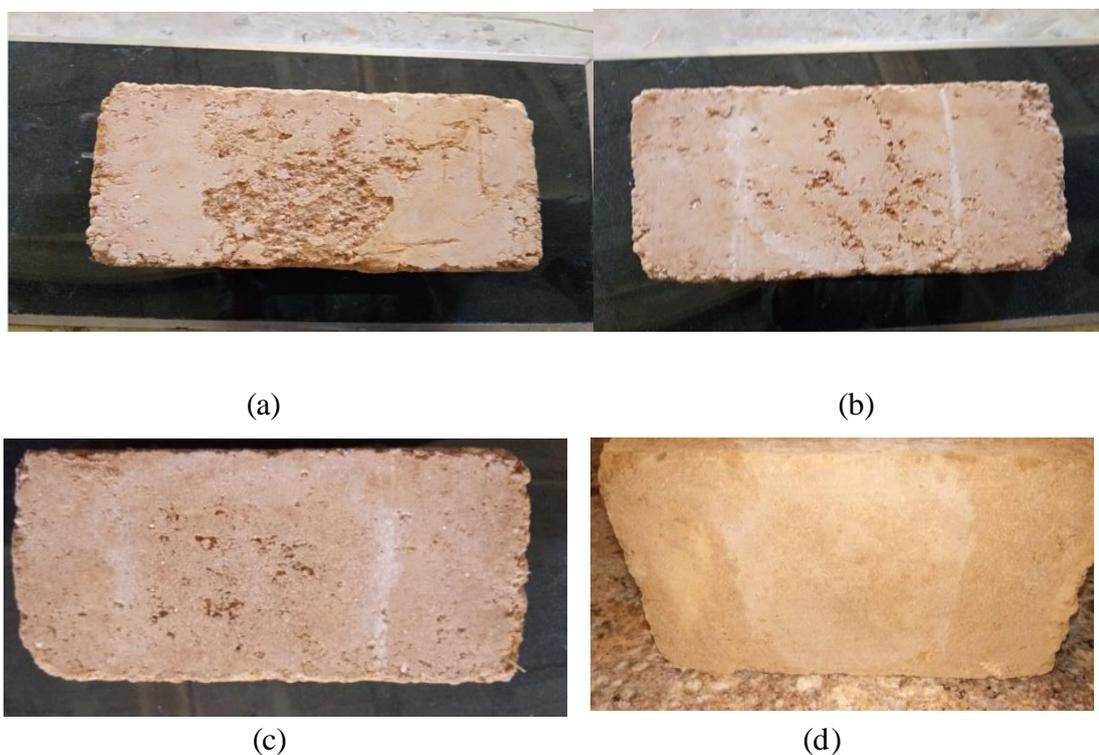


Figure 4.21 : Les blocs stabilisés après l'essai d'érosion.

a- (8 % ciment) 7 jours. b- (8 % ciment) 28 jours.

a-(8 % du ciment + 12% de laitier) 7 jours. b-(8 % du ciment + 12% de laitier) 28 jours.

Il en est de même pour les blocs de terre à base de sol limoneux traités à la chaux et au mélange (chaux –laitier), une diminution de l'érosion avec l'augmentation de la teneur en laitier et la périodes de cure pour les blocs à base de sol limoneux traités à 8 % de chaux

est observée. cette diminution est de l'ordre de 11.86 %, 40.67 % et 69.49 % pour les blocs traités à 8 % de chaux et mélangés avec 4 % , 8 % et 12 % de laitier.

Comparé au traitement au ciment, le traitement à la chaux seule ou mélangée à une proportion de laitier semble avoir moins d'effet sur la diminution du taux d'érosion. Cette augmentation de la résistance à l'érosion avec l'ajout de ciment, de chaux et l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (ciment-laitier) ou (chaux - laitier) est principalement due à la formation de produits cimentaires issus de la réactions pouzzolaniques développée avec de la période de cure. Il est également très clair que ces blocs de terre traités peuvent être utilisés dans des murs sans plâtre.

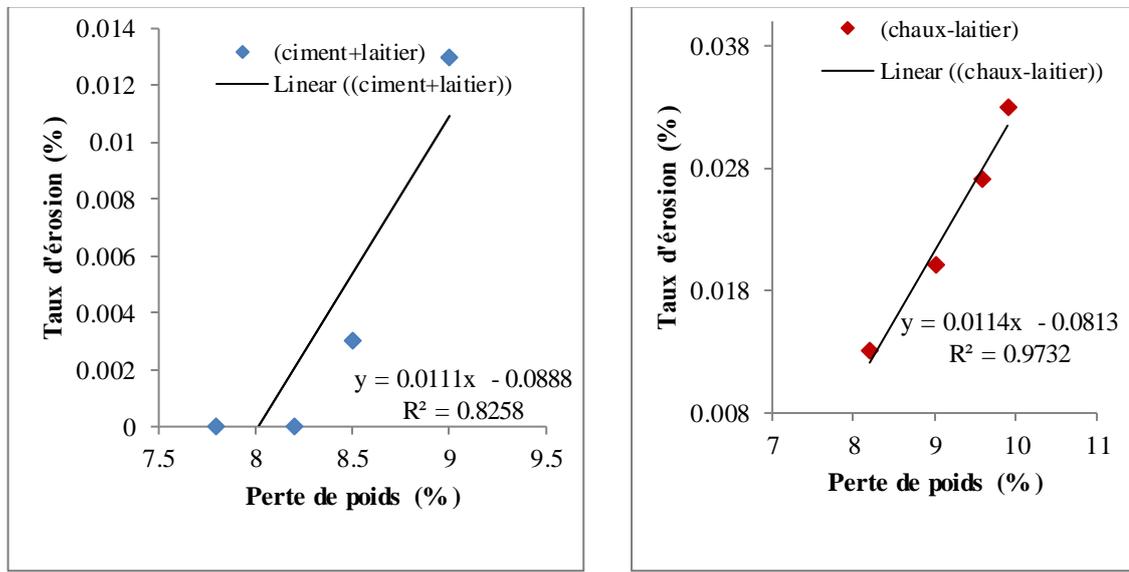
Contrairement au mélange (ciment-laitier) ou bien (chaux-laitier), il faut noter que l'ajout de fibres de paille de blé au mélange (terre-ciment) augmente le taux d'érosion. L'apparition des fibres à la surface des blocs provoque une pénétration de l'eau entre le mélange de terre et les fibres, ce qui facilite l'érosion de la surface des blocs. Malgré cela, tous les blocs de terre à base de sol limoneux ont un taux d'érosion inférieur à 1 mm/minute, valeur minimale recommandée.

Dans une étude antérieure sur l'effet du ciment, de la chaux et des fibres naturelles sur l'érosion des blocs de terre comprimée, il a été rapporté que tous les blocs utilisés, dans l'étude, montrent un taux d'érosion inférieur à 1 mm/minute. Parmi tous les blocs fabriqués, ceux faits de (sol – ciment), ont enregistré des taux d'érosion négligeables. Cependant, en les comparants entre eux, il en a été déduit que l'utilisation de chaux et de fibres naturelles telles que, les coquilles de noix de coco, peut être problématique en termes d'amélioration de la durabilité par augmentation du taux d'érosion [199]. Des résultats contradictoires ont été rapportés par [196], qui montrent que l'utilisation de la fibre de bagasse de canne à sucre dans les blocs de terre augmente considérablement leur durabilité vis-à-vis de l'action de l'eau, en augmentant la résistance à l'érosion.

- Corrélation entre la perte de poids et l'érosion

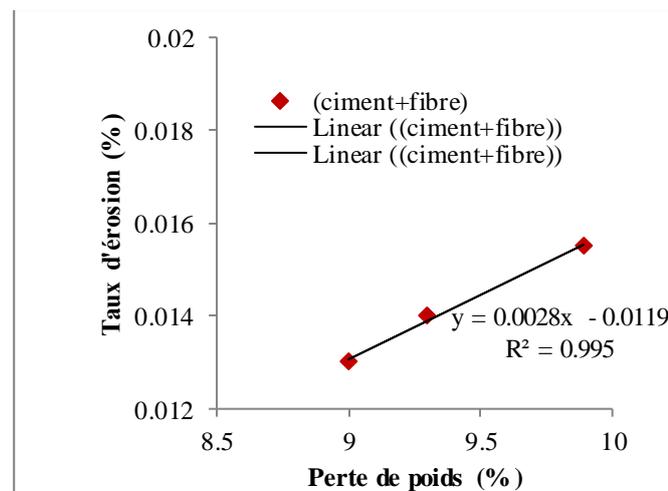
La corrélation entre la perte de poids et le taux d'érosion est illustrée à la figure 4.22 pour la terre à base de sol limoneux, laquelle montre une excellente corrélation entre les valeurs. À titre d'exemple, le coefficient de corrélation est de 0,825, 0,973 et 0,995 pour les mélanges (ciment - laitier), (chaux - laitier) et (fibres - ciment) respectivement. Ces résultats

sont conformes à ceux de Danso et al (2015) [170] qui ont constaté, à partir de ces bonnes corrélations, qu'il est possible de vérifier la durabilité des blocs avec un seul de ces tests.



(a)

(b)



(c)

Figure 4.22 : Corrélation entre la perte de poids et le taux d'érosion de la terre à base du sol limoneux traitée au mélange.

a-(ciment-laitier). b- (chaux-laitier). c-(ciment-fibre).

4.2.2.4. Effet des additifs sur l'abrasion

Plus le coefficient d'abrasion est élevé, meilleure est la durabilité de la brique [156]. Les résultats de la résistance à l'abrasion de la terre à base de sol limoneux, traitée au ciment, à la chaux, aux mélanges (ciment-laitier), (chaux-laitier) et (ciment-fibres) après une cure de 7 et 28 jours, sont illustrés dans la figure 4.23.

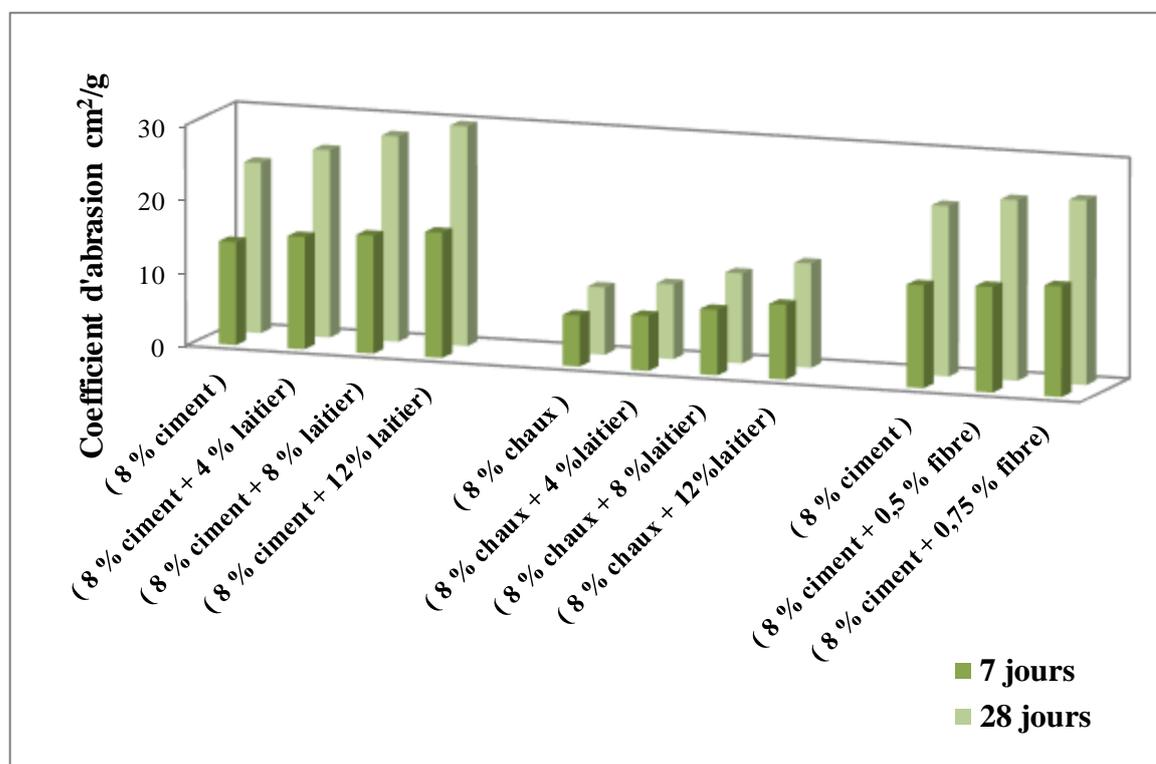


Figure 4.23 : Effet des différents ajouts sur la résistance à l'abrasion de la terre à base de sol limoneux.

Les résultats montrent que le coefficient d'abrasion augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier, aussi bien dans le mélange (ciment – laitier) que dans le mélange (chaux – laitier) et de la période de cure. Néanmoins, l'effet sur l'augmentation du coefficient d'abrasion est plus prononcé pour les blocs de terre à base de sol limoneux, traités au ciment et au mélange (ciment – laitier). En effet, les valeurs obtenues avec le traitement au ciment et au mélange (ciment – laitier) sont supérieures à celles obtenues avec le traitement, à la chaux et au mélange (chaux- laitier), à 7 et 28 jours. Cette amélioration est due à l'action des composés cimentaires qui tendent à créer une liaison entre les particules de la terre. Cette liaison tend à augmenter avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange (ciment –laitier) / ou (chaux-laitier) et de la période de cure. La plus grande valeur du coefficient

d'abrasion est obtenue avec la combinaison (8 % ciment – 12 % laitier) après 28 jours de cure. Des résultats similaires ont été rapportés dans la littérature sur l'effet du ciment et du mélange (chaux – laitier) sur la résistance à l'abrasion des blocs de terre comprimée [152 - 200].

De plus, les résultats montrent une augmentation de la résistance à l'abrasion avec l'augmentation de la teneur en fibres, pour les blocs traités à 8 % de ciment. La plus grande valeur de la résistance à l'abrasion est observée pour les blocs de terre à base de sol limoneux, traitée à 8 % de chaux et renforcée avec 0.75 % de fibres. Ces résultats s'accordent avec ceux trouvés par [175] où l'ajout de paille de lavande à un bloc de terre augmente sa résistance à l'abrasion.

D'après les résultats obtenus, il en ressort que la résistance à l'abrasion est en étroite relation avec la résistance. En effet, la valeur du coefficient d'abrasion la plus élevée est obtenue par la combinaison présentant la plus grande valeur de la résistance à la compression, aussi bien pour le mélange (ciment – laitier) que pour le mélange (chaux – laitier) à 28 jours. La corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à l'abrasion de la terre à base de sol limoneux est illustrée à la figure 4.24.

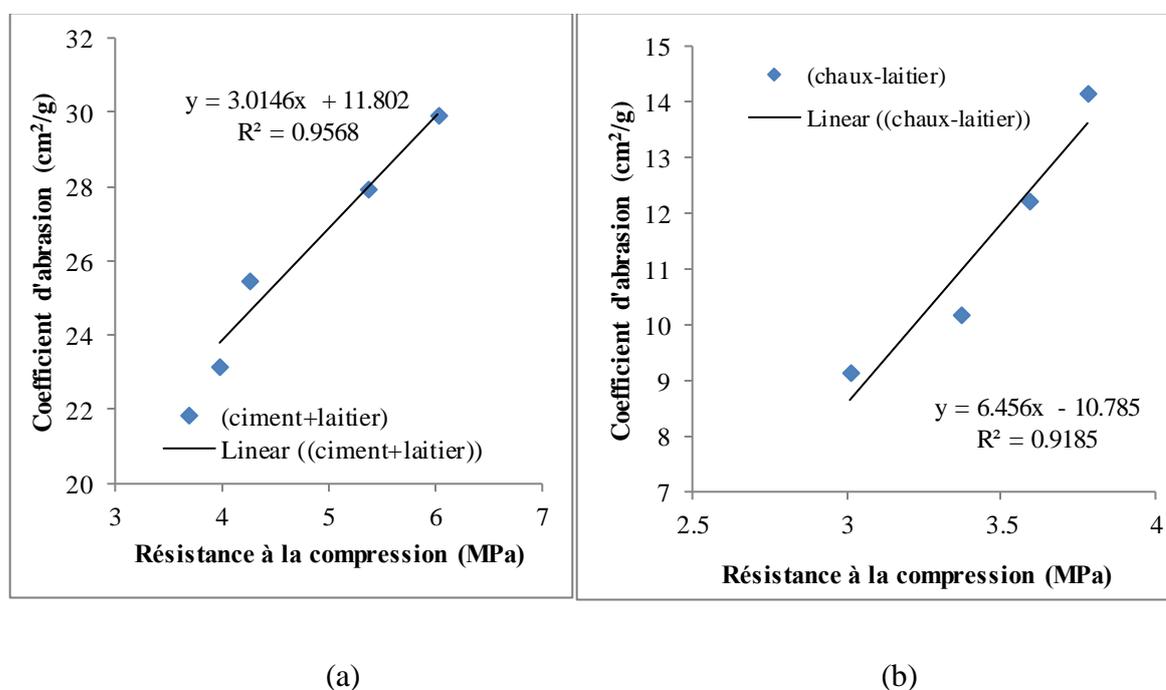


Figure 4.24 : Corrélation entre la résistance à la compression et à l'abrasion de la terre à base de sol limoneux traitée au mélange.
a-(ciment-laitier). b- (chaux-laitier).

4.2.2.5. Effet des additifs sur le gonflement

La variation du taux de gonflement après 4 jours d'immersion en fonction de la quantité des ajouts additionnés est donnée dans la figure 4.25.

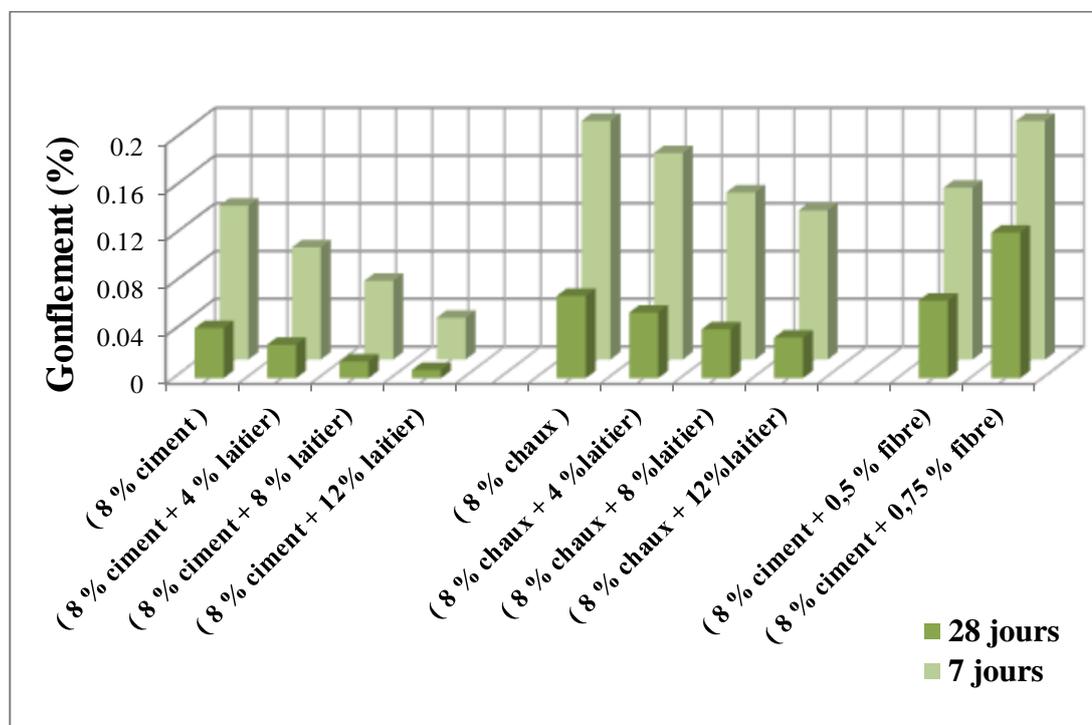


Figure 4.25 : Effet des différents ajouts sur le gonflement de la terre à base de sol limoneux.

À l'exception du mélange (ciment – fibres) montrant une évolution contraire du gonflement en fonction du taux d'additifs, les résultats, présentés dans la figure 4.6, montrent que le gonflement des blocs de terre à base de sol limoneux diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier dans les mélanges (ciment-laitier), (chaux-laitier) et de la période de cure. Néanmoins, la réduction est plus prononcée dans le mélange (ciment-laitier) que dans le mélange (chaux-laitier) à 7 jours et 28 jours. Cela indique que l'action du mélange (ciment - laitier) a un meilleur effet sur la réduction du taux de gonflement des blocs de terre à base de sol limoneux utilisés dans cette étude, que celle du mélange (chaux - laitier). À 28 jours, l'analyse des valeurs montre que l'ajout du mélange (ciment - laitier) réduit le gonflement à des valeurs presque négligeables. Cette réduction est due à la formation du composé cimentaire issu de la réaction pouzzolanique. Une cure prolongée augmente la résistance, ce qui rend le mélange plus susceptible de se fissurer autour des agrégats lorsqu'il est retenu. Cette fissuration interne est très fine et peut ne pas être visible. La fissuration interne permet au retrait de se produire sans réduction de volume. L'infiltration d'eau dans les fissures

pendant la cure réduit la tension de surface du gel, et une nouvelle expansion se produit. En outre, les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et ont tendance à écarter les particules de gel, ce qui entraîne un gonflement général [201-202].

Néanmoins, le renforcement du mélange (terre à base de sol limoneux-ciment) par la paille de blé augmente le gonflement. Ces résultats sont cohérents avec ceux observés dans d'autres travaux [166, 203 - 204]. Les auteurs ont constaté que l'augmentation du gonflement par l'ajout de fibres est attribuée à la variation dimensionnelle des fibres végétales due à l'absorption d'eau en raison de son caractère hydrophile, produisant une pression sur les particules du mélange (matrice), ce qui modifie sa microstructure. Après le séchage, les fibres perdent l'eau absorbée, ce qui entraîne une réduction de leur volume et la formation d'un réseau poreux plus important tout autour de la fibre, ce qui nuit à l'adhérence fibre/matrice.

4.2.2.6. Effet des ajouts sur le retrait

La variation du retrait en fonction de la quantité des ajouts additionnés est donnée par la figure 4.26.

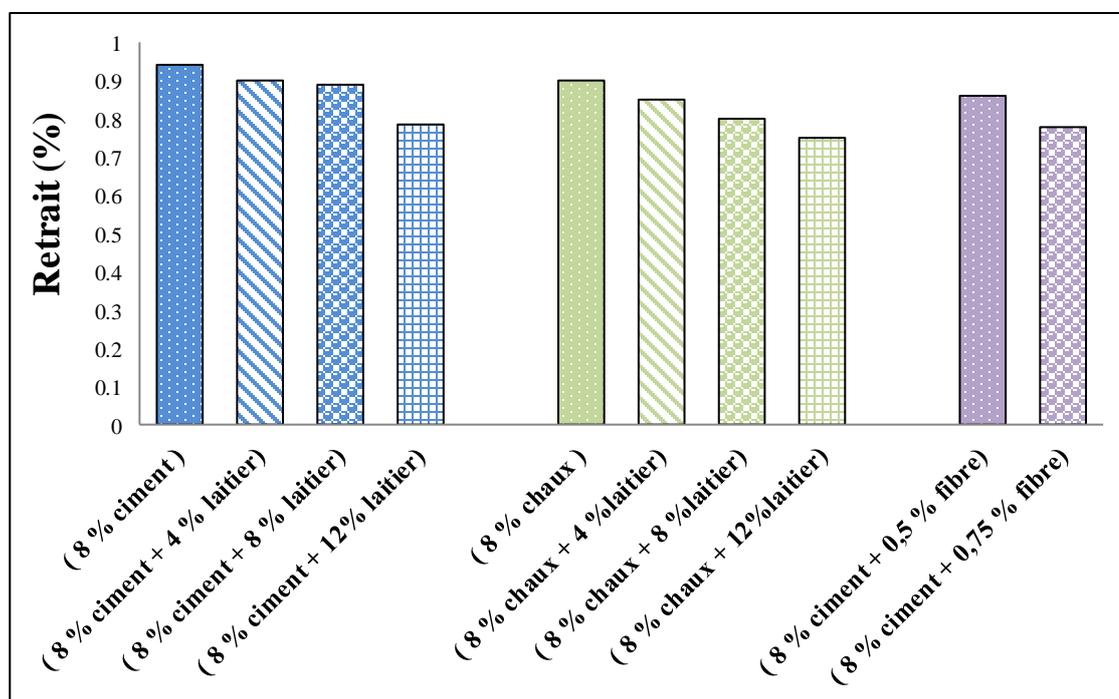


Figure 4.26 : Effet des différents ajouts sur le retrait de la terre à base de sol limoneux.

Le retrait est dû généralement à l'évaporation de l'eau qui engendre le rapprochement des particules du sol. Les résultats montrent une diminution du retrait avec l'augmentation des différents additifs soit les mélanges (ciment - laitier), (chaux - laitier) et (ciment – fibres). Ce comportement peut être expliqué par la formation des produits de cimentation. Ces produits remplissent les vides et empêchent le rapprochement des grains de sol. En ce qui concerne l'effet des fibres, on observe une diminution du retrait en ajoutant les fibres au mélange (terre à base de sol limoneux - ciment). Un des principaux objectifs de l'utilisation des fibres, comme élément, de renforcement dans les matrices de sol, est d'empêcher la fissuration du sol résultant du retrait. La fissuration par retrait en traction dans le sol est principalement due à un séchage rapide et non uniforme. Les fibres de renforcement dans les matrices de sol empêchent la fissuration par adhésion ou collage au sol. De plus, les fibres accélèrent le séchage en évacuant l'humidité vers l'extérieur par les canaux [203-205].

4.2.3. Effet des ajouts sur la conductivité thermique

La conductivité thermique est une mesure de la capacité d'un matériau à laisser passer la chaleur. Dans le secteur du bâtiment, les matériaux à faible conductivité thermique sont intéressants pour leur contribution à la réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation, selon les régions. Cet indicateur de capacité d'isolation est donc déterminé pour les matériaux de construction en cours de développement. La variation de la conductivité thermique du sol limoneux en fonction de la quantité des ajouts additionnés est donnée dans la figure 4.27.

Les résultats montrent une augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en laitier dans les mélanges (ciment-laitier) ou (chaux-laitier). Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que l'ajout de chaux ou de ciment apporte au matériau initial de nombreux éléments fins qui bloquent les pores créés par la proximité de grosses particules. Le matériau obtenu après le mélange est moins poreux que le matériau initial, comme le montre la figure du MEB, donnée précédemment.

Le ciment et la chaux servent donc non seulement à stabiliser le matériau, mais aussi, à réduire ses pores. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres travaux ayant fait l'objet d'étudier l'effet du ciment et de la chaux sur la résistance des blocs de terre à base des sols limoneux [206, 57, 95].

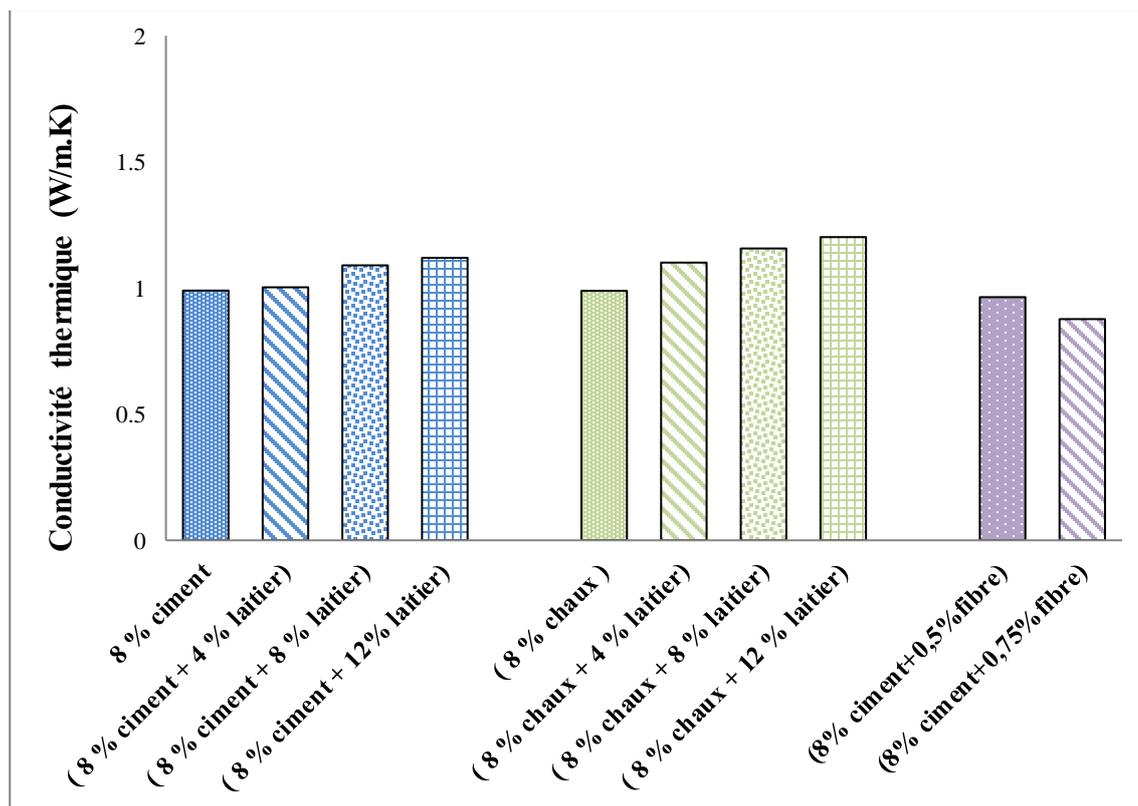


Figure 4.27 : Effet des différents ajouts sur la conductivité thermique de la terre à base sol limoneux.

En revanche, le renforcement du bloc stabilisé au ciment et à la fibre de la paille de blé réduit la conductivité thermique. Cela peut être expliqué, premièrement, par le fait que les fibres se caractérisent par leur faible conductivité thermique ($0,055 - 0,065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) par rapport à celle de la matrice du mélange (terre à base de sol limoneux - ciment). Deuxièmement, la présence de fibres dans la matrice génère des vides, entraînant une augmentation de la porosité et une diminution de la densité. Il convient de noter que la conductivité thermique de la paille dépend également de la direction du flux de chaleur appliqué (parallèle ou perpendiculaire aux faisceaux de paille) [174, 207].

4.2.4. Synthèse des résultats obtenue

Le 4.1 tableau résume les optimums des différents combinaisons obtenus à partir l'application des essais mécanique, durabilité et thermique pour la terre à base de sol limoneux.

À partir de ce tableau, on dégage la combinaison qui donne un bloc résistant, durable et écologique.

Tableau 4.1 : Synthèse des résultats obtenus pour l'utilisation de sol argileux comme matériau de construction

	Résistance à la compression	Perte de poids	Absorption capillaire	Érosion	Abrasion	Retrait	Conductivité thermique
	➤ 2 MPa	< 10 %	$(20\text{cm}\cdot\text{s}^{-0,5})\times 10^{-2}$	1 mm/min	20 cm ² /g	(%)	
8% ciment	3,979	9	0,5	0.013	23,12	0,941	0,99
(8 %ciment + 4% laitier)	4,252	8,50	0,49	0.003	25,43	0,9	1,003
(8 %ciment +8% laitier)	5,365	8,2	0,45	0	27,9	0,889	1,09
(8% ciment +12% laitier)	6,019	7,8	0,42	0	29,84	0,785	1,12
Par l'ajout de (8% ciment +12% laitier), on obtient un matériau de construction résistant, durable et écologique.							
8 % chaux	3,012	10	0,07	0,033	9,13	0,9	0,989
(8% chaux+ 4 % laitier)	3,373	9,8	0,05	0,027	10,15	0,85	1,101
(8 % chaux + 8 % laitier)	3,595	9,6	0,03	0,02	12,21	0,8	1,157
(8 % chaux +12 % laitier)	3,789	8,2	0,01	0,013	14,14	0,75	1,202
Par l'ajout de (8% chaux+12% laitier), on obtient un matériau de construction résistant, durable et écologique.							
(8% ciment +0.5 % fibre)	4.078	9,16	0.58	0,014	24.51	0,86	0,964
(8% ciment +0.75 % fibre)	4.005	9,59	0.74	0,0155	25.05	0,778	0,877

4.3. Terre à base de sol argileux

4.3.1. Effet des ajouts sur la résistance

- Effet de la chaux, du laitier et du mélange (chaux-laitier) sur la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux

La figure 4.28 présente l'effet de laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la résistance à la compression sèche après une cure de 7 jours et 28 jours.

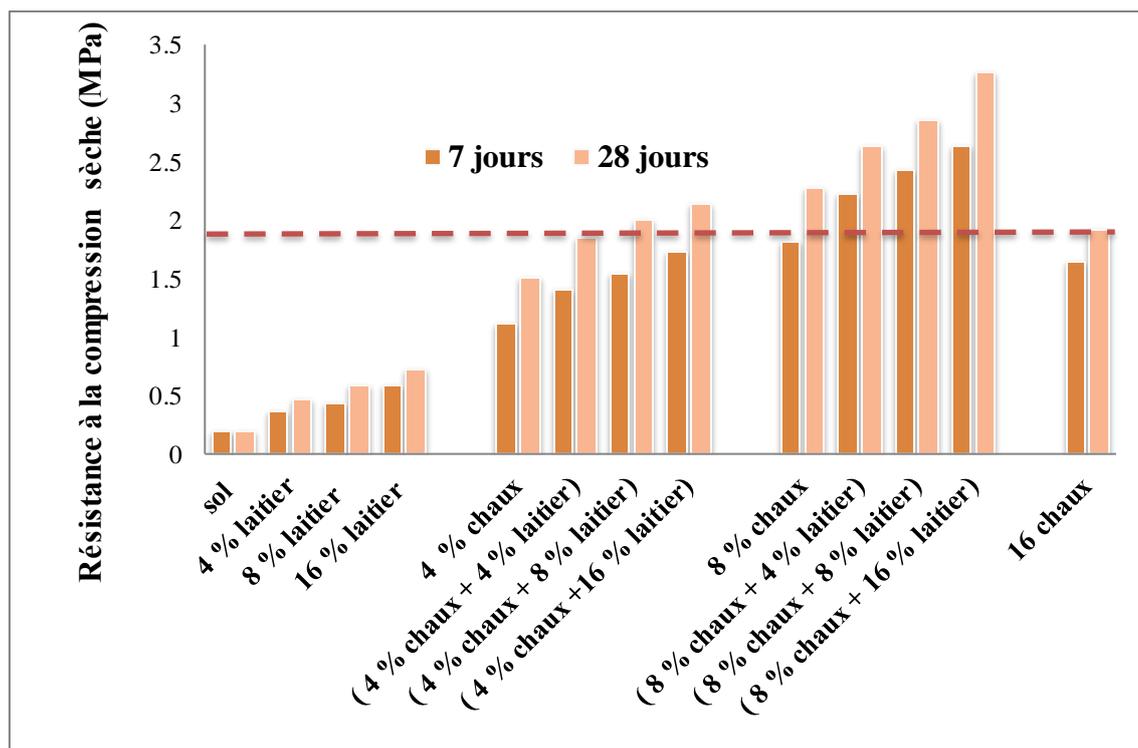


Figure 4.28 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier, de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et le temps de cure.

En ce qui concerne le laitier, une augmentation de la résistance à la compression uniaxiale avec l'augmentation de la quantité de laitier rajoutée après 7 et 28 jours de cure est observée. Cette augmentation est principalement due à l'effet du compactage et du développement des composés cimentaires après la cure, entre la CAO_H présente dans la terre [137, 208].

Avec l'ajout d'une quantité variable de chaux, les résultats obtenus montrent une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la quantité de chaux jusqu'à une certaine valeur, au-delà de laquelle, la résistance diminue, pour les échantillons de terre ayant subi à 7 et 28 jours de cure. Cette valeur est dite valeur optimale, elle est de l'ordre

de 8 % pour la terre à base de sol argileux utilisée dans cette étude. La résistance augmente avec l'augmentation de la période de cure. Cette augmentation est due au changement de la structure à court terme (modification de la granulométrie et augmentation de l'angle de frottement) et à la cimentation des particules (augmentation de la cohésion) produite avec le temps. La première modification instantanée à 7 jours induit des augmentations limitées de la résistance et, de ce fait, nécessite une quantité suffisante d'additifs. En revanche, la formation des hydrates (CSH et CAH) et, donc, la cimentation des particules, augmente avec la quantité des additifs ajoutés et induit des résistances mécaniques qui évoluent progressivement avec une cinétique lente de la réaction pouzzolanique, à température ambiante [209].

L'incorporation du laitier dans le mélange (chaux – terre) entraîne une augmentation supplémentaire de la résistance. Cette augmentation est proportionnelle à la quantité de laitier rajoutée et de la période de cure, pour la terre traitée à 4 % et 8 % de chaux. Comme nous l'avons vu précédemment pour le mélange (chaux-terre), en général, la dissolution de la chaux fournit un environnement très alcalin, dans lequel des silicates et une petite quantité d'ions aluminates sont produits par la dissolution des particules de la terre. Par conséquent, le principal matériau cimentaire est le silicate de calcium hydraté, qui est formé par la réaction du silicate et des ions calcium à l'état alcalin. Ce processus, est appelé réaction pouzzolanique, dans laquelle les composants actifs, tels que la silice et l'alumine de la terre à base de sol argileux, réagissent avec l'hydroxyde de calcium de la chaux, pour former des produits chimiques, tels que le silicate de calcium hydraté, l'aluminate de calcium hydraté. L'introduction de laitier dans le mélange chaux-sol, modifie les réactifs de la réaction pouzzolanique et apporte de l'alumine, de la silice et du magnésium au mélange (chaux-terre). En outre, ces produits réactifs acquièrent une grande réactivité en raison de l'environnement alcalin, fourni par l'existence d'une quantité suffisante de chaux pour la réaction pouzzolanique du laitier (activation du laitier), qui doit produire davantage de silicate de calcium hydraté et d'aluminate de calcium hydraté. Ainsi, le produit de la réaction pouzzolanique est le principal facteur contribuant à la solidification du mélange [194]. Il est évident que le mélange (terre - laitier - chaux) présente une résistance à la compression plus élevée que les mélanges (terre - laitier)/ou (terre - chaux). Seuls les blocs de terre, traités avec 8 % de chaux et ceux traités avec 8 % de chaux et mélangée avec différentes teneurs en laitier après 28 jours de cure, présentent une résistance supérieure à 2 MPa (la valeur minimale recommandée par les différentes normes internationales). Des résultats similaires

soulevant l'effet du laitier seul ou combiné avec la chaux sur la résistance à la compression ont été rapportés dans la littérature [210-213].

- Effet de la chaux, du laitier et du mélange (chaux- laitier) sur la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux

La figure 4.29 présente l'effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la résistance à la compression humide après une cure de 7 jours et 28 jours.

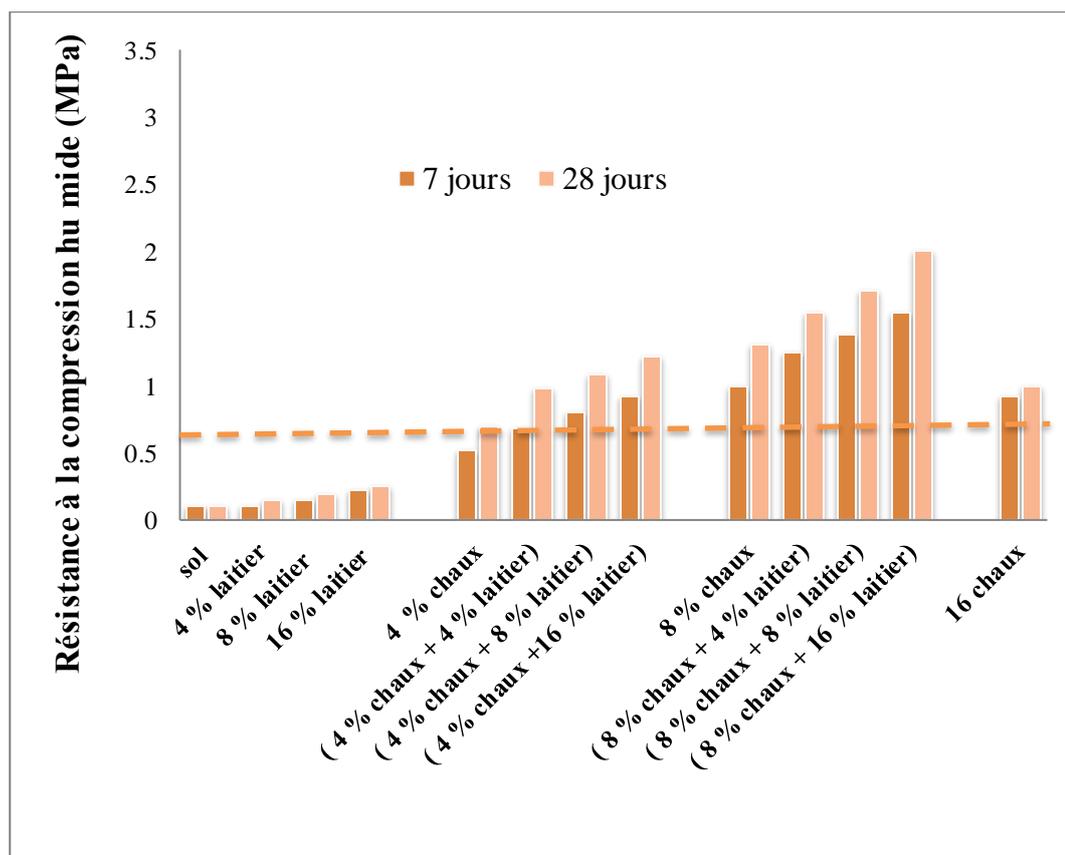


Figure 4.29 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de laitier, de chaux et de mélange (chaux-laitier) ajoutée et le temps de cure.

Une évolution similaire de la résistance à la compression en fonction de la quantité de laitier, de chaux et du mélange (chaux – laitier) à 7 et 28 jours est observée. Une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la quantité de chaux seule jusqu'à une valeur optimale et avec l'augmentation de la quantité de laitier seul dans les échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % et 8 % de chaux à 7 et 28 jours, est observée. Les plus grandes valeurs de la résistance humide sont obtenues après une cure de 28 jours. Néanmoins, les valeurs de la résistance humide sont inférieures à celles à l'état sec à 7 jours

et 28 jours. L'ensemble des échantillons traités présentent des valeurs de résistances inférieures à 2 MPa. Par contre, l'ensemble des échantillons traités à 8 % de chaux et ceux traités à 8 % de chaux 4 %, 8 % et 16 % de laitier présentent des valeurs de résistance humide supérieures à 1 MPa. Néanmoins, les valeurs de résistance humide des échantillons traités restent supérieures à ceux des échantillons de terre non traités.

-Effet du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux

La figure 4.30 présente l'effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la résistance à la compression sèche après une cure de 7 jours et 28 jours.

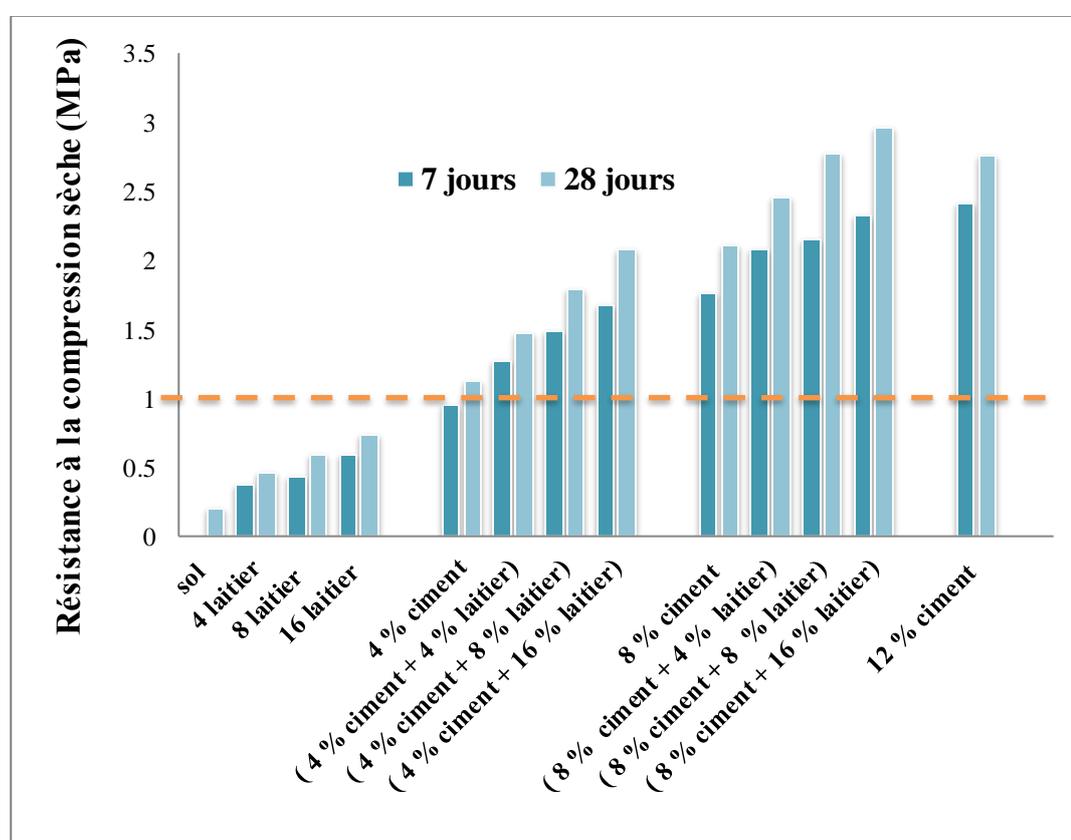


Figure 4.30 : Variation de la résistance à la compression sèche de terre à base de sol argileux en fonction de la quantité, ciment et mélange (ciment-laitier) ajoutée et le temps de cure.

La résistance à la compression de la terre à base de sol argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. Plus la teneur en ciment est élevée, plus la résistance est importante. L'amélioration de la résistance de la terre est due à la solidification de ses particules, par la composition du matériau cimentaire et des cristaux. Ces cristaux sont

directement corrélés au temps de durcissement et se développent après l'introduction du stabilisateur dans le mélange. L'évolution des liaisons entre les particules et les cristaux dans le mélange, entraîne à l'augmentation de la résistance.

Pour le mélange (ciment -laitier), les résultats montrent l'augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en laitier dans le mélange à 7 et 28 jours de cure pour les échantillons de terre traités à 4 et 8% de ciment. Cette augmentation est d'autant plus prononcée que le temps de cure et la quantité de ciment sont augmentés. Par conséquent, plus le dosage de ciment et de laitier est élevé et plus le temps de cure est long, plus la résistance des échantillons de terre traités est forte. Cette amélioration significative de la résistance due à la stabilisation mixte avec du ciment et du laitier de haut fourneau serait le résultat d'une réaction chimique entre le calcium, la silice et l'alumine dans les minéraux argileux pour former des aluminates et des silicates complexes. En effet, ces aluminates et silicates confèrent aux blocs de terre une résistance ~~mécanique~~ élevée. Les échantillons qui ont donné les meilleurs résultats sont ceux qui ont été stabilisés avec 8 % de ciment et 16 % de laitier ayant subi une cure de 28 jours. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans un autre travail, ayant fait l'objet d'étudier l'effet du laitier de magnésium sur la résistance à la compression du sol stabilisé au ciment [214-215].

-Effet du ciment, du mélange (ciment – laitier) sur la résistance à la compression humide des échantillons de terre à base de sol argileux

La figure 4.31 montre l'effet du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux après une période de cure de 7 jours et 28 jours.

L'imbibition diminue la résistance à la compression pour tous les échantillons traités comparée à celle obtenue à l'état sec. En général, une augmentation de la résistance à la compression humide avec l'augmentation de la teneur en ciment et de la teneur en laitier contenues dans le mélange (ciment – laitier), pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de ciment est observée. Mise à part les échantillons traités à 12% de ciment, 4% de ciment plus 16% de laitier, l'ensemble des échantillons de terre traités avec 8% de ciment et mélangés avec différents teneurs en laitier présentent une résistance à la compression humide supérieure à 1 MPa, après 28 jours de cure la valeur minimale recommandée pour les blocs de terre comprimée. Néanmoins, ces valeurs restent supérieures à celles obtenues pour les échantillons de terre non traités.

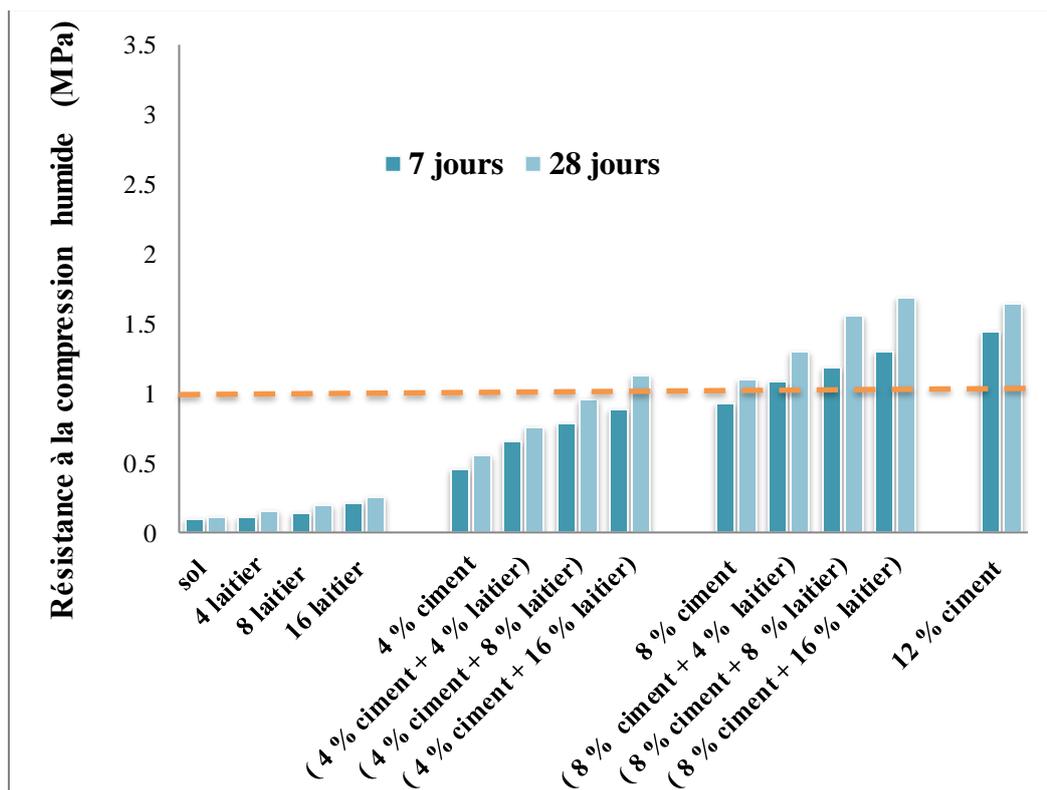


Figure 4.31 : Variation de la résistance à la compression humide de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de ciment et de mélange (ciment-laitier) ajoutée et le temps de cure.

-Effet de la chaux et du mélange (chaux-fibres en paille de blé) sur la résistance à la compression sèche des échantillons de terre à base du sol argileux

La figure 4.32 montre l'effet de la chaux et du mélange (chaux-fibres de paille de blé) sur la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux après une période de cure de 7 jours et 28 jours.

Les résultats ne montrent aucun gain appréciable de résistance avec l'ajout des fibres au mélange (terre - chaux) pour la terre à base de sol argileux traitée à 4 % et 8 % de chaux. Une tendance non appréciable, vers une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres de 0 % à 0.75 %, puis une diminution au-delà de cette teneur, pour la terre traitée à 4 % et 8 % de chaux, à 7 jours et 28 jours de cure, est observée. Le gain de résistance par rapport à la terre non traitée est principalement dû à l'action de la chaux (formation de silicate de calcium hydraté et d'aluminate hydraté). Il est clair que la teneur en paille, en présence de chaux, ne semble pas avoir d'effet sur les caractéristiques de résistance des blocs de terre à base de sol argileux. Des échantillons traités avec 8% de

chaux et renforcés avec (0,5 %, 0,75 % et 1%) de fibres montrent des valeurs de résistance à la compression supérieures à 2 MPa.

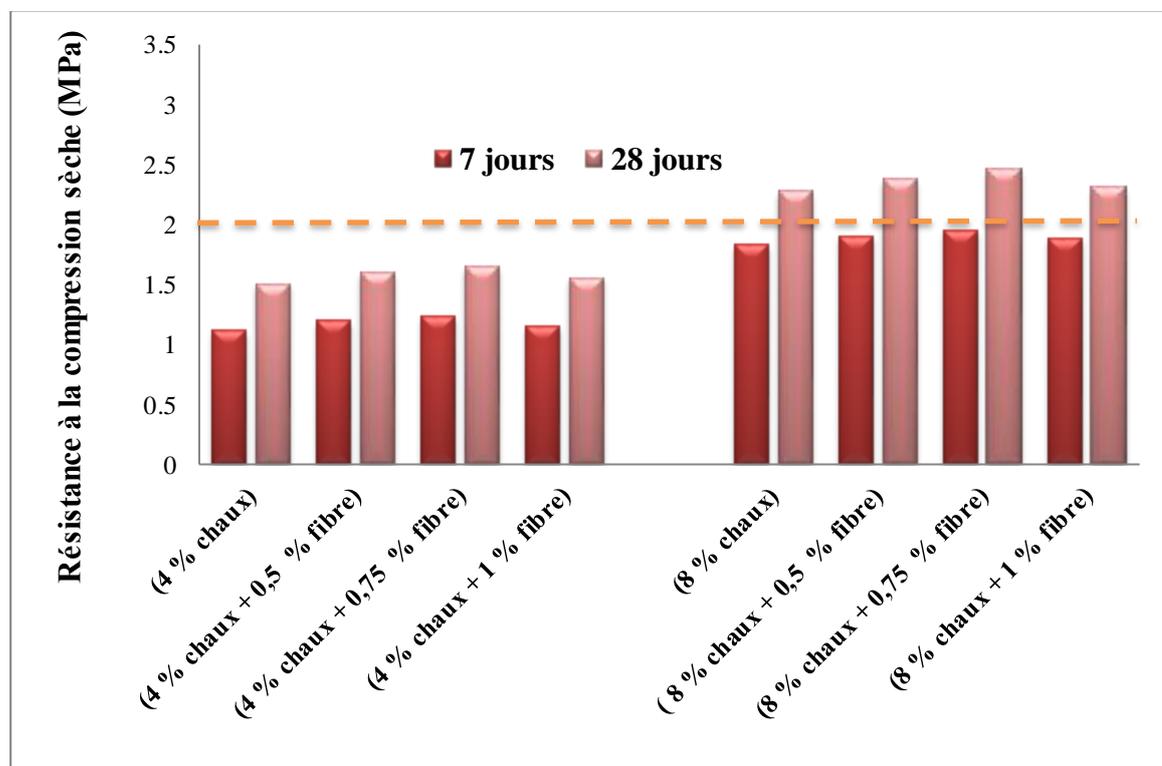


Figure 4.32 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la chaux et la quantité de mélange (chaux-fibres de paille de blé) ajoutée et le temps de cure.

-Effet de la chaux et du mélange (chaux – fibres de paille de blé) sur la résistance à la compression humide des échantillons de terre à base du sol argileux

Les résultats de la variation des valeurs de la résistance à la compression humide, en fonction de la quantité de chaux et celle des fibres rajoutées au mélange (terre – chaux), pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de chaux sont donnés dans la figure 4.33.

Comparé aux valeurs des résistances obtenues à l'état sec, les valeurs des résistances obtenues à l'état humide sont inférieures à celles obtenues à l'état sec pour l'ensemble des échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de chaux et ceux mélangés avec 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres à 7 jours et 28 jours. Les échantillons traités à 8 % de chaux et ceux mélangés avec 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres présentent des valeurs de la résistance à la compression supérieures à 1 MPa.

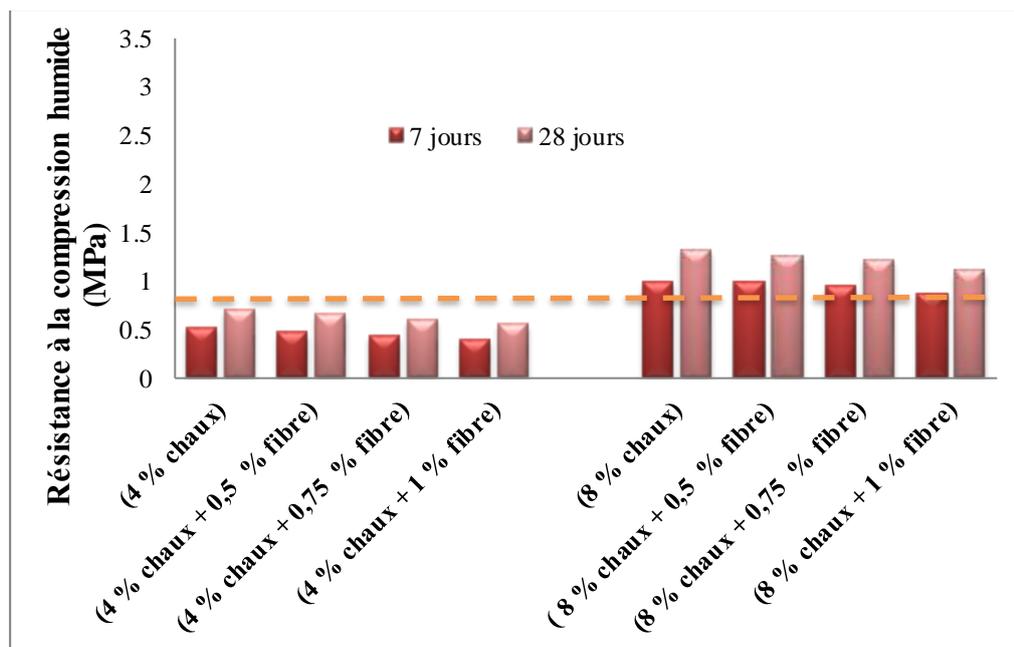


Figure 4.33 : Variation de la résistance à la compression sèche de la terre à base de sol argileux en fonction de la quantité de mélange (chaux-fibre en paille de blé) ajoutée et le temps de cure.

-Comparaison entre les résultats obtenue pour la résistance à la compression de la terre à base de sol argileux traité à la chaux, au ciment et au mélange (chaux/ou ciment-laitier)

L'effet de l'ajout du ciment seul, de la chaux seule et des mélanges (ciment - laitier) (chaux -laitier) sur la résistance à la compression à l'état sec à 28 jours de cure est donné dans la figure 4.34.

Comme le montre la figure 4.34, dans le cas d'une terre à base de sol argileux, l'augmentation de la résistance est plus prononcée avec le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier) qu'avec le ciment et le mélange (ciment - laitier), car le traitement à la chaux s'effectue en modifiant la structure interne de la terre à base de sol argileux (réaction pouzzolanique) tandis que le ciment hydraté pénètre dans la terre ~~le sol~~ argileuse qui, en durcissant, la rend plus résistante. Comme les particules d'argile sont plus fines que les particules de ciment, ce dernier pénètre à peine dans les sols argileux, c'est pourquoi les résistances qui se développent dans les mélanges terre à base de sol argileux - chaux sont plus importantes que celles développées dans les mélanges sol argile - ciment.

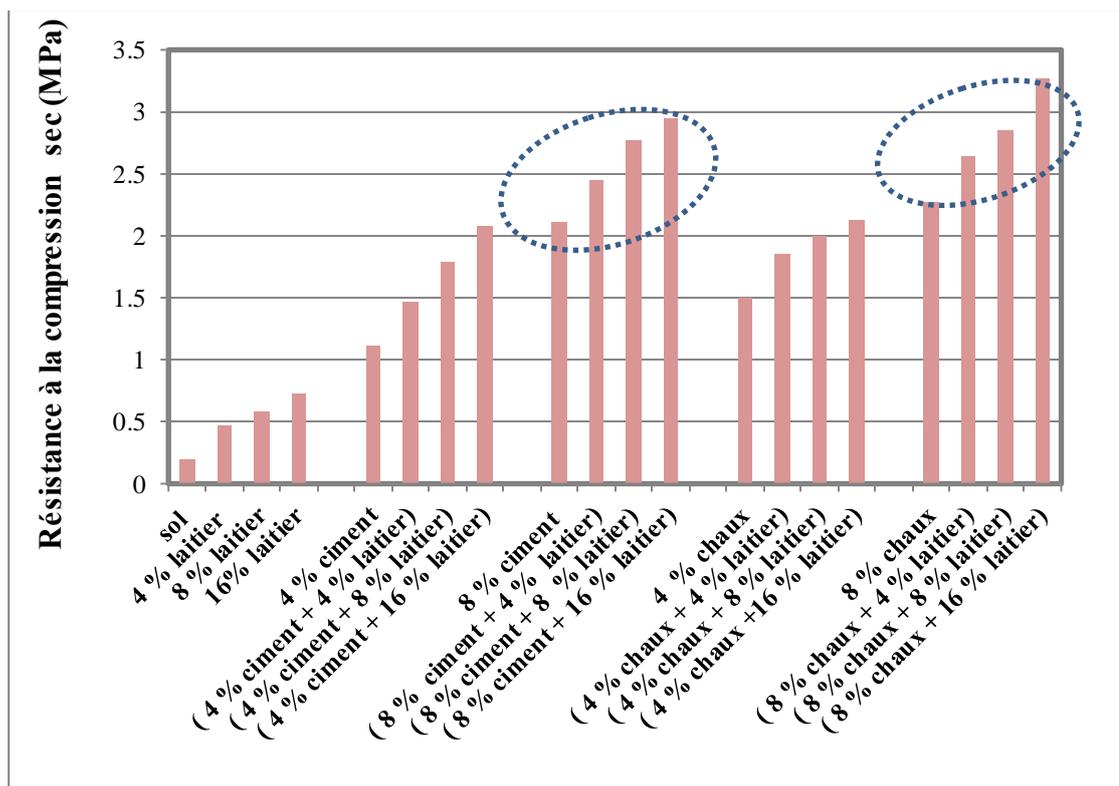


Figure 4.34 : Comparaison entre l'effet du mélange (chaux –laitier) et du mélange (ciment – laitier) sur la résistance à la compression de la terre à base de sol argileux.

4.3.2. Effet des ajouts sur la durabilité

4.3.2.1. Effet des ajouts sur les cycles humidification-séchage

-Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la perte de poids

La figure 4.35 montre l'impact du dosage de laitier, de la chaux et du mélange (chaux-laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux traitée après les cycles d'humidification et de séchage.

Les résultats montrent que tous les spécimens non traités et traités au laitier après une cure de 7 jours et 28 jours présentent une perte de poids de 100%. Cela signifie que les spécimens représentant ces mélanges se sont complètement détériorés avant la finalisation des 12 cycles de l'essai. Lorsque l'eau entre et sort du réseau de pores de l'échantillon pendant le cycle, les parois des pores sont soumises à une pression capillaire et subissent un effondrement.

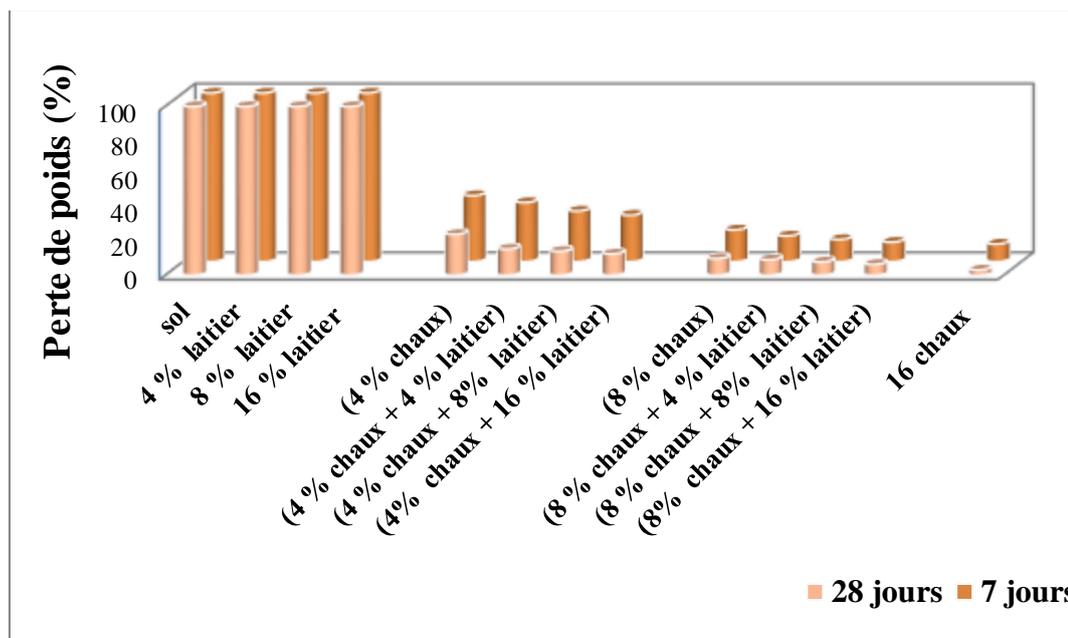


Figure 4.35 : Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux - laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux.

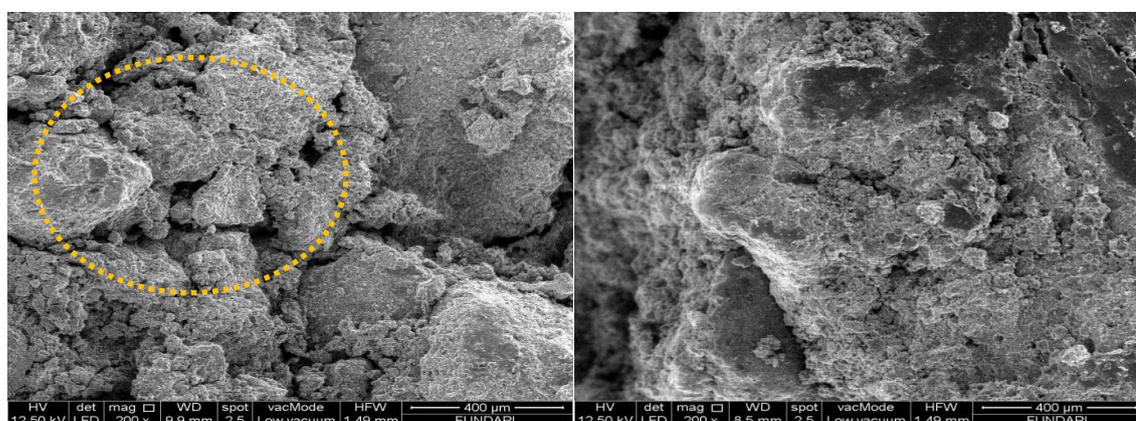
Contrairement au laitier, l'ajout de chaux aux échantillons de terre à base de sol argileux, entraîne une réduction de la perte de poids. Cette réduction, augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et la période de cure. L'utilisation de la chaux diminue et réduit la propagation des fissures par formation de nouveaux hydrates suite à la réaction pouzzolanique, ce qui induit à une meilleure résistance, des échantillons de terre à base de sol argileux traités à l'action de la perte de poids. De plus, la prolongation de la cure jusqu'à 28 jours permet à la réaction pouzzolanique de se poursuivre, ce qui donne à l'échantillon de terre une meilleure résistance à la perte de poids. Ces résultats confirment encore, ce qui a été rapporté dans la littérature sur l'effet de la chaux sur les cycles humidification – séchage des sols argileux [84, 79].

Les résultats révèlent que l'utilisation d'une combinaison (chaux –laitier) a un effet encore plus efficace que l'utilisation de la chaux seule sur la réduction de la perte du poids. Cela est d'autant plus important en augmentant la teneur en chaux et en laitier dans le mélange (chaux – laitier), pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 4 % et 8 % de chaux. La perte de poids la plus importante est obtenue dans les mélanges contenant 4 % de chaux, tandis que les éprouvettes contenant 8 % de chaux et 16 % de laitier présentent la plus faible valeur de la perte de poids. En général, l'utilisation de matériaux pouzzolaniques, tels que le laitier activé à la chaux, est suffisamment efficace pour

empêcher la détérioration des échantillons de terre à base de sol argileux soumis à des cycles d'humidification et de séchage. Le laitier, matériau pouzzolanique, contient de la silice réactive et en réagissant avec la chaux en présence d'eau, implique la formation du C-S-H, donnant naissance à un matériau mécaniquement solide et durable.

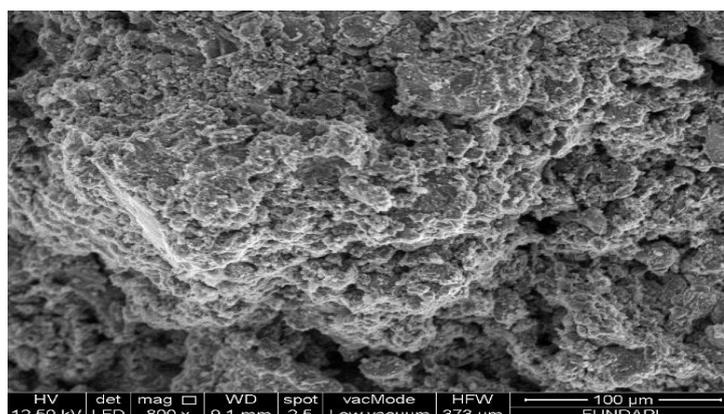
En outre, seules les valeurs de perte de poids à 28 jours pour les échantillons de terre à base de sol argileux, traités avec 8 % de chaux ceux traités avec un mélange de 8 % de chaux et de laitier, sont inférieures à 10 %, limite maximale de perte de poids recommandée.

L'observation au MEB de la terre à base de sol argileux non traitée et traitée est présentée dans la figure 4.36.



(a)

(b)



(c)

Figure 4.36 : Photos de lame mince observées au Microscopie électronique à balayage d'échantillons de terre à base de sol argileux
 a-Terre à base de sol argileux. b- Terre à base de sol argileux+8 % de chaux. c-Terre à base de sol argileux +8 % chaux+16 % laitier.

D'après cette photo de MEB, on constate que le traitement à la chaux et au mélange (chaux - laitier) a sensiblement modifié la texture de la terre. En effet, le nombre et la taille des pores diminuent ; les pores sont connectés et les agrégats de la terre à base de sol argileux traitée à la chaux sont plus petits et forment un ensemble plus compact par rapport à un échantillon de terre non traité.

-Effet du ciment et du mélange (ciment-laitier) sur la perte de poids

Les résultats de la perte de poids pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités au ciment et au mélange (ciment-laitier) sont présentés à la figure 4.37.

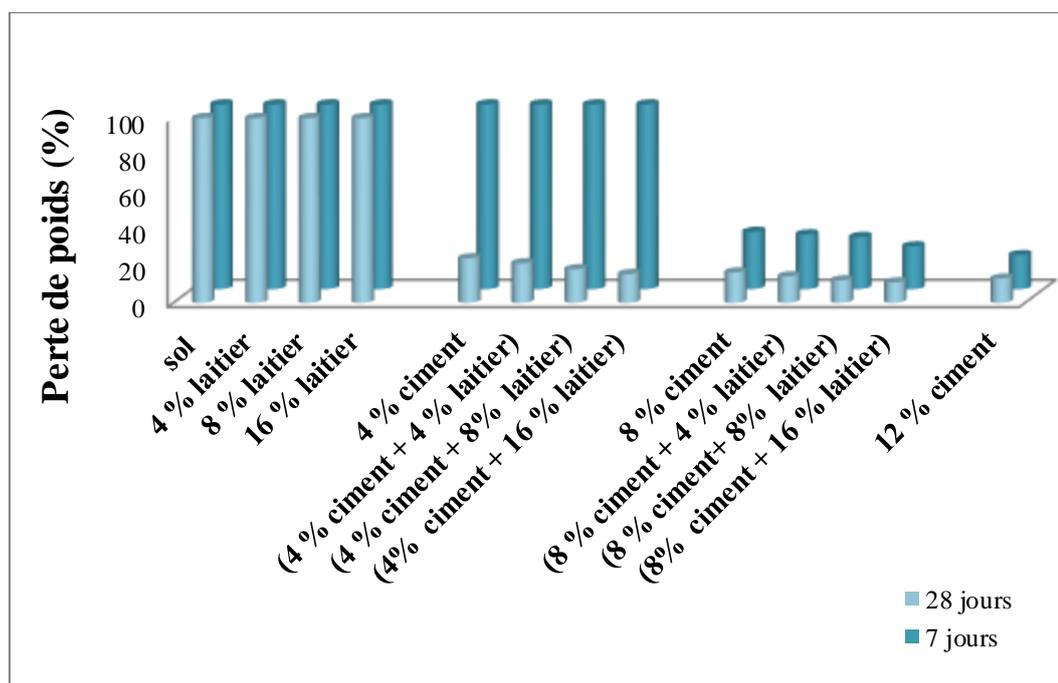


Figure 4.37 : Effet du ciment, du mélange (ciment - laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux et la période de cure.

Pour l'effet du ciment à 7 jours de cure, les résultats montrent que les échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % de ciment et ceux traités, à 4 % de ciment et mélangés à 4 %, 8 % et 16 % de laitier, montrent des dommages importants, en présentant des pertes de poids appréciables (100%). Cependant, en augmentant le pourcentage de ciment de 4 %, à 8 % et 12 %, une meilleure performance des échantillons de terre à base de sol argileux au cycle humidification- séchage, est obtenue. Cette performance se manifeste par une diminution appréciable de la perte de poids. Cette diminution est d'autant

plus appréciable avec l'ajout d'une quantité de laitier de 4 % à 16 %, pour les échantillons de terre à base de sol argileux traités à 8 % de ciment.

Le prolongement de la période de cure de 7 jours à 28 jours engendre une meilleure performance des échantillons de terre à base de sol argileux, traités à 4 % de ciment et ceux traités à 4% de ciment et mélangés avec 4 %, 8 % et 16 % de laitier. Une diminution plus importante est observée avec l'ajout du laitier dans le mélange (terre – ciment). Il en est de même pour les échantillons de terre à base de sol argileux, cimentés à 8 %, où une diminution supplémentaire de la perte de poids est enregistrée, elle est d'autant plus appréciable avec l'ajout d'une quantité de laitier dans le mélange (terre-ciment). Néanmoins, la perte de poids, engendrée par ces combinaisons, est supérieure à la valeur minimale recommandée (10 %).

- Comparaison entre le traitement à la chaux, au ciment et au mélange (chaux/ou ciment-laitier) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux.

La variation des valeurs de perte de poids de la terre à base de sol argileux, traitée à la chaux, au ciment et au mélange (chaux/ou ciment-laitier) après une cure de 7 et 28 jours, est donnée dans la figure 4.38.

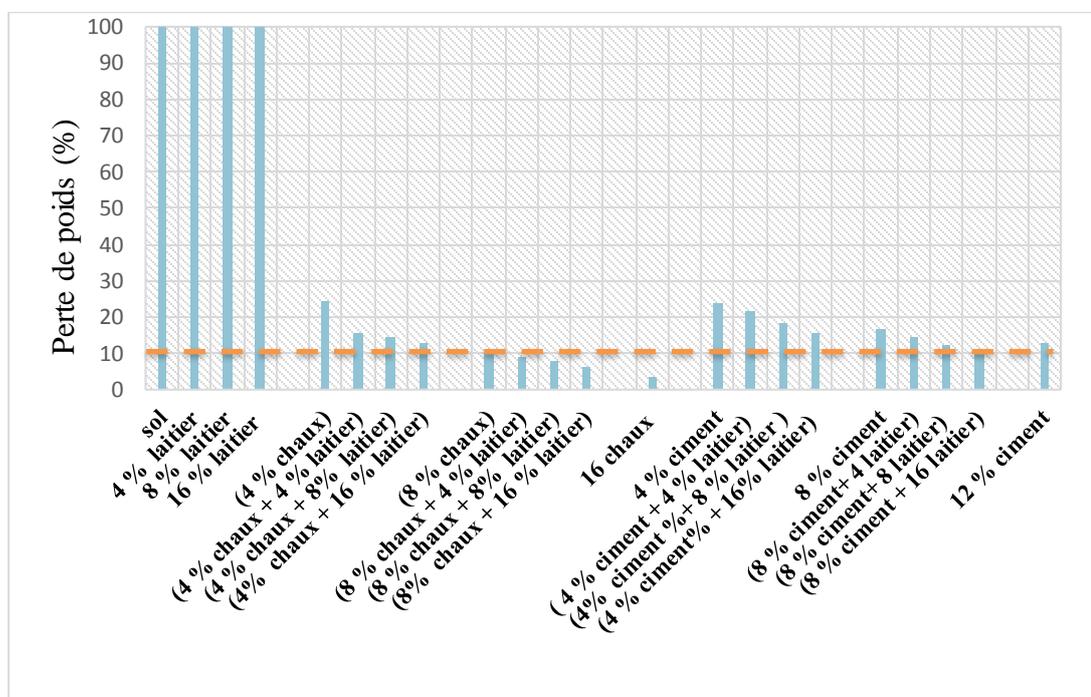


Figure 4.38 : Variation de la perte de poids de la terre à base de sol argileux traitée au laitier, à la chaux, au ciment et au mélange (chaux/ou ciment-laitier) après 28 jours de cure.

Comme le montre la figure 4.38 dans le cas des échantillons de terre à base de sol argileux, l'augmentation de la résistance à la perte de poids est plus prononcée avec le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier) qu'avec le traitement au ciment et au mélange (ciment - laitier) à 28 jours. L'échantillon de sol traité à 8 % de chaux plus 16 % de laitier montre la perte de poids la plus faible.

-Effet des fibres en paille de blé et du mélange (chaux-fibres de paille de blé)

L'influence de la fibre en paille de blé, de la chaux et du mélange (chaux- fibres en paille de blé) sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux après l'essai humidification - séchage est illustré dans la figure 4.39.

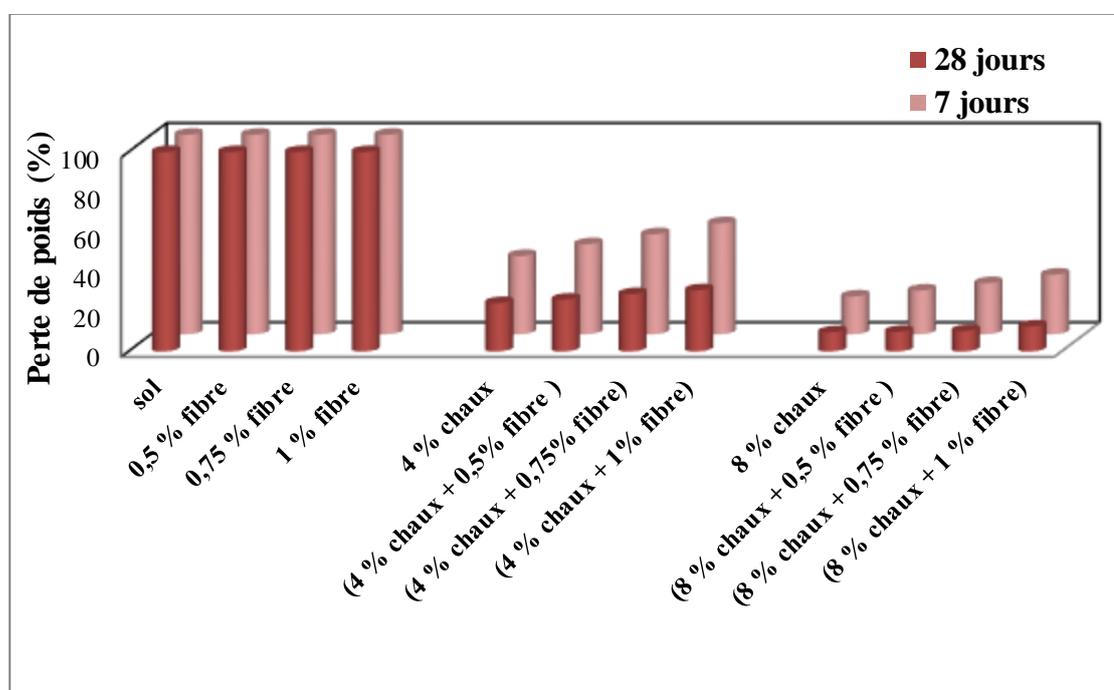


Figure 4.39 : Effet de la fibre en paille de blé, chaux et mélange (chaux – fibres de paille de blé) et la cure, sur la perte de poids de la terre à base de sol argileux.

Comme il peut se voir sur la figure 4.39, l'augmentation de la quantité de fibres seules n'a pas d'effet sur la résistance au cycle humidification – séchage. Comme pour le cas des échantillons de terre à base de sol argileux non traités, les résultats montrent une perte de poids de 100 %, pour les échantillons de terre traités à 0.5 %, 0.75 % et 1 % de fibres. L'augmentation de la quantité de chaux induit une diminution considérable de la perte de poids des échantillons de terre. Cette augmentation est d'autant plus importante, avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure. Par contre, l'incorporation de fibres dans le mélange (chaux – terre) entraîne une évolution inverse de la perte de poids

des échantillons de terre à base de sol argileux à 4 % et 8 % de chaux. Une augmentation de la perte de poids pour les échantillons de terre avec l'augmentation de la quantité de fibres dans le mélange (terre – chaux) à 7 jours et 28 jours pour les échantillons de terre traités à 4 % et 8 % de chaux est observée. Ce comportement s'explique par le fait que l'ajout de fibres à la matrice terre – chaux génère la création de pores et de fissures, figure 4.40.

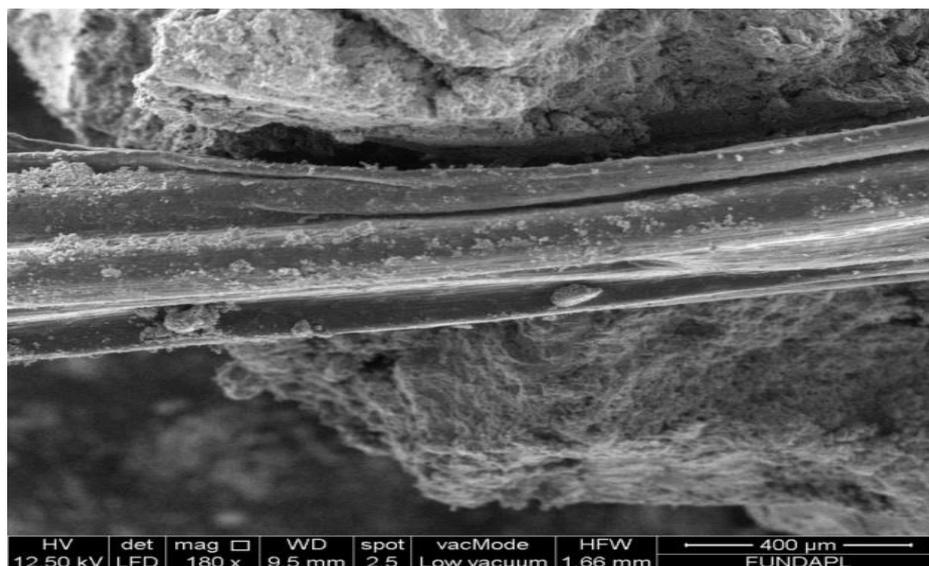


Figure 4.40 : Microscopie électronique à balayage pour la terre à base de sol argileux renforcé par la paille de blé.

Dans la phase de saturation, la création des fissures permet l'infiltration de l'eau. De plus, la nature hydrophile des fibres en paille de blé favorise le développement des tensions internes à l'interface fibres/matrice et peut éventuellement conduire à un endommagement de la matrice et à une dégradation importante des propriétés initiales.

-Corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids de la terre à base de sol argileux

La corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids de la terre à base de sol argileux est donnée dans la figure 4.41.

Comme dans le cas des échantillons de terre à base de sol limoneux, les résultats concernant la terre à base de sol argileux montrent une corrélation négative entre la résistance à la compression et la perte de poids. Le coefficient de corrélation des blocs de sol argileux stabilisés au mélange (chaux-laitier) et au mélange (ciment-laitier) est

respectivement de 0.972 et 0.999. Ces valeurs confirment qu'il existe une forte corrélation entre les deux propriétés. Par exemple, l'addition de 0 à 16 % de laitier à la terre traitée, à 8 % de chaux à 28 jours entraîne une augmentation de la résistance à la compression de 2.27 MPa à 3.27 MPa (soit une augmentation de 44.05 %) et entraîne également une réduction de la perte de poids de 32 %.

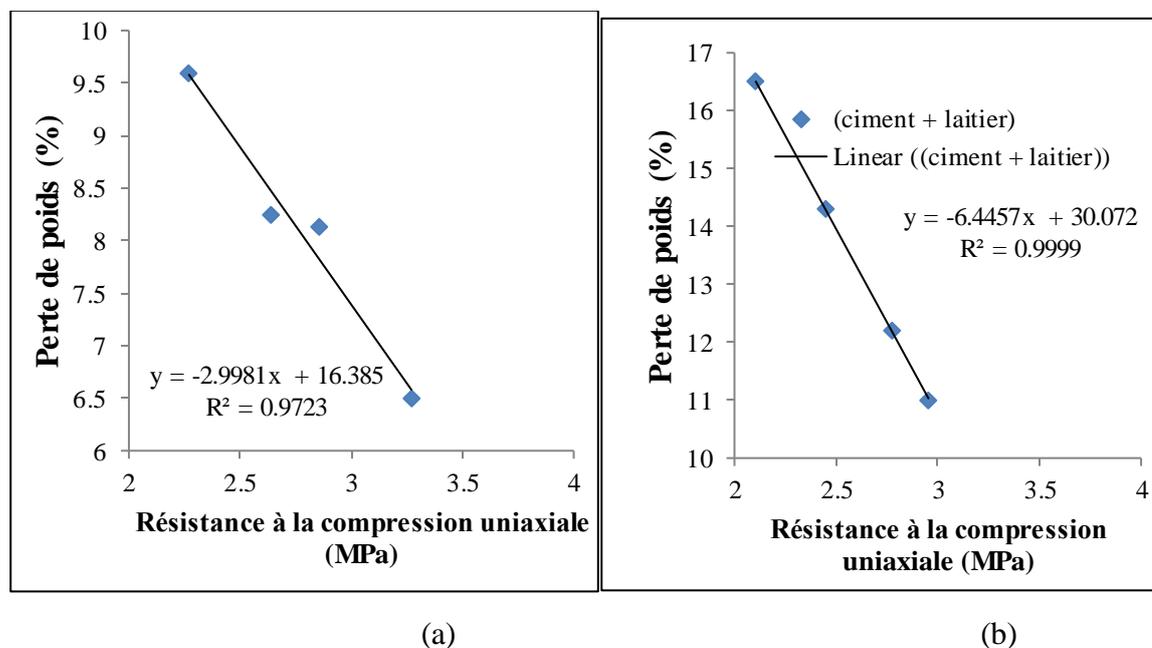


Figure 4.41 : Corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids de sol argileux.

a- (chaux-laitier). b- (ciment-laitier).

4.3.2.2. Effet des ajouts sur l'absorption capillaire

Le deuxième paramètre important de la durabilité est la mesure de la pénétration de l'eau par action capillaire.

-Effet du laitier, de la chaux et du mélange (chaux - laitier) sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux

L'absorption capillaire des échantillons de terre à base du sol argileux traités au laitier, à la chaux et au mélange (chaux- laitier) est donnée dans la figure. 4.42.

Pour ce qui est du rajout de laitier seul, les résultats montrent une diminution de l'absorption capillaire avec l'augmentation de la teneur en laitier à 7 jours. Celle – ci est beaucoup plus prononcée avec l'augmentation de la période de cure de 7 jours à 28 jours.

Comme déjà mentionné dans les sections précédentes, cela s'explique par la non-réactivité du laitier utilisé seul. Il demande un activateur) et/ou milieu alcaline, pour être actif.

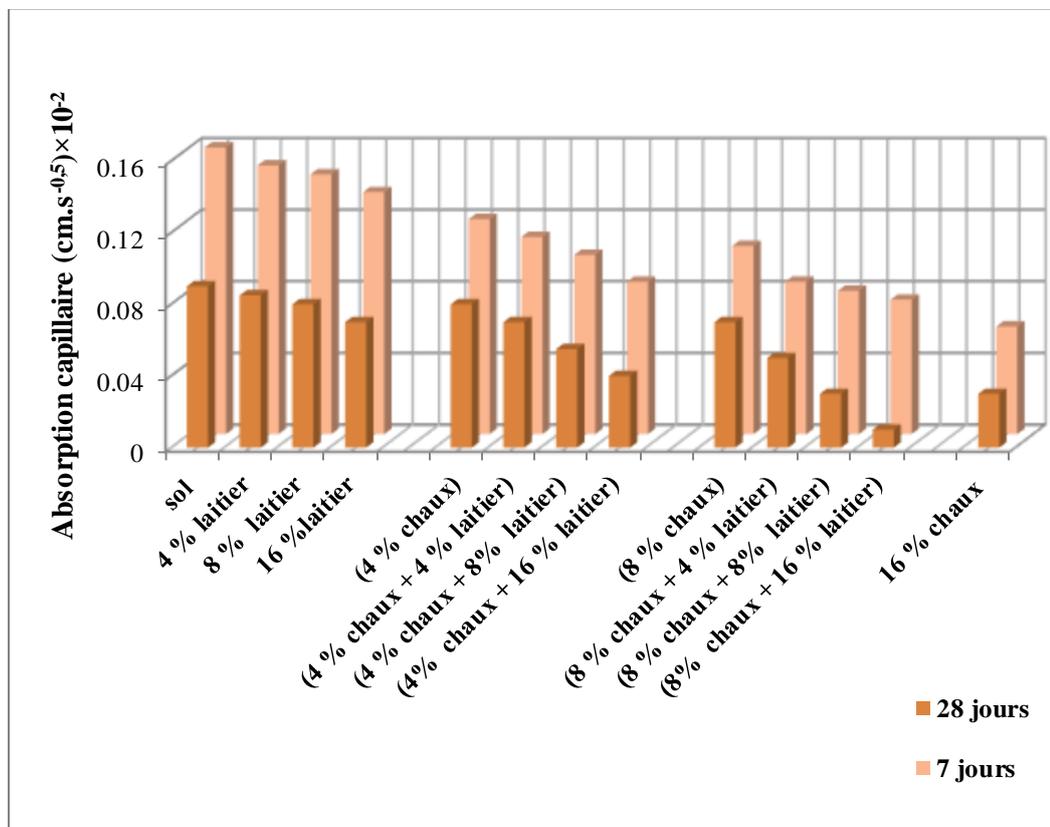


Figure 4.42 : Effet du laitier, de la chaux, du mélange (chaux - laitier) et de la cure sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux.

Une allure similaire dans l'évolution de l'absorption capillaire des échantillons de terre est observée avec l'ajout de la chaux seule ou combinée à 4 %, 8 % et 16 % de laitier. En effet, une diminution de l'absorption capillaire avec l'augmentation de la teneur en chaux et la période de cure est observée. Cette diminution est plus prononcée avec l'ajout d'une quantité du laitier au mélange (terre-chaux) et augmente avec l'augmentation de la quantité du laitier dans les échantillons de terre, traités à 4 % et 8 % de chaux. Il peut être noté, qu'à 28 jours de cure, la combinaison de 8 % de chaux et 16 % de laitier diminue de façon considérable l'absorption capillaire des échantillons de terre à une valeur proche de zéro. Cette diminution est la conséquence des produits cimentaires issus des réactions chimiques après l'ajout de la chaux à un jeune âge et ceux issus de la réaction pouzzolanique avec l'augmentation de la période de cure, comme déjà mentionné précédemment.

- Effet du ciment et du mélange (ciment - laitier) sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux

L'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux traités au laitier, au ciment et au mélange (ciment- laitier) est donnée dans la figure 4.43.

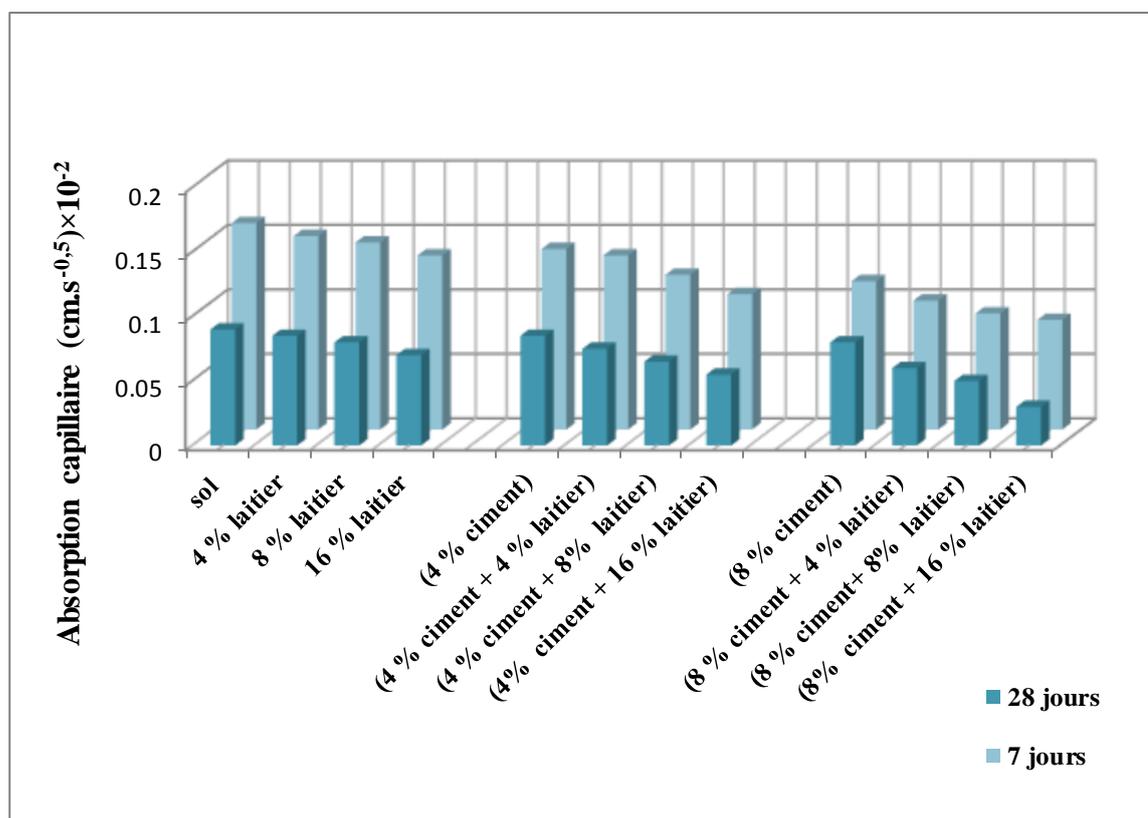


Figure 4.43 : Effet du ciment, du mélange (ciment - laitier) et de la cure sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux.

Les résultats donnés dans la figure 4.43, montrent que l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment et de la période de cure. Cette diminution est moins prononcée que celle des blocs de terre traitée à la chaux. La réduction est principalement attribuée à la formation d'hydrates issus de la réaction pouzzolanique qui ont rempli les vides et ont contribué à la réduction du coefficient d'absorption capillaire.

En ce qui concerne le mélange (ciment-laitier), la diminution de l'absorption capillaire pour les blocs de terre traitée avec le mélange (ciment-laitier) suit approximativement la même allure que celle des blocs de terre, traitée avec le mélange

(chaux - laitier). D'une manière générale, l'utilisation d'additifs minéraux dans les mélanges ternaires avec du ciment et du sol permet de modifier certaines propriétés physiques, ce qui se traduit par une microstructure plus dense et moins poreuse, ce qui peut réduire, voire empêcher la pénétration de l'eau par capillarité dans l'échantillon. En outre, les échantillons de terre à base de sol argileux traités avec un mélange (ciment - laitier) ont une absorption capillaire plus élevée que ceux traités avec un mélange (chaux - laitier).

-Comparaison entre les résultats obtenue

La variation des valeurs de l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux, traitée à la chaux, au ciment et au mélange (chaux/ou ciment-laitier) après une cure de 7 et 28 jours, est donnée dans la figure 4.44.

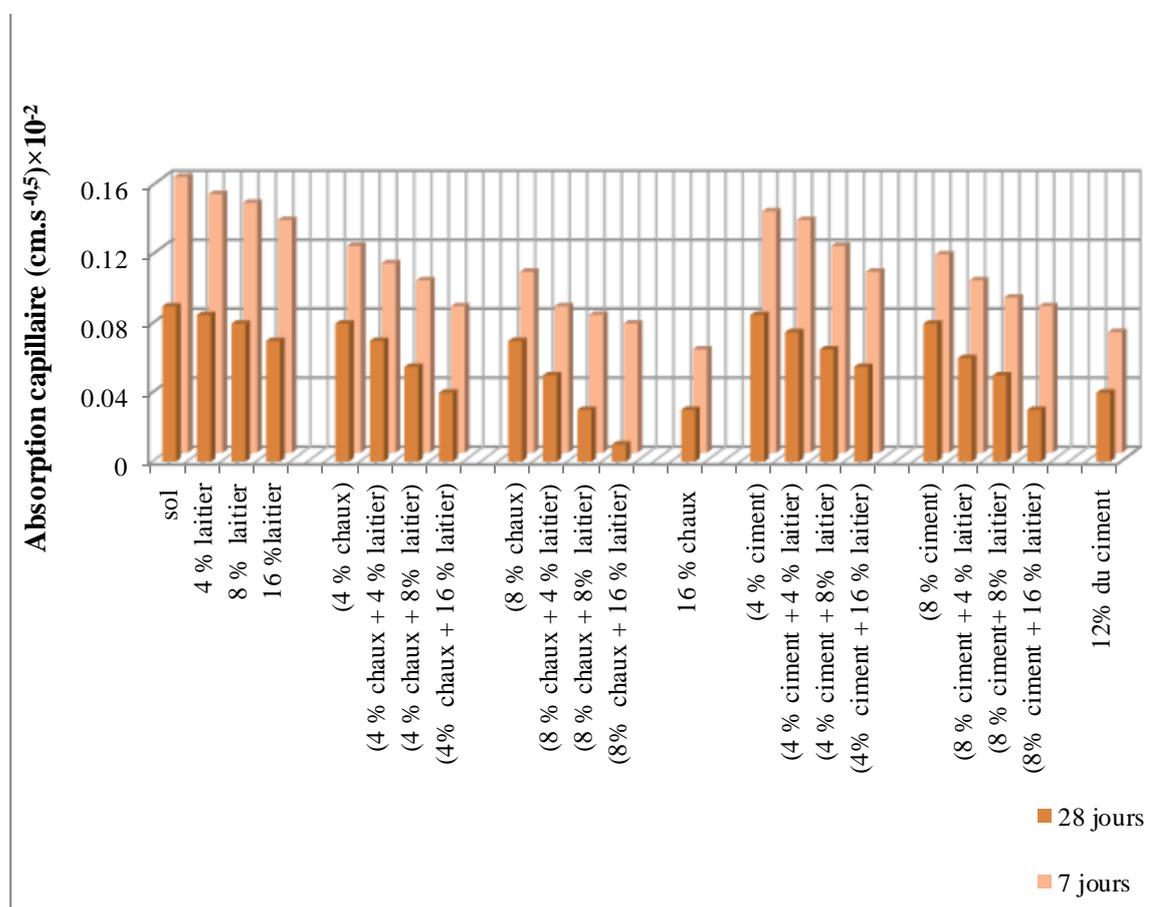


Figure 4.44 : Comparaison entre l'effet de la chaux, du mélange (chaux –laitier), du ciment et du mélange (ciment – laitier) et la cure sur la perte de poids du sol limoneux.

La diminution de l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux est plus prononcée avec la stabilisation au mélange (chaux/laitier) qu'avec la stabilisation au mélange (ciment/laitier) après une période de cure de 28 jours.

-Effet des fibres en paille de blé, et du mélange (chaux – fibres en paille de blé)

L'effet des fibres et du mélange (chaux- fibres) sur l'absorption capillaire de sol argileux est illustré dans la figure 4.45.

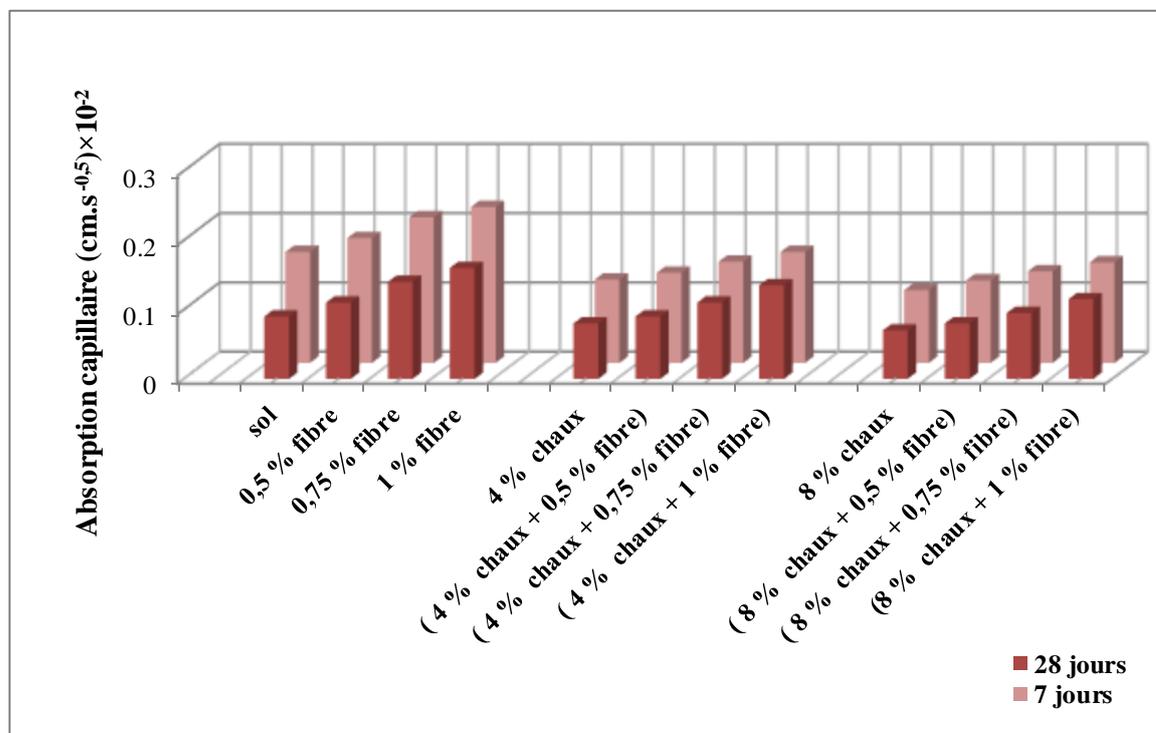


Figure 4.45 : Effet des fibres de paille de blé, du mélange (chaux - fibre) et la cure sur l'absorption capillaire de la terre à base de sol argileux.

Concernant l'ajout de fibres de paille de blé seules, les résultats montrent une augmentation du coefficient d'absorption capillaire avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille de blé à 7 et 28 jours de cure. Cela peut s'expliquer par leur capacité intrinsèque d'absorption d'eau et par le fait que l'addition des fibres entraîne la création de vides au sein des échantillons de terre traités par addition d'une teneur en fibres de paille de blé et par conséquent l'augmentation du coefficient d'absorption capillaire.

Concernant l'ajout d'une teneur en fibres de paille de blé à la terre à base de sol argileux traitée à 4 et 8 % de chaux, une même allure dans l'évolution du coefficient d'absorption capillaire, comme pour le cas d'ajout de fibres en paille de blé seuls, est observée à 7 et 28 jours de cure. Néanmoins, cette augmentation de l'absorption est moins prononcée en augmentant la teneur en chaux, dans le mélange (chaux-fibres en paille de blé), et la période de cure comparée à celle obtenue en utilisant les fibres en paille de blé seules. Cela montre

que la terre à base de sol argileux, stabilisée à la chaux et renforcée avec de la paille de blé, présente une meilleure résistance à l'absorption d'eau. Cela est particulièrement important car les matériaux de construction à base de terre présentent des déficiences lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres travaux ayant fait l'objet d'étudier l'effet des fibres de palmier dattier sur l'absorption capillaire des blocs de terre comprimée [171]. Cette tendance est également cohérente avec les résultats d'études précédentes [167].

4.3.2.3. Effet des additifs sur l'érosion de la terre à base de sol argileux.

Ce test est important pour déterminer comment le bloc de plancher peut résister à l'eau (pluie) lorsqu'il est appliqué à l'extérieur de la surface du mur. La figure 4.46 montre l'influence de différents additifs sur l'érosion des blocs de terre à base de sol argileux.

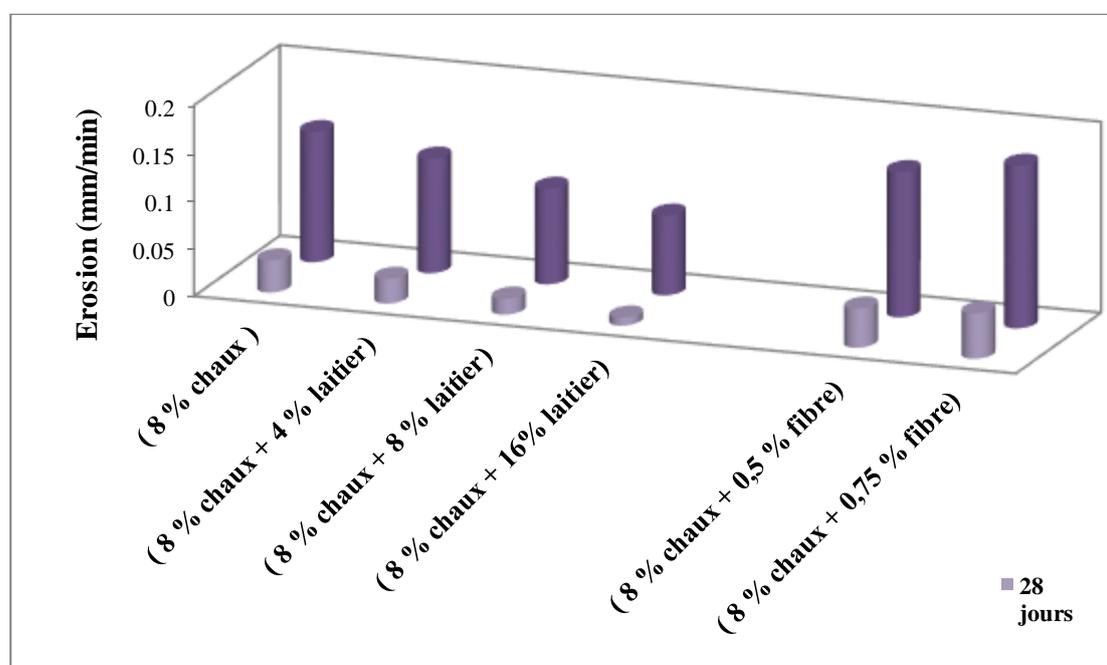


Figure 4. 46 : Effet des différents ajouts sur l'érosion de la terre à base de sol argileux.

Les résultats montrent une réduction de l'érosion de la terre à base de sol argileux avec une augmentation de la teneur en laitier, pour les blocs de terre traitée avec 8 % de chaux. Une réduction supplémentaire est observée avec l'augmentation de la période de cure. L'addition de 4 %, 8 % et 16 % de laitier à 8 % de chaux, entraîne une réduction de 22 %, 50 % et 75 % respectivement après une période de cure de 28 jours.

D'autre part, l'ajout de 0.75 % de fibres en paille de blé au mélange (sol argileux - chaux), augmente le taux d'érosion jusqu'à 41 %, par rapport aux échantillons traités à 8 % de chaux et 0% de fibre. À l'exception des blocs non renforcés qui se sont complètement désintégrés avant l'achèvement du test, tous les blocs de sol traités avec la chaux, le mélange (chaux-laitier) et (chaux-fibres en paille de blé) passent le test d'érosion, toutes les valeurs sont inférieures à la valeur minimale recommandée qui est de 1 mm/min. Cette valeur est une exigence générale pour les murs extérieurs [216]. La figure 4.47 montre les blocs de terre à base de sol argileux après l'essai d'érosion.



(a)

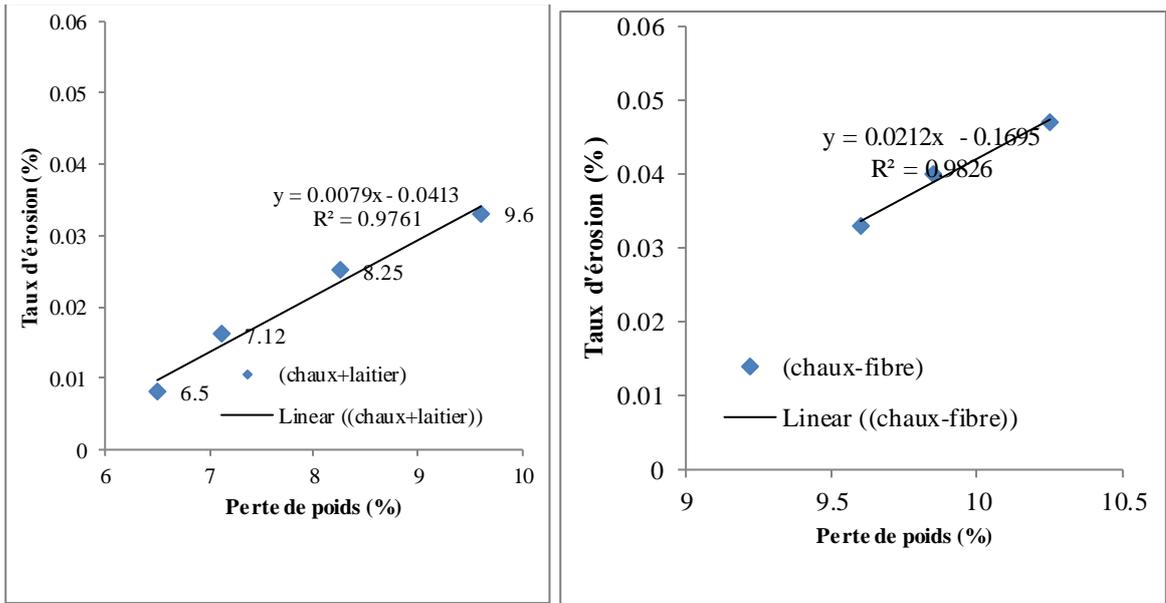
(b)

Figure 4.47 : les blocs de terre à base de sol argileux après l'essai d'érosion.

a- (8 % chaux+ 8 % laitier).

b- (8 % chaux + 0.75 % fibre).

La corrélation entre la perte de poids et le taux d'érosion est présentée dans la figure 4.48. Les résultats montrent une excellente corrélation entre les valeurs. À titre d'exemple, le coefficient de corrélation est de 0,97, 0,974 pour le mélange (chaux-laitier), (chaux-fibres de paille de blé) respectivement. Il existe donc une bonne corrélation de sorte qu'il est possible de vérifier la durabilité des blocs avec un seul de ces tests.



(a) (b)
 Figure 4.48 : Corrélation entre la perte de poids et le taux d'érosion de la terre à base de sol argileux.
 a-(chaux-laitier). b- (chaux-fibre).

4.3.2.4. Effet des additifs sur l'abrasion de la terre à base de sol argileux

Les résultats du test d'abrasion effectué sur les blocs de terre à base de sol argileux traitée, à 4 % et 8 % de chaux plus 4 %, 8 % et 16 % de laitier et 8 % de chaux plus 0.5 % et 0.75 % de fibres à 7 et 28 jours de cure, sont regroupés dans la figure 4.49.

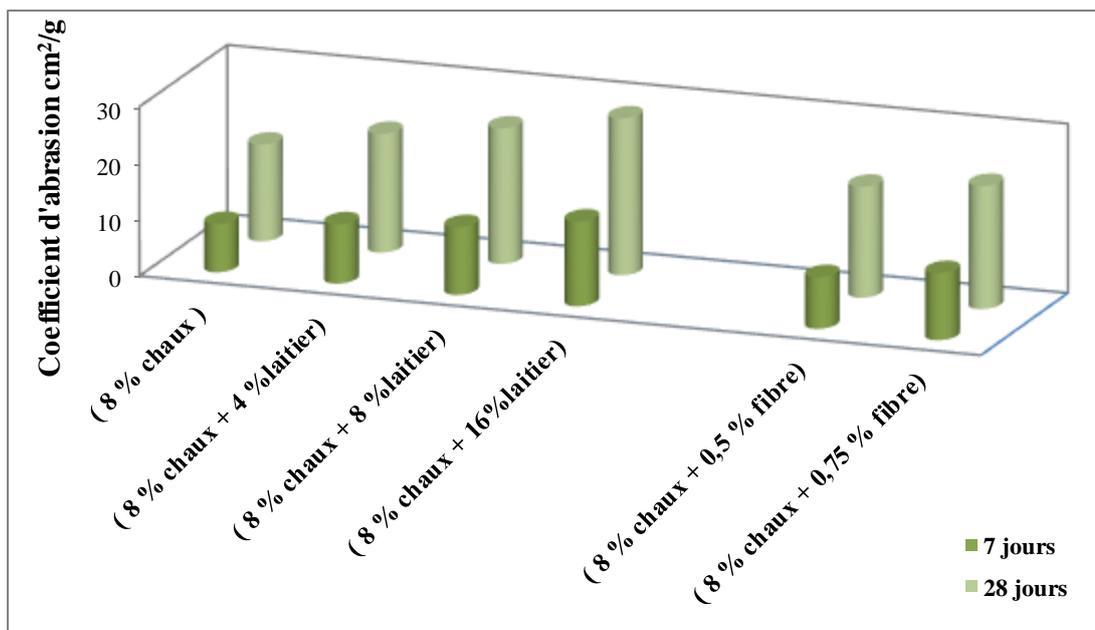


Figure 4.49 : Effet des différents ajouts sur la résistance à l'abrasion des blocs de terre à base de sol argileux à 7 et 28 jours de cure.

Comme il peut se voir sur la figure, la résistance à l'abrasion augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier et celle des fibres en paille de blé respectivement dans le mélange (chaux – laitier) et (chaux-fibres en paille de blé) à 7 jours et 28 jours de cure. Néanmoins, les valeurs du coefficient d'abrasion, pour les blocs traités au mélange (chaux – laitier), sont supérieures à celles obtenues par le mélange (chaux – fibres), pour les deux périodes de cure de 7 et 28 jours. Les valeurs les plus élevées du coefficient d'abrasion sont obtenues après 28 jours de cure. Malgré cette différence, l'addition de fibres au mélange (terre – chaux), entraîne une augmentation de la résistance à l'abrasion, comparée à l'action de la chaux seule, dans le mélange. Cela est bien observé sur les échantillons traités à 8 % de chaux plus 0.75 % de fibres en paille de blé, à 7 jours et 28 jours de cure. En effet, l'augmentation de la cure, entraîne un développement plus important dans les liaisons cimentaires, ce qui induit une bonne adhésion des fibres avec la matrice du bloc à base de sol argileux traité et, par conséquent, une plus grande résistance est développée [152].

La corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à l'abrasion des sols limoneux est illustrée dans les figures 4.50.

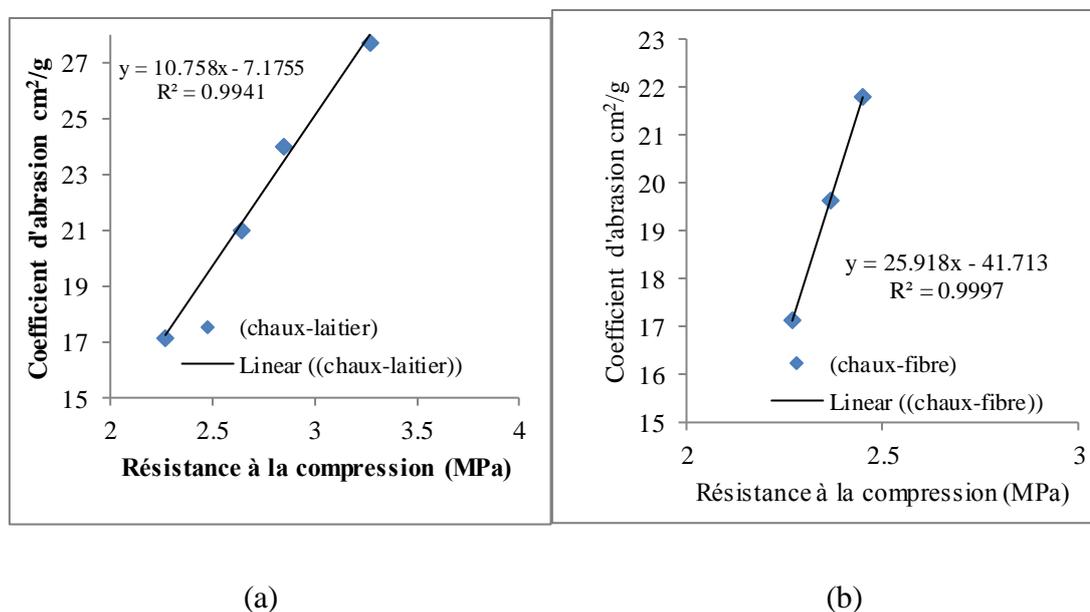


Figure 4.50 : corrélation entre la résistance à la compression et à l'abrasion de la terre à base de sol argileux.

a-(chaux-laitier). b- (chaux-fibre).

Les résultats concernant la terre à base de sol argileux montrent une corrélation positive entre la résistance à la compression et le coefficient d'abrasion. Le coefficient de corrélation des blocs de sol argileux stabilisés au mélange (chaux-laitier) et au mélange

(chaux- fibres en paille de blé) est respectivement de 0.994 et 0.999. Ces valeurs confirment qu'il existe une forte corrélation entre les deux propriétés.

-Effet des additifs sur le gonflement de la terre à base de sol argileux

La figure 4.51 présente l'évolution du gonflement pour les blocs de terre à base de sol argileux en fonction de la teneur des mélanges (chaux - laitier) et (chaux-fibres en paille de blé) à 7 et 28 jours de cure.

Le gonflement des blocs de terre à base de sol argileux diminue avec l'introduction de la chaux. Il convient de noter que les blocs de terre à base de sol argileux non traitée, se sont désintégrés complètement avant la fin du test. Cette évolution dans la diminution augmente encore de façon progressive avec l'ajout d'une quantité de laitier au mélange (chaux – terre) à 7 jours et 28 jours de cure. Elle est proportionnelle à la quantité de laitier rajoutée et à la période de cure. En effet, les blocs traités ayant subi une période de cure à 28 jours présentent les plus faibles valeurs de gonflement. Ce comportement s'explique par l'échange de cations inter-foliaires par des cations de calcium. Cet échange de cations, attribué à la réduction d'aptitude des argiles, a absorbé l'eau. La diminution du gonflement en fonction du temps de cure s'explique par le développement de nouveaux hydrates, résultant de la réaction pouzzolanique. Avec l'ajout du laitier, une nouvelle diminution du gonflement est observée. Dans les blocs de terre traitée à la chaux et au laitier, la structure du squelette peut être formée en raison de la production d'agents cimentaires C-S-H. Ce processus, conduit à la formation de particules plus grossières et limite le gonflement des sols argileux stabilisés [198]. Cette diminution est plus prononcée à mesure que la période de cure s'allonge. Une réduction de 43 %, pour les blocs de terre traité à 8 % de chaux et mélangé avec 16 % du laitier est obtenue, lorsque la période de cure augmente de 7 jours à 28 jours.

Contrairement à l'introduction du laitier dans le mélange (chaux–terre), l'introduction de fibres de paille de blé entraîne une allure inverse. Une augmentation du gonflement est observée à 7 jours et 28 jours de cure. Cette augmentation est d'autant plus importante en augmentant la teneur de paille de blé dans le mélange (chaux – terre). Ces résultats indiquent que l'utilisation de la fibre de paille de blé a un effet négatif sur la réduction du gonflement. Cela est dû, d'une part, à l'effet défavorable de la décomposition des blocs pendant la phase de préparation de l'échantillon, impliquant l'obtention des blocs moins compacts que ceux obtenus lors du mélange (chaux – laitier). De plus, les caractéristiques hydrophiles de la

paille de blé, et la formation des vides dans la matrice des échantillons, ne vont pas s'opposer de façon adéquate à la circulation de l'eau dans le bloc traité, le rendant encore, plus sensible à l'action de l'eau [167].

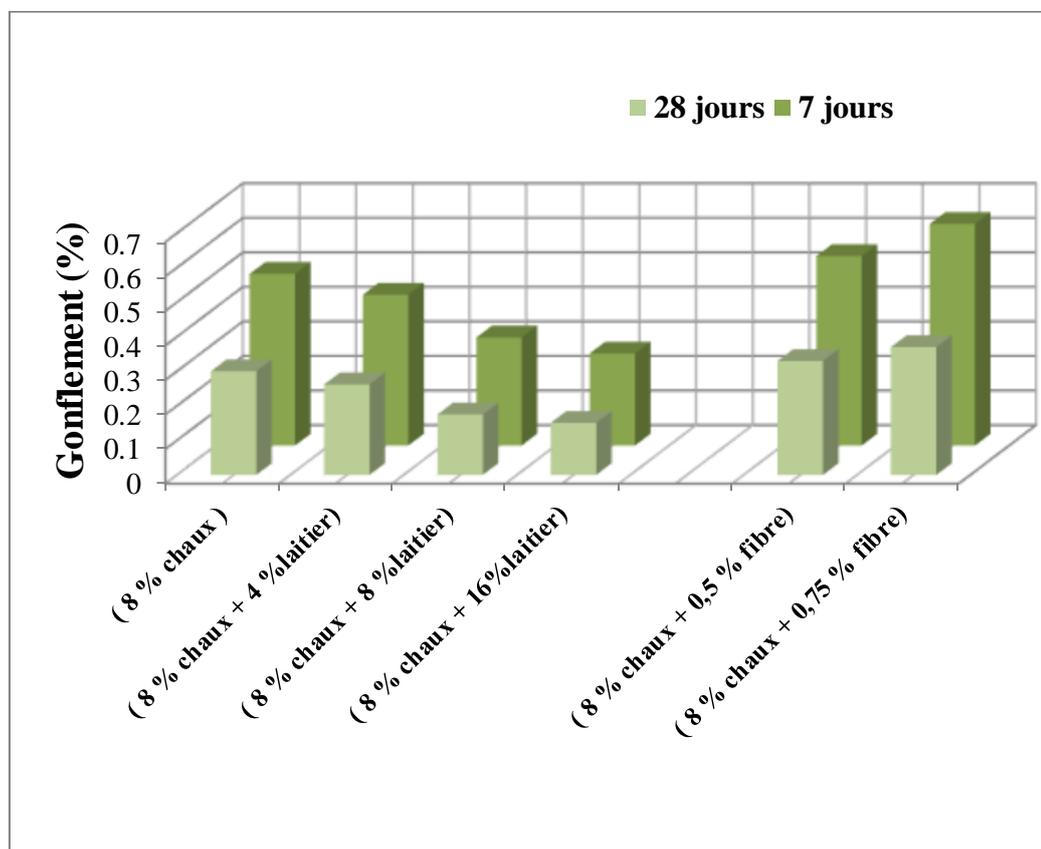


Figure 4.51 : Effet des différents ajouts sur le gonflement de la terre à base sol argileux.

4.3.2.5. Effet des additifs sur le retrait de la terre à base de sol argileux

Le séchage externe est le processus par lequel la teneur en humidité à l'intérieur de l'échantillon tente de s'équilibrer avec le milieu environnant par des processus d'évaporation et de diffusion, ce qui entraîne une modification de la teneur en humidité de l'échantillon [217]. Le retrait dû au séchage, est directement lié à la perte d'humidité dans l'échantillon. L'effet des mélanges (chaux-laitier) et (chaux-fibres) sur le retrait des blocs à base du sol argileux est illustré sur la figure 4.52.

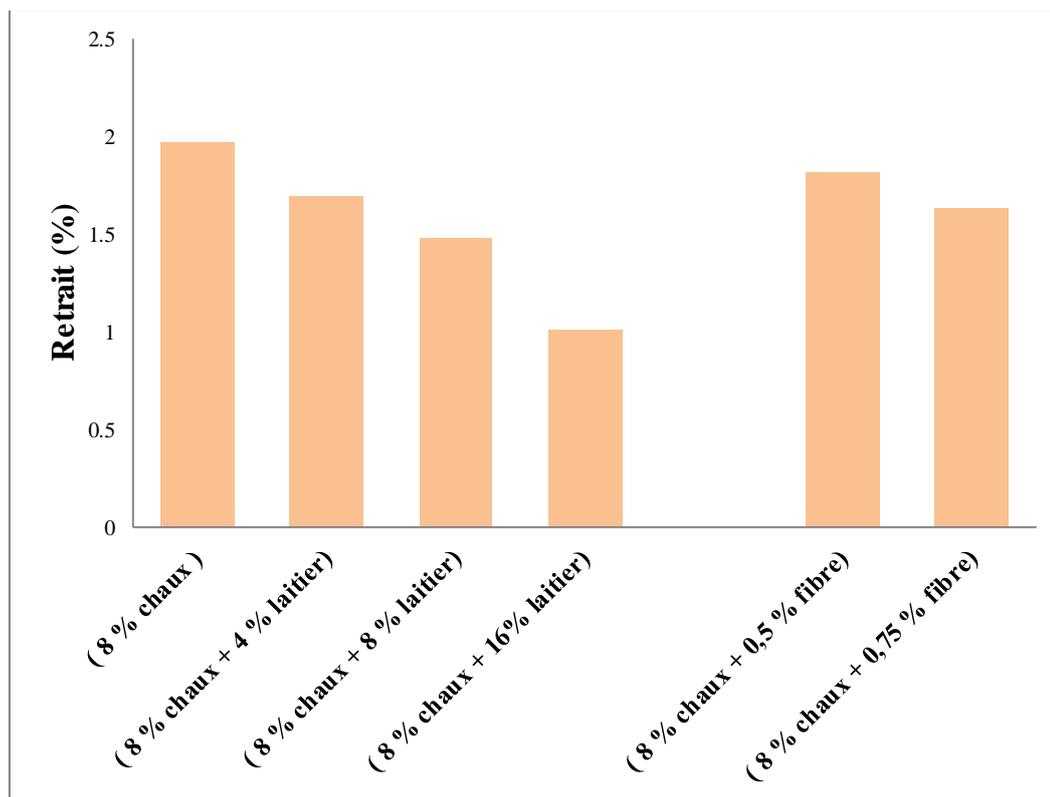


Figure 4.52 : Effet des différents ajouts sur le retrait de terre à base de sol argileux.

Les résultats montrent que le retrait des blocs de terre à base de sol argileux diminue avec l'augmentation d'une quantité de chaux. Cette diminution est d'autant plus prononcée avec la combinaison (chaux –laitier), (chaux-fibres de paille de blé) et avec l'augmentation de la teneur en laitier et en fibres en paille de blé dans le mélange (chaux – laitier/ou fibres de paille de blé). Néanmoins, la diminution dans les retraits des blocs est plus sensible au traitement au mélange (chaux –laitier) qu'au mélange (chaux- fibres de paille de blé). Pour le cas du mélange (chaux-laitier), le comportement peut être expliqué par la formation des produits de cimentation. Ces produits remplissent les vides et empêchent donc le rapprochement des grains de sol.

En ce qui concerne l'effet des fibres, une diminution du retrait, en ajoutant les fibres au mélange (de terre à base sol argileux - chaux), est observée. Les fissures de retrait dans le sol, sont principalement dues à un séchage rapide et non uniforme. Les fibres de renforcement dans les matrices de la terre empêchent la fissuration par adhésion ou collage à la terre. La diminution du retrait par l'ajout de paille de blé, est due au développement d'une liaison plus forte entre les fibres et la terre, ce qui améliore la cohésion [218] et contrecarre la déformation de la matrice du sol par frottement [15-219].

Pour chaque formulation étudiée, le retrait de la terre à base de sol argileux est supérieur à celle à base de sol limoneux. Cela est probablement dû à l'activité argileuse qui est plus importante. En effet, plus l'activité argileuse est importante, plus les phénomènes de gonflement/retrait des argiles sont importants. Les minéraux argileux présents dans la terre possèdent une affinité pour l'eau. Au contact de l'eau, les sols se gonflent et se rétrécissent en séchant [220]. La figure 4.53 montre l'apparition de fissures dans les blocs de terre à base de sol argileux.

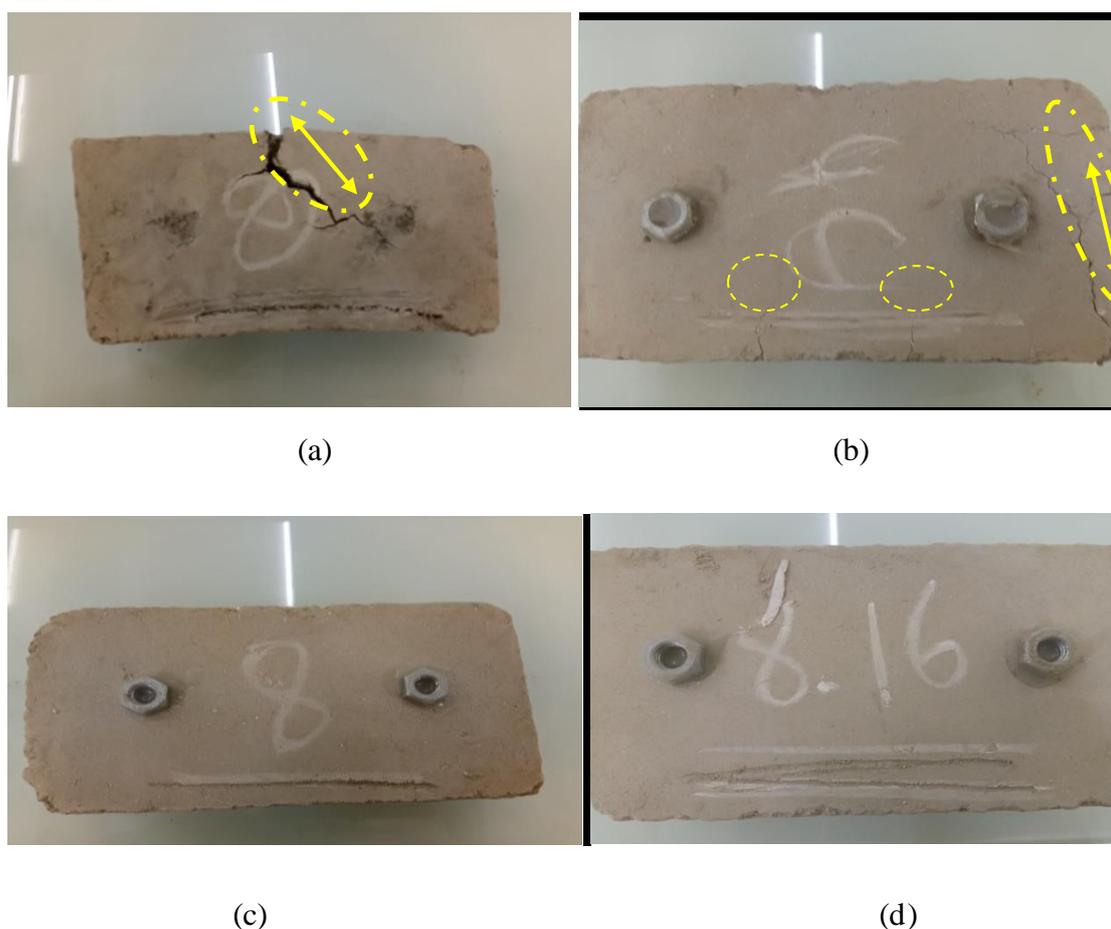


Figure 4.53 : Apparition de fissure dans les blocs a base de sol argileux.
a- terre. b- (terre-4% chaux). c. (terre-8% chaux). d- (terre-8 chaux-laitier).

4.3.3. Effet des ajouts sur la conductivité thermique

La figure 4.54 présente la variation de la conductivité thermique de la terre à base de sol argileux en fonction des ajouts.

La conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier pour la terre traitée à 8 % de chaux. Cette augmentation s'explique, comme déjà mentionné dans

les sections précédentes, par le fait que l'ajout de la chaux ou du mélange (chaux-laitier) apporte au matériau initial de nombreux éléments cimentaires qui bloquent les pores créés par la proximité de grosses particules. Le matériau obtenu après le mélange est moins poreux que le matériau initial.

Par contre, la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres pour les blocs de terre à base de sol argileux traitée à 8 % de chaux. Cette réduction est visible pour le fait que les fibres végétales ont, en général, une conductivité thermique très faible. De plus, la présence des fibres en paille de blé dans le bloc de terre augmente la porosité, ce qui réduit sa masse volumique et, également, la valeur de sa conductivité thermique.

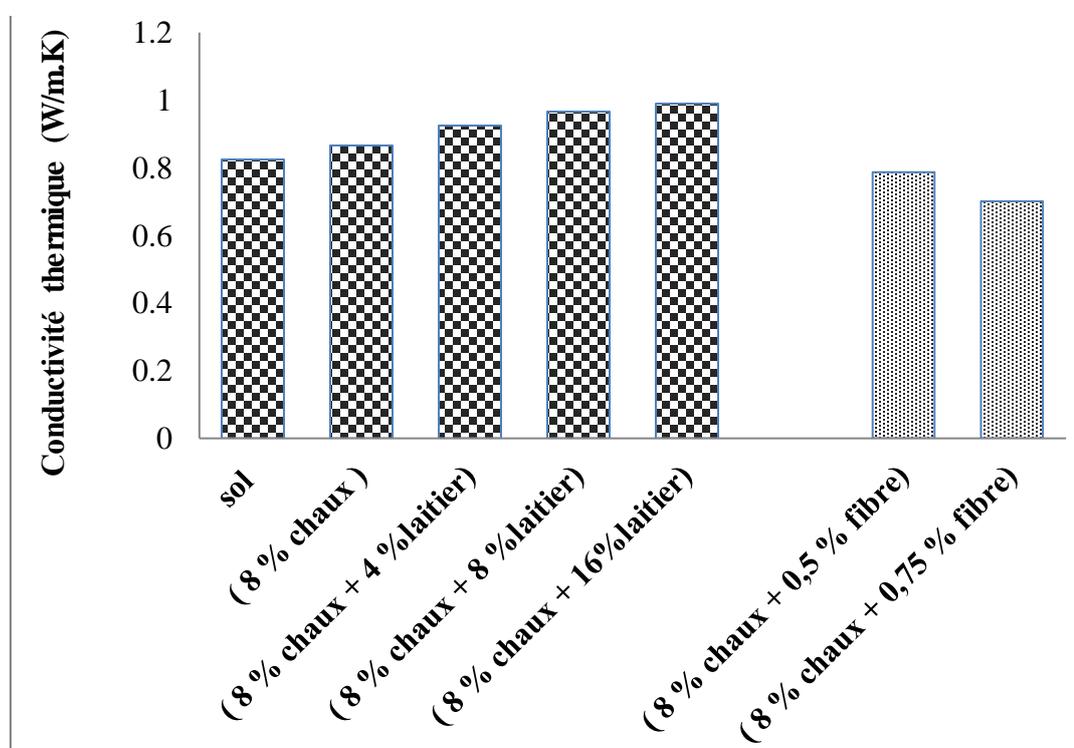


Figure 4.54 : Effet des différents ajouts sur la conductivité de la terre à base de sol argileux.

4.3.4. Synthèse des résultats obtenue

Le 4.2 tableau résume les optimums des différents combinaisons obtenus à partir l'application des essais mécanique, durabilité et thermique pour la terre à base de sol limoneux. À partir de ce tableau, on dégage la combinaison qui donne un bloc résistant, durable et écologique.

Tableau 4.2 : Synthèse des résultats obtenus pour l'utilisation de sol argileux comme matériau de construction

	Résistance à la compression	Perte de poids	Absorption capillaire	Érosion	Abrasion	Retrait	Conductivité thermique
	>2 MPa	< 10 %	$(20\text{cm}\cdot\text{s}^{-0,5})\times 10^{-2}$	< 1 mm/min	>20 cm ² /g	(%)	
8 % chaux	2,27	9,6	0,07	0,033	17,14	1,97	0,867
(8% chaux+ 4 % laitier)	2,64	8,25	0,05	0,025	21,05	1,698	0,923
(8 % chaux + 8 % laitier)	2,85	7,12	0,03	0,016	24	1,478	0,965
(8 % chaux +16 % laitier)	3,27	6,5	0,01	0,008	27,77	1,01	0,989
Par l'ajout de (8% chaux+16% laitier), on obtient un matériau de construction résistant, durable et écologique.							
(8% chaux +0.5 % fibre)	2,37	9,85	0,08	0,04	19,67	1,82	0,787
(8% chaux +0.75 % fibre)+0.75	2,45	10,25	0,095	0,0475	21,81	1,63	0,701

4.4. Conclusion

Après analyse et discussion de l'effet des différents additifs (laitier et paille de blé seuls ou en combinaison avec du ciment ou de la chaux), sur les principales propriétés à prendre en compte lors de l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction, notamment, la résistance à la compression, la durabilité et les propriétés thermiques, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1- Pour la résistance à la compression

- Le laitier a peu d'effet sur l'augmentation de la résistance à l'état sec et humide pour les échantillons de terre à base de sol limoneux et argileux à 7 et 28 jours de cure. Un effet plus grand est observé lorsque le laitier est combiné avec du ciment ou de la chaux, après activation par la chaux ou le ciment.

- L'incorporation d'une quantité de ciment et de chaux induit une augmentation de la résistance à la compression sèche et humide des échantillons de terre à base de sol limoneux ou argileux, à 7 et 28 jours de cure. La résistance à la compression à l'état sec et humide augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. Ce n'est pas le cas de la chaux. La résistance augmente jusqu'à une certaine quantité de chaux ajoutée, nommée (valeur optimale de la chaux), puis diminue. Cette valeur est de l'ordre de 4 % pour la terre à base de limoneux et de 8 % pour la terre à base de sol argileux. Un gain supplémentaire de la résistance à la compression, aussi bien pour la terre à base de sol limoneux que pour la terre à base de sol argileux, est obtenu en ajoutant une teneur en laitier au ciment et à la chaux.

- La stabilisation avec le ciment et le mélange (ciment laitier) a plus d'effet sur l'augmentation de la résistance à la compression à l'état sec et humide de la terre à base de sol limoneux que celle à base de terre argileuse. D'autre part, la stabilisation à la chaux et au mélange (chaux - laitier), a un effet plus important sur l'augmentation de la résistance (à l'état sec et humide) de la terre à base de sol argileux que celle de la terre à base de sol limoneux. Les valeurs de résistance obtenues à l'état sec sont supérieures que celles obtenues à l'état humide.

- Les fibres de paille de blé, lorsqu'elles sont utilisées seules ou associées à une quantité de ciment ou de chaux, n'ont aucun effet sur l'augmentation de la résistance à la compression de la terre à base de sol limoneux et argileux.

2-Pour la durabilité

✓ Perte de poids

✓ Il en est de même pour la résistance, lorsque le laitier est utilisé seul, il n'a aucun effet sur la réduction de la perte de poids des échantillons de terre à base de sol limoneux et argileux à 7 et 28 jours de cure. L'effet est plus important lorsque le laitier est utilisé avec une certaine quantité de ciment ou de chaux.

✓ Le ciment, la chaux, les mélanges (ciment-laitier) et (chaux-laitier) affectent la perte de poids de la terre de manière positive. En effet, ils induisent une diminution de la perte de poids des échantillons de la terre à base de sol limoneux et argileux à 7 et 28 jours de cure. La diminution de la perte de poids augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, en chaux et en laitier dans le mélange (ciment/ou chaux - laitier) et la période de cure, aussi bien pour les échantillons de sol limoneux que pour les échantillons de sol argileux.

✓ Pour la valeur limite de perte de poids recommandée, le traitement à la chaux ou au mélange (chaux - laitier) est efficace pour stabiliser la terre à base de sol limoneux et argileux. En revanche, le traitement au ciment, son efficacité pour réduire la perte de poids par rapport à la valeur minimale recommandée, n'est pas vérifiée, avec une terre à caractère plus argileux.

✓ Les fibres de paille de blé, lorsqu'elles sont utilisées seules, n'ont aucun effet sur la réduction de la perte de poids dans les échantillons de terre à base de sol limoneux et argileux à 7 et 28 jours. Leurs effets sur la diminution de la perte de poids, par rapport aux échantillons de terre vierge, sont plus prononcés lorsqu'elles sont mélangées à une quantité de ciment avec une terre à base de sol limoneux et à la chaux avec une terre à base sol argileux.

✓ Absorption capillaire

✓ Même chose pour l'absorption capillaire, lorsqu'il est utilisé seul, le laitier n'a aucun effet sur la diminution de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de limoneux et peu pour ceux de terre à base argileux à 7 et 28 jours de cure. L'effet sur la diminution de l'absorption capillaire est plus marqué lorsque le laitier est utilisé avec une quantité de ciment ou de chaux.

✓ Le ciment et la chaux affectent de manière positive sur l'absorption capillaire de la terre. En effet, ils entraînent une diminution de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol limoneux et argileux. Cette diminution augmente avec l'augmentation de la quantité de ciment, de chaux, de laitier dans le mélange (ciment/ou chaux-laitier) et la période de cure de 7 à 28 jours.

✓ Par rapport au traitement au ciment et au mélange (ciment-laitier), le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier) a un effet plus important sur la réduction de l'absorption capillaire des échantillons de terre à base de sol argileux et de ceux de la terre à base de sol limoneux traités avec 8 % de chaux après 28 jours de cure.

✓ Les fibres de paille de blé utilisées seules ou combinées à une proportion de ciment ou de chaux, entraînent une augmentation de l'absorption capillaire à 7 et 28 jours de cure. Cette tendance est plus prononcée avec l'augmentation de la teneur en fibres dans le mélange, aussi bien pour les échantillons de terre à base de sol limoneux ou argileux.

✓ Érosion

- Le ciment, la chaux et le mélange (ciment /ou chaux-laitier) diminuent le taux d'érosion à 7 et 28 jours de cure de la terre à base de sol limoneux ou argileux. Cette diminution devient plus importante avec l'augmentation de la période de cure.
- Le traitement de la terre à base de sol limoneux au ciment et au mélange (ciment-laitier), a plus d'effet sur la réduction du taux d'érosion que le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier).

Les fibres de paille de blé, lorsqu'elles sont ajoutées à une terre à base de sol limoneux traitée à la chaux ou au ciment et à une terre à base de sol argileux traitée à la chaux, induisent une augmentation du taux d'érosion à 7 et 28 jours de cure. L'augmentation du temps de cure compense cet effet négatif de l'action des fibres.

✓ Abrasion

- Le ciment, la chaux et le mélange (ciment/ou chaux- laitier) augmentent la résistance à l'abrasion à 7 et 28 jours de cure. Cette résistance à l'abrasion augmente avec l'augmentation de la période de cure.
- Le traitement de la terre à base de sol limoneux au ciment et au mélange (ciment-laitier) a plus d'effet sur la réduction de l'abrasion que le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier).

- En ce qui concerne les fibres de paille de blé, leur ajout à la terre à base de sol limoneux traitée au ciment et à une terre base de sol argileux traitée à la chaux induit à une diminution de leur taux d'abrasion à 7 et 28 jours de cure. Cette diminution est plus prononcée à 28 jours de cure.
- Le traitement de la terre à base de sol limoneux au mélange (ciment-fibres) a plus d'effet sur la réduction de l'abrasion de la terre, que le traitement au mélange (chaux-laitier).

✓ Gonflement

- Le ciment, la chaux et le mélange (ciment/ou chaux-laitier) diminuent le gonflement de la terre à base de sol limoneux et argileux à 7 et 28 jours de cure. Cette diminution du gonflement devient plus importante avec l'augmentation de la période de cure.
- Le traitement de la terre à base de sol limoneux, au ciment et au mélange (ciment-laitier) a plus d'effet sur la réduction du gonflement que le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier).
- Pour les fibres de paille de blé, leurs ajouts à la terre à base de sol limoneux traitée au ciment et à celle à base de sol argileux traitée à la chaux affectent le gonflement de la terre de façon négatif. En effet, l'ajout de fibres induit une augmentation du gonflement à 7 et 28 jours de cure. Cette augmentation est moins prononcée avec l'augmentation du temps de cure

✓ Retrait

- Pour le ciment, la chaux et le mélange (ciment ou chaux-laitier), comme pour le cas du gonflement diminuent le retrait de la terre à base de sol limoneux et argileux.
- Le traitement de la terre à base de sol limoneux, à la chaux et au mélange (chaux-laitier) a plus d'effet sur la réduction du retrait que le traitement au ciment et au mélange (ciment-laitier).
- Pour les fibres de paille de blé, leurs ajouts à une terre à base de sol limoneux traitée à la chaux ou au ciment et à celle à base de sol argileux traitée la chaux induisent une diminution du retrait. Cette diminution est accentuée avec l'augmentation de la teneur en fibre de 0.5 % à 0.75 %.

3-Pour la conductivité thermique

- Le ciment, la chaux et le mélange (ciment/ ou chaux-laitier) augmentent la conductivité thermique de la terre à base de sol limoneux et argileux.
- Le traitement de la terre à base de sol limoneux au ciment et au mélange (ciment-laitier) a plus d'effet sur l'augmentation de la conductivité thermique que le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier).
- Pour les fibres de paille de blé, leurs ajouts à la terre à base de sol limoneux traitée à la chaux ou au ciment et à celle à la base de sol argileux traitée à la chaux induisent une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en fibre de 0.5 % à 0.75 %.

CONCLUSION GENERALE

Le but visé par ce travail, est de valoriser l'utilisation de la paille de blé et le laitier, en combinaison avec le ciment ou la chaux, dans la stabilisation de la terre crue, pour la réalisation d'un bloc de construction en terre, résistant, durable et écologique. La démarche suivie dans cette étude à travers une étude purement expérimentale, réalisée en le laboratoire, était, d'établir en premier lieu, différentes combinaisons associant le laitier, les fibres de paille de blé, le ciment et la chaux à deux types de terre, une terre à base de sol limoneux et une à base de sol argileux, pour la réalisation d'un bloc de terre stabilisé. En second lieu, d'évaluer leurs effets sur sa performance vis-à-vis à certains paramètres, notamment, le compactage, la résistance, la durabilité et la conductivité. La finalité de cette démarche, est d'essayer de faire ressortir la combinaison optimale pour la réalisation d'un bloc de construction de terre stabilisée, satisfaisant les conditions de résistance, d'écologie et de durabilité, initialement visées dans cette étude. Les conclusions tirées de cette étude expérimentales sont données dans ce qui suit :

- La stabilisation de la terre crue utilisant la paille de blé et le laitier en combinaison avec le ciment ou la chaux, permet de réaliser un bloc de construction en terre, résistant, durable et écologique.
- En termes de résistance et durabilité, les combinaisons impliquant la stabilisation de terre à base de sol limoneux pour produire un bloc de construction rependant aux normes recommandées de résistance et de durabilité sont les suivantes, (8% de ciment ou 8% de chaux) seuls, (8% ciment ou 8% de chaux) combiné à 4%, 8% et 12% de laitier et 8% de ciment, combiné à 0.5 % et 0.75 % de fibres en paille de blé.
- Pour une terre crue à caractère limoneux, les combinaisons optimales et économiques, incorporant l'utilisation de laitier ou de fibres de paille de blé en combinaison avec du ciment ou de la chaux, induisant à la production d'un bloc de terre résistant, durable et écologique sont, (8% de chaux-12% de laitier) et (8% ciment-0.75 % de fibres en paille de blé).
- En termes de résistance et durabilité, les combinaisons impliquant la stabilisation de terre à base de sol argileux pour produire un bloc de construction rependant aux normes recommandées de la résistance et la durabilité, sont les suivantes, 8 % chaux, 8% de chaux combiné à (4 %, 8 % et 16 % de laitier) et 8 % chaux combiné à 0.5 % et 0.75% de fibres en paille de blé.

- Pour une terre crue à caractère argileux, les combinaisons optimales et économiques, incorporant l'utilisation de laitier ou de fibres en paille de blé en combinaison avec le ciment ou la chaux, induisant à la production d'un bloc de terre résistant, durable et écologique sont, (8 % chaux-16 % de laitier) et (8 % chaux-0.75% de fibres de paille de blé).
- Comme additif principale, comparé au ciment, la chaux est plus efficace et plus économique à utiliser en combinaison avec le laitier ou la paille de blé dans la stabilisation de la terre crue, pour la réalisation d'un bloc de construction en terre, étant donné qu'elle peut être utilisée aussi bien pour une terre à caractère limoneux et une terre à caractère plus argileux. Ce qui n'est pas le cas pour le ciment, qui s'adapte plus avec une terre à caractère plus limoneux.
- Comparé au traitement ciment et mélange (ciment-laitier), le traitement à la chaux et au mélange (chaux-laitier) a plus d'effet sur la diminution de l'absorption capillaire et du retrait des échantillons de terre à base de sol limoneux traitées à 8% de chaux après 28 jour de cure.
- La terre à base de sol argileux présente une courbe granulométrique, se situe en dehors de la zone limite recommandé par la norme des blocs de terre comprimée (BTC), malgré ça il est possible d'obtenir un bloc terre résistant et durable.
- La terre à base de sol limoneux présente une résistance et une durabilité plus importantes à celles de la terre à base de sol argileux.
- L'existence d'une corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids pour les échantillons de la terre à base de sol limoneux et ceux de la terre à base de sol argileux montre que plus le bloc est résistant à la compression, il est résistant à la perte de poids.
- L'existence d'une corrélation entre la perte de poids et le taux d'érosion pour les blocs de la terre à base de sol limoneux et ceux à base de sol argileux. Á partir de cette bonnes corrélations, on conclue qu'il est possible de vérifier la durabilité des blocs avec un seul de ces tests.
- L'existence d'une corrélation entre la résistance à l'abrasion et la résistance pour la terre à base de sol limoneux montre si le matériau terre présente une résistance à la compression élevée. il automatiquement présente une résistance à l'abrasion importante

Recommandations et perspectives

À travers cette étude, nous avons mis en lumière sur la valorisation de l'utilisation de la paille de blé et du laitier en combinaison avec le ciment ou la chaux dans la stabilisation de la terre crue pour la réalisation d'un bloc de construction en terre résistant, durable et écologique. Cette étude peut être complétée par d'autres investigations

- Etude de l'influence d'autres types d'ajout disponible en algérie sur la performance et la durabilité des blocs de terre.
- Etude de l'influence d'autres types d'ajout disponible en algérie sur la performance et la durabilité des blocs de terre.
- Etude de l'influence des combinaisons entre les ajouts minéraux et fibres naturelles sur la performance et la durabilité des blocs de terre.

REFERENCES

REFERENCES

- 1-Maubec, N., “Approche multi-échelle du traitement des sols a la chaux études des interactions avec les argiles”, Thèse doctorale matières molécules, matériaux en pays de la LOIRE, (2010).
- 2-Bultel, F., “Prise en compte du gonflement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels”, thèse de doctorat, L'école nationale des ponts et chaussées, (2001).
- 3-Cabane, N., “Sols traites à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation”, École nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, (2004).
- 4-Wan, T., Tokunaga, K., “Partitioning of Clay Colloids at Air–Water Interfaces”, *Journal of Colloid and Interface Science*, V. 61, (2002), 54-61. doi: 10.1006/jcis.2001.8132.
- 5-Rigassi, V., “Compressed Earth Blocks Vol I. Production Manual (French); Blocs de terre comprimée Vol I. Manuel de production.” (1995), pp 107.
- 6-Jiménez Delgado, M. C., Guerrero, I. C., “ The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review” , *Constr. Build. Mater*, V. 21, (2007), 237–251, , doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006.
- 7-Doat, P., Hays, A., Houben, H., Maluk, S., Vitoux, F., “Construire en terre”, Edition alternative et parallèles, (1979).
- 8-Houben, H, Guillaud, H. “Traité de construction en terre”. CRA Terre, Edition Parenthèse, Marseille, France, (2006), 355 p.
- 9-Minke, G., “Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture”, (2006).
- 10-Terki, Y., “ La réhabilitation de l'image : stratégie algérienne pour la préservation du patrimoine bâti en terre, Algérie”, *L'architecture de terre dans le monde d'aujourd'hui Actes du Colloque international de l'UNESCO sur la conservation de l'architecture de terre du patrimoine mondial*, (Décembre 2012).
- 11-Benouali, H., “ La réglementation technique Algérienne de construction avec les Matériaux locaux ”, Festival ArchiTerre, 2015

- 12-Tiec, J. M., “Architectures de terre contemporaines dans le monde”, 4ème Édition du festival Culturel International de Promotion des Architectures de Terre, (Avril 2015).
- 13-Ajam, L., Ben, M., Sfar, H., El, R., “Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks”, *Constr. Build. Mater*, V. 23, (2009), 3240–3247. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.05.009.
- 14-Kerali, A. G., Ekyalimpa, R., “Environmental Water Related Deterioration of Compressed Stabilized Earth Block Structures in Uganda”, *Civil and Environmental Research*, V. 9, (2017), 25–30.
- 15-Sangma, S., Tripura, D. D., “Experimental study on shrinkage behaviour of earth walling materials with fibers and stabilizer for cob building”, *Constr. Build. Mater.*, V. 256, 119-449, (2020), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119449.
- 16-Kerali, A.G., “Destructive Effects of Moisture on the Long-term durability of stabilized soil blocks”, *Development Technology Unit School of Engineering, University of Warwick*, (2000).
- 17-Ngowi, A. B., “Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana”, *Construction and Building Materials*, Vol. 11, (1997), 1-7.
- 18-BIS. Specification for soil based blocks used in general building construction. IS1725 Indian Bureau of Indian Standards, (1982).
- 19-ABNT, Tijolo macico de solo-cemento. Especificacao. NBR 849, Rio de Janeiro:Associacao brasileira de normas tecnicas, (1986).
- 20-ARSO, Compressed earth blocks. Technical specifications for ordinary compressed earth blocks, ARS 674. Nairobi (Kenya): African Regional Standard; 1996.
- 21-SNZ. Engineering design of earth buildings. NZS 4297. Wellington: Standards New Zealand, (1998).
- 22-AFNOR. XP P13-901, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions – Spécifications – Méthodes d’essais – Conditions de réception, 2001.
- 23-Bell, F.G. “Engineering Treatment of Soils”, University of Natal, Durban (1993),
- 24-Bryan, A.J., “Criteria for the suitability of soil for cement stabilization”, *Building and Environment*, V. 23, (1988), 309-319
- 25-Saussaye, L., “Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la salification”, Université de Caen Basse Normandie France, (2013).

- 26-Bell, F.G., “Methods of treatment of unstable ground”, Newnes Butterworth, London, (1975).
- 27-Rekik, B., Boutouil M., “Étude de la compressibilité et de la microstructure d’un sédiment de dragage traité au liant hydraulique”, IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest, (2006).
- 28-Prusinski, J.R., Bhattacharja, S., “Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils”. Transp. Res. Rec. 1652, TRB, Washington, DC: National Research Council, (1999), 215–222.
- 29-Kariyawasam, K.K.G.K.D., Jayasinghe, C., “Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material”, Construction and Building Materials, Vol. 8, (2016), 519–527.
- 30-Okagbue, C.O., Ochulor, O.H., “The Potential of Cement-Stabilized Coal-Reject as a Construction Material”, Bull Engineering Geology Environnement, V. 66, (2007), 143-151.
- 31-Basha, E.A., Hashim, R., H.B. Mahmud, A.S. Muntohar, “Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement”, Construction and Building Materials, V.19, (2005), 448–453.
- 32-Zoheir, G. B., Smaine, M., Mokhtar, D., “Effet du ciment sur le comportement physico-chimique d’un matériau de la région de sidi bel Abbès”, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, (2012).
- 33-Justin, P., Milburn, R., Parsons, L., “Performance of soil stabilization agents”, Final Report, (2004).
- 34-Gay, G., Schad, H., “Influence of Cement and Lime Additives on the Compaction Properties and Shear Parameters of Fine Grained Soils”, Otto-Graf-Journal, Vol. 11, (2000),
- 35-Osula, D.O.A., “A Comparative Evaluation of Cement and Lime Modification of Laterite”, Engineering Geology, V. 42, (1996), 71-81.
- 36-Shooshpasha, I., Shirvani, R.A., “Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils”, Geomechanics and Engineering, V. 8, (2015), 17-31.
- 37- Sanou, I., Seynou, M., Zerbo, L., Ouedraogo, R., “Mineralogy, Physical and Mechanical Properties of Adobes Stabilized with Cement and Rice Husk Ash”, Science Journal of Chemistry, (2019), 1-10.
- 38-Raj, S., Sher, M., Das. R., and Saha, S., “Coconut fibre-reinforced cement-stabilized rammed earth blocks ”, World Journal of Engineering, (2017), 208–216.

- 39-Heathcote, K, “ Compressive strength of cement stabilized pressed earth blocks" Building research and information”, V. 19, (1991), 101-105.
- 40-Akpokodje, E. G., “The stabilization of some arid zone soils with cement and lime”, Q. J. eng. Geol. London, V. 18, (1985), 173-180.
- 41-Aytekin, M., Nas, E., "Soil stabilization with lime and cement”, Digest, (1998), 471-477.
- 42-Walker, P., “Characteristics of Pressed Earth Blocks in Compression”, Proc. 11th Int. Brick/Block Mason. Conf, CHINA, (1997), 1–10.
- 43-CNERIB., “Recommandations pour la production et mise en œuvre du béton de terre stabilisée”, CNERIB, (1993). p. 33.
- 44-Zhongjie, Z., Mingjiang, T., “Durability of Cement Stabilized Low Plasticity Soils”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, (2008), 203-213.
- 45- Megat, J. M. M. N., “Durability and strength characteristics of cement stabilized modified malaka series”, Journal of Islamic Academy of Sciences, (1994), 137-141.
- 46-Al-Ayedi, E. S. “ Chemical stabilization of Al-Qurayyah eastern Saudi sabkha soil”, Master’s of Engineering of Civil Engineering, King Fahd Univ. of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabi. (1996).
- 47- Aiban, S.A., Hamad, I. A., Al-Amoudi, O. S. B., Habibur, R. A., “Performance of a stabilized marl base: a case study ”, Construction and Building Materials, V.12, (1998), 329 – 340.
- 48-Egenti, C., Khatib, J. M., Negim, E., “ Performance of compressed earth brick in comparison with the prevailing sand-cement wall construction in Nigeria”, International Journal of Engineering Research and Reviews, V. 3, (2015), 37-41.
- 49-Fopossi, A. J., Mutuku, R. N., Ngapgue, F., “Effects of stabilizers on water absorption of compressed earth blocks made from mangu soil”, International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, V. 07, (2014), 490-495.
- 50-Gallipoli, D., Bruno, A.W., Perlot, C., Mendes, J., “A geotechnical perspective of raw earth building”, Acta Geotech, (2017), 463–478. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>
- 51-Bahar, R., Benazzoug, M., Kenai, S., “Performance of compacted cement-stabilised soil ”, Cement & Concrete Composites, V 09, (2004), 811–820.

- 52-Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J, E, Gomina, M., “Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement”, *Construction and Building Materials*, (2018), 84–96.
- 53-Walker, P. J., “Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks”, *Cement & Concrete Composites*, (1995), 301-310.
- 54- Fopossi, A. J., Mutuku, R. N., “Physical Behavior of Clay Mixed With Stabilizers on Linear Shrinkage for Making Compressed Soil Blocks : A Case Study Using Mangu Soil”, V. 19, (2014), 9965–9974.
- 55-Boussaid, S., El Bakkouri, A., Ezbakhe, H., Taib, A., El Bouardi, A., “Comportement thermique de la terre stabilisée au ciment”, *Revue française de génie civil*, V.5, (2011), 505-515.
- 56-Boffoue, M, O., Kouadio, K. C., Kouaki, C.H., “Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d’argile comprimée et stabilisée”, *Afrique science*, V. 11, (2015), 35 – 43.
- 57-Balaji, N, C., Reddy, V., Mani, M., “Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials* 170.1, (2017), 40-54.
- 58-Zhang, L., Gustavsen, A., Bjørn, P. J., Yang, Lui., Gao, T., Wangf, Y., “Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks”, *Construction and Building Materials*, V.151, (2017), 504–511.
- 59-Ben Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, A. S., Ben Jabrallah, S., “Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB)”, *Construction and Building Materials*, V. 104, (2016), 44–51.
- 60-Burroughs,V.S., “Quantitative criteria for the selection and stabilization of soils for rammed earth wall construction”, *Phd thesis*, University of New South Wales, (2001).
- 61-AFNOR, “Chaux de construction: Définitions, spécification, et critère de conformité ”, (1996).
- 62-Canonge, P., Autric, F., Nourissier, G., “Technique et pratiques de la chaux”, Eyrolles, (2003).
- 63-Bell, F.G., “Lime stabilization of clay minerals and soils”, *Engineering Geology*, V. 42, (1996), 223-237.
- 64-Little, D.N., “Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime”, *The National Lime Association*, Washington, (1995), D.C. 219 p.

- 65-Eades, J.L., Grim, R.E., "Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization", Highway Research Board Bulletin, V. 262, (1960), 51-63.
- 66-Légère, G., "Étude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière", Montréal (Québec), (2001).
- 67-Diamond, S., Kinter, E.B., "Mechanisms of soil-lime stabilization", Highway Research Record, (1965), 92, 83-102.
- 68-Al-mukhtar, M., "Le gonflement et le traitement à la chaux des sols argileux" , éléments de synthèse des études réalisées au CRMD, (2009), 1-11.
- 69-Arman, A., Munfakh, G, A., "Lime stabilization, of organics soils", Highway Research Record, (1972), 37-45.
- 70-Hussain, M., Dash, S.K., "Influence of Lime on Plasticity Behaviour of Soils", Indian Geotechnical Conference, (2010), 537-540.
- 71-Muhmed, A.,Wanatowski, D., "Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of Clay", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), V.6, (2013), 87-94.
- 72-Kavak, A., "Stabilization of high plasticity soil at high water content with a special hydraulic lime", Proc. of the Intl. Conf. on Advances in Civil, Structural, Environmental & Bio-Technology – CSEB, (2014), 72-76.
- 73-Sakr, M. A., Shahin, M. A., Metwally. Y.M., "Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content", Geotechnical and Geological Engineering, (2009), 105-113.
- 74-George, S. Z., Ponniah, D. A., & Little, J. A., "A Little Effect of temperature on lime-soil stabilization", Constr. Build. Mater., vol. 6, (1992), 247–252.
- 75-Mateos, M., "Soil lime research at Iowa State University", Proc. Am. Soc. Civ. Eng. J. Soil Mech. Found. Div., (1965), 127-153.
- 76-Ola, S.A., "The Potentials of Lime Stabilization of Lateritic Soils", Engineering Geology, V.11, (1977), 305-317.
- 77-Mtallib, M., Bankole, G., "The improvement of the index properties and compaction characteristics of lime stabilized tropical lateritic clays with rice husk ash (RHA) Admixtures", EJGE, V. 16, (2011), 983-996.
- 78-Attoh-Okine, N. O., "Lime Treatment of Laterite Soils and Gravels-Revisited", Construction and Building Materials, Vol. 9, (1995), 283-287.

- 79-Maafi, N., Akchiche, M., Riosb, S., “Impact of wetting–drying cycles on the mechanical properties of lime-stabilized soils”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, (2019)
- 80- Venkatarama, B. R., “Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction”, *Modern Earth Buildings*, (2012). 324-363.
- 81-Y.Millogo, M. Hajjaji, R. Ouedraogo, “ Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks”, *Construction and Building Materials*, (2008), 2386–239.
- 82-Guettala, A., Houari, H., Mezghiche, B., Chebili, R., “Durability of lime stabilized earth blocks ”, *Courrier du Savoir*, (2002), 61-66.
- 83-Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., Tuncan, M., “Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil”, *Building and Environnement*, V. 42, (2007), 681-688.
- 84-Sankar, B., Javed, B., “Comparative Performance of Portland Cement and Lime in Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils”, *Portl. Cem. Assoc* 2066 (2003), 60-67.
- 85-Al-Kiki, I. M., Al-Atalla, M. A., Al-Zubaydi, A. H., “Long term strength and durability of clayey soil stabilized with lime”, *Eng. & Tech. Journal*, V.29, (2011), 725-735.
- 86-Barbero-Barrera, M. M., Jové-Sandoval, F., González Iglesias, S., “Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, V. 260, (2020). p. 119877, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119877.
- 87-Abbou, M., Semcha, A., “Stabilization of compressed earth block clayey materials from Adrar (Algeria) by lime and crushed sand”, *J. Build. Mater. Struct.* (2020), 42–50.
- 88-Venkatarama, B. R., K. Jagadicht, S., “Spray Erosion Studies on Pressed Soil Blocks”, *Building and Environment*, Vol. 22, (1987), 135-140.
- 89-Guettala, A., Abibsi, A. and Houari, H., “Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure”, *Construction and Building Materials*,(2006), 119–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001.
- 90-Sireesh, S., Puppala, A.J., Chikyala, S.R., “Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays”, *Applied Clay Science*, (2013), 39–45.
- 91-al-Swaidani, A., Hammoudb, I., Meziab, A., “Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*”, V. 8, (2016). 714-725.

- 92-Petry, T. M., Glazier, E. J., “Project Report: The Effect of Organic Content on Lime Treatment of Highly Expansive Clay”, University of Missouri, (2004).
- 93-Stamatopoulos, A. C., Christodoulis, J. C., Giannaros, H.C., “Treatment of expansive soils for reducing swell potential and increasing strength”, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, (1992), 301-312.
- 94-Pekmezci, B. Y., Kafesçioğlu, R., Agahzadeh, E., “Improved performance of earth structures by lime and gypsum addition”, *Metu J. Fac. Archit.*, V. 29, (2012), 205–221, doi: 10.4305/METU.JFA.2012.2.9.
- 95-Saidi, M., Cherif, A.S., Zeghmati, B., Sediki, E., “Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behaviour of earth bricks”, *Construction and Building Materials*, V.167, (2018), 566–577.
- 96-Azakine Sindanne, S., Ntamack, G.E., Lemanle Sanga., R.P., Moubeké, CA., Kelmamo Sallaboui, ES., Bouabid, H., Mansouri, K., D’Ouazzane, SC., “ Thermophysical characterization of earth blocks stabilized by cement, sawdust and lime”. *J. Build. Mater. Struct*, V.1, (2014), 58-64.
- 97-Guettala, A., “Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau”, thèse de doctorat, Université de Biskra, (2003), 203 p,
- 98- Taallah, B., “Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres”, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, (2014)
- 99-Bekki, H., Djilaili, Z., Tlidji, Y., Daouadji, T. H., “Durability of treated silty soil using lime and cement in road construction – a comparative study”, V.5, (2015), 23–31.
- 100-Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., Al-Sarmi, H., “Effect of lime, cement and sarooj (Artificial Pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from oman”, *Building and Environnement*, V. 40, (2005), 681-687.
- 101-Khemissa, M., Mahamedi, A., “Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay” , V. 95, (2016), 104-110. *Appl. Clay Sci.*, (2014), doi: 10.1016/j.clay.2014.03.017.
- 102-Phan, V. T., Pham, K. N., “Improvement in engineering properties of soft-soil using cement and lime additives : A case study of southern Vietnam” *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, V.143, (2018).
- 103-Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., Singh, T. N., “Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study” *Appl. Clay Sci.*, V.152, (2017), 183-195. doi: 10.1016/j.clay.2017.11.01.

- 104-Pinto, C. S., Davidson, D. T., Laguros, J. G., “Effect of Lime on Cement Stabilization of Montmorillonitic Soils”, Highway Research Board Bull, (1962), 64-83.
- 105-El-rawi, N. M., Al – samadi, M. M.Y., “Optimization of cement – lime- chemical additives to stabilize Jordanian soils”, Journal of Islamic Academy of Sciences, (1995), 167-174,
- 106-Malkanthi, S. N., Balthazaar, N., Perera, A. A. D. A. J., “Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt” , Case Stud. Constr. Mater., V. 12, (2020), p. e00326, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00326.
- 107-Nagaraj, H.B., Sravan, M.V., Arun , K.S., “ Role of lime with cement in long-term strength of compressed stabilized earth blocks compressed stabilized earth blocks”, International Journal of Sustainable Built Environment, V. 7, (2014), 54-61.
- 108-Mahdad, M., Benidir, A., “Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: influence of different stabilisers and compaction levels”, International journal of sustainable building technology and urban development, V. 9, (2018), 44-60.
- 109-Chaibeddra, S., Kharchi, F., “Sustainability of Stabilized Earth Blocks to Water Erosion”, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), V. 2, (2013).
- 110-Wachira, K. T., "Optimization of soil- lime and cement mixes for compressed earth stabilized blocks for low- cost housing in east Africa (Kenya) ”, these de master en science , University of Missouri at Kansas, (2018).
- 111-Francisco, M., Granja, C., “Compressed earth blocks with and without cementitious materials”, 1–13, (2012).
- 112-Mehta et al., P. K. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. Concrete. doi:10.1036/0071462899
- 113-Neville, A. M. *Properties of concrete* ((fourth an). Pearson Education Limited. (1995). doi:10.1016/0008-8846(96)82366-0.
- 114-Zeghichi, L., “Etude des bétons basiques à base des différents granulats”, these doctorat, Université Mohamed Khider Biskra. (2006).
- 115-Nalbantoglu, Z., “Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizes”, Construction and Building Materials, (2004), 377–381.
- 116-Zhang, J., CAO, X., “Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash”, Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed, (2002).
- 117-Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A., “Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization”, Building and Environnement, V. 42, (2007),3393-3398.

- 118-Bin-Shafique, S., Rahman, K., Yaykiran, M. and Azfar, I., “the Long-Term Performance of Two Fly Ash Stabilized Fine-Grained Soil Subbases”, *Resources, Conservation and Recycling*, V. 54, (2010), 666-672
- 119-Hossain, K.M.A., Lachemi, M., EASA, S., “characteristics of volcanic ash and natural lime based stabilized clayey soils”, *Can. J. Civ. Eng.*, (2006), 1455-1458.
- 120-McCarthy, M. J., Csetenyi, L. J., Sachdeva, A., Dhir, R. K., “Engineering and durability properties of fly ash treated lime-stabilised sulphate-bearing soils”, *Engineering Geology*, (2014), 139–148.
- 121-Phanikumar, B. R., Raju, J., Raju, R., “Silica fume stabilization of an expansive clay subgrade and the effect of silica fume-stabilised soil cushion on its CBR”, *Geomechanics and geoengineering*, (2019), 64-77.
- 122-AL-Soudany, K. Y., “Improvement of expansive soil by using silica fume”, *Kufa Journal of Engineering*, V. 9, (2018), 222-239.
- 123-Kalkan, E., “Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume”, *Applied Clay Science*, (2011), 345–352.
- 124-Behim M. “Sous produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d’el hadjar dans les matériaux a matrice cimentaire”. thèse de doctorat, Université de Annaba, (2005), 173 p.
- 125-Abdel rahman ouf, M. E., “stabilization of clay subgrade soils using ground granulated blastfurnace slag ”, University of Leeds, (2001).
- 126-Axelsson, K., Johansson, S., Andersson, R., “Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions”, Swedish Deep Stabilization Research Centre, (2002).
- 127-Nidzam, R. M., Kinuthia J. M., “Sustainable soil stabilisation with blast furnace slag – a review”, *Construction Materials*, (2010).
- 128-Meng, C, Weins, U, Schiessl, P. “Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete”, *Proceedings of the 6 CANMENT/ACI Int. Conf. On Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Vol. 1, (1998), pp. 109-128.
- 129-Yazici, V., “Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS), GBFS- lime combinations and GBFS cement”, thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, (2004).
- 130-Chandra, J.V., Lavanya, P., “Effect of Granulated Blast Furnace Slag in the Stabilization of Expansive Soil for the Pavement Sub-Grades”, *(IRJET)*, V. 4, (2017), 1735 - 1739 (2017).

- 131- Geeta, R., Tulasi, K., Sai, R. K. Y., “Ground granulated blast furnace slag as an expansive soil stabilizer”, VFSTR Journal of STEM, V. 3, (2017), 2455-2062
- 132-Rawat, A., Jain, R., “Effect of blast furnace slag on index properties of black cotton soil”, (IRJET), V. 04, (2017).
- 133-Sekhar, D. C., Nayak, S., “SEM and XRD investigations on lithomargic clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement”, International Journal of Geotechnical Engineering, V. 13, (2017), 615-629.
- 134-Kiran, B. B., Arun, k., Satyanarayana, P.V.V., “Influence of Steel Slag and Fly Ash on Strength Properties of Clayey Soil: A Comparative Study”, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT),V.14, (2014), 61-64.
- 135-Zemouli, S., Chelghoum, N., “Utilisation du laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation des sols Use of ground granulated blast furnace slag in soils stabilization”, Rev. Sci. Technol., Synthèse, V.36, (2018), 103-114.
- 136-Joseph, O. A., “Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes Joseph Resources”, Resources, Conservation and Recycling, V.5, (1991), 37-80.
- 137-Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins,D.D. “Effects of partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the strength properties of lime stabilised sulphate bearing clay soils”, Engineering Geology, V.54, (1998), 37–53.
- 138-Alkhafaji, R., Dulaimi, A., Jafer, H. M., Atherton, W., “Soft soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag”, The 3rd BUiD Doctoral Research Conference, At British University in Dubai, (2017).
- 139-Yadu, L., Tripathi, R.K., “Stabilization of soft soil with granulated blast furnace slag and fly ash”, IJRET, V. 02. (2013).
- 140-Pathak, A. K., Pandey, V., Murari, K., Singh, J.P., “Soil Stabilisation Using Ground Granulated Blast Furnace Slag”, Engineering Research and Applications, V. 4, (2014), 164-171.
- 141-Kavisri, M., Senthilkumar, P., Gurukumar, M. S., Karunian J.P., “ Experimental study on effects of stabilization of clayey soil using copper slag and ggbs”, Rasayan J. Chem, 11(1), (2018),111-117.
- 142-Higgins., “Soil Stabilisation with Ground Granulated Blastfurnace Slag”, UK Cementitious Slag Makers Association (CSMA), (2005).
- 143-Kavak, A., Bilgen, G., “Reuse of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in lime stabilized embankment materials”, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, V. 8, (2016), 11-14.

- 144-Sridevi, G., Sreerama, R. A., “Efficacy of GGBS Stabilized Soil Cushions With and Without Lime in Pavements”, *IJETCAS*, 2014, 141- 147
- 145-Manjunath, k.v., Sivapullaiah P., “Blast furnace slag for bulk geotechnical applications”., *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, (2011).
- 146-Jiang, L.U., Modmoltin, C., Onitsuka, K., “stabilization effects of surplus soft clay with cement and GBF slag”, *journal of environmental sciences* , V.16, (2004), 397-403.
- 147-Izemouren, O., Guettala, A., “Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate”, *Conférence Matériaux - Colloque Eco matériau*, Montpellier, France. (2014).
- 148-Sekhar, D. C., Nayak, S., “Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks”, *Construction and Building Materials*, V.166, (2018), 531–536.
- 149-Singh, S.P., Tripathy, D.P., Ranjith, P.G., “Performance evaluation of cement stabilized fly ash–GBFS mixes as a highway construction material”, *Waste Management*, V. 28, (2008). 1331–1337.
- 150-Oti, J.E., Kinuthia, J.M., “Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use”, *Applied Clay Science* 58, (2012), 52–59.
- 151-Darwish, G. S., Tangri, A. P., “Effects of ground granulated blast furnace slag and lime on the strength and durability of clayey soil ”, (*IJEAT*), (2019), 920-926.
- 152-Izemouren, O., “Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée ”, *Thèse Doctorat en sciences*, université de biskra, (2016).
- 153-Padmaraj, D., Chandrakaran, S., “Stabilisation of soft clay using Ground Granulated Blastfurnace Slag and Lime”, *Sixth Indian Young Geotechnical Engineers Conference 6IYGEC2017*, India, (2017).
- 154-Dun, Y. J., Bo, Y.L., Fei, J., Chen-Yang, L., “Durability of reactive magnesia-activated slag-stabilized low plasticity clay subjected to drying–wetting cycle”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, V.20, (2015).
- 155-Cokca, E., Yazici, V., Ozaydin, V., “Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement”, *Geotech Geol Eng* V. 27, (2009), 489–499.
- 156-Liu, X., Hu, M., Ke, S., Fu, C., Guo, X., Ye, X., “A novel rammed earthen material stabilized with steel slags” *Constr. Build. Mater.*, V.189, (2018),1134–1139, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.075.
- 157- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., “Design thermal values for unfired clay bricks, *Materials & Design*”, V.31, (2010), Pages 104-112.

- 158-Saad, I., Belouettar, R., “Comportement mécanique des briques de terre crue renforcées par des fibres de palmier, dattier et des fibres de paille”, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, (2011).
- 159-Miraucourt, D., “Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso”, mémoire de fin étude, Université de Liège , (2017).
- 160-Baley, C., “Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites ”, Techniques del'ingénieur AM6 (AM5130), (2005). 1-12.
- 161-Govumoni, S. P., Koti, S., Kothagouni, S. Y., Venkateshwar, S., Venkateswar, R. L., “Evaluation of pretreatment methods for enzymatic saccharification of wheat straw for bioethanol production”, Carbohydrate Polymers, V.91,(2013), 646– 650.
- 162-Divanery, R. G., Lehmann, L., Schultz-Jensen, N., Bjerre, A. B., Timothy, J. H., “Examining the Potential of Plasma-Assisted Pretreated Wheat Straw for Enzyme Production by Trichoderma reesei ”, Appl Biochem Biotechnol, (2012), 2051–2063.
- 163-Keller, A., Leupin, M., “Influence of the growth stage of industrial hemp on chemical and physical properties of the fibres. Industrial crops and products, V. 13, (2001), 35-48.
- 164-Prabakar. J., Sridhar, R.S., “Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil”, Constr. Build. Mater, V.16, (2002), 123-131.
- 165-Dang, L, C., Khabbaz, H., “Experimental investigation on the compaction and compressible properties of expansive soil reinforced with bagasse fibre and Lime”, Recent Advancements on Expansive Soils, (2019).
- 166-Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., and Kriker, A., “Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers” , Constr. Build. Mater, V.7, (2014), 161-168.
- 167-Ouedraogo, M. K., Dao, Y., Millogo, M., Seynou, J-E., Aubert, M., “Influence des fibres de kenaf (Hibiscus altissima) sur les propriétés physiques et mécaniques des adobes”, Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie J., (2017).
- 168-Bouhicha, M., Aouissi, F., Kenai,S., “Performance of composite soil reinforced with barely straw”, Cement Concrete Composite, Vol. 5, (2005), 617–621.
- 169-Namango, S. S., “Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction: investigations into the properties of compressed earth blocks stabilized with Sisal vegetable fibres, cassava powder and cement compositions”. Phd thesis, University Cottbus, (2006).

- 170-Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. B., “Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres”, *Constr. Build. Mater.*, V.101, (2015), 797-809.
- 171-Taallah, B., Guettala, A., “The mechanical and physical properties of compressed earth bloc stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers”, *Constr. Build. Mater.*, V.104, (2016), 52–62.
- 172-Addison Greer, M. J., “The Effect of Moisture Content and Composition on the Compressive Strength and Rigidity of Cob Made from Soil of the Breccia Measures Near Teignmouth”, Phd thesis, University of Plymouth, (1996).
- 173-Sujatha, E. R., Selsia Devi. S., “Reinforced soil blocks: Viable option for low cost building units”, *Constr. Build. Mater.*, V.189, (2018), 1124–1133.
- 174-Millogo, Y., Morel, J-C., Aubert, J-E., Ghavami, K., “Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers”, *Constr. Build. Mater.*, V.52, (2014), 71-78.
- 175-M.,Giroudon., A. Laborel-Préneron, J. Aubert, Camille Magniont., "Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks"., *Construction and Building Materials* 202 (2019) 254–265.
- 176-Khedari J, Charoenvai S, Hirunlabh J. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Build Environ*;38(3):245–254, 2003.
- 177-Ashoura, T., Korjenicb, A., Korjenicc, S., Wu, W., “Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum”, *Energy and Buildings*, V.104, (2015), 139–146
- 178-NF P94-056. «Sols : reconnaissance et essais — Analyse granulométrique par tamisage ». AFNOR, (Mars 1996).
- 179-NF P94-057. «Sols : reconnaissance et essais — Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation ». AFNOR, (Mai 1992)
- 180-NF P 94-051, Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.
- 181-NF P 94-093. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. (Septembre 1997).
- 182-ASTM D559 (1989) Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- 183-ISO 8894-1, Matériaux composites - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes à fil chaud (thermomètre à réseau croisé et à résistance). (1987).

- 184-NFP 94-052-1 , Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : Limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration).
- 185-NF P 94-060-1 , Sols : reconnaissance et essais – Essais de dissiccation – Partie 1 : Détermination conventionnelle de la limite de retrait.
- 186-Magniont, C., “Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, phd thesis, (2010).
- 187-NFP 94-077 «Sols : reconnaissance et essais — Essai de compression uniaxiale».
- 188- Cid-falceto, J., Mazarrón, F. R., Cañas, I., “Assessment of compressed earth blocks mae in Spain : International durability tests”, *Constr. Build. Mater*, V. 37, (2012), 738–745, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019.
- 189-WD-ARS 1333, African standard, Compressed stabilized earth blocks — Requirements, production and construction, african organisation for Standardisation Nairobi, Kenya, (2018).
- 190-SAZ. Standards Association Zimbabwe Standard (SAZS) 724:2001: standard code of practice for rammed earth structures. harare: Standards Association of Zimbabwe, (2001).
- 191-Abbasi, N., Mahdieh, M.. “Improvement of geotechnical properties of silty sand soils using natural pozzolan and lime”, *International Journal of Geo-Engineering*. (2018), 1-22. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0072-4>.
- 192-Le Runigo, B., Ferber, V., Cui, Y.J., Cuisinier, O., Deneele, D., “Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions”, *Engineering Geology*, V.118, (2011), 20–28.
- 193-Consoli, N. C., Dalla Rosa Johann, A., Gauer, E. A., Dos Santos, V. R., Moretto, R. L., Corte, M. B. “Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures” , *Geotech. Lett.*, V.2, (2012), 81–85.
- 194-Rabbani, P., Daghigh, Y., Reza, A. M., Karimi, M., Tolooiyan, A., “The potential of lime and grand granulated blast furnace slag (ggbs) mixture for stabilisation of desert silty sands” , *J. Civ. Eng. Res.*, V.2, (2012), 108–119.
- 195-Arquie, “Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats de compactage” *Bull. Liaison Labo. Ponts et chaussées* N°64, (1973), 145-158.
- 196-Danso, H., “Use of agricultural waste fibres as enhancement of soil blocks for low-cost housing in ghana”, *Phd thesis, University of Portsmouth*, (2016).
- 197-Khebizi, W., “Etude de la durabilité des sols argileux améliorés avec des ajouts minéraux”, *mémoire Magister, université chlef* , (2011).

- 198-Jeefferie, A. R., Nurul Fariha, O., Mohd Warikh, A. R., Yuhazri, M. Y., Sihombing, H. Ramli, J., “ Preliminary study on the physical and mechanical properties of tapioca starch sugarcane fiber cellulose composite”. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, (2011).
- 199-Obonyo, E., Exelbirt, J., & Baskaran, M., “Durability of Compressed Earth Bricks: Assessing Erosion Resistance Using the Modified Spray Testing”, *Sustainability*, (2010). 2, 3639-3649; doi:10.3390/su2123639
- 200-Eko, R. M., Mpele, M., Doumtsop, M. H. D., Minsili, L. S., “Some hydraulic, mechanical, and physical characteristics of three types of compressed earth blocks”. *Engineering International, the CIGR Journal*, (2006), 1-15.
- 201-Powers, T. C., “Causes and control of volume change”, *Journal of Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, V. 1, (1959), 29–39.
- 202-Mahedi, M., Cetin, B., David, J. W., “Performance evaluation of cement and slag stabilized expansive soils”, *Transportation research record*, (2018), 1–10.
- 203-Segetin, M., Jayaraman, K., XU, X., “Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties”, *Building and Environment*, V. 42, 3066–3079, (2007), doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.033. 2007.
- 204-Hibouche, A., “Sols traites aux liants. Performances hydro-mecaniques et hygro thermiques Applications en BTP”. *Thèse doctorat. Universtie du Havre*. (2013), p. 374.
- 205-Ghavami, K., Filho, R. D. T., Barbosac, N. P., “Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres”, *Cement and Concrete Composites*, V. 21, (1999), 39-48.
- 206-Zakham, N., Rhaffari, Y. El, Ammari, A., Cherraj, M., Bouabid, H., Gueraoui, K., Samaouali, A., & Mzerd, A. “Influence of cement content on the thermal properties of compressed earth blocks (CEB) in the dry state” *MATEC Web of Conferences* 149, V. 01059, (2018), 1-5.
- 207-Phung, T. A., “Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge ”, *thèse doctorat, IUniversité de Caen Normandie*.(2018).
- 208-Chmeisse, G., “Soil stabilisation using some pozzolanic industrial and agricultural by products”, *thèse de doctorat.*, (1992).
- 209-Lasledj, A., “Traitement des sols argileux à la chaux: processus physico- chimique et propriétés géotechniques”, *thèse de doctorat, Universityd’Orleans*, (2009). [.ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/abdelmadjid.lasledj_1914.pdf](ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/abdelmadjid.lasledj_1914.pdf).
- 210-Jia, L., Zhang, L., Guo, J., Yao, K., Lim, S. M., Li, B., Xu, H., “Evaluation on Strength Properties of Lime – Slag Stabilized Loess as Pavement Base Material”, *Sustainability*, (2019).

- 211-Zemouli, S., “Amélioration des propriétés géotechniques des argiles par l’utilisation de sous-produits industriels”, these de doctorat, (2016).
- 212-Subedi, S., Prasad, I., “ Effect of lime activated ground granulated blastfurnace slag (GGBS) and lime on the strength and swelling properties of kalomato soil” , Proceedings of IOE Graduate Conference, (2019), 667–674.
- 213-Pai, R. R., Patel, S., “ Effect of ggbs and lime on the strength characteristics of black cotton soil elastic modulus”. Ground improvement techniques and Geosynthetics, (319-328), 2019.
- 214-Nayak, H. K. P. S., “Geotechnical investigations on marine clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement” , Int. J. Geosynth. Gr. Eng., V. 5, (2019),1–12.
- 215-Amini, O., Ghasemi, M., “Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil”, Constr. Build. Mater., V. 223,(2019), 409–420, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.011.
- 216-Walker, P. J., “Strength and erosion characteristics of earth blocks and earth block masonry”, journal of materials in civil engineering, (2004), 497–506.
- 217-Neithalath, N., Pease, B., Moon, J.-H., Rajabipour, F., Weiss, J., Attiogbe, E. “Considering moisture gradients and time dependent crack growth in restrained concrete elements subjected to drying”, NSF Workshop on High Performance Concrete, Westerville: American Ceramic Society, (2005), 279-290.
- 218-Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., Morel, J.C., “Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building”, Build. Env., V.106, 103–119, (2016).
- 219-Sujatha, E. R., Atchaya, P., Darshan, S., Subhashini, S., “Mechanical properties of glass fibre reinforced soil and its application as subgrade reinforcement” , Road Mater. Pavement Des, (2020), 1–12.
- 220-Latha, M. S., Venkatarama Reddy, B. V., “Swell–shrink properties of stabilised earth products” , *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.*, V. 170, (2017), 3–15. doi: 10.1680/jcoma.15.00031.