

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle

En : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Par : AIT SALEM Ahmed Abdelmadjid

Sujet

**Etude des comportements mécaniques et de durabilité :
Valorisation du tuf en brique de terre compressée stabilisée
(BTCs)**

Soutenue publiquement, le 07/01/2024, devant le jury composé de :

M. ABOU-BEKR Nabil	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. ZADJAOUI Abdeldjalil	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^{me} . BOUROKBA Souad Amel	MCA	Usto, Oran	Examinatrice
M ^{me} . BENCHOUK Assia	Professeure	Univ. Tlemcen	Directrice de thèse
M ^{me} . BELAYACHI Naima	Professeure	Université d'Orléans. France	Co- Directrice de thèse
M. BEZZAR Abdelillah	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité

Remerciment

C'est avec un grand plaisir que j'écris ces mots en guise de remerciement et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette thèse et qui m'ont permis de surmonter tous les défis que j'ai rencontré sur mon chemin.

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser tous les obstacles.

*J'adresse ma profonde gratitude à mes directrices de thèse Madame **BENCHOUK Assia** professeure à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen et madame **BELAYACHI Naima** professeure à l'École Polytechnique de l'université d'Orléans — France qui m'ont poussé et encouragé tout au long de ce travail. Je les remercie pour leurs conseils, leurs esprits critiques, les nombreuses discussions constructives qui m'ont permis de mener à bien cette thèse et pour leurs qualités humaines.*

*Je remercie profondément monsieur **Nabil ABOU-BEKR**, professeur à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, de m'avoir honoré de présider ce jury, d'examiner et de rapporter ce travail.*

*Je remercie également mes deux examinateurs monsieur **Abdeldjalil ZADJAOUI**, professeur à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, et madame **BOUROKBA Souad Amel**, Maître de Conférences à l'USTO Oran, pour leur lecture profonde ; leur évaluation et d'avoir accepté la tâche de rapporter cette thèse.*

*J'exprime mes vifs remerciements à monsieur **Noureddine Choukchou-Braham**, pour son accueil dans le Laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique (LCSCO) et sa collaboration dans le cadre de la caractérisation physico- chimique des matériaux étudiés dans cette thèse, ainsi que monsieur **Mohammed Mouli** pour son accueil dans le laboratoire Labmat à l'ENP Oran, et sa collaboration dans le cadre de la caractérisation thermique de notre brique.*

*Je tiens aussi à remercier vivement monsieur **Hachimi Dahhaoui** maître de conférence à l'université de Tlemcen pour ses précieux conseils, et sa collaboration dans la partie modélisation réalisé dans le cadre de cette thèse.*

*Mes vifs remerciements à monsieur **Abdelillah BEZZAR** directeur du laboratoire EOLE ainsi que tous les membres du laboratoire.*

*Mes pensées vont également à tous mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements permanents, en particulier **SEBAA Karim**, **MEKAIDECH Oussama**, et **YOUSSARI Fatima Zohra**.*

*En fin, Un grand merci et une grande pensée à ma famille et aux personnes qui m'ont accompagné en dehors du travail et qui m'ont toujours soutenu. Merci donc à mes **chers parents**, mes frères et sœurs, mes belles-sœurs, mon beau-frère ainsi que mes neveux et nièces*

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Résumé :

La valorisation de la terre compactée comme un éco-matériau disponible et recyclable rentre dans le domaine de la protection des ressources et de l'environnement.

L'objectif de la thèse est de caractériser expérimentalement le matériau terre compacté en vue de confectionner des BTC qui répondent aux exigences de résistance mécanique, thermique et de durabilité. Il s'agit aussi de prospecter différents ajouts qui optimisent et améliorent les caractéristiques de la BTC stabilisée en tenant compte de différents aspects (résistance, tenue à l'eau, etc.).

La terre utilisée est un tuf provenant de la région de Béni-saf, qui satisfait aux exigences de la norme des briques de terre comprimée en termes de granulométrie et de plasticité. Les stabilisants utilisés dans cette étude sont la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, et les fines argileuses.

Une caractérisation mécanique a été faite par un essai de compression uni axial, thermique par une conductivité thermique, et hydrique par une absorption capillaire, et la durabilité par un essai de vieillissement rapide à travers des cycles de séchages mouillages dans l'eau et dans des solutions salines.

Ensuite des essais mécaniques et de durabilités sont effectués sur des échantillons prismatiques sous forme de briques.

Enfin une tentative de modélisation du comportement mécanique des échantillons stabilisée avec la fumée de silice par la méthode d'homogénéisation numérique est présentée à la fin de ce travail de recherche.

Mots Clés : Eco-matériau, compactage, BTC, stabilisant, résistance, durabilité homogénéisation numérique.

Summary:

The utilization of compacted earth as an accessible and recyclable eco-material aligns with the conservation of resources and environmental protection.

The objective of this thesis is to experimentally characterize compacted earth material to produce Compressed Earth Bricks (BTCs) that meet mechanical, thermal resistance, and durability standards. Additionally, the research aims to explore various additives that optimize and enhance the properties of stabilized BTCs, considering factors such as strength, water resistance.

The soil selected for this study is tuff from the Beni-Saf region, meeting the specifications outlined in the compressed earth brick standard concerning grain size and plasticity. Stabilizers employed in the study include silica fume, natural pozzolan, and fine clay.

Mechanical characterization involved uniaxial compression testing, thermal characterization focused on thermal conductivity, and hydrous characterization encompassed capillary absorption. Durability was assessed through a rapid aging test, involving cycles of drying and immersion in water and saline solutions.

Subsequent tests were conducted on prismatic samples in the form of bricks to evaluate mechanical and durability aspects.

Finally, the research concludes with an attempt to model the mechanical behavior of samples stabilized with silica fume using the numerical homogenization method.

Keywords: Eco-material, compaction, BTC, stabilizer, strength, durability, numerical homogenization.

ملخص:

إن تثمين الأرض المضغوطة باعتبارها مادة بيئية متاحة وقابلة لإعادة التدوير يقع ضمن مجال حماية الموارد والبيئة.

الهدف من الأطروحة هو التوصيف التجريبي للمواد الأرضية المضغوطة بهدف صنع الطوب الأرضي المضغوط المستقر التي تلبية متطلبات المقاومة الميكانيكية والحرارية والمتانة. كما يتضمن أيضًا استكشاف الإضافات المختلفة التي تعمل على تحسين خصائص الطوب الأرضي المضغوط المستقرة من خلال مراعاة الجوانب المختلفة (المقاومة، ومقاومة الماء، وما إلى ذلك).

الأرض المستخدمة هي طوب من منطقة بني صاف، وهو مطابق لمتطلبات معيار الطوب الترابي المضغوط من حيث الحجم الحبيبي واللدونة. المثبتات المستخدمة في هذه الدراسة هي غبار السيليكا، البوزولان الطبيعي، ودقائق الطين.

تم إجراء التوصيف الميكانيكي عن طريق اختبار الضغط أحادي المحور، والحراري عن طريق التوصيل الحراري، والماء عن طريق الامتصاص الشعري، والمتانة عن طريق اختبار الشخوخة السريعة من خلال دورات التجفيف، والترطيب في الماء وفي المحاليل الملحية.

ثم يتم إجراء الاختبارات الميكانيكية والمتانة على عينات منشورية على شكل طوب.

وأخيرا، يتم تقديم محاولة لنمذجة السلوك الميكانيكي للعينات المستقرة مع دخان السيليكا باستخدام طريقة التجانس الرقمي في نهاية هذا العمل البحثي.

الكلمات المفتاحية: المواد البيئية، الدمك، الطوب الأرضي المضغوط، المثبت، المقاومة، المتانة، التجانس الرقمي

Table des matières

Résumé :	i
Summary :	ii
ملخص :	iii
Table des matières	iv
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux	xvi
NOTATIONS.....	xviii
Introduction Générale.....	I
Chapitre 1 : Sols non saturés et construction en terre	
I. Introduction	1
II. Sols non saturés et BTC	1
III. La construction en terre	1
III.1 Historique	1
III.2 Les avantages de la construction en terre.....	3
IV La brique de terre compressée (BTC).....	3
IV.1 Les différents types de BTC	3
IV.1.1 Blocs courants	3
IV.1.2 Blocs accessoires.....	3
IV.1.3 Blocs de parement	4
IV.2 Technique de confection des BTC.....	4
IV.2.1 Choix du sol	4
IV.2.2 Fabrication et pression de compactage des blocs.....	4
IV.2.3 Séchage des blocs.....	6
IV.2.4 Densité et teneur en eau	7
IV.2.5 Relation énergie de compactage teneur en eau du moulage et densité	8
V Stabilisation de la BTC	12
V.1 Stabilisation mécanique.....	12
V.1.1 Influence de stabilisation mécanique sur les propriétés des briques	12
V.2 Stabilisation physique :	13

V.2.1 Stabilisation par correction granulaire.....	13
V.2.2 Stabilisation par l'ajout des fibres	14
V.2.2.1 Les différents types de fibres	14
V.2.2.2 Effet de l'ajout des fibres sur les propriétés des briques	15
V.3 Stabilisation chimique	15
V.3.1 Stabilisation avec la chaux	15
V.3.1.1 Réactions chaux-sol argileux	16
a) Flocculation et agglomération	16
b) Réaction pouzzolanique.....	17
V.3.1.2 Influence de l'ajout de la chaux sur les propriétés du sol.....	18
a) La consistance	18
b) Les paramètres de l'optimum Proctor.....	18
c) Propriétés mécaniques	19
d) La durabilité du sol stabilisé à la chaux :.....	19
V.3.2 Stabilisation au ciment.....	20
V.3.2.1 Réactions ciment-sol.....	20
V.3.2.2 Influence de l'ajout du ciment sur les propriétés du sol	21
a) La densité	21
b) Résistance mécanique	22
c) Absorption totale.....	22
V.3.3 Stabilisation avec des ajouts minérales	23
V.3.3.1 Effet de l'ajout des additions minérales sur les propriétés du sol.....	23
VI Principaux résultats trouvés au sein de notre équipe SNSC(laboratoire EOLE)....	25
VII. Conclusion :.....	27

Chapitre 2 : Matériaux et méthodes

I. Introduction	27
II. Aperçu géologique de l'Algérie	27
III. Matériaux utilisés.....	27
III.1 Sol	27
III.2 Types de stabilisants	28
III.2.1 Fumé de silice.....	28
III.2.2 Pouzzolane naturel.....	28
III.2.3 Fine argileuse.....	28

IV. Méthodes expérimentales	29
IV.1 Caractérisation physico-chimique	30
IV.1.1 Densité des grains solides	30
IV.1.2 La teneur en eau naturel du sol.....	30
IV.1.3 La perte au feu.....	30
IV.1.4 Composition minéralogique des différents matériaux	30
IV.1.5 Analyse thermique différentiel et analyse thermogravimétrique (ATD/ATG).....	34
IV.2 Caractéristiques géotechniques	35
IV.2.1 Analyse granulométrique	35
IV.2.2 Les limites d'Atterberg.....	36
IV.2.3 Essai de bleu de méthylène	37
IV.2.4 Equivalent de sable.....	37
IV.2.5 Teneur en matières organiques.....	38
IV.2.6 Classification du Tuf de Béni-Saf :	38
IV.2.6 Essai Proctor.....	39
IV.2.7 Détermination de la teneur en eau par compactage statique	40
V. Confection des éprouvettes cylindriques	42
V.1 Cure des échantillons	42
V.2 Méthode de caractérisation thermomécanique	43
V.2.1 Détermination des propriétés mécaniques	43
V.2.1.1 Résistance à la compression	43
V.2.1.2 Module d'élasticité dynamique.....	43
V.2.2 Détermination des propriétés thermiques	44
V.2.2.1 Conductivité thermique.....	44
V.2.2.2 Capacité de stockage thermique	44
V.2.2.3 Diffusivité thermique.....	45
V.2.2.4 Effusivité thermique	45
V.2.3 Essai d'absorption par capillarité	46
V.2.3 Essai de front de remonté capillaire	46
VII. Confection des briques de maçonnerie.....	47
VII. Propriétés des briques de terre comprimées BTC	48
VII.1 Résistance à la compression	48

VII.2 Résistance à la flexion 3 point	49
VII.3 Tenue à l'eau par immersion	50
VII.4 Abrasion par brosse métallique	51
VIII. Conclusion :	51

Chapitre 3: Comportement mécanique et hygrothermique du matériau stabilisé

I. Introduction	53
II. Comportement mécanique du matériau cru et stabilisé	53
II.1 Stabilisation avec la fumée de silice	53
II.1.1 Résistance à la compression	53
a) Effet de l'ajout de la fumée de silice sur l'évolution de la résistance à la compression	53
b) Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression	54
II.1.2 Module d'élasticité dynamique (MED)	56
a) Influence de l'ajout de la fumée de silice sur le MED	56
b) Influence de la teneur en eau sur le MED	56
II.2 Pouzzolane naturelle.....	57
II.2.1 Résistance à la compression	57
a) Influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance à la compression.....	57
b) Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression (pouzzolane)	58
II.2.2 Module d'élasticité dynamique (MED)	59
a) Influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur le MED	59
b) Influence de la teneur en eau sur le MED	59
II.3 Fines Argileuses	60
II.3.1 Résistance à la compression	60
a) Influence de l'ajout des fines argileuses sur la résistance à la compression	60
b) Influence de la densité sur la résistance à la compression	61
c) Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression	61
II.4 Récapitulatif des résultats de la résistance à la compression	63
III. Comportement thermique du matériau stabilisé	64

III.1 Fumée de silice.....	64
III.1.1 Conductivité thermique	64
a) Influence de l'ajout de la fumée de silice sur la conductivité thermique ..	64
b) Influence de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique	65
III.1.2 Diffusivité thermique.....	66
III.1.3 Effusivité thermique	66
III.2 Pouzzolane naturelle	67
II.2.1 Conductivité thermique.....	67
a) Influence de l'ajout de la pouzzolane sur la conductivité thermique	67
b) Influence de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique	68
III.2.2 Diffusivité thermique.....	68
III.2.3 Effusivité thermique	69
II.3 Fines argileuse	69
II.3.1 Conductivité thermique.....	70
a) Influence de l'ajout de l'argile sur la conductivité thermique.....	70
b) Influence de La densité sur la conductivité thermique (argile).....	70
c) Influence de La teneur en eau sur la conductivité thermique (argile)	71
II.3.2 Diffusivité thermique	72
II.3.3 Effusivité thermique	73
III. 4 Récapitulatif des résultats et comparaison avec la littérature	74
IV. Comportement hydrique du matériau stabilisé	75
IV.1 Fumée de silice	75
IV.1.1 Absorption par capillarité.....	75
IV.1.2 Front de remontée capillarité.....	76
IV.2 Pouzzolane	77
IV.2.1 Absorption par capillarité.....	77
IV.2.2 Front de remontée capillarité.....	78
IV.3 Fines argileuses	79
IV.3.1 Absorption par capillarité.....	79
IV.3.2 Front de remontée capillarité.....	80
IV.4 Récapitulatif des résultats d'absorption capillaire	81

V. Comportement physico-chimique du matériau stabilisé.....	82
V.1 Fumée de silice.....	82
IV.2 Pouzzolane.....	83
IV.3 Fines argileuse :	84
V. Conclusion :	85

Chapitre 4 : Durabilité et caractérisation des briques

I. Introduction	87
II. Etude de la Durabilité.....	87
II.1 Mécanismes d'attaques sulfatiques	87
II.1.1 Cas des matériaux cimentaires.....	88
II.1.2 Cas des sols :	88
II.2 Facteurs influant sur l'expansion des sols par attaque sulfatique.....	88
II.2.1 La nature du sol.....	88
II.2.2 Condition de cure.....	89
II.2.3 Les stabilisants	89
II.3 Les chlorures	89
II.3.1 Influence des chlorures sur les matériaux cimentaires	90
II.3.2 Cas des sols.....	90
II.4 Matériaux et méthodes	91
II.4.1 Cure des échantillons	91
II.4.2 Protocole d'attaque aux solutions salines	91
II.5 Résultats et discussions	92
II.5.1 Immersion totale	92
a) Immersion dans l'eau.....	92
b) Immersion dans la solution NaCl	95
c) Immersion dans la solution Na ₂ SO ₄	97
d) Récapitulatif des résultats d'immersion totale	100
II.5.2 Absorption par capillarité	100
a) Absorption par capillarité dans l'eau.....	101
b) Absorption par capillarité dans la solution NaCl	102
c) Absorption par capillarité dans la solution Na ₂ SO ₄	104
d) Récapitulation des résultats d'absorption par capillarité.....	107

III. Confection et caractérisation des blocs prismatiques	107
III.1 Résistance à la compression	108
III.2 Résistance à la flexion.....	109
III.3 Absorption capillaire	110
III.4 Résistance à l'abrasion	110
III.5 Tenue à l'eau par immersion.....	112
IV. Conclusion	113

Chapitre 5 : Modélisation par homogénéisation numérique

I. Introduction	114
II. Prélude sur les méthodologies d'homogénéisation	114
II.2 Méthodes analytiques	115
II.3 Méthodes numériques.....	116
III. Cellules unitaires et morphologies des inclusions	117
IV. Modélisation numérique du matériau BTC	119
IV.1 Comportement local des constituants	120
IV.2 Maillage et conditions aux limites	121
V. Résultats et discussions	122
V.1 Test de compression uni-axiale	122
V.2 Effet de la fraction volumique de silice	123
V.3 Effet de la morphologie des inclusions	124
V.4 Comparaison avec l'expérimental	125
VI. Conclusion :	125
C onclusion Générale.....	127
R éférences Bibliographiques	129

Liste des Figures

Figure I.1 : Le pisé.....	2
Figure I.2 : Le torchis	2
Figure I.3 : L'adobe	2
Figure I.4 : La brique de terre compressée (BTC)	2
Figure I.5: Différentes étapes du processus de compactage statique.....	6
Figure I.6 : Conditions de cure : (a) cure par vapeur, (b) cure humide (Izemmouren 2013) .	7
Figure I.7 : Courbe de compactage (Venkatarama R 1993)	9
Figure I.8 : Recommandation de la teneur en eau et la densité sèche pour les BTC (Houben et Guillaud 1994)	10
Figure I.9 : Evolution de la densité apparente en fonction de la pression de compactage (Ben Mansour 2016).....	10
Figure I.10 : Effet de diminution des vides de sol par compactage (DeJong-Hughes, 2001).	12
Figure I.11 : Influence de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996).	13
Figure I.12 : Variation de la plasticité en fonction de la teneur en eau pour différents types de sols (Doat,1979).....	13
Figure I.13 : Evolution de la résistance en compression du béton de terre stabilisée, en fonction de la teneur en sable (Guettala, 2003).	14
Figure I.14 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable. (Izemmouren et Guettala, 2014).....	14
Figure I.15 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo et al,2014).....	15
Figure I.16 : Réaction argile-chaux à court terme. (Cabane, 2004)	16
Figure I.17 : Réaction pouzzolanique chaux-argile (Locat et al 1990)	17
Figure I.18 : Evolution des limites d'Aterberg en fonction de la teneur en chaux pour plusieurs temps de cure (Lasladj, 2009).....	18
Figure I.19 : Influence de l'ajout de la chaux sur la courbe Proctor	18
Figure I.20 : Influence de plusieurs teneurs en chaux sur la résistance mécanique en fonction de temps de cure	19
Figure I.21 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de teneur en chaux (Millogo et al. 2008).....	19
Figure I.22 : murets en BTC après 48mois d'exposition avec deux teneurs en chaux (A) 8% de chaux et (B) 12% de chaux (Guettala2003).....	20

Figure I.23 : Effet de l'ajout du ciment et de l'énergie de compactage sur l'évolution de la densité des BTC (kerali,2001)	21
Figure I.24 : Evolution de la résistance à la traction et à la compression d'une terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar et al, 2004)	22
Figure I.25 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance mécanique de 3type de sol (Akpokodje ,1985).....	22
Figure I.26 : Amélioration de l'absorption en fonction des différents teneurs en ciment (Meukam, 2004)	23
Figure I.27 : Evolution de la résistance a la compression en fonction du temps de cure pour différent combinaison de stabilisation de deux sols (Hossain et al. 2007).....	24
Figure I.28 : Influence de la chaux et la pouzzolane sur la résistance mécanique (Harichane et al. 2012)	24
Figure I.29 : (a) Résistance à la compression, (b) coefficient d'absorption pour différents mélanges (Saeed I.A et al 2020).....	24
Figure I.30 : (a) Résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane pour différents temps de cure, (b) absorption d'eau en fonction de la teneur en pouzzolane (Danso H, Adu S (2019).....	25
Figure I.31 : Résistance à la compression en fonction du temps de séchage (a) énergie Proctor, (b) énergie statique (sebaa. k (2021))	25
Figure I.32 : Résistance à la compression en fonction du temps (a) stabilisation par la chaux, (b) stabilisation au ciment (sebaa. k (2021))	26
Figure I.33 : Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en eau initiale (MEKAIDECHE.K, (2021)).....	26
Figure I.34 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale (MEKAIDECHE.K, (2021)).....	27
Figure II.1 (a) Tuf de Béni-saf ; (b) Fumée de silice ; (c) Argile de Boughrara ;(d) Pouzzolane.....	28
Figure II.2 : Organigramme du protocole expérimental réalisé.	29
Figure II.3: Diffraction des rayons X selon BRAGG (Protas. 1999)	31
Figure II.4 DRX du tuf de Béni-Saf	31
Figure II.5 : DRX de l'argile de Boughrara.....	32
Figure II.6 : DRX de la Pouzzolane	32
Figure II.7 : DRX de la Fumée de silice	33
Figure II.8 Analyse thermo gravimétrique du sol.....	35
Figure II.9 : Distribution granulométrique et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1994.....	36
Figure II.11. Classifications du sol (a) classification LCPC, (b) classification GTR.....	38

Figure II.12 Compactage dynamique OPN ; OPM pour le tuf de Béni-saf.....	39
Figure II.13 : Poids volumique sec en fonction du degré de saturation pour les deux énergies Proctor	39
Figure II.14 Compactage statique (4Mpa) pour le tuf de Béni-saf et les différents mélanges	40
Figure II.15 : Nomogrammes de compactibilité (Houben et Gullaud 1994).....	41
Figure II.16 : Dispositif de mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique	44
Figure II.17 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique	44
Figure II.18: Schéma de l'essai d'absorption par Capillarité (NF XP P13-901)	46
Figure II.19 : Détermination du front de remonté capillaire	47
Figure II.20: Moule 10x20x5.....	48
Figure II.21: Presse utilisé pour la confection des briques	48
Figure II.22: Schéma de l'essai de compression	49
Figure II.23: Principaux modes de rupture en compression (Fontaine2004)	49
Figure II.24 : Schéma de l'essai de flexion 3points selon la RDM (Morel, 2003).	50
Figure II.25 : Dispositif d'essai de tenu à l'eau par immersion	50
Figure II.26 : Dispositif pour essai d'abrasion :(a)système de guidage, (b) brosse avec poids	51
Figure III.1 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en fumée de silice	54
Figure III.2 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau des échantillons traité avec la fumée de silice.....	55
Figure III.3 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en fumée de silice. .	56
Figure III.4 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en eau des échantillons traité avec la fumée de silice	57
Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle	57
Figure III.6 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau (pouzzolane)....	58
Figure III.7 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en pouzzolane	59
Figure III.8 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en eau (Pouzzolane)	60
Figure III.9 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en argile	61
Figure III.11 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau (argile).....	62
Figure III.12 : Résistance à la compression en fonction du temps de cure	63
Figure III.13 : Résistance à la compression à 28 jours	64
Figure III.14 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice	65

Figure III.15 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente (fumée de silice).....	65
Figure III.16 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice	66
Figure III.17 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice	67
Figure III.18 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane	67
Figure III.19 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente (pouzzolane)	68
Figure III.20 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane	69
Figure III.21 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane.....	69
Figure III.22 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en argile	70
Figure III.23 : Conductivité thermique en fonction de la densité apparente	71
Figure III.24 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.....	72
Figure III.25 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en argile.....	73
Figure III.26 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en argile	73
Figure III.27 : Récapitulatif des résultats de conductivité thermique et comparaison avec la littérature.....	75
Figure III.28 : Coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en fumée de silice.....	76
Figure III. 29 : Courbes de front capillaire (fumée de silice)	77
Figure III.30 : Hauteur capillaire, (a) Tuf+0%FS, (b) Tuf+4% FS, (c) Tuf+ 8% FS, (d) Tuf+10% FS	77
Figure III.31 : Coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en pouzzolane.	78
Figure III.32 : Courbes de front capillaire (pouzzolane)	78
Figure III.33 : Hauteur de capillarité, (a) Tuf, (b) Tuf+4% PZ, (c) Tuf+ 8% PZ, (d) Tuf+10% PZ	79
Figure III.34 : Coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en fines argileuses.	80
Figure III.35 : Courbes de front capillaire (argile)	80
Figure III.36 : Hauteur de capillarité, (a) Tuf, (b) Tuf+10% AR, (c) Tuf+ 20% AR, (d) Tuf+ 30% AR	81
Figure III.37 : Récapitulatif des coefficients d'absorption capillaire.	82
Figure III.38 : Microscopie électronique a balayage, (a)Tuf, (b) Tuf+8% FS, (c) Tuf+10% FS.....	83
Figure III.39 : Microscopie électronique à balayage, (a)Tuf, (b) Tuf+8% PZ, (c) Tuf+10% PZ.....	84

Figure III.40 : Microscopie électronique à balayage, (a)Tuf, (b) Tuf+20% AR, (c) Tuf+30% AR.....	85
Figure IV.1 : Elément constitutif d'une pate de ciment immergé dans le KCL (a) portlandite, (b) sel de Friedel (Medala 2005)	87
Figure IV .2 : Courbes de gonflement d'une argile d'In Amenas en présence de différents sels (Hachichi et Fleureau 1999).	90
Figure IV.3 : Cure des échantillons	91
Figure IV.4 : Types de mouillage (a) mouillage par capillarité, (b) mouillage par immersion	92
Figure IV.5 : Evolution de la masse en fonction des cycles (immersion totale dans l'eau). 93	
Figure IV.6 : Dégradation des échantillons suivant les cycles (immersion totale dans l'eau)	94
Figure IV.7 : Evolution de la masse en fonction des cycles (immersion totale dans solution NaCl)	96
Figure IV.8 : Dégradation des échantillons suivant les cycles (immersion totale dans solution NaCl)	97
Figure IV.9 : Evolution de la masse en fonction des cycles (immersion totale dans solution Na ₂ So ₄).....	98
Figure IV.10 Dégradation des échantillons suivant les cycles (immersion totale dans solution Na ₂ So ₄).....	99
Figure IV.11 : Récapitulatif des résultats d'immersion totale.....	100
Figure IV.12 Evolution de la masse en fonction des cycles (absorption par capillarité dans l'eau).....	101
Figure IV.13 Dégradation des échantillons suivant les cycles (absorption par capillarité dans l'eau).....	102
Figure IV.14 Evolution de la masse en fonction des cycles (absorption par capillarité dans solution NaCl).....	103
Figure IV.15 Dégradation des échantillons suivant les cycles (absorption par capillarité dans solution NaCl).....	104
Figure IV.16 Evolution de la masse en fonction des cycles (absorption par capillarité dans solution Na ₂ So ₄)	105
Figure IV.17 Dégradation des échantillons suivant les cycles (absorption par capillarité dans solution Na ₂ So ₄)	106
Figure IV.18 : Récapitulatif des résultats d'absorption par capillarité.....	107
Figure IV.19 Résistance à la compression en fonction du type de brique.....	108
Figure IV.21 Résistance à la flexion de la BTC en fonction du type de stabilisant	109
Figure IV.23 Coefficient d'abrasion de la BTC en fonction de type de stabilisant	111

Figure IV.24 Etat des briques après essai d'abrasion, (a) TM, stabilisée, (b) T.10PZ, (c) T.30AR, (d) T.10FS.....	111
Figure IV.25 Tenue a l'eau par immersion en fonction de type de brique.....	112
Figure IV.26 Etat des briques après l'essai de tenue à l'eau par immersion, (a) TM, stabilisée, (b) T.10PZ, (c) T.30AR, (d) T.10FS IV. Conclusion :.....	112
Figure V.1 : Etapes d'homogénéisation à deux échelles (Dahhaoui, (2018))......	115
Figure V.2 : Définition de la taille pour des blocs de formes différentes. (a) En forme de cercle ; (b) De forme carrée ; (c) En forme d'hexagone ; (d) En forme d'ellipse avec l'angle d'orientation étant 0° ; (e) En forme d'ellipse avec l'angle d'orientation étant de 45° ; (f) En forme d'ellipse avec l'angle d'orientation étant de 90° (Wenan et al (2022)).....	117
Figure V.3 : Cellule unitaire 3D géométrique schématique pour sphérique, cubique et renforcement cylindrique (Belayachi et al. 2012).	118
Figure V.4 : Représentation schématique 3D de la cellule unitaire pour le renforcement sphérique, cubique et aléatoire à 8 sphères.....	119
Figure V.5 : Microscopie électronique a balayage (a) Tuf+8% fumée de silice, (b) Tuf+ 10% fumée de silice	119
Figure V.6 : Exemple du maillage pour le cas d'une inclusion sphérique	121
Figure V.7 : Courbe contrainte déformation des deux mélanges	122
Figure V.8 : Comportement macroscopique contrainte/déformation pour (a) inclusion sphérique, (b) 8 inclusion sphérique, (c) inclusion cubique	123
Figure V.9 : Effet de la morphologie de l'inclusion sur le comportement contrainte/déformation pour les deux teneurs en fumée de silice.....	124
Figure V.10 : Comparaison du comportement de contrainte/déformation pour les différentes inclusions avec l'expérimental	125

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Les différentes machines et leurs énergies de compression (Houben et al. 1994)	5
Tableau I.2: Pression de compactage utilisée pour la fabrication de blocs de terre dans des études antérieures.	6
Tableau I.3 : Densité trouvé par différents chercheurs dans des études antérieurs	7
Tableau I.4 : Teneur en eau du moulage utilisé par différents chercheurs	8
Tableau I.5 : Densité sèche en fonction du taux de compactage (Humphrey, 2015)	9
Tableau I.6 : Synthèse de caractéristiques de compactages et mécaniques de BTC et BTCs	11
Tableau II.1 : Résultats de l'analyse minéralogique des différents matériaux utilisées.....	33

Tableau II.2 : Récapitulatif des caractéristiques géotechniques et physiques du Tuf de Béni-Saf.....	42
Tableau III.1 : Récapitulatif des résistances à la compression et des teneurs en eau (fumée de silice).....	55
Tableau III.2 : Récapitulatif de la résistance à la compression ainsi que les teneurs en eau (pouzzolane)	59
Tableau III.3 : Récapitulatif de la résistance à la compression ainsi que les teneurs en eau (argile)	62
Tableau V.1 Avantages et Limites des Méthodes Analytiques et Numériques.....	115
Tableau V.2 Paramètre mécanique du matériau	120

NOTATIONS

BTC	:	Brique de terre comprimée
BTCs	:	Brique de terre stabilisée
Sr	:	Degré de saturation
Rc	:	Résistance à la compression
E	:	Module d'élasticité
G _d	:	Densité sèche
γ _{dmax}	:	Densité sèche maximale
W	:	Teneur en eau
W _{opt}	:	Teneur en eau optimale
G	:	Densité du matériau
v	:	Coefficient de Poisson
G _s	:	Densité des grains solides
W _L	:	Limite de liquidité
I _p	:	Indice de plasticité
Ac	:	Activité du sol
V.B.S.	:	Valeur de bleu de méthylène
MO	:	Teneur en matière organique
OPN	:	Optimum Proctor normal
OPM	:	Optimum Proctor modifié
C	:	La capacité volumique thermique (J. m ⁻³ . K ⁻¹)
D	:	La diffusivité thermique (m ² /s)
e	:	L'épaisseur (m)
λ	:	La conductivité thermique (W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
Na ₂ SO ₄	:	Sulfate de sodium
NaCl	:	Chlorure de sodium
Cb	:	Coefficient d'absorption d'eau
Ca	:	Coefficient d'abrasion

Introduction Générale

Les applications sur les sols compactés, non saturés, sont divers et variés dans le domaine de la mécanique des sols. On peut en citer : les remblais routiers, barrages, les centres d'enfouissement techniques,... Parmi les domaines d'application des sols compactés, on s'intéresse dans cette thèse aux sols destinés à la construction en terre, une construction économique et écologique. La technique de construction par la brique de terre compressée BTC fera l'objet de nos investigations. Ce choix est dicté par la possibilité d'industrialisation de ce procédé de construction.

L'expansion croissante de l'utilisation des briques de terre comprimée à l'échelle mondiale trouve sa justification dans leur coût abordable et leurs propriétés hygrothermiques extrêmement bénéfiques. Cependant, il est souvent nécessaire de stabiliser la terre crue utilisée dans leur fabrication pour améliorer son comportement. Cette stabilisation peut prendre différentes formes, qu'il s'agisse d'une stabilisation mécanique par compactage pour accroître la compacité et réduire la porosité, d'une stabilisation physique par correction granulaire, ou encore d'une stabilisation chimique par l'ajout de liants hydrauliques ou d'additifs minéraux.

Notre équipe de recherche, Sols non Saturés et Couplages du laboratoire Eole, a entrepris plusieurs études sur le matériau Tuf provenant de la région de Béni-saf. La première phase étant d'étudier les caractéristiques des BTC crues et stabilisées par le ciment et la chaux. Cette approche a permis d'améliorer les propriétés mécaniques et hygrothermiques du matériau. Cependant, le matériau reste encore sensible à l'eau, ce qui nous a conduits à explorer un deuxième axe à savoir l'utilisation d'additifs minéraux pour améliorer les performances mécaniques et aussi la durabilité de notre BTC comme second objectif qui sera traité lors de cette thèse de doctorat.

L'objectif principal de cette thèse est donc la valorisation de matériau local de déblai en un eco-matériau destiné à la fabrication de brique de terre crue stabilisée. Trois types de stabilisants ont été utilisés dans cette démarche afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et hygrothermiques, à savoir la pouzzolane de Béni-saf, la fumée de silice, et l'argile provenant de la région de Boughrara.

Enfin, pour évaluer la durabilité de notre travail, une étude approfondie a été menée, impliquant un vieillissement accéléré par des cycles de séchage-mouillage dans l'eau et dans des solutions salines.

Il faut souligner que la partie expérimentale de la thèse a accusé beaucoup de retard par rapport aux objectifs initiaux ceci due à la période de la pandémie COVID 19, où l'accès au laboratoire était pratiquement impossible.

Cette thèse est constituée de cinq chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les techniques de construction en terre, les différents types de stabilisants utilisés dans la BTC. Il décrit aussi l'influence des paramètres d'état sur le comportement de la brique, ainsi que l'influence des stabilisants sur les paramètres mécaniques, thermiques, et de durabilité de la BTC.

Le deuxième chapitre est dédié en premier aux résultats de caractérisation géotechnique et physico-chimique du sol et des différents stabilisants. Une seconde partie traite les résultats des différents essais de caractérisation mécanique thermique et de durabilité de la brique de terre crue.

Le troisième chapitre montre l'effet de chaque stabilisant (pouzzolane, fumée de silice, argile) sur le comportement thermique, mécanique, et hydrique.

Le chapitre quatre, traite de la durabilité par une immersion totale et une absorption par capillarité dans l'eau et dans les solutions salines. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques et prismatiques présentant les meilleures caractéristiques trouvées dans le chapitre trois.

Un cinquième et dernier chapitre présente une tentative de modélisation numérique du comportement mécanique par la méthode d'homogénéisation numérique. Des simulations ont été réalisées et comparés aux résultats expérimentaux.

On clôture notre travail par une conclusion générale et des perspectives en suggérant quelques pistes à explorer pour les recherches futures.

Chapitre 1 :

**Sols non saturés et
construction en
terre**

I. Introduction

Bien que les constructions à base de sol soient d'origine ancienne, la technologie moderne du bloc de terre comprimée (BTC) date des années 1950 c'est une technique écologique économique pour transformer le sol en un produit de construction durable et respectueux de l'environnement. La BTC c'est une technique de fabrication de briques modernes. Au lieu que la terre soit moulée à la main dans un cadre en bois comme pour l'adobe, ou compactée dans des formes comme pour le pisé, les BTC sont formés en comprimant la terre dans une presse en acier.

La terre crue est souvent critiquée suite à sa sensibilité à l'eau. L'emploi des additions minérales dans la fabrication des BTC fait l'objet d'un intérêt mondial dans le domaine de matériaux compacté car elle peut faire l'objet de l'amélioration des propriétés mécanique et de l'insensibilité à l'eau des briques de terre comprimée.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord introduire les sols non saturés et leurs applications particulièrement la construction en terre. Après on présentera une étude bibliographique sur les BTC avec les différents types de briques, les différents types de stabilisation, l'influence des paramètres d'état sur les différents propriétés des briques et enfin les principaux résultats trouvés au sein de notre équipe de recherche.

II. Sols non saturés et BTC

Étant donné que la recherche dans la mécanique des sols a principalement été menée dans les pays tempérés, les développements se sont principalement concentrés sur les sols saturés.

Cependant, il est aujourd'hui plus important que jamais d'étudier le comportement des sols non saturés. Cette nécessité a d'abord été mise en évidence dans les régions au climat sec ou aride, où les événements d'évaporation et de précipitations entraînent des fluctuations considérables des profils de teneur en eau.

Ces variations peuvent entraîner des problèmes tels que le gonflement des argiles ou l'effondrement des limons.

Parmi les applications des sols on trouve le compactage de la terre sous forme de brique de terre compressée. Une connaissance plus approfondie des phénomènes de non saturation est donc nécessaire. La caractéristique principale liée à la non saturation est le phénomène de succion.

III. La construction en terre

III.1 Historique

La terre, comme la pierre ou le bois, a été l'un des premiers matériaux utilisés par l'homme pour construire. Facilement disponible, la terre a été mise en œuvre suivant différentes techniques.

Pour améliorer celles-ci, la terre a parfois été additionnée à des matériaux d'origine minérale ou végétale ou même animale. Jusqu'au début du XXème siècle, la terre non cuite était encore couramment utilisée dans les campagnes françaises pour bâtir fermes et dépendances (Guillaud, Joffroy, Odul 1985).

La gamme des techniques de mise en œuvre est variée, mais elles n'ont pas toutes eu le même développement. Parmi ces techniques :

Murs composés d'éléments :

- L'adobe : brique de terre crue, moulée et séchée au soleil.
- La brique de terre compressée : version moderne de l'adobe, la BTC requiert l'utilisation de presse manuelle, mécanique ou hydraulique

Murs coffrés

- Le pisé, où la terre est coffrée entre 2 banches.

Murs à ossature bois

- Le torchis, mélange de terre et fibres végétales disposé entre les éléments porteurs en bois d'une construction.



Figure I.1 : Le pisé



Figure I.2 : Le torchis



Figure I.3 : L'adobe

Figure I.4 : La brique de terre compressée (BTC)

III.2 Les avantages de la construction en terre

- Matériau souvent disponible à proximité des lieux d'utilisation,
- Matériau assurant une bonne inertie thermique source de confort,
- Matériau recyclable.
- Matériau peu consommateur de liant (économique et écologique).

IV La brique de terre compressée (BTC)

Le bloc de terre compressée est la version moderne des briques d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la performance de blocs de terre moulés est cependant loin d'être nouvelle et c'est avec les tampons en bois que le premier des blocs de terre comprimée ont été produits. Ce processus est encore utilisé dans certaines parties du monde (Rigassi, 1995). Ces blocs sont généralement montés à joints de mortiers, servant à la construction des murs et des cloisons.

Les BTC combinent les meilleures caractéristiques de la technologie de la terre traditionnelle et des processus de fabrication de briques modernes. Au lieu que la terre soit moulée à la main dans un cadre en bois comme pour l'adobe, ou compactée dans des formes comme pour le pisé, les BTC sont formés en comprimant la terre dans une presse en acier. Le compactage est le processus de stabilisation mécanique d'un sol en pressant les particules de sol dans un état proche de contact afin que l'air emprisonné puisse être expulsé de la masse du sol. Actuellement, les blocs de terre sont compactés avec des machines à blocs de terre comprimée telles que des presses manuels, mécaniques, hydrauliques. Cela peut être fait de trois manières :

- Compactage dynamique : à partir de l'essai Proctor
- Compactage statique : avec un compacteur statique ou une presse de compactage
- Compactage vibratoire : par le biais d'une table vibrante

IV.1 Les différents types de BTC

La BTC se présente sous différentes formes suivant l'emploi, ci-après les types d'utilisations :

IV.1.1 Blocs courants

Blocs utilisés pour constituer les parties pleines des murs ou des cloisons. Les blocs courants peuvent être entiers ou partiels.

IV.1.2 Blocs accessoires

Blocs de forme ou de structure interne différentes de celles des blocs courants auxquels ils sont associés pour la réalisation de points particuliers de la maçonnerie tels que : chaînage vertical, linteau.

Les blocs accessoires sont généralement destinés à servir de coffrage perdu pour des éléments en béton armé, ce qui va donc améliorer les performances mécaniques de l'ensemble blocs accessoires, béton armé.

IV.1.3 Blocs de parement

Blocs dans lesquels la où les faces apparentes sont réalisées de manière à constituer le parement du mur ou de la cloison.

IV.2 Technique de confection des BTC

La technique de production participe largement à la prolongation de la vie d'une construction en terre crue.

IV.2.1 Choix du sol

Les sols les plus adéquats à la fabrication des briques de terres crues sont celle qui répond aux exigences des différentes normes qui se trouve dans la littérature (NF XP P13-901). Il arrive parfois que la composition de la terre ne soit pas idéale. Par exemple, on constate :

- L'apparition de fissures dans les briques lors du séchage (trop d'argile).
- La cohésion de la pâte est trop faible (trop de sable).

Cependant, une simple correction permettra d'ajuster la qualité du sol ajouté du sable pour améliorer la cohésion ou réduire le taux d'argile pour éviter l'apparition de fissuration engendré par le retrait pendant le séchage des briques.

IV.2.2 Fabrication et pression de compactage des blocs

Les briques de terre compressée sont obtenues par compactage statique de la terre stabilisée ou non stabilisée, exercé par le biais d'une presse suivant différentes énergies de compactage.

Les blocs de terre compressée généralement n'ont pas de perforations et les formats les plus courants sont 14 cm X 9,5 cm X 29,5 cm et 22 cm X 9,5 cm X 22 cm. (NF XP P13-901).

Plusieurs chercheurs ont utilisé différentes géométries de BTC, cubique et rectangulaire.

Les essais réalisés sur des échantillons de section carrée ou cylindrique ne donnent pas nécessairement les mêmes résultats. En effet, la forme de l'échantillon influe sur la façon dont il est traité et, par conséquent, sur la qualité du matériau. Par exemple, le compactage est moins efficace dans les coins de la terre comprimée, ce qui pourrait expliquer pourquoi les résistances mesurées sont inférieures à celles des cylindres ayant le même allongement (Maniatidis, 2008).

Si différentes qualités de moules sont utilisées pour comparer diverses géométries, cela peut également contribuer à expliquer les incohérences de mesure, étant donné que la qualité du moule ou du coffrage utilisé influe également sur la qualité du traitement (Azeredo, G. 2007).

Lorsque la taille de l'échantillon est trop petite, la densité mesurée s'écarte de la valeur mesurée sur des blocs suffisamment grands, selon Collet, (2004), qui a utilisé des blocs de plus en plus petits pour mesurer la densité apparente.

Le compactage est la technique de stabilisation des sols la plus connue, utilisée pour améliorer la résistance et réduire la porosité. Cette technique amène le sol d'un état meuble à un état dense en fournissant de l'énergie de compactage. Il existe deux types de techniques de compactage du sol :

- Le compactage statique
- Le compactage dynamique.

L'amélioration de la résistance, la réduction de la porosité et d'autres propriétés dépendent de la composition du sol, de la teneur en eau de moulage et de l'énergie de compactage fournie.

La pression exercée sur le sol dans moule est appelé la pression de moulage. Où on distingue deux types de presse :

- Presses à main atteindrent des pressions de moulage typiques de 1,38 à 3,45 MPa
- Presses hydrauliques peuvent atteindre des pressions de moulage de 13,8-17,2 MPa.

Des pressions de moulage plus élevées produisent généralement des BTC plus forts (Adam, 2001)

Venkatarama Reddy, (1993) a dit que Le taux de compactage (H/T) ne doit pas être inférieur à 1,70 avec : (H) la hauteur du mélange mis dans le moule avant compactage et (T) l'épaisseur du bloc, qui doit être limitée à 100 mm. Une épaisseur de bloc supérieure à 100 mm peut entraîner une variation de la densité du bloc sur toute son épaisseur lorsque le processus de compactage statique est utilisé

Une étude menée par (Houben et al. 1994) a donné un aperçu sur les différentes machines et de leurs énergies de compression, présenté dans le tableau I.1

Tableau I.1: Les différentes machines et leurs énergies de compression (Houben et al. 1994)

Type de machine	Energie De Compression (Mpa)
Ttera structure TPM	1,2
Untata 1003	2,5
Urpata 5005	3,7
AltechGeo 50	3,5
Appro-Techno Terstaram	3,6
Ausbildungsverbund AVM CINVA Ram	2,0
Nigerian building and road research NBRRI block making machine	3,0
Shelbertech block press	1-2
Societe nouvelle presse a parpaing	1,1
Cartem manual elephant block maker	10,8
Ceratecceraram	2,4 + Impact
Concrete machin erysystems BREPAK	10,8

La Figure I.5 montre les différentes étapes du processus de compactage statique dans une presse. Elle se résume à :

- Remplir le moule avec du sol et fermer le couvercle,
- Compacter le sol en déplaçant le piston soit manuellement ou mécaniquement,
- Ouvrir le couvercle et faire sortir la brique du moule.

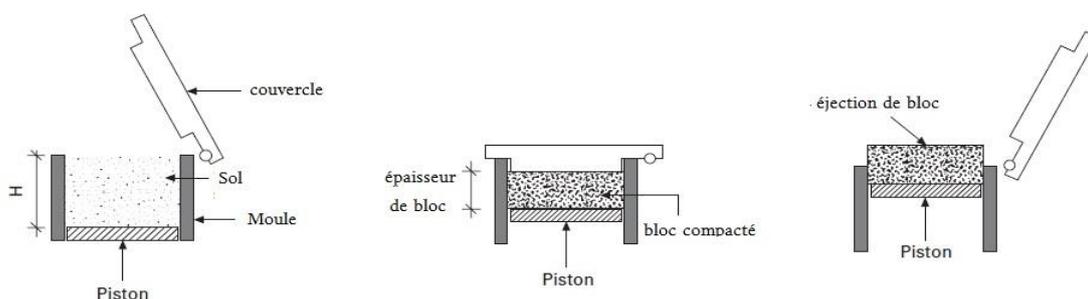


Figure I.5: Différentes étapes du processus de compactage statique

Tableau I.2: Pression de compactage utilisée pour la fabrication de blocs de terre dans des études antérieures.

Auteur	Energie de compression (Mpa)
Peter (1996)	2
Jase. Sitton (2018)	15,5
Kenneth (2015)	10,7
Ben mansour (2016)	de 0,39 à 3,16
Lawson, (2011)	5,17 et 9,31
Kerali (2002)	6
Guettala (2006)	15
Miqueleiz (2012)	13
Chan (2011)	10
Danso (2015)	10
Millogo (2014)	2
Muntohar (2011)	15
Oti (2009)	15

IV.2.3 Séchage des blocs

Le processus du séchage joue un rôle essentiel et influence largement les propriétés mécanique et thermique des BTC. Il existe plusieurs modes de séchage des blocs, les méthodes les plus utilisés sont :

- La cure par vapeur
- La cure en atmosphère humide.

Izemmouren, (2013) a utilisé ces deux méthodes de cure dans son étude (Figure I.6)



Figure I.6 : Conditions de cure : (a) cure par vapeur, (b) cure humide (Izemmouren 2013)

IV.2.4 Densité et teneur en eau

Cette propriété est intéressante car elle peut être corrélée avec de nombreuses propriétés du matériau, telles que thermique ou caractéristiques mécaniques.

La masse volumique apparente est déterminée à partir du rapport entre la masse de l'échantillon et son volume apparent selon la norme française NF P18-559 AFNOR.

A partir de la masse volumique et la teneur en eau on détermine le poids volumique sec γ_d .

Le tableau suivant montre les masses volumiques obtenues par différents chercheurs dans la littérature

Tableau I.3 : Densité trouvé par différents chercheurs dans des études antérieurs

Auteur	Masse volumique (kg/m ³)
Peter (1996)	1733 et 1775
Kenneth (2015)	2033
Ben mansour (2016)	de 1610 à 2194
Guettala (2006)	1520
Guettala (2006)	1520
Miqueleiz (2012)	2020
Chan (2011)	1780
Danso (2015)	1951
Muntohar (2011)	1740
Oti (2009)	1800

Le compactage de la BTC à une teneur en eau proche de l'optimum (compactage statique) permettra d'améliorer ses propriétés telles que : La résistance mécanique, la résistance à l'eau, la durabilité et la conductivité thermique (Rigassi1995, Nelson 1997).

Le tableau suivant résume toutes les teneurs en eau de moulage utilisé pour la fabrication des BTC dans des études antérieures :

Tableau I.4 : Teneur en eau du moulage utilisé par différents chercheurs

Auteur	Teneur en eau (%)
Jase. Sitton (2018)	De 8,2 à 11,4
Ben mansour (2016)	13
Lawson, (2011)	W_{opt}
Lawson, (2011)	$W_{opt} -3$
Lawson, (2011)	$W_{opt} +3$
Kerali (2002)	8,5
Guettala (2006)	W_{opt} (11.75)
Miqueleiz (2012)	W_{opt}
Chan (2011)	18
Danso (2015)	W_{opt}
Millogo (2014)	20
Muntohar (2011)	W_{opt} (19)
Oti (2009)	W_{opt}

IV.2.5 Relation énergie de compactage teneur en eau du moulage et densité

Une bonne compréhension des divers aspects du compactage statique des sols est nécessaire pour la conception et le développement de machines pour la fabrication de BTC. La force / l'énergie nécessaire au compactage d'un bloc de sol, les relations humidité, densité et énergie et la teneur en humidité optimale sont quelques-unes des questions examinées par (Olivier, 1994) et (Venkatarama, 1983).

L'énergie de compactage fournie n'est pas une valeur fixe et dépend de la composition du sol, de la teneur en humidité et de la densité cible. Par conséquent, les relations densité / humidité standard classiques de Proctor sont sans rapport avec le processus de compactage statique utilisé dans la production de BTC par presse. Différentes étapes impliquées dans le compactage statique.

Un effort de compactage plus élevé conduit à une valeur plus élevée de (γ_{dmax}) et à une réduction de la (w_{opt}). Dans l'essai Standard Proctor, l'énergie fournie à l'échantillon de sol est fixée.

Dans le processus de compactage statique, (γ_{dmax} ; w_{opt}) n'apparaissent pas, car l'énergie fournie n'est pas constante. Tout en utilisant le procédé de compactage statique (figure I.7), il est préférable d'atteindre autant que possible la densité sèche en utilisant une teneur en eau appropriée. Les courbes de compactage statique pour un apport d'énergie constant

peuvent être générées indirectement par le biais de relations énergie – densité et énergie – humidité (Venkatarama, 1993).

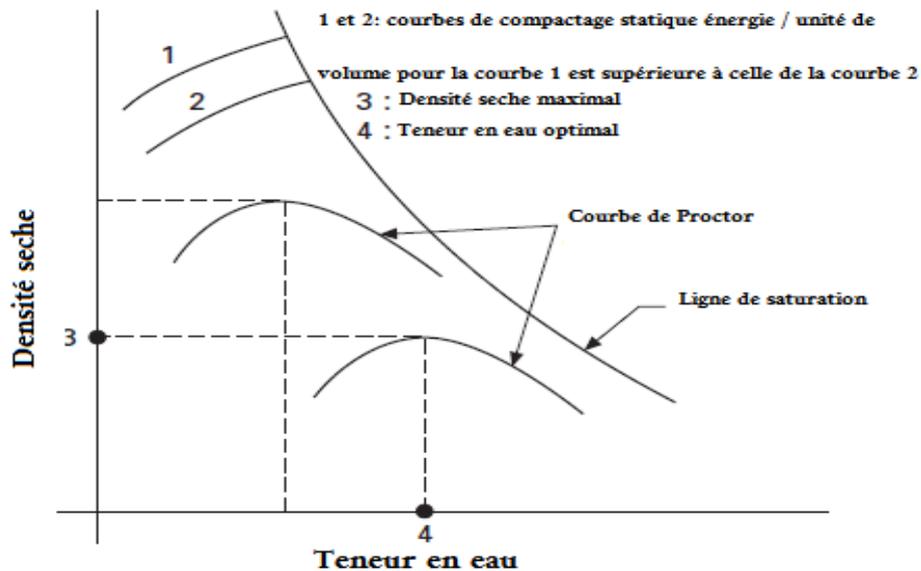


Figure I.7 : Courbe de compactage (Venkatarama R 1993)

Humphrey, (2015) a fait varier la vitesse de compactage de sol pour voir si elle pourrait aussi bien affecter la densité des blocs de terre comprimée. et il affirme que la densité moyenne est étroitement liée à la vitesse de compactage.

Humphrey, (2015) a dit que plus la vitesse de compactage est lente, plus le réarrangement des grains est parfait, ce qui engendre une meilleure densité (cf. tableau I.5)

Tableau I.5 : Densité sèche en fonction du taux de compactage (Humphrey, 2015)

Vitesse de compactage (mm/min)	Masse volumique sèche (kg/m ³)
1	1894
5	1890
10	1866
15	1871

Houben et Guillaud 1994, ont utilisé le compactage comme moyen de sélection des sols destinés à la construction en terre, ce nomogramme donné un graphe densité sèche en fonction de la teneur en eau de moulage figure I.8 avec des zones recommandées pour les briques de terre comprimée, la terre battue, et les briques d'adobe, ou on peut superposer nos résultats de compactage statique pour voir si le sol qu'on vas utiliser peut être valoriser en construction en terre.

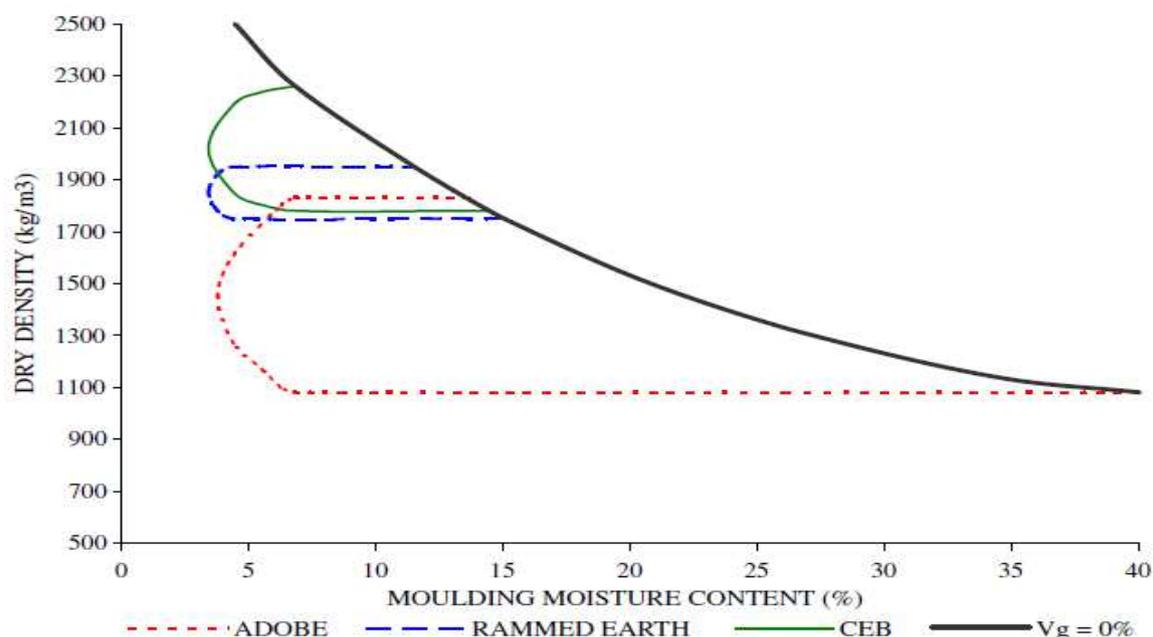


Figure I.8 : Recommandation de la teneur en eau et la densité sèche pour les BTC (Houben et Guillaud 1994)

Ben Mansour, (2016) a étudié l'influence de la pression de compactage sur la densité apparente des blocs en BTC (figure I.9). Il remarque que la densité augmente avec l'augmentation du pression de compactage

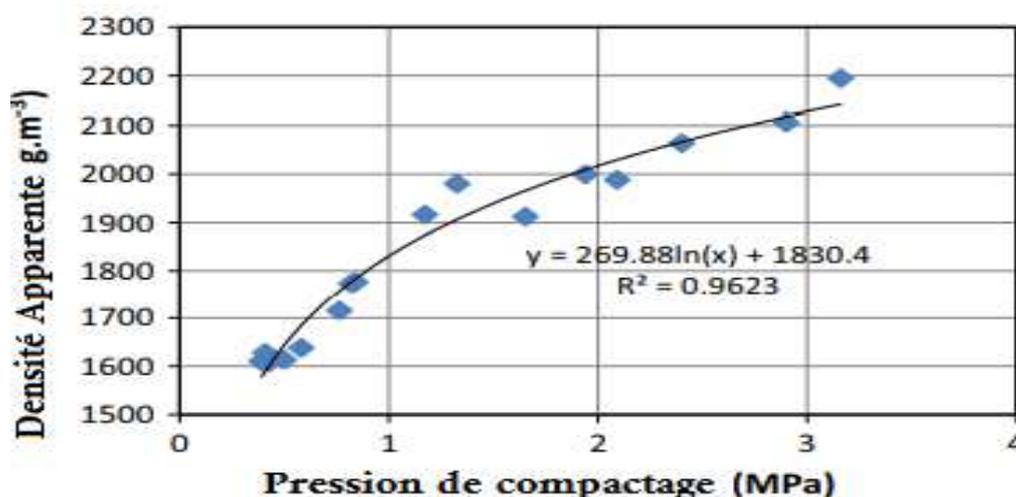


Figure I.9 : Evolution de la densité apparente en fonction de la pression de compactage (Ben Mansour 2016).

Après lectures de plusieurs travaux expérimentaux, nous avons rassemblé dans le tableau I.6 les valeurs de l'énergie de compactage et la teneur en eau utilisé, et leurs influences sur les caractéristiques des blocs

Tableau I.6 : Synthèse de caractéristiques de compactages et mécaniques de BTC et BTCs

	Auteur	Dimension des blocs (mm)	Type de presse	Énergie de compression (MPa)	Masse volumique (Kg/m3)	Teneur en Chaux (%)	Teneur en Fibre (%)	Teneur en ciment (%)	Teneur en eau (%)	RC (MPa) à 28 jours	Absorption (%)	RF (MPa) à 28 jour
BTC Stabilisé	Peter (1996)	295x140x125	Manuel	2	1733	/	/	5	/	3,67	14,6	/
	Peter (1996)	295x140x125	Manuel	2	1775	/	/	10	/	10	13,1	/
	Jase, Sitton (2018)	/	Presse hydraulique BP714.	15,5	/	/	/	de 3,5 à 10,91	de 8,2à11,4	15,15	/	/
	Kenneth Mak (2015)	/	Presse hydraulique AECT 3,500	10,7	2033	/	/	5	/	12,6	/	/
	Dulal et all (2023)	300 x 150 x 100	Presse manuel	/	1770	/	/	De 5 à 20	14,18	De 3,83 à 6,4	De 17,75 à 6,7	De 0,24 à 1,33
	Kenneth Mak (2015)	/	Presse hydraulique AECT 3,500	10,7	2033	/	/	10	/	18,7	/	/
	Kerali (2002)	100 x100 x100	Presse hydraulique	6	/	/	/	5	8,5	1,49/6,85	/	/
	guettala (2006)	100 x 100 x200	Compactage statique	15	1520	3	/	5	OMC (11.75)	17,5	8,1	/
	guettala (2006)	100 x 100 x200	Compactage statique	15	1520	4	/	8	OMC (11.75)	21.5	7,9	/
	Danso (2015)	290x140x100	Presse hydraulique (BREPAC)	10	1951	/	0,5	/	OMC	2,8	8,1	1,1
	Limami et all (2023)	160 x40 x40	Presse hydraulique	/	De 1400 à 1770	/	De 0 à 20%	/	17,25	De 2,52 à 8,75	/	/
	Millogo (2014)	295x140x100	Presse manuel (G50)	2	/	/	8	/	20	/	3,07	/
	Muntohar (2011)	230 x110 x55	Presse hydraulique	15	1740	5	/	/	OMC (19)	13	/	/
Oti (2009)	215x102x65	Presse hydraulique à commande manuelle	15	1800	1,5	/	/	OMC	4	17	/	
BTC non Stabilisé	Ben mansour (2016)	7x7x28	Presse hydraulique	De 0,39 à 3,16	De 1610 à 2194	/	/	/	13	de 0,4 à 4,2	/	/
	Lawson, (2011)	305x152x102	Presse manuel	5,17 et 9,31	/	/	/	/	OMC	3,5et 4,5	/	0,38 et 0,53
	Lawson, (2011)	305x152x102	Presse manuel	5,17 et 9,31	/	/	/	/	OMC-3	1,8et2,3	/	0,19 et 0,28
	Lawson, (2011)	305x152x102	Presse manuel	5,17 et 9,31	/	/	/	/	OMC+3	5,8et7	/	0,7
	miqueleiz (2012)	65x 30 (Cylindrique)	Compactage statique	13	2020	/	/	/	OMC	05à20	/	/
	Chan (2011)	290x140x100	Presse hydraulique	10	1780	/	/	/	18	/	/	/

V Stabilisation de la BTC

Les normes des BTC donnent des exigences concernant la texture du sol (granularité et plasticité) et durabilité des briques, Afin de respecter ces exigences, une stabilisation est nécessaire. Elle donne :

- Une augmentation de la densité des briques, ce qui va améliorer les propriétés physiques et thermiques des BTC.
- Réduction du risque de fissuration par la diminution du retrait et gonflement.
- Une faible perméabilité à l'eau ce qui rend la brique durable.
- Rendre les briques moins poreuses.

Dans la littérature on trouve trois types de stabilisation (mécanique, physique et chimique). On donnera quelques aspects ci-après :

V.1 Stabilisation mécanique

Elle se fait par un compactage de la terre pour modifier : sa perméabilité, sa porosité et sa densité. La brique est sensible à l'eau elle perd ses caractéristiques par le simple contact avec de l'eau. Par conséquent la stabilisation mécanique doit être associée à une stabilisation physique ou chimique. L'efficacité de la stabilisation mécanique est influencée par l'énergie de compactage, la composition du sol et le moule de compactage.

Houban et Guillaud (2006) distinguent trois types de compactage :

- Le compactage statique.
- Le compactage dynamique par vibration.
- Le compactage dynamique par impact.

(Bahar et al, 2004) ont trouvé que le compactage dynamique donne une résistance supérieure de 20% par rapport au compactage statique et de 50% par rapport au compactage vibratoire.

V.1.1 Influence de stabilisation mécanique sur les propriétés des briques

Le compactage par définition est une opération qui engendre une réduction du volume des vides dans un sol (figure I.10).

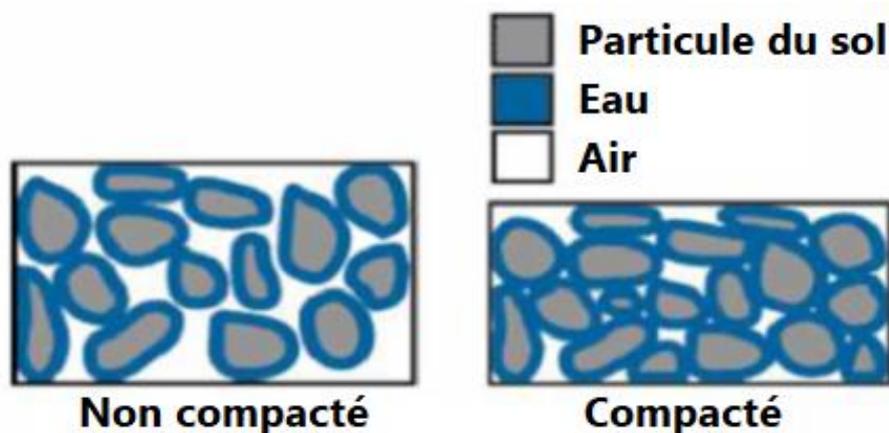


Figure I.10 : Effet de diminution des vides de sol par compactage (DeJong-Hughes, 2001).

Une grande énergie de compactage influe directement sur le sol par une diminution de la teneur en eau optimale w_{opt} et conduit à une plus grande densité sèche, (figure I.11).

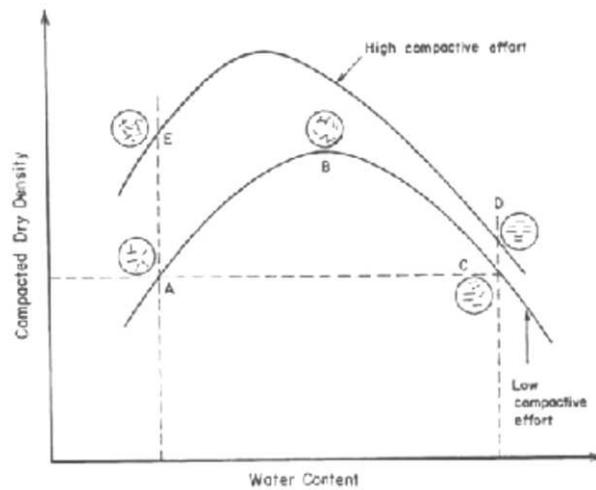


Figure I.11 : Influence de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996).

V.2 Stabilisation physique :

La stabilisation physique peut se faire par deux façons différentes :

- La première c'est que on va intervenir directement sur la texture du sol par correction de la granularité soit on diminue la plasticité par l'ajout de sable, ou lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.
- La deuxième façon c'est d'ajouter des fibres végétales dans une terre argileuse pour modifier la structure interne de la brique et l'empêcher de se fissurer au moment du retrait et du gonflement.

V.2.1 Stabilisation par correction granulaire

(Doat,1979) a présenté les variations de plasticité (limites d'Atterberg) d'un mélange argile-sable pour différents pourcentages de sable et d'argile Figure I.12.

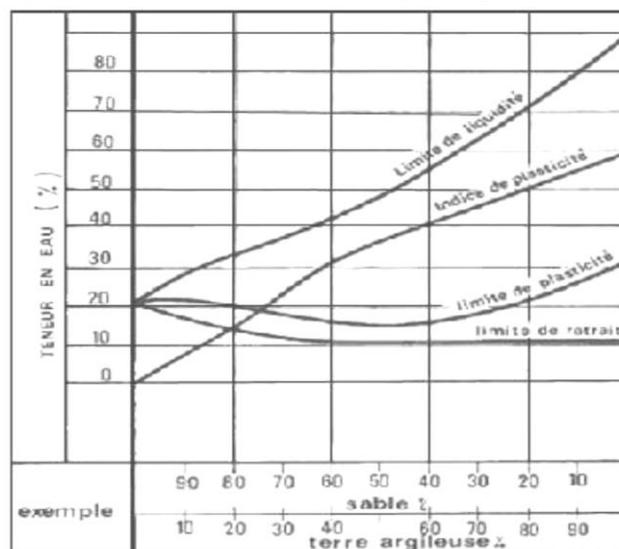


Figure I.12 : Variation de la plasticité en fonction de la teneur en eau pour différents types de sols (Doat,1979).

(Guettala, 2003) a dit que la concentration de sable engendre une augmentation de la résistance à l'état sec et humide, à titre d'exemple il a trouvé qu'avec 30% de sable en remarque une augmentation de la résistance sec et humide de l'ordre 24% voir figure I.13.

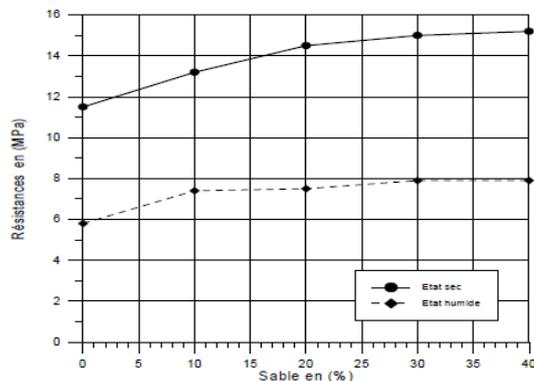


Figure I.13 : Evolution de la résistance en compression du béton de terre stabilisée, en fonction de la teneur en sable (Guettala, 2003).

Izemmouren et Guettala, (2014) ont varié plusieurs pourcentages de sable indexé à un sol de la région de Biskra. Ils ont remarqué que la concentration de sable ne présente pas une grande diminution de l'absorption totale par rapport à la terre seul, mais elles donnent une valeur optimale à (30%) qui présente une valeur minimale pour deux types de sol, (CF figure I.14).

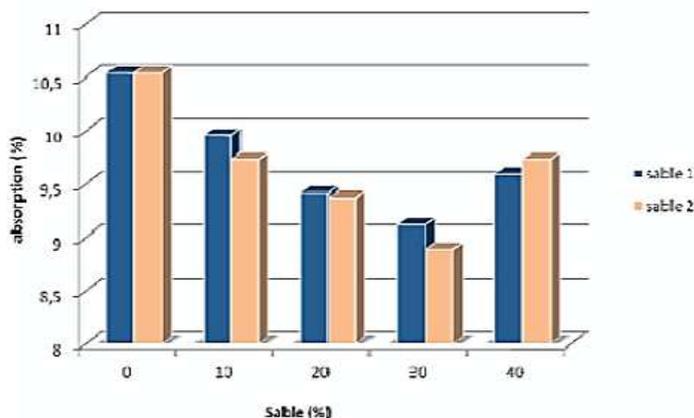


Figure I.14 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable. (Izemmouren et Guettala, 2014)

V.2.2 Stabilisation par l'ajout des fibres

La stabilisation par des fibres est très utilisée à travers le monde dans le domaine de la construction. Les fibres stabilisent les sols qui présentent un grand retrait. Par exemple la paille est utilisée dans la stabilisation des briques d'adobe et pour construire en torchi et en mur de pisé (Houben, 2006).

On trouve aussi les fibres synthétiques utilisés généralement pour augmenter la résistance à la compression et au cisaillement des sols (Prabakar, 2002).

V.2.2.1 Les différents types de fibres

On distingue trois types de fibre :

- Les fibres naturelles : fibre végétale, fibre animale, fibre minérale

- Les fibres synthétiques : nylon, polyester
- Les fibres artificielles : fibre de verre, fibre de carbone

V.2.2.2 Effet de l'ajout des fibres sur les propriétés des briques

(Ramaswamy, 1983 ; Ziegler, 1998 ; Filho, 2000), ont trouvé que l'addition des fibres végétales dans les BTC améliore la résistance à la traction des briques et diminue la taille des fissures.

Millogo et al, (2014) ont stabilisé des briques de terre compressé BTC avec des fibres de kénaf sans l'ajout d'aucun autre stabilisant chimique et avec différentes teneurs en fibre et différentes longueurs. Ils ont trouvé que la présence des fibres améliore les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs, voir Figure I.15

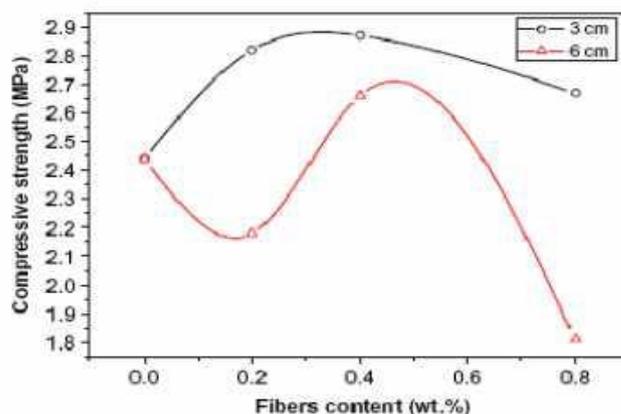


Figure I.15 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo et al,2014)

Eko et al, (2001), ont utilisé une stabilisation mixte par l'ajout de 5 à 10% de ciment et de 5 à 15% en volume de fibre de bagasse. Ils ont remarqué une amélioration de la résistance à la compression à 28 jours.

Dans le manuel de production des blocs de terre comprimée de Rigassi, (1995). Il dit que en ajoutant des fibres dans le matériau terre on va améliorer la résistance à la traction et au cisaillement et réduire le retrait, suite à une création d'un réseau de fibres omnidirectionnel.

V.3 Stabilisation chimique

Ce type de stabilisation se fait par l'intégration de différents ajouts dans notre mélange pour modifier les caractéristiques de la terre destiné à être utilisé pour la confection des BTC. Ces ajouts sont souvent des liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou des produits chimiques qui agissent directement sur le sol traité pour le rendre moins hydrophiles.

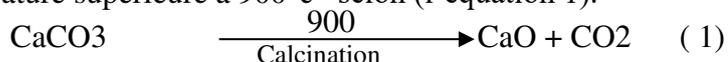
V.3.1 Stabilisation avec la chaux

Le premier usage documenté de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 ans av. J.-C., alors que les pyramides Égyptiennes sont plâtrées avec de la chaux.

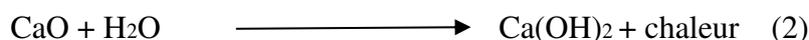
Les Romains sont les premiers à utiliser la stabilisation des chaussées avec la chaux.

Aujourd'hui, elle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la construction. On distingue différents types de chaux utilisées dans la stabilisation des sols.

- La chaux vive : elle est obtenue par la calcination de la roche de calcaire (CaCO_3) à une température supérieure à 900°C selon (l'équation 1).



- La chaux éteinte (aérienne) : est obtenue après la réaction de la chaux vive avec de l'eau selon (l'équation 2)



- La chaux hydraulique : elle est obtenue à partir de calcaires contenant plus de 6 % d'argile. A température entre 800 et 1500°C

La chaux la plus utilisée dans la stabilisation c'est la chaux aérienne plutôt que la chaux hydraulique. Houben et Guillaud, (1994) ont dit que la chaux vive est plus efficace par rapport à la chaux aérienne, mais elle doit être manipulée avec précaution à cause de la chaleur dégagée au contact avec l'eau et elle doit aussi être mise à l'abri de l'humidité.

V.3.1.1 Réactions chaux-sol argileux

La réaction chaux-sol argileux se traduit par deux effets, un effet à court terme c'est la floculation des particules, et un effet à long terme traduit par la formation de composés hydratés, suite à une réaction pouzzolanique.

a) Floculation et agglomération

Les ions calcium dans le sol peuvent être liés par les matières organiques et l'argile. Selon Cabane (2004), la capacité d'échange cationique des argiles est équivalente à l'échange de cations inter foliaire.

Selon Cabane (2004), cet échange de cations modifie la densité de charge électrique de surface des particules d'argile. En conséquence, des ponts Ca(OH)_2 ou CaOH^+ se forment entre les feuillets d'argile. Les interactions électrostatiques conduisent à la déstructuration des feuillets (Figure I.16).

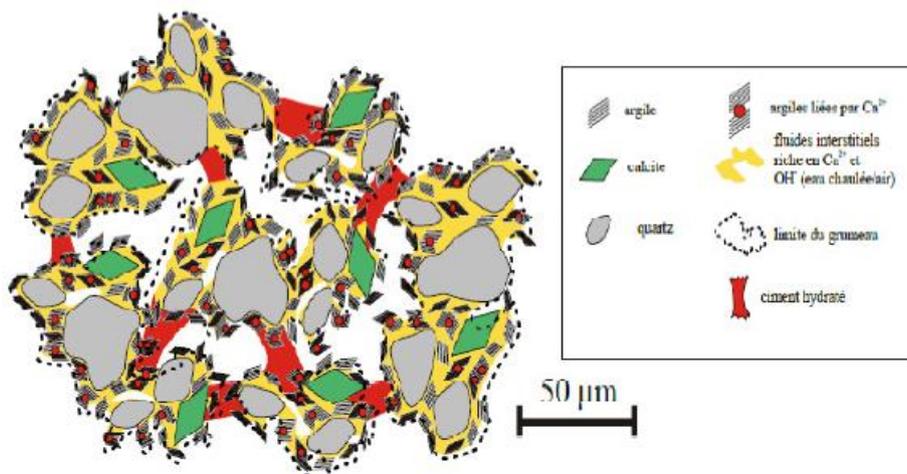


Figure I.16 : Réaction argile-chaux à court terme. (Cabane, 2004)

b) Réaction pouzzolanique

La chaux libère des cations Ca^{2+} et des anions OH^- lorsqu'elle entre en contact avec l'eau, remplissant la solution d'ions calcium et augmentant le pH dans un cadre simple. L'alumine et la silice sont libérées lors de l'attaque des argiles, et lorsque ces deux substances sont combinées au calcium, à l'eau et aux hydroxydes de chaux, elles réagissent pour générer des hydrates d'aluminate de calcium (CAH), des hydrates de silicate de calcium (CSH) et des hydrates de silicate d'aluminate de calcium (CASH). L'hydratation des silicates de calcium (C_3S , C_2S) et des aluminates de calcium (C_3A , C_4AF) entraîne la présence de ces composés hydratés, que l'on trouve généralement dans les ciments. Ces processus sont connus sous le nom de réactions pouzzolaniques. La saturation précoce du sol en chaux les conditionne.

D'après Eades et Grim (1966), une quantité minimale de chaux, connue sous le nom de "Lime Fixing Point" (LFP), est nécessaire pour déclencher les réactions pouzzolaniques. Comme indiqué dans l'ASTM D6276-99a,

Selon (Eades et Grim 1960 ; Cabane 2004), les différents types d'argile réagissent avec la chaux de différentes manières cinétiques. En fait, la quantité d'hydrates solubles dans l'acide (C-S-H et C-A-H) dans les argiles est un bon indicateur de leur réactivité chimique, la montmorillonite réagissant plus rapidement que l'illite et la kaolinite.

Conformément à (Locat et al. 1990), une teneur en eau élevée favorise la réaction pouzzolanique en permettant aux ions de se déplacer facilement et en provoquant la formation de minéraux uniformes dans une zone plus ou moins étendue autour des gains de chaux (figure I.17).

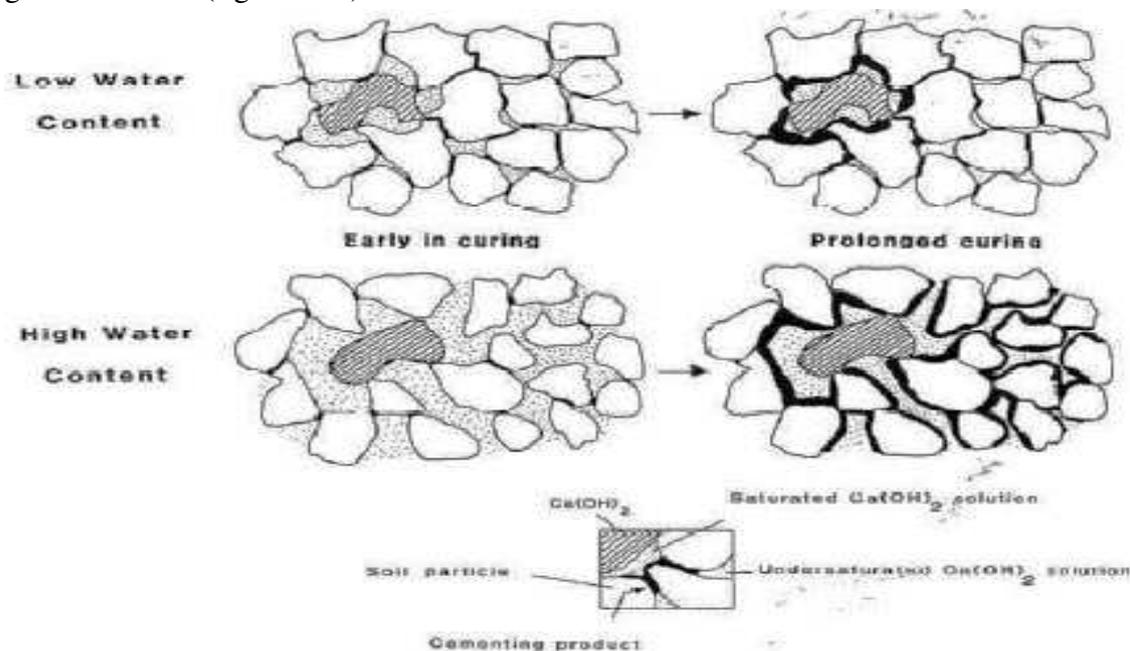


Figure I.17 : Réaction pouzzolanique chaux-argile (Locat et al 1990)

D'après (Cabane, 2004) il faut faire attention à ce que la chaux ne réagit pas avec le CO_2 atmosphérique pour ne pas former le calcite CaCO_3 . Cette réaction provoqué va consommer une grande partie de la chaux disponible, ce qui réduit les propriétés liantes.

V.3.1.2 Influence de l'ajout de la chaux sur les propriétés du sol

L'ajout de la chaux influence sur plusieurs propriétés du sol tel que : la consistance, la densité, la teneur en eau optimale, et aussi sur les propriétés mécanique et durabilité des briques.

a) La consistance

La consistance du sol est améliorée par la floculation des argiles provoqué par l'ajout de chaux, ce qui augmente la limite de plasticité. L'indice de plasticité diminue avec l'ajout de chaux jusqu'à 6 %, puis diminue quelque peu avant de se stabiliser pour des pourcentages plus élevés, selon une étude (Lasledj 2009) sur des argiles très plastiques traitées à la chaux (figure I.18).

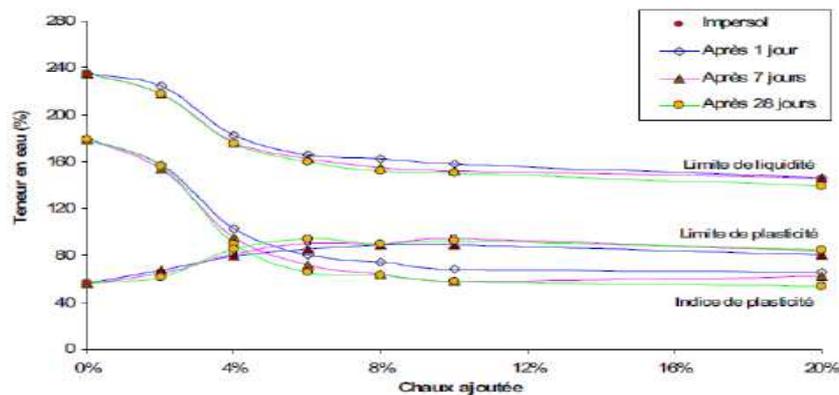


Figure I.18 : Evolution des limites d'Aterberg en fonction de la teneur en chaux pour plusieurs temps de cure (Lasladj, 2009)

b) Les paramètres de l'optimum Proctor

Siddique et al. (2013) ont étudié l'impact de l'ajout de chaux hydraulique sur la courbe Proctor et ont constaté que l'augmentation de la teneur en chaux entraînait un déplacement de la teneur

en eau de compactage optimale vers des teneurs en eau plus élevées et une diminution des densités sèches). Après l'ajout de chaux au sol, les courbes de compactage Proctor deviennent plus plates. (figures I.19).

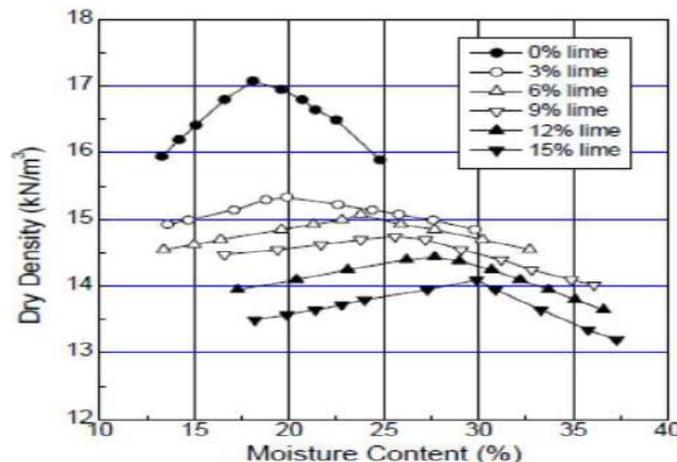


Figure I.19 : Influence de l'ajout de la chaux sur la courbe Proctor

c) Propriétés mécaniques

Plusieurs auteurs montrent que l'ajout de chaux conduit à une augmentation de la résistance à la compression.

Al-Mukhtar (2010), a étudié l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure d'un échantillon stabilisé à la chaux (figure I.20).

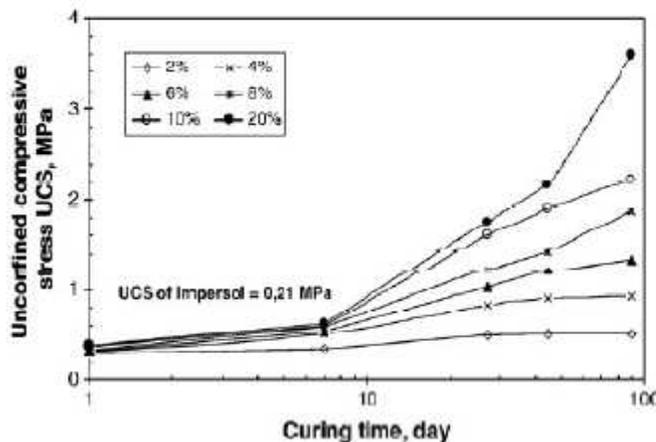


Figure I.20 : Influence de plusieurs teneurs en chaux sur la résistance mécanique en fonction de temps de cure

Dans leur étude, Millogo et al 2008. Ont examiné l'évolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de différents niveaux de chaux et ont découvert que, jusqu'à un certain niveau d'ajout de chaux, la résistance à la compression augmente. Ces niveaux de chaux sont supérieurs à 10 % du poids du mélange (figureI.21).

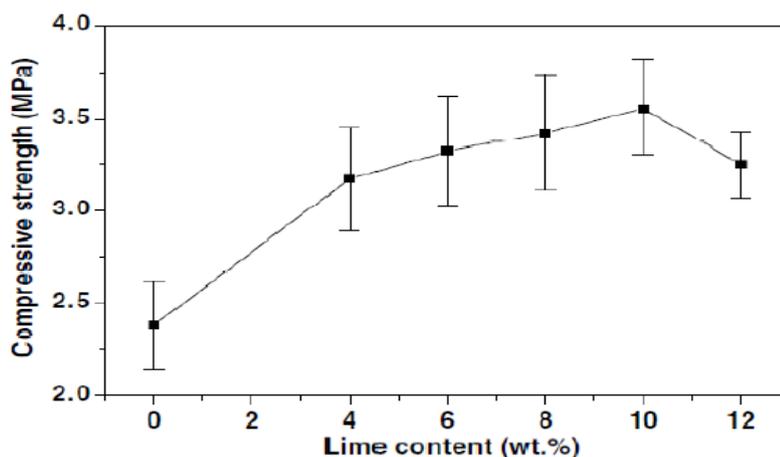


Figure I.21 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de teneur en chaux (Millogo et al. 2008)

d) La durabilité du sol stabilisé à la chaux :

L'un des grands problèmes de la brique de terre compressée c'est sa durabilité vis-à-vis de l'eau, l'intérêt d'ajouter de la chaux a des sols argileux c'est d'améliorer sa durabilité. (Guettala2003) a construit des murets avec des BTC stabilisé avec deux teneurs en chaux 8 et 12% et ils les ont mis dans des conditions climatiques réel pendant 48 mois. (Figure I.22)



Figure I.22 : murets en BTC après 48mois d'exposition avec deux teneurs en chaux (A) 8% de chaux et (B) 12% de chaux (Guettala2003)

Les résultats indiquent qu'après deux ans d'exposition, le muret stabilisé avec de la chaux à 8 % commence à se détériorer partiellement sur la face nord des première et deuxième rangée, alors que le muret traité avec de la chaux à 12 % ne présente aucune érosion pendant la période d'exposition de deux ans.

V.3.2 Stabilisation au ciment

En Allemagne, la stabilisation au ciment dans la construction de bâtiments a commencé en 1920. Depuis 1935, le sol-ciment est de plus en plus utilisé pour les routes et les pistes d'atterrissage aux États-Unis. Depuis lors, la stabilisation au ciment a été appliquée dans d'innombrables projets de travaux publics et de construction dans le monde entier (Houben, 2006).

Le meilleur stabilisateur pour les briques de terre comprimée est le ciment. Grâce aux liens qu'il forme entre les plus grosses particules, il renforce les propriétés du matériau, en particulier sa résistance à l'eau. Lorsqu'il est utilisé dans le béton ou le mortier sable-ciment, le ciment affecte principalement le sable et le gravier. Les sols trop argileux (> 30 %) ne doivent pas être utilisés et peuvent être préjudiciables (Houben, 1996).

(Venuat,1980) à dit que tout les types de ciment peuvent être employé pour la stabilisation des sols, même les ciments de plus faible résistance.

(Doat et all,1979) ont dit que pour les sols qui contient un certain pourcentage d'argile il est préférable d'employé un ciment riche en alite C3S et bélite C2S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

(Verdeyen,1971) conseille d'utiliser le ciment pour la stabilisation des sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % ($I_p < 25\%$)

V.3.2.1 Réactions ciment-sol

D'après (Tran, 2009). Comme la poudre de ciment contient tout ce qu'il faut pour réagir et générer des produits cimentaires, elle créera des liens physiques entre les particules et augmentera par la suite la résistance du sol. Par conséquent, la nature et la granulométrie des sols traités ont souvent peu d'influence sur les effets du ciment.

Pour le cas des sols pulvérulents, les particules du sol vont être recouvert par le ciment ou les grains de ciment ont des tailles plus petites que celles des particules du sol. Le ciment peut réagir avec lui-même ou avec la structure granulaire du sable. (United Nations, 1992).

Pour sols cohérents le ciment ne peut pas recouvrir les particules du sol car les particules de sol sont plus petites que celle du ciment (Bell, 1975). Mais en raison du compactage utilisé, les hydrates de ciment développent un squelette dur qui deviendra de plus en plus

résistant au fur et à mesure de l'hydratation, ce qui renforcera la résistance. (1992 Nations Unies).

Dans le cas des sols argileux, le processus de réaction du ciment comporte trois étapes :

1. Le développement de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. L'argile réagit immédiatement à la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment. L'argile commence à se détériorer car la chaux est rapidement absorbée.
2. Désagrégation des agglomérats d'argile : les gels de ciment saturent l'argile en profondeur.
- 3- Contact intime entre l'argile et les gels de ciment L'hydratation se poursuit, mais plus lentement.

V.3.2.2 Dosage du ciment

(Houben,2006) dit que le dosage optimal du ciment est obtenu à travers un essai de compression à l'état humide. Le même auteur trouve que les sols sableux montrent des résistances plus importantes que celle des limons et des argiles après une stabilisation avec le ciment.

(Doat,1979). Trouve qu'il faut au moins ajouter 5 à 6 % de ciment pour avoir bons résultats en termes de résistance à la compression, mais il ne faut pas dépasser les 8 % du ciment pour répondre aux exigences du développement durable en termes d'économie.

D'après (Gooding, 1993), pour le bloc de terre stabilisée un intervalle de 3 à 12% en masse de ciment, donne les blocs le plus courant.

Pour le dosage minimal en ciment (Heathcote, 1994), à fixer un dosage de 0,75%, d'autre part (Walker, 1996) trouve que la teneur en ciment pour la stabilisation du sol doit être comprise entre 4% et 10%.

V.3.2.2 Influence de l'ajout du ciment sur les propriétés du sol

L'ajout du ciment a un sol va nettement améliorer ses caractéristique mécanique et sa durabilité.

a) La densité

(kerali,2001) à trouver que la stabilisation du sol avec le ciment avec une énergie de compactage importante améliore la densité sèche des BTC (Figure I.23)

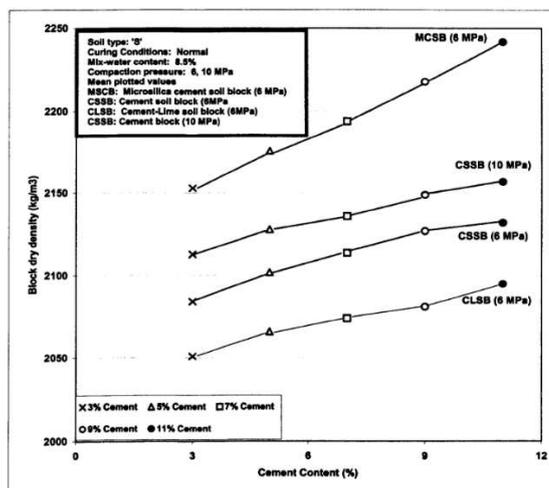


Figure I.23 : Effet de l'ajout du ciment et de l'énergie de compactage sur l'évolution de la densité des BTC (kerali,2001)

b) Résistance mécanique

L'effet principal qui pousse à stabiliser le sol avec le ciment c'est d'améliorer la résistance mécanique.

(Bahar et al,2004) ont trouvé que l'ajout du ciment pour la stabilisation du sol améliore la résistance à la traction et à la compression (Figure I.24).

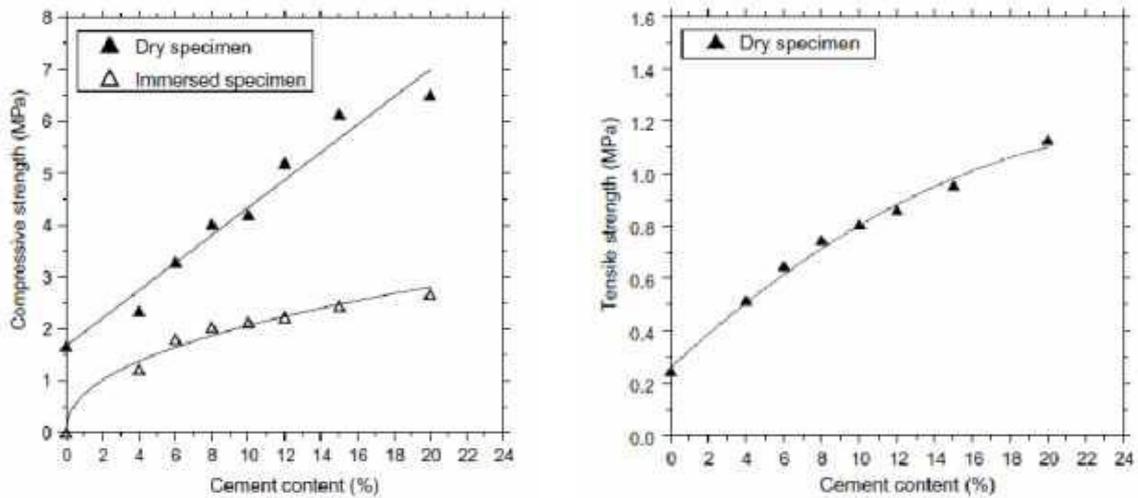


Figure I.24 : Evolution de la résistance à la traction et à la compression d'une terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar et al, 2004)

(Akpokodje ,1985). A étudié l'effet de l'ajout du ciment sur 3 types de sol et il trouve que l'ajout du ciment a fait augmenter la résistance à la compression pour les trois types du sol, aussi il trouve que la résistance augmente plus rapidement dans le cas du sol sableux que celles du sol argileux et du sol limoneux voir Figure I.25.

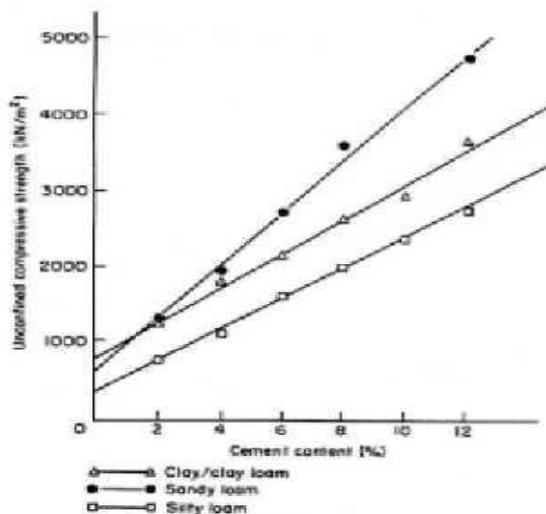


Figure I.25 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance mécanique de 3type de sol (Akpokodje ,1985)

c) Absorption totale

L'un des plus grands problèmes des briques de terres compressée c'est la résistance en contact avec de l'eau, le ciment joue un rôle essentiel dans l'insensibilisation des briques.

L'étude de (Meukam, 2004) montre que en ajoutant du ciment l'absorption totale des briques de terre compressée s'améliorent, il trouve que le taux d'absorption se diminue en augmentant la teneur en ciment voire Figure I.26.

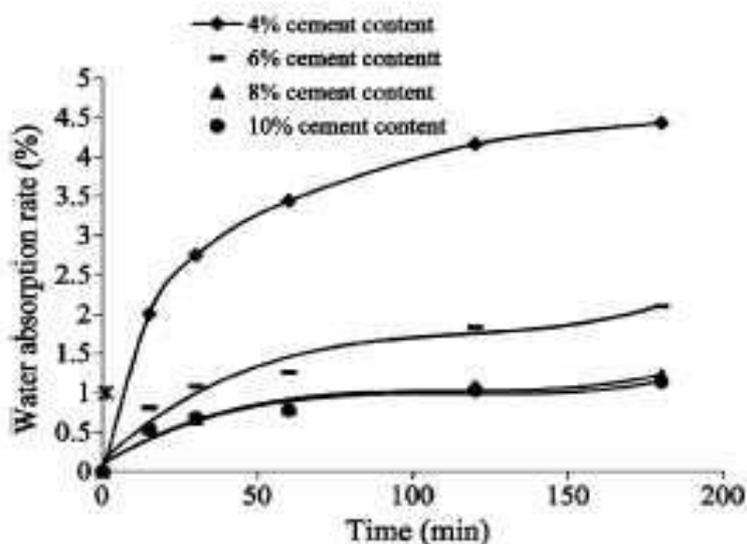


Figure I.26 : Amélioration de l'absorption en fonction des différents teneurs en ciment (Meukam, 2004)

V.3.3 Stabilisation avec des ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux très fins avec une granulométrie généralement inférieure à $100\mu\text{m}$, ils peuvent s'hydrater facilement en présence de l'eau, aussi ils peuvent réagir avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui sont responsables des propriétés liantes de la matrice du sol.

On peut utiliser les ajouts comme un stabilisant des sols qui remplace le ciment et la chaux partiellement ou totalement, cela présente un effet bénéfique pour l'aspect économique.

On distingue plusieurs types d'ajout utilisés pour la stabilisation des sols :

- Pouzzolane naturelle,
- Laitier de haut fourneau
- Poudre de verre
- Fumé de silice

V.3.3.1 Effet de l'ajout des additions minérales sur les propriétés du sol

En plus de l'effet sur l'aspect économique, les ajouts minéraux présentent un effet bénéfique sur les propriétés des sols stabilisés surtout sur la résistance mécanique et la durabilité.

Pour la pouzzolane naturelle très peu d'étude ont été publiées, (Hossain et al. 2007) ont fait dans leur étude une stabilisation par combinaison de la chaux, le ciment, et les cendres volantes pour la stabilisation de deux types de sol, ils trouvent que la combinaison du ciment avec la cendre volante produit des résistances à la compression supérieures par rapport à la combinaison chaux-cendre volante, voir Figure I.27.

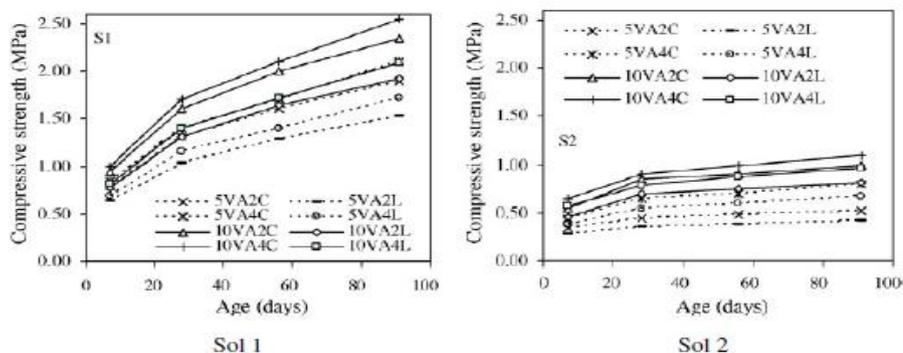


Figure I.27 : Evolution de la résistance a la compression en fonction du temps de cure pour différent combinaison de stabilisation de deux sols (Hossain et al. 2007)

Les mêmes résultats sont obtenus pour l’absorption d’eau, le coefficient d’absorption diminue avec l’augmentation des teneurs et avec les combinaisons des stabilisants.

(Harichane et al. 2012) ont mené une étude sur l’influence de l’ajout de la chaux et de la pouzzolane de béni-saf (Algérie) sur les propriétés mécaniques de deux types de sol argileux cohésifs, ils trouvent que ces sols cohésifs offrent des résistances bénéfiques après une stabilisation combiné (chaux-pouzzolane), voir Figure I.28.

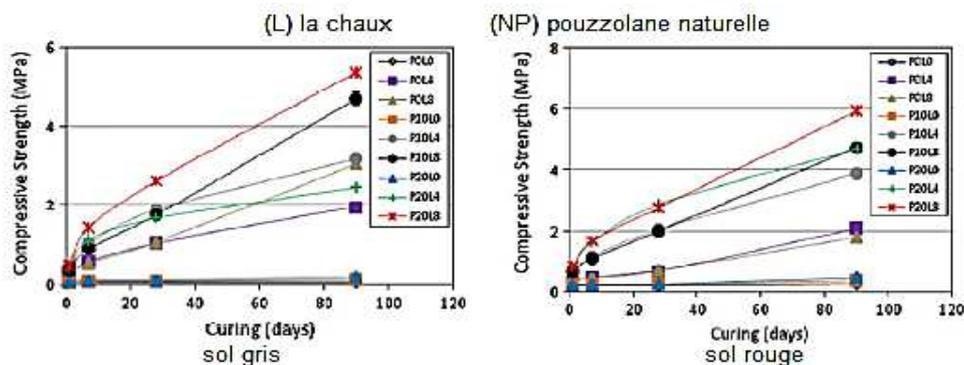


Figure I.28 : Influence de la chaux et la pouzzolane sur la résistance mécanique (Harichane et al. 2012)

Saeed et al (2020) ont utilisé une stabilisation combinée entre le ciment et la fumée de silice pour la stabilisation des briques de terre comprimée, les résultats ont montré des résistances très importantes qui peut atteindre jusqu’à 15,76 MPa et une amélioration de la tenue à l’eau par une diminution du coefficient d’absorption qui devient de 6,09% pour 5% de fumée de silice et 5% de ciment (figure I.29),

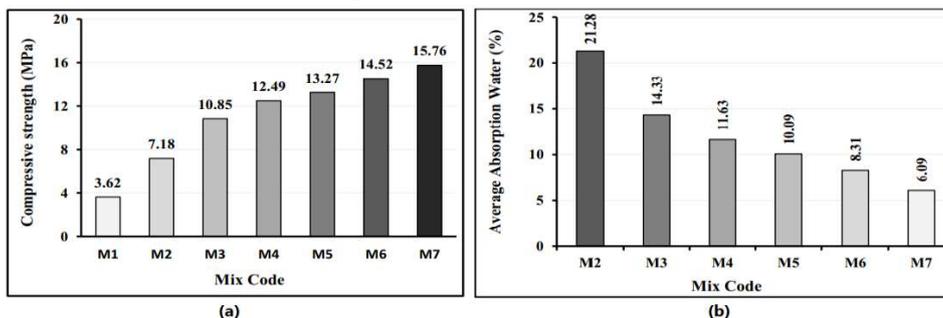


Figure I.29 : (a) Résistance à la compression, (b) coefficient d’absorption pour différents mélanges (Saeed I.A et al 2020)

Danso H, Adu S (2019) ont stabilisé un sol destiné à la fabrication des briques de terre comprimée par la pouzzolane argileuse et ils ont constaté que l’ajout de la pouzzolane induit à une augmentation remarquable de la résistance à la compression ainsi qu’une diminution de l’absorption d’eau (figure I.30)

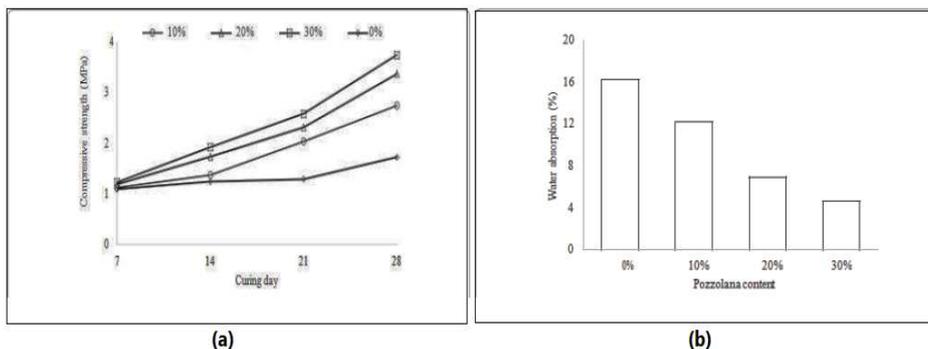


Figure I.30 : (a) Résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane pour différents temps de cure, (b) absorption d’eau en fonction de la teneur en pouzzolane (Danso H, Adu S (2019)).

VI Principaux résultats trouvés au sein de notre équipe SNSC(laboratoire EOLE)

Plusieurs recherches ont été mené au sein de notre équipe de recherches sur les sols non saturés et les sols compactés. On peut citer Sebaa. k (2021) qui a étudié l’influence du compactage et de la stabilisation par les liants sur le comportement mécanique de la brique de terre comprimée où il a utilisé plusieurs énergies de compactage comme montre la figure I.31 qui représente la variation de la résistance à la compression en fonction du temps de séchage pour les différents énergie figure I.31(a) énergie Proctor et figure I.31(b) énergie statique. Il a trouvé que l’énergie de compactage à une grande influence sur la résistance à la compression l’augmentation de l’énergie de compactage conduit à une augmentation de la résistance et que l’énergie Proctor offre des résistances supérieures à celle statique.

Dans la figure I.32 l’influence de la stabilisation sur la résistance à la compression ou-il utilise une stabilisation avec le ciment figure I.32(a) et avec la chaux dans la figure I.32(b) où on remarque une diminution de la résistance à la compression après l’ajout de la chaux. On remarque aussi une légère augmentation de la résistance après l’ajout du ciment causé par les hydrates formé qui vont lié les particules et rendre l’échantillons plus rigide.

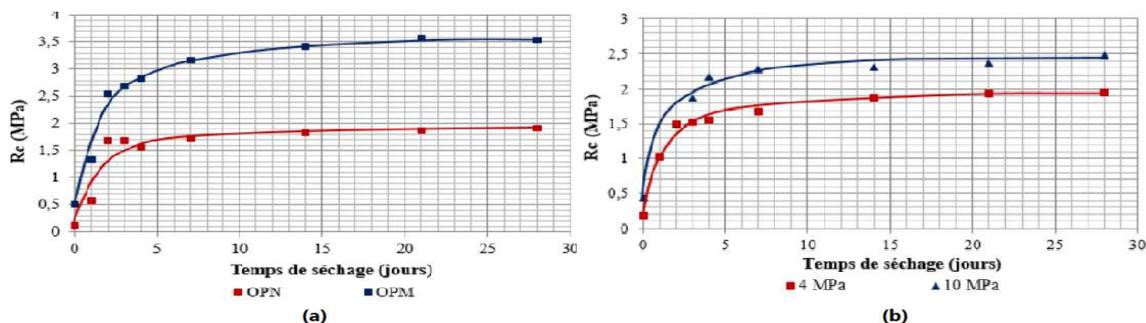


Figure I.31 : Résistance à la compression en fonction du temps de séchage (a) énergie Proctor, (b) énergie statique (sebaa. k (2021))

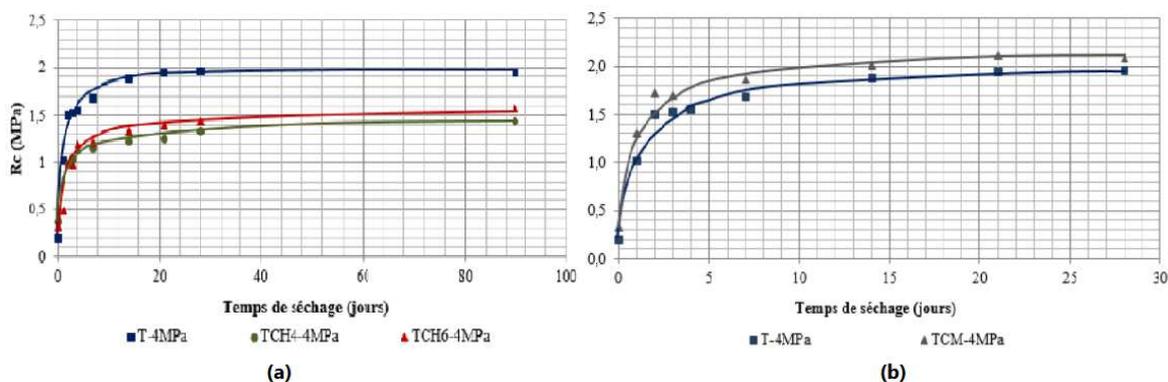


Figure I.32 : Résistance à la compression en fonction du temps (a) stabilisation par la chaux, (b) stabilisation au ciment (sebaa. k (2021))

On peut citer aussi MEKAIDECHE.K, (2021) qui à travaillé sur le comportement hygrothermique de la brique de terre comprimée ou il à étudié l’effet du séchage, de la succion, de l’énergie de compactage, de la teneur en eau, et du degré de saturation sur le coefficient d’absorption d’eau et la conductivité thermique.

La figure I.33 montre l’évolution du coefficient d’absorption d’eau en fonction de la teneur en eau ou il a trouvé que la diminution de la teneur en eau engendre une diminution du coefficient d’absorption pour les différentes énergies de compactage.

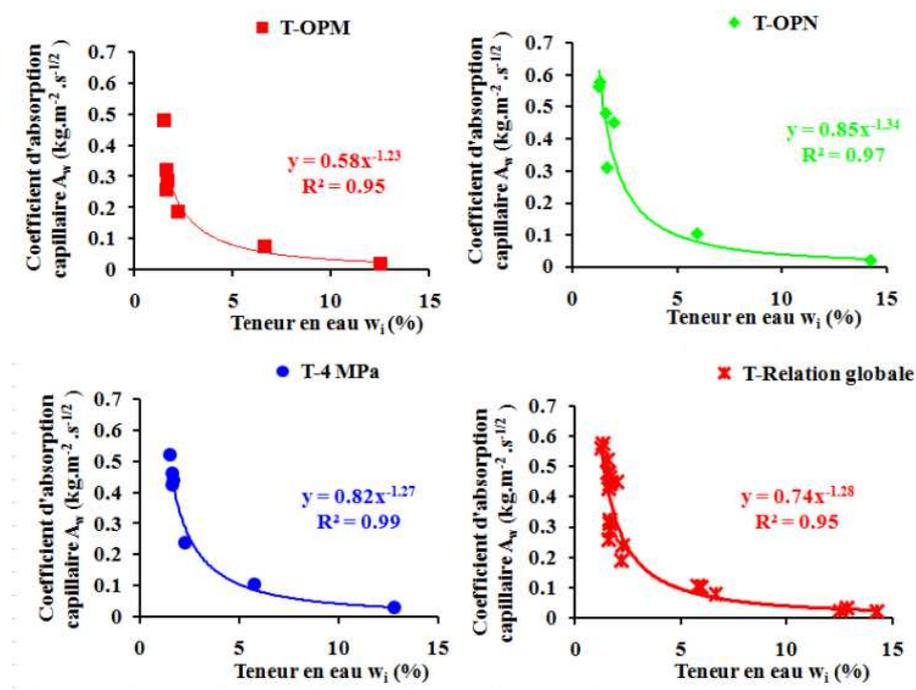


Figure I.33 : Evolution du coefficient d’absorption en fonction de la teneur en eau initiale (MEKAIDECHE.K, (2021))

On remarque aussi dans la figure I.34 qui représente l’évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau, où-il à trouvé une décroissance entre la teneur en eau et la conductivité thermique.

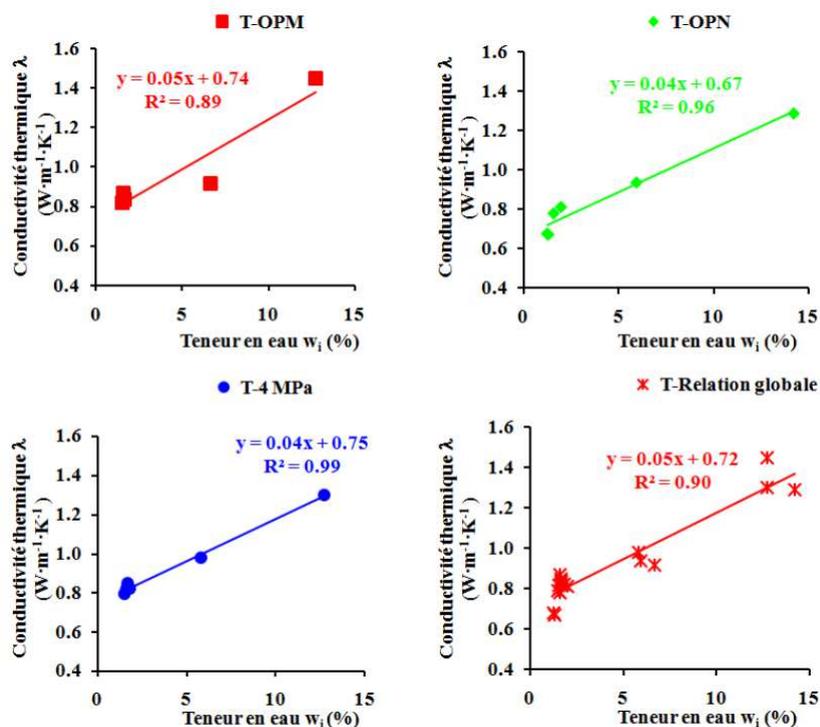


Figure I.34 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale (MEKAIDECHE.K, (2021))

VII. Conclusion :

A travers cette contribution bibliographique, on à remarquer que l'énergie de compactage et la teneur en eau du moulage ont un effet sur les propriétés mécanique et de durabilité des BTC, on remarque aussi que plusieurs études sont focalisé sur l'emploi du ciment et de la chaux comme stabilisant des briques de terre comprimée, et souvent cet emploi conduit à une amélioration de la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau, par contre il y'a moins d'études sur l'utilisation de la pouzzolane naturel et la fumée de silice comme stabilisant des BTC malgré qu'ils représentent une bonne source qui favorise la réaction pouzzolanique.

Cependant ce manque d'étude sur l'exploitation des additions minéraux dans la stabilisation des BTC à mis en évidence l'étude de l'effet de ces additions dans la stabilisation des BTC. C'est dans ce cadre que cette étude a été réalisé pour comprendre l'effet de la fumée de silice, la pouzzolane et les fines argileuses sur les propriété thermique, mécanique, et de durabilité de la brique de terre comprimée BTC.

Chapitre 2 :

**Matériaux et
méthodes**

I. Introduction

Tout travail expérimental commence par identifier les matériaux utilisés, dans ce chapitre nous allons parler sur l'origine des différents matériaux qu'on a utilisé qui est l'objectif de cette étude la valorisation des briques de terre comprimée à base de matériaux locaux, ensuite nous allons présenter les résultats de la caractérisation géotechnique, minéralogique et physique du matériaux utilisé ainsi que les exigences de la norme pour l'utilisation de ce matériaux pour la construction en brique de terre comprimée, enfin nous allons présenter les différents techniques de caractérisation mécanique, thermique et de durabilité du matériaux compacté.

II. Aperçu géologique de l'Algérie

L'Algérie présente plusieurs types de relief. D'ouest en est, les chaînes du Dahra, de l'Ouarsenis, du Hodna, de la Kabylie et des Aurès font partie d'une double barrière montagneuse connue sous le nom d'Atlas tellien et saharien.

La région de l'ouest exactement les wilayas de Tlemcen et Ain Temouchent sont très riche en substances minérales utilisables comme :

- Matériaux de construction : calcaires pour le ciment la chaux et la construction en terre ; sables pour la construction ; argiles pour fabrication les briques cuites ; gypse pour les mortiers ; pierres de construction ; pierres de parement, roches pour les granulats concassé.
- Matériaux industriels granit pour céramiques, barytine, dolomies, quartzites, magnésites, et kaolinit.

III. Matériaux utilisés

Dans le cadre de ce travail de recherche, un seul type de sol est utilisé : un tuf provenant de la région de Béni-saf (wilaya de Ain Temouchent). Aussi trois types d'additions minérales :

- La pouzzolane naturelle qui provient de la même région que le sol.
- La fumée de silice qui est commercialisée sous le nom Siltek Powder par le groupement Hasnaoui « TEKNA CHEM ».
- Les fines argileuses de la région de Boughrara (wilaya de Tlemcen).

III.1 Sol

Le sol utilisé est un tuf calcaire (figure II.1(a)) qui provient de la région de Béni-Saf. Il est issu d'un déblai de l'excavation de la ligne ferroviaire qui se trouve dans le Nord-Ouest de l'Algérie, la collecte a été faite à une profondeur de 0,5 à 1m de la surface du sol.

Dans cette thèse, ce déblai est récupéré et valorisé en tant que matériau destiné à l'éco-construction.

III.2 Types de stabilisants

III.2.1 Fumé de silice

C'est une substance en poudre grise (figure II.1(b)) composée de silice active micronisée. Elle a une forte activité pouzzolanique grâce à sa composition riche en silice et micro-silicates actifs et sa surface spécifique élevée.

Elle est composée de 93% à 98% de particules sphériques de SiO₂ amorphes d'une taille de quelques dixièmes de micron, ayant ainsi une surface spécifique maximale d'environ 220 000 cm² / g et sa granulométrie varie entre 0,05 à 0,15 µm. Ces caractéristiques permettent à l'hydrate de calcium [Ca (OH)] d'être capturé, fixé et converti d'abord en silicate hydraté puis en silicate solide et irréversible.

III.2.2 Pouzzolane naturel

Nous avons utilisé une pouzzolane qui provient d'un gisement volcanique dans la région de Béni-saf. Sa couleur varie entre le rouge et le noir (figure II.1 (d)).

La fraction utilisée est inférieure à 80µm. Elle a été préalablement broyée au laboratoire EOLE (Eau et ouvrages dans leurs environnements).

III.2.3 Fine argileuse

L'argile utilisé provient de la région de Boughrara (situé à 25 Km de la frontière Algéro-Marocaine). Plusieurs recherches ont été mené sur le comportement de ce matériau au sein de notre équipe « sols non saturés et couplages » du laboratoire EOLE.

Cette argile a été utilisé pour la construction du noyau du barrage de Boughrara de Tlemcen (Benchouk, 2014). Et d'après les analyses physico-chimiques ce sol est une argile très plastique faiblement organique avec une limite de liquidité de 56% (Derfouf et al. 2012).

La fraction utilisée dans cette étude est celle inférieure à 80µm.



Figure II.1 (a) Tuf de Béni-saf ; (b) Fumée de silice ; (c) Argile de Boughrara ;(d) Pouzzolane

IV. Méthodes expérimentales

Dans cette thèse plusieurs protocoles expérimentaux seront utilisés. L'organigramme suivant (Figure II.2) résume les principaux axes d'investigations.

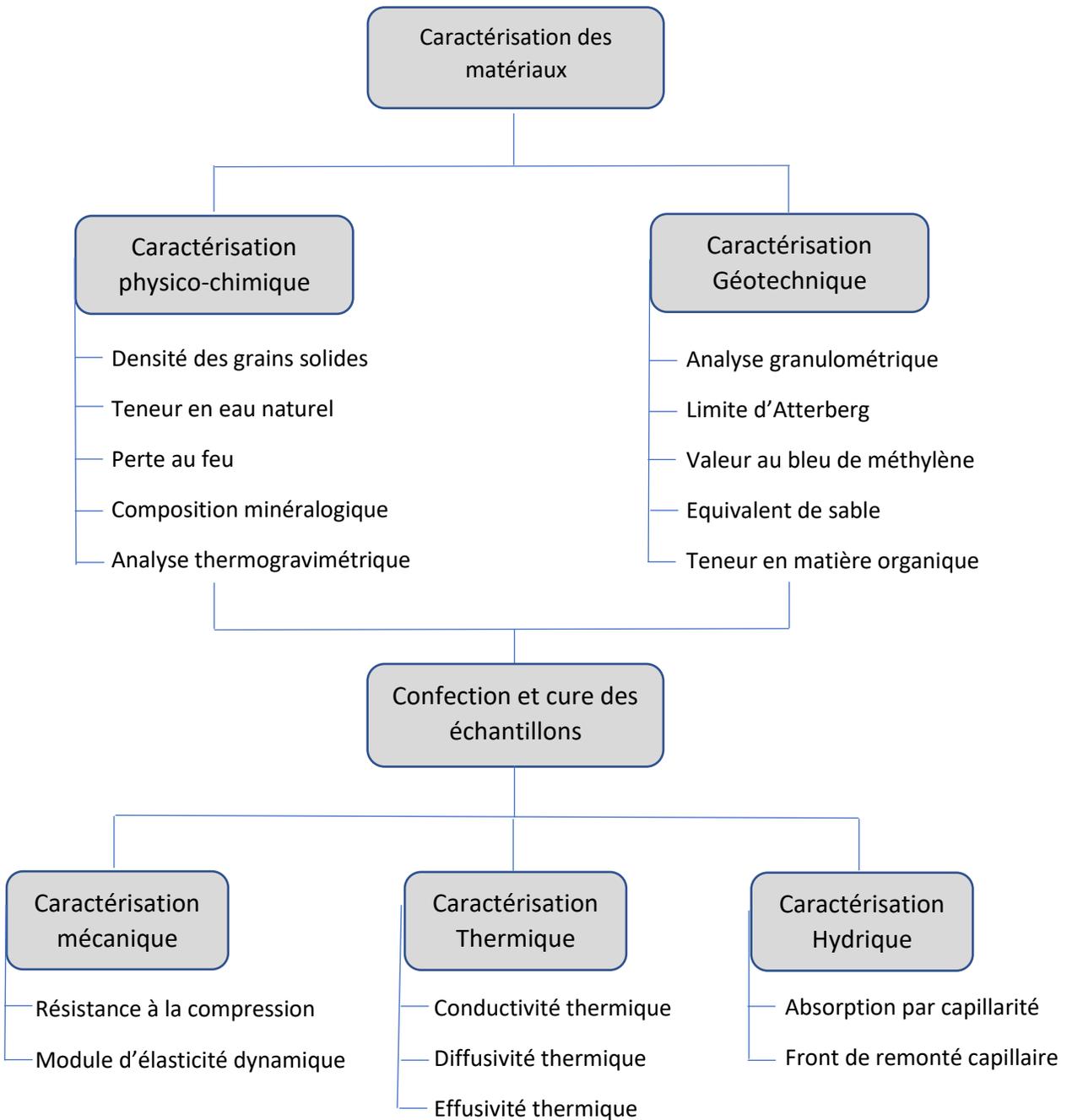


Figure II.2 : Organigramme du protocole expérimental réalisé.

IV.1 Caractérisation physico-chimique

Dans ce qui suit on présente les principaux résultats de la caractérisation physico-chimique du matériau étudié .

IV.1.1 Densité des grains solides

La densité des grains solides est déterminée en utilisant la technique du pycnomètre selon la norme (NF P 94-054).

La moyenne de trois essais effectués nous donne $G_s = 2,74$.

IV.1.2 La teneur en eau naturel du sol

La teneur en eau est évaluée selon la norme NF P94-050.

La teneur en eau naturel de notre sol est de $\omega=2,95\%$

IV.1.3 La perte au feu

La perte de poids d'un échantillon suite à la calcination à 1000°C , donnée en pourcentage, est appelée perte au feu (PF). Divers processus de déshydratation des différents minéraux avec perte d'eau d'hydratation et de la matière organique se produisent lors du chauffage.

La perte au feu de notre sol à 1000°C est de $4,3\%$

IV.1.4 Composition minéralogique des différents matériaux

Nous avons utilisé pour l'identification de la composition minéralogique des différents constituant la diffractométrie aux rayons X. c'est une méthode d'identification des espèces minérales cristallines dans les poudres fréquemment utilisées dans la recherche sur les matériaux. Le diagramme aux rayons X, qui est similaire à une empreinte digitale, peut être utilisé pour identifier chaque solide cristallin. Nous pouvons utiliser cette approche pour discriminer différents types d'argiles.

Une source de rayons X, un support pour l'échantillon pulvérulent et un détecteur de rayons X diffractés constituent l'équipement de diffraction des rayons X. L'orsqu'on décompose un matériau il est constitué de plusieurs cristaux. Ces cristaux sont plongé dans des faisceaux d'intensité constante et diffusent des ondes de manière cohérente. Les ondes diffractées entrent en collision et produisent une onde puissante dans la direction de la diffraction. Des lignes de diffraction très précises sont en corrélation avec chaque structure cristalline. Selon la règle de Bragg (Protas. 1999), le faisceau de rayons X est diffracté par une famille de plans réticulaires (h, k, l), et la lumière est réfléchié sous un angle égal à la moitié de la déviation (figureII.3).

Le diffractomètre utilisé est un appareil Rigaku miniflex 600 avec une plage d'analyse comprise entre 2 et 80 et un pas de $0,02^\circ$ et une vitesse de $4^\circ/\text{min}$. Le traitement des données a été fait avec l'outil PDXL2.

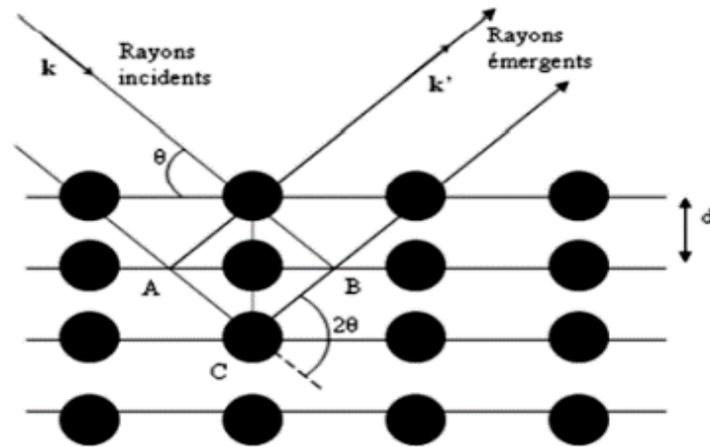


Figure II.3: Diffraction des rayons X selon BRAGG (Protas. 1999)

Les diffractogrammes des différents matériaux étudiés sont présentés ci-dessous.

Tuf de Béni-Saf (figure II.4), argile de Boughrara (figure II.5), pouzzolane naturelle (figure II.6), et fumée de silice (figure II.7).

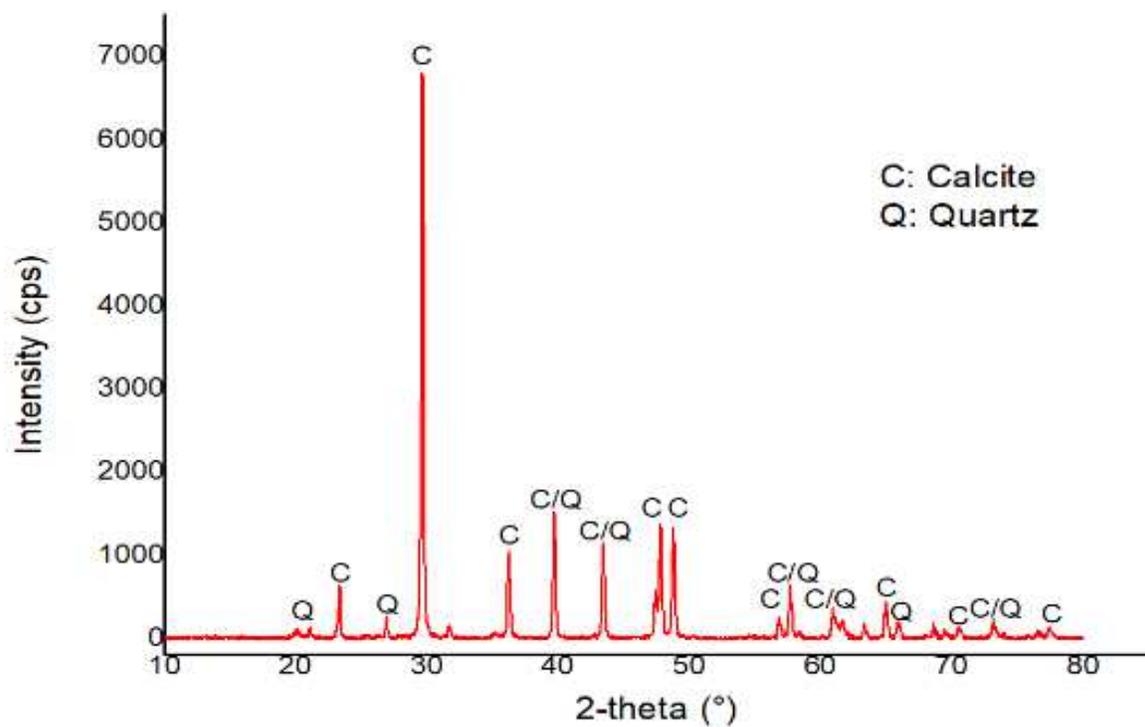


Figure II.4 DRX du tuf de Béni-Saf

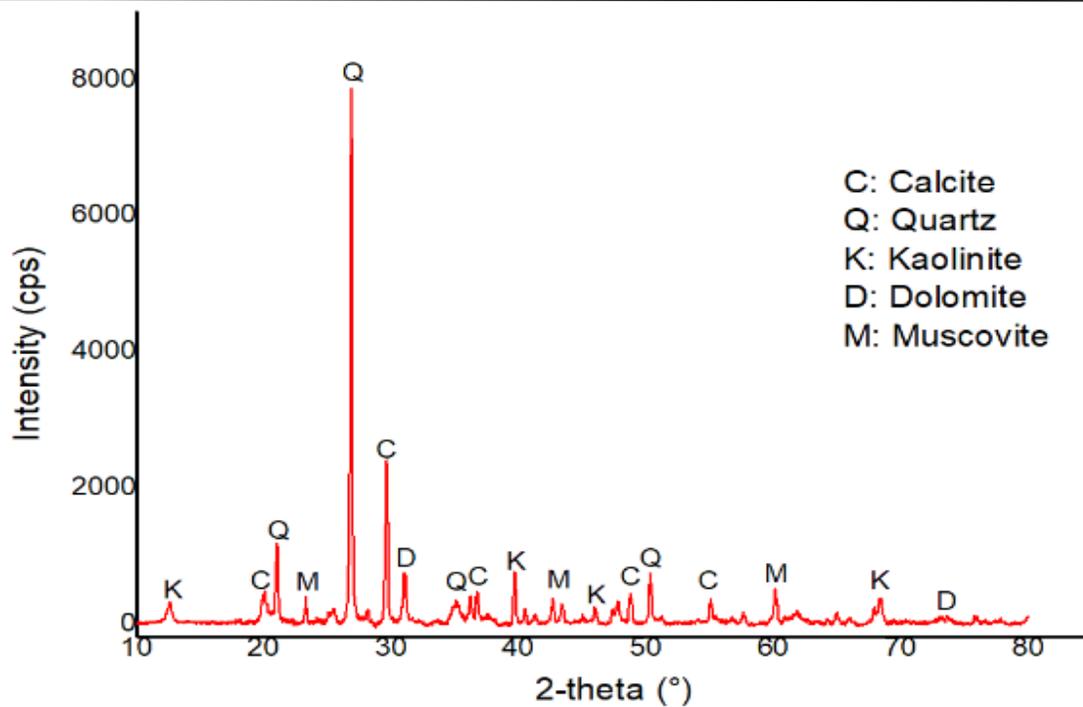


Figure II.5 : DRX de l'argile de Bougrara

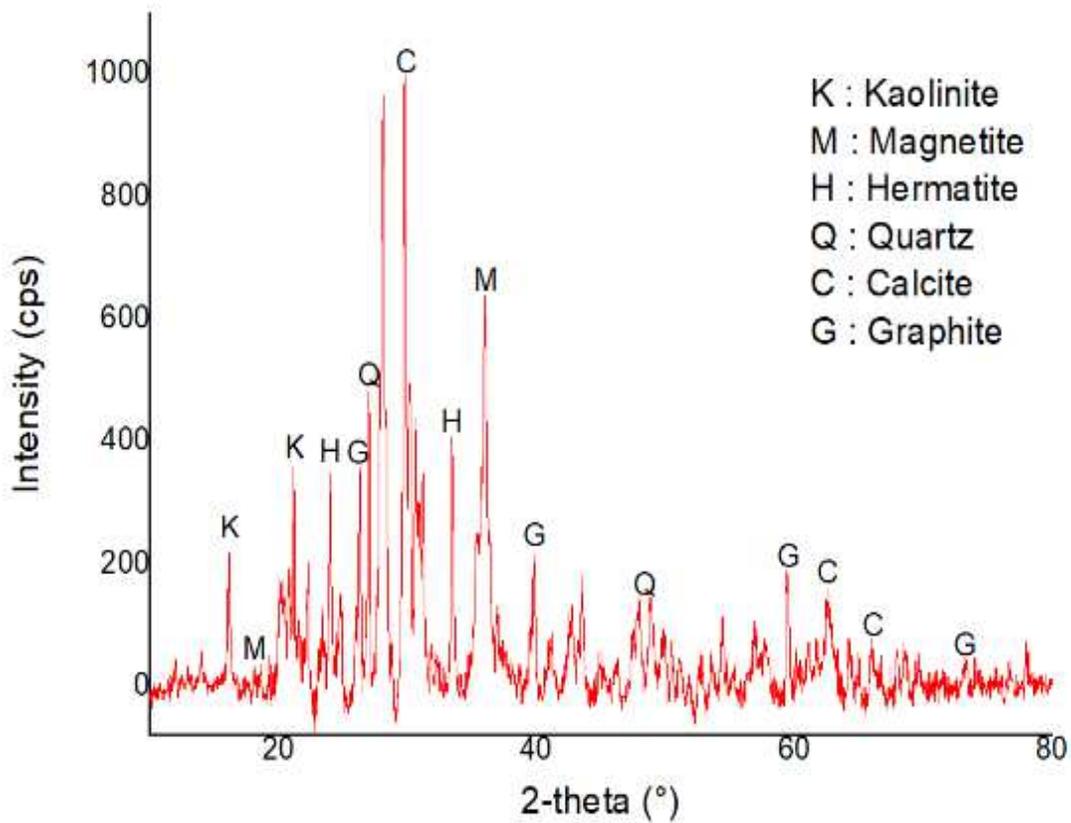


Figure II.6 : DRX de la Pouzzolane

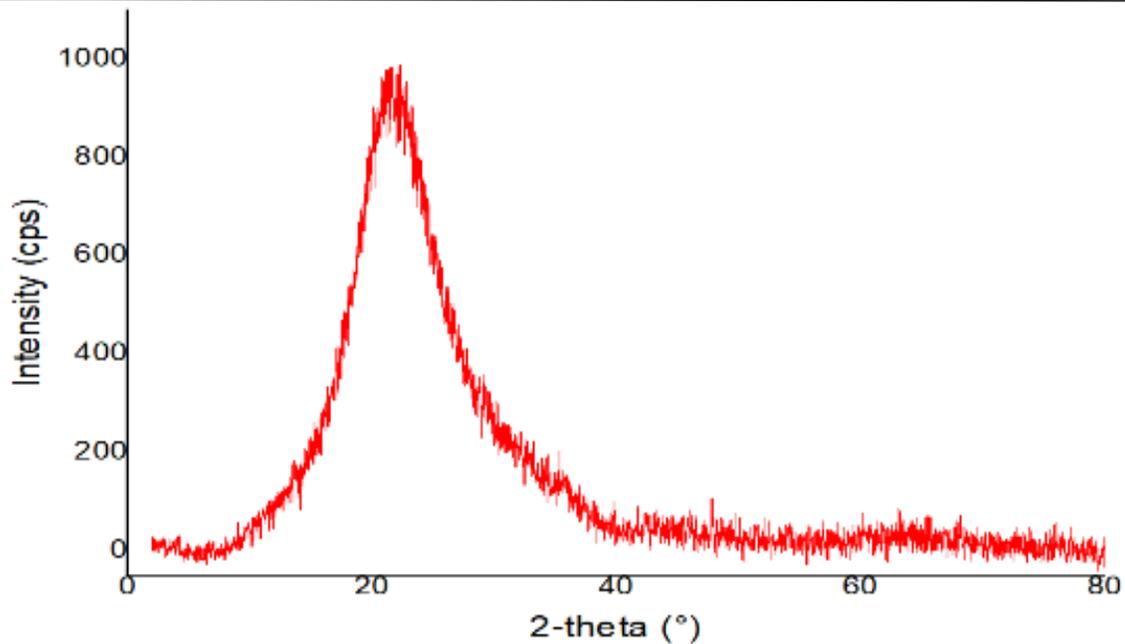


Figure II.7 : DRX de la Fumée de silice

D’après les résultats des différents DRX effectués on a déduit la composition minéralogique de nos échantillons (cf. Tableau II.1).

Tableau II.1 : Résultats de l’analyse minéralogique des différents matériaux utilisés

Composition minéralogique (%)	Tuf de Béni-Saf	Pouzzolane Naturel	Argile de Boughrara	Fumée de silice
Quartz	52,4	16,4	31	SiO ₂ Amorph
Calcite	47,6	25	14,7	
Hematite	-	9.6	-	
Magnetite	-	17	-	
Kaolinite	-	25	13,1	
Graphite 2H	-	7	-	
Muscovite	-	-	33,3	
Dolomite	-	-	7,9	

A la lecture du tableau de la composition minéralogique on peut déduire les remarques suivantes :

- Le tuf de Béni-saf contient du quartz et de la calcite avec presque les mêmes proportions.
- La pouzzolane naturelle contient de faible teneur en quartz, hermatite, magnetit, kaolinite, graphite 2H, avec 25% de calcite.

- L'argile de Bouhrara contient du quartz, de la calcite, kaolinite, muscovite et dolomite.
- La fumée de silice qui est un SiO_2 amorphe car elle ne présente pas une forme cristallisante.

V.1.5 Analyse thermique différentiel et analyse thermogravimétrique (ATD/ATG)

Le traitement thermique peut entraîner des modifications des caractéristiques physico-chimiques, telles que le changement de phase, l'altération structurelle, la décomposition, la fluctuation de volume.

Ces changements peuvent être observés en fonction de la température par analyse thermique. L'analyse thermique peut être conduite par les deux essais suivants :

- Analyse thermique différentielle ATD.
- Analyse thermogravimétrique ATG.

L'analyse des événements thermiques qui se produisent généralement dans un matériau chauffé ou refroidi est à la base de la méthode analytique qualitative et quantitative connue sous le nom d'ATD.

L'ATD associée à une analyse par diffraction des rayons X permet de déterminer la composition minéralogique du matériau. Lorsque de la chaleur est produite (réaction exothermique) ou absorbée (réaction endothermique) au cours des différents processus chimiques et des changements minéralogiques qui se produisent, comme lors de la combustion d'un minéral argileux, des phénomènes thermiques se produisent (Nana, 2004).

L'ATG peut être utilisé pour suivre les modifications de la masse d'un échantillon à la suite d'un traitement thermique. Ainsi que la façon de la variation de la masse de ses composants au cours d'un cycle thermique.

L'essai est réalisé au laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique (LCSCO) université de Tlemcen par l'appareil SDT Q600. Il détermine simultanément l'ATD et l'ATG entre 20°C et 1250°C.

En analysant les résultats de l'ATG et de l'ATD (Figure II.8) on peut dire :

- En raison de l'absence du pic endothermique de la transition allotropique du quartz : qui se manifeste à une température de 400°C, la teneur en quartz est faible.
- Dominance de la calcite dans notre sol exprimé à 748°C:

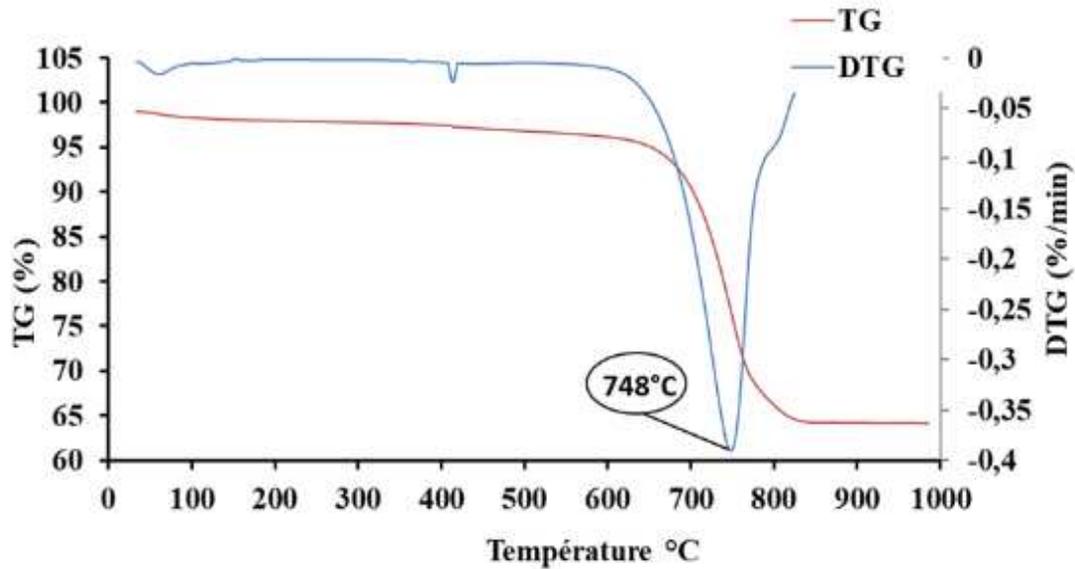


Figure II.8 Analyse thermo gravimétrique du sol

IV.2 Caractéristiques géotechniques

IV.2.1 Analyse granulométrique

La connaissance de la granulométrie du sol est essentielle pour déterminer sa nature.

Les analyses granulométriques par tamisage et sédimentométrie sont réalisées conformément aux normes NF P18-560 et NF P94-057 respectivement. Pour les grains d'un diamètre supérieur à 80 μm , le tamisage est utilisé. Pour les grains les plus petits, la sédimentométrie est utilisée.

La sédimentométrie est le processus qui permet à une suspension de sol de se déposer au fond d'une éprouvette rempli d'eau. Plus les granules se déposent lentement, plus ils sont fins (loi de Stokes). La fraction de grains de chaque diamètre peut être calculée en mesurant la densité de la suspension à différents intervalles de temps.

Selon la figure II.9, on constate que la courbe granulométrique de notre sol ainsi que le sol après la correction granulaire par les différents pourcentages en argiles s'intègre totalement dans le fuseau granulométrique proposé par la norme (AFNOR XP P13-901), ainsi que celui de Houben et Guillaud, 1994.

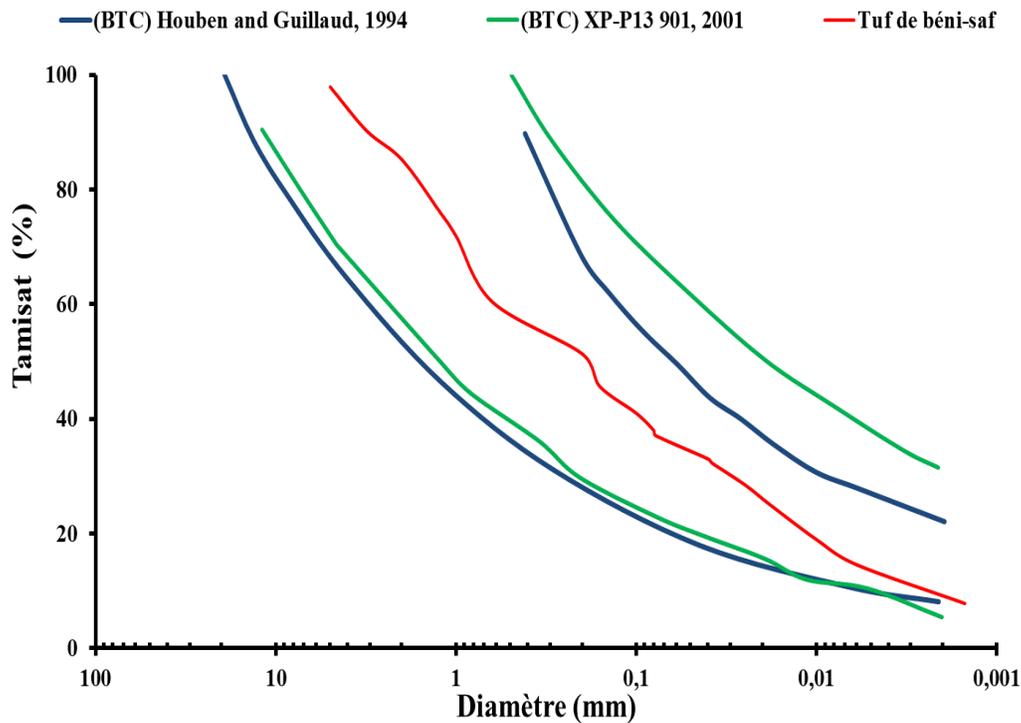


Figure II.9 : Distribution granulométrique et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1994

IV.2.2 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées conformément à la norme NF P 94-05. Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques d'un sol qui marquent les transitions entre :

- Le passage d'un état liquide à un état plastique : limite de liquidité (W_L),
- Le passage d'un état plastique à un état solide : limite de plasticité (W_P),

La différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité nous donne l'indice de plasticité I_p et c'est lui qui nous montre l'argilosité du sol.

Les résultats des essais de la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité de notre sol est :

Tuf de Béni-saf : $W_L = 37\%$; $I_p = 17,5\%$

Sur la figure II.10 on constate que du point de vue plasticité, le tuf de Béni-saf se situe dans le fuseau de plasticité recommandé par la norme AFNOR XP P13-90 et celui recommandé par Houben et Guillaud, 1994

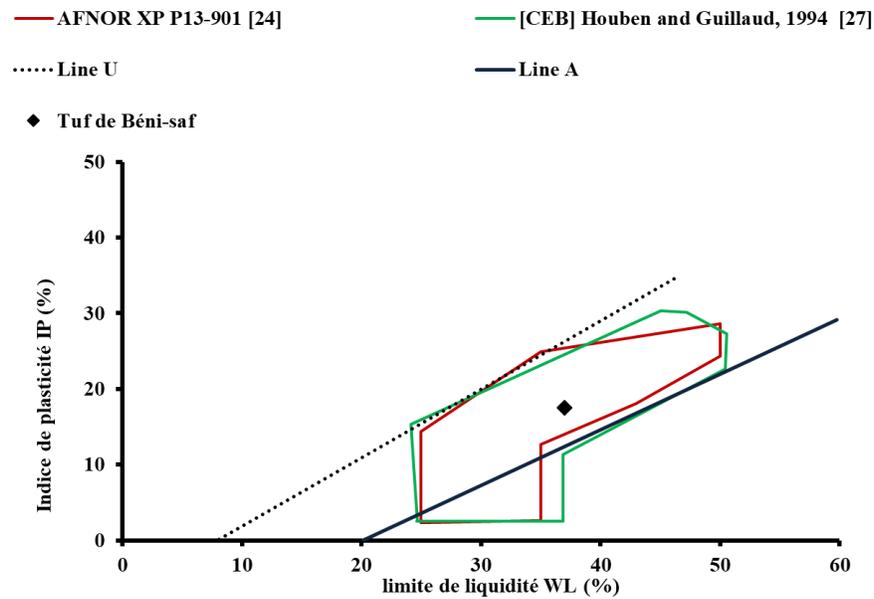


Figure II.10 : L'intersection entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1994

D'après l'analyse granulométrique et le fuseau de plasticité notre matériau peut être utilisé dans la fabrication des briques de terre comprimée. Suivant les recommandation de la norme Afnor XP P13-901.

IV.2.3 Essai de bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène est réalisé selon la norme NF P 94-068. Cet essai a pour but de déterminer l'activité de la fraction argileuse en mesurant la capacité d'adsorption ionique de ce sol.

L'essai consiste à saturer les particules d'argile avec du bleu de méthylène en utilisant des concentrations croissantes. La valeur de bleu de méthylène (VBS) est calculée selon l'équation qui suit :

La valeur au bleu de méthylène du tuf de Béni-Saf est de 1,4 ce qui implique qu'il est un sable limoneux sensible à l'eau.

IV.2.4 Equivalent de sable

L'essai est réalisé conformément à la norme NF EN 933-8. En exprimant un rapport volumétrique conventionnel entre les éléments dits sableux et les éléments les plus fins (argileux). L'essai d'équivalent de sable est réalisé sur la fraction de matériau passant au tamis de 5 mm. Les résultats de l'essai donnent :

- La valeur de l'équivalent de sable visuel ESV est de 73%.
- L'équivalent de sable tassé au piston ESP est de 63%.

Ce qui implique selon la norme NF EN 933-8 qu'il est un sable propre avec une faible proportion des fines argileuse $60 < ESP < 70$.

IV.2.5 Teneur en matières organiques

L'attaque par l'eau oxygénée est utilisée pour évaluer la teneur en matière organique du sol a été faite selon la norme NF P 94-047. Elle est égale au rapport de la variation de masse (100 grammes) entre la masse initiale de notre échantillon m_0 et la masse finale de l'échantillon m_1 après le test.

Pour le sol de Béni-Saf il contient peu de matière organique elle est de l'ordre de 1,7%. Donc c'est un sol faiblement organique selon la classification LCPC.

Le tableau suivant donne un récapitulatif des caractéristiques physiques et géotechnique du tuf de Bén-Saf.

IV.2.6 Classification du Tuf de Béni-Saf :

Selon l'annexe A de la norme (NF P 18-592) (figure II.11(b)), notre sol peut être classé comme un sable argileux, et selon la classification USCS/LCPC (figure II.11(a)) le tuf de Béni-Saf peut être classé comme un sable argileux (Ap-SA), avec une faible teneur en matière organique et une très forte teneur en calcaire (85%).

CLASSIFICATION DES SOLS GREUUS (plus de 50% des éléments > 0,08 mm)					
Définitions		Symbo	Critères	Appellation	
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm (Taux ASTM N° 7)	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$	Grave propre bien graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Une des conditions Gb non satisfaites	Grave propre mal graduée
			GM (GM)	Limites d'Atterberg au dessous de la ligne A (Voir figure 2.3)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au dessus de A	Grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$	Sable propre bien graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions Sb non satisfaites	Sable propre mal graduée
			SL (SM)	Limites d'Atterberg au dessous de la ligne A (Voir figure 2.3)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au dessus de la ligne A (Voir figure 2.3)	Sable argileux

Remarque : Lorsque : $5\% < \%$ d'éléments inférieurs à 0,08 mm < 12% \Rightarrow on utilise un double symbole

(a)

Figure II.11. Classifications du sol (a) classification LCPC, (b) classification GTR.

IV.2.6 Essai Proctor

L'essai est réalisé suivant la norme NF P 94-093. L'objectif de cet essai est de déterminer la densité sèche maximale pour un compactage standard à une certaine intensité. L'essai Proctor se présente sous deux formes. Selon le nombre de couches compactée, on parle d'essai Proctor standard (3 couches) ou d'essai Proctor modifié (5 couches). Les deux types de test ont été inclus dans notre étude.

Les résultats de l'essai de compactage dynamique Proctor normal et Proctor modifié sont illustrées à la figure II.12. On détermine les caractéristiques aux optimums :

- Proctor normal, $w_{\text{optimal}} = 15\%$; $\gamma_{\text{dmax}} = 17,93 \text{ KN/m}^3$; $Sr_{\text{optimum}} = 79\%$.
- Proctor Modifié, $w_{\text{optimal}} = 13\%$; $\gamma_{\text{dmax}} = 19,87 \text{ KN/m}^3$; $Sr_{\text{optimum}} = 83\%$.

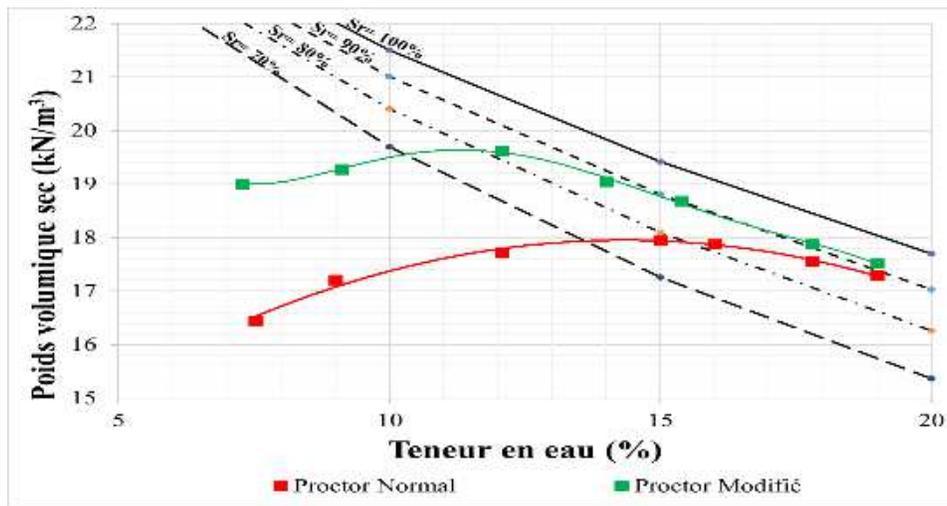


Figure II.12 Compactage dynamique OPN ; OPM pour le tuf de Béni-saf

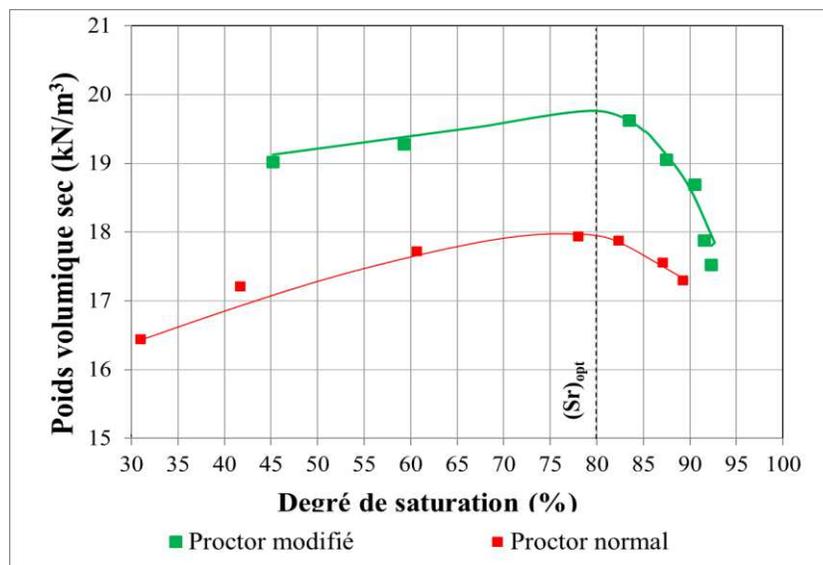


Figure II.13 : Poids volumique sec en fonction du degré de saturation pour les deux énergies Proctor

La figure II.13 nous donne une façon récente de représentation de la courbe de compactage donner par (Tatsuoka et Gomes Correia, 2018 ; Sebaa, 2021) qui s'agit de remplacer la teneur en eau par le degré de saturation.

IV.2.7 Détermination de la teneur en eau par compactage statique

Le compactage dynamique n'est pas approprié pour la fabrication de la BTC. L'industrialisation de cette dernière est faite strictement par des presses hydraulique, pneumatique, donc un mode de compactage statique et non dynamique. A cet effet nous avons réalisé des essais de compactage statique pour déterminer les caractéristiques optimales.

L'essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique et d'un moule cylindrique à double piston d'un diamètre de 5 cm. La contrainte de compactage est fixée à 4 MPa suivant les résultats de Sebaa, 2021 (il à trouver que le compactage à 4MPa et le compactage à une plus grande énergie de compactage.

La figure II.14 représente les courbes de compactage statique (poids volumique sec en fonction de la teneur en eau) compactées avec une énergie de 4 MPa.

Les essais ont été réaliser pour les différents mélanges étudiés :

- Tuf cru
- Tuf + 10% de fumée de silice,
- Tuf + 10% de pouzzolane naturelle
- Tuf + 30% de l'argile de Boughrara,

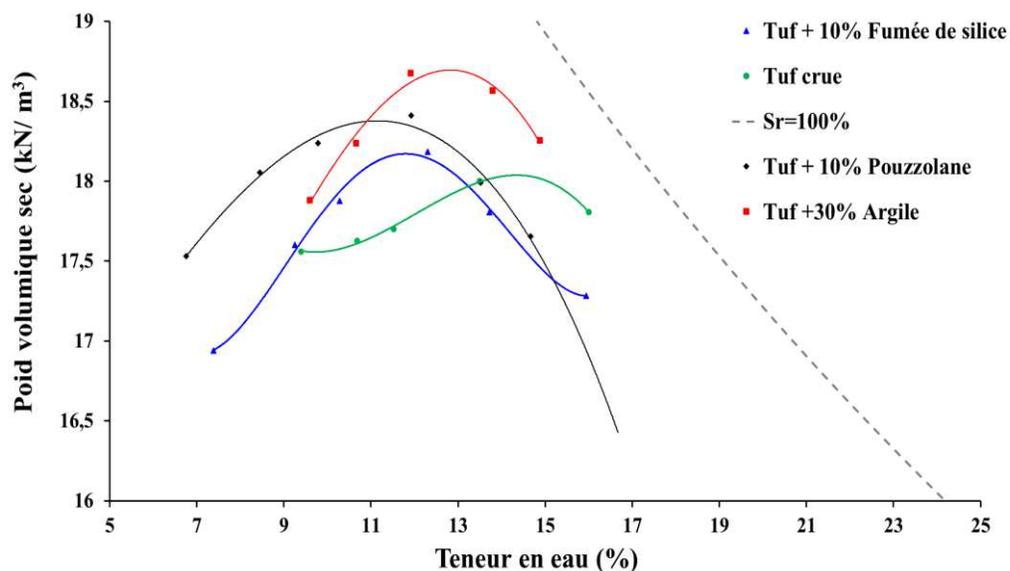


Figure II.14 Compactage statique (4Mpa) pour le tuf de Béni-saf et les différents mélanges

Les résultats du compactage statique ainsi que les corrélations données par Fleureau et al (2002) sont donnés dans le tableau II.2

Figure II.2 : Paramètres de l'optimum pour les différents mélanges

Paramètres Formulations	Teneur en eau optimal (%)	Poids volumique sec maximal (KN/m ³)	Limite de liquidité (%)	Corrélation Fleureau et al. (2002)	
				W _{Opt} (%)	γ _{dopt} (KN/m ³)
Tuf cru	13,5	18	37	17,3	17,1
Tuf + 10% Fumée de silice	12,3	18,1	41	18,8	16,7
Tuf + 10% Pouzzolane	11,9	18,4	39	18,1	16,9
Tuf + 30% Argile	11,9	18,6	44	19,9	16,4

(Houben et Guillaud 1994) ont utilisé le compactage comme moyen de sélection pour la caractérisation des sols destinés à la construction en terre, ils ont tracé un nomogramme (Densité sèche / Teneur en eau du moulage) avec des zones recommandées pour les BTC, la terre battue, et les briques d'adobe, on a superposé les densité sèche et les teneurs en eau du moulage pour différents mélanges sur ce nomogramme figure II.15.

On remarque dans la figure 13 que le tuf seul est dans les limites du domaine recommandé par Houben et Guillaud 1994 pour la construction en brique de terre comprimée (BTC) et après l'ajout des différentes additions on commence à bien rentrer dans ce domaine suite à la diminution de la teneur en eau optimal ainsi que l'augmentation de la densité sèche maximal.

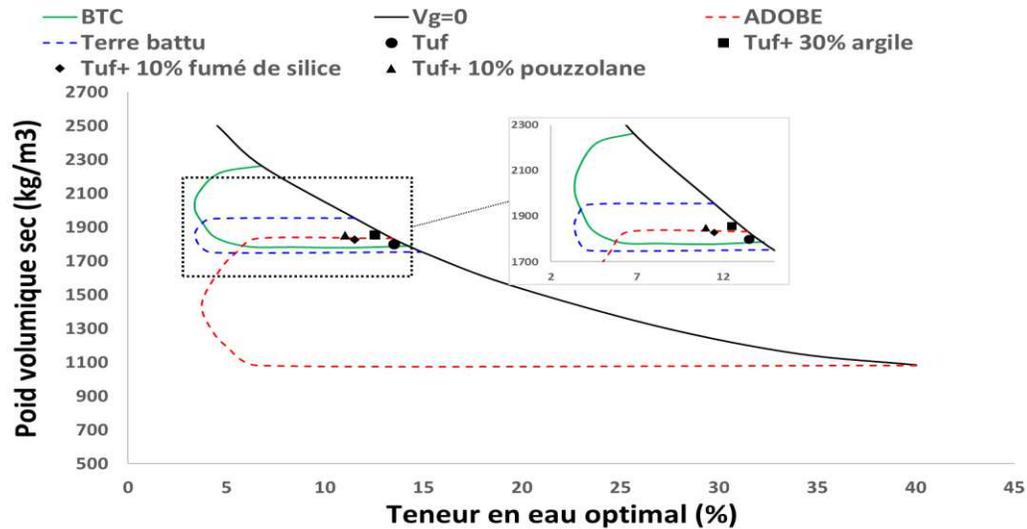


Figure II.15 : Nomogrammes de compactibilité (Houben et Gullaud 1994)

Le tableau II.2 donne un récapitulatif des caractéristiques géotechniques du tuf de Béni-Saf

Tableau II.2 : Récapitulatif des caractéristiques géotechniques et physiques du Tuf de Béni-Saf

Propriétés	Valeurs	Normes
Gravier (%)	12	NF P 94-041
Sable (%)	48	
Limon (%)	21	NF P 94-057
Argile (%)	19	
WL (%)	37	NF P 94-051
IP (%)	17	
Densité des grains solides	2,74	NF P 94-054
CaCO ₃ (%)	85	NF P 94-048
Mo (%)	1,8	NF P 94-047
VBS	1,4	NF P 94-068
Equivalent de sable (%)	73	NF EN 933-8

V. Confection des éprouvettes cylindriques

Les éprouvettes (H=10cm et $\phi=5$ cm) ont été réalisées par la même technique de fabrication des BTC (malaxage, compactage, démoulage).

Le protocole expérimental suivi pour la confection des échantillons est :

- Séchage du sol pendant 24h dans l'étuve
- Ecrêtage du sol à 5mm
- Malaxage avec la teneur en eau optimal
- Rajouter le pourcentage de stabilisant et homogénéisation de l'ensemble
- Compactage dans le moule cylindrique à une contrainte de 4MPa.

V.1 Cure des échantillons

Après un démoulage avec précaution des éprouvettes, ils sont laissés à l'air libre. La température ambiante et l'humidité relative du laboratoire est de 20°C \pm 2°C et 50% \pm 5%

respectivement. Ceci pour prévenir un dessèchement rapide des éprouvettes évitant ainsi l'apparition de fissures.

Afin d'étudier l'influence du temps de séchage sur l'évolution des propriétés mécaniques, plusieurs essais de résistance à la compression ont été effectués après 7,14,21 et 28 jours de cure.

V.2 Méthode de caractérisation thermomécanique

Les méthodes présentées ci-après concernent les différents essais mécaniques et thermiques réalisés sur nos échantillons.

V.2.1 Détermination des propriétés mécaniques

V.2.1.1 Résistance à la compression

Cet essai a pour but de déterminer la résistance à la compression. Il s'agit de soumettre des échantillons cylindriques de $H=10\text{cm}$ et $\phi=5\text{cm}$ à un écrasement. L'éprouvette cylindrique est introduit dans une cellule triaxiale en assurant un bon contact entre le piston et l'échantillon afin que la force appliquée soit centrée.

La résistance à la compression est calculée selon l'équation II.7

$$R_C = \frac{F}{S} \quad \text{Equation II.7}$$

Avec :

R_C : Résistance à la compression des éprouvettes cylindriques en (MPa).

F : Force maximale en (N).

S : Section comprimée en mm^2

La valeur de la résistance à la compression trouvée est la moyenne de 3 essais réalisés sur 3 échantillons qui ont les mêmes conditions initiales.

V.2.1.2 Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique (MED) a été mesuré par un appareil des ultrasons Pundit lab (figure II.16), avec une fréquence de 24 kHz. Le module d'élasticité dynamique a été calculé selon l'équation II.8 :

$$MED = F(v) \cdot \rho \cdot C^2 \cdot 10^{-6} \quad \text{Equation II.8}$$

Avec :

- $f(v)$: Un facteur qui dépend du coefficient de Poisson. Il est estimé à 0,3 en se basant sur la littérature publiée sur les sols sablo-argileux (Bowels, 1996).
- ρ c'est la masse volumique de l'échantillon en (kg / m^3).

- C en (m / s) c'est le rapport entre le temps enregistré par l'appareil en secondes, et la hauteur de l'échantillon testé en mètre.



Figure II.16 : Dispositif de mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique

V.2.2 Détermination des propriétés thermiques

L'appareil utilisé dans cette partie expérimentale du laboratoire labmat (ENPOran) est un Quikline-30 (figure II.17). Un essai complet nous donne en même temps les valeurs de :

- La conductivité thermique
- La capacité thermique volumétrique (C)
- La diffusivité thermique (D).

La méthodologie de mesure est selon la norme NF EN 993-15. Cette méthode est basée sur l'étude de la réponse à la température du matériau sous imposition de flux de chaleur.

La valeur de la conductivité thermique de l'échantillon à la fin du test est calculée à partir de la fluctuation de la température en fonction du temps et affichée sur l'écran de l'équipement.



Figure II.17 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique

V.2.2.1 Conductivité thermique

La quantité de chaleur qui peut traverser un matériau d'une épaisseur égale à un mètre carré et dont la différence de température entre les surfaces extérieure et intérieure est d'un kelvin est représentée par l'un des paramètres thermiques les plus représentatifs d'un matériau qui est la conductivité thermique.

V.2.2.2 Capacité de stockage thermique

La capacité de stockage thermique d'un corps est une mesure de la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température en kelvin.

D'autre part, elle permet de quantifier la capacité de ce corps absorbant à restituer de la chaleur tout au long d'une transition où sa température varie.

Elle dépend directement de la masse volumique du matériau et de sa chaleur spécifique volumique selon l'équation II.9.

$$c_p = \frac{c}{\rho} \quad \text{Equation II.9}$$

Avec :

- C_p : la chaleur spécifique massique ($\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
- C : la chaleur spécifique volumique ($\text{J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)
- ρ : la masse volumique (kg/m^3).

V.2.2.3 Diffusivité thermique

La capacité d'un matériau à conduire la chaleur est appelé la diffusivité thermique (κ). Cette dernière représente l'efficacité du transfert de chaleur par conduction.

L'équation II.10 montre que la diffusivité thermique k dépend de la capacité thermique volumétrique et la conductivité thermique.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad \text{Equation II.10}$$

Avec :

- k : La diffusivité thermique (m^2/s)
- λ : La conductivité thermique (en $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- ρ : La masse volumique (kg/m^3),
- C_p : La capacité thermique massique à pression constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

V.2.2.4 Effusivité thermique

L'effusivité thermique, dépend de la capacité de masse thermique et la conductivité thermique. Elle mesure la rapidité avec laquelle la température de surface d'un matériau s'élève et devient chaude ou froide au toucher. Plus le matériau met de temps à se réchauffer en surface, plus le coefficient d'effusivité est élevé.

Dans le secteur de la construction, l'effusivité thermique est une mesure cruciale qui détermine le degré de confort d'une structure, elle est calculée selon l'équation II.11:

$$E = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} \quad \text{Equation II.11}$$

Avec :

- E : L'effusivité thermique ($\text{J.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$)

- k : La diffusivité thermique (m^2/s)
- ρ : La masse volumique (kg/m^3),
- C_p : La capacité thermique massique à pression constante ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$).

V.2.3 Essai d'absorption par capillarité

Le plus grand problème des briques de terre compressée c'est qu'ils sont très sensibles à l'eau. L'essai d'absorption par capillarité permet de quantifier la résistance à l'eau de la BTC.

Cet essai est réalisé selon la norme (NF XP P13-901) ou les BTC sont classées suivant la valeur du coefficient d'absorption d'eau C_b défini comme suit :

$$C_b = \frac{100M}{S\sqrt{t}} \quad \text{Equation II.12}$$

Avec :

- C_b : Coefficient d'absorption capillaire ($kg\cdot m^{-2}\cdot S^{-1/2}$)
- M : La masse d'eau absorbée durant l'essai.
- S : La surface immergée, en centimètre carré.
- t : le temps d'immersion , en minutes.

On détermine deux catégories de blocs suivant la norme :

- Bloc faiblement capillaire C_b20 : ou $C_b < 20$
- Bloc peu capillaire C_b40 : ou $20 < C_b < 40$

Le dispositif expérimental pour la détermination du coefficient C_b est illustré dans la figure II.18.

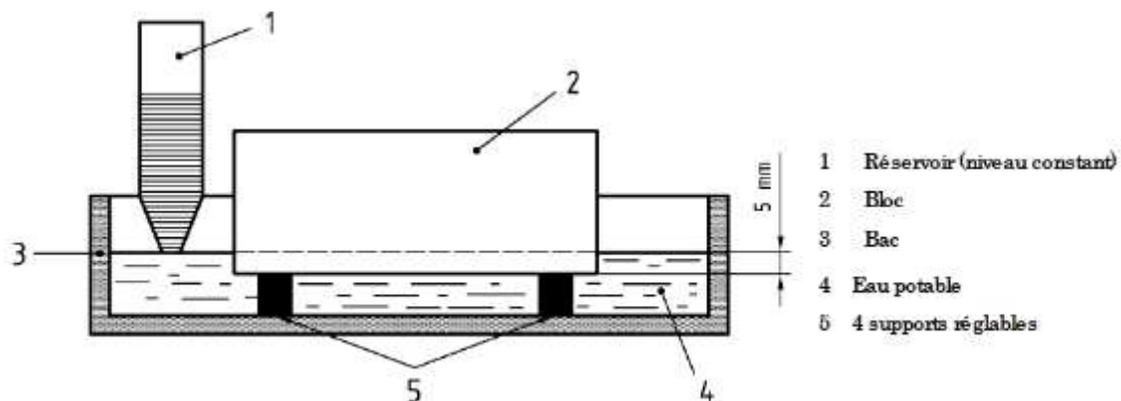


Figure II.18: Schéma de l'essai d'absorption par Capillarité (NF XP P13-901)

V.2.3 Essai de front de remonté capillaire

Cet essai a été utilisé par (Mekaidèche. 2021) ; Il a pour but de déterminer la variation de la hauteur d'eau capillaire dans un échantillon après un essai d'absorption par capillarité.

L'essai consiste à :

- Soumettre l'échantillon cylindrique de 10cm de hauteur à l'absorption capillaire pendant 2h.
- Après ce temps, on le dévise en 5 disques de 2cm de hauteur (0-2 cm ; 2-4 cm ;... jusqu'à 8-10 cm) (figure II.19).
- Après découpage on mesure la teneur en eau de chacun des disques.



Figure II.19 : Détermination du front de remonté capillaire

VII. Confection des briques de maçonnerie

Dans notre étude nous avons confectionné deux types d'éprouvettes :

- Cylindriques de (H=10cm et $\phi=5$ cm) : où on a étudié le comportement mécanique et thermique du tuf cru et stabilisé.
- Prismatiques de dimensions (20cmx10cmx5cm) : les blocs de terre crue et stabilisée confectionnée sont choisis suivant les meilleurs résultats obtenus à partir des formulations des éprouvettes cylindriques en termes de résistance mécanique et comportement thermique. Ces briques ont été confectionnées au laboratoire par une presse hydraulique de capacité de 30 tonnes (figure II.21) dans un moule démontable (figure II.20) confectionné chez un tourneur.



Figure II.20: Moule 10x20x5



Figure II.21: Presse utilisé pour la confection des briques

VII. Propriétés des briques de terre comprimées BTC

La production des BTC doit répondre à des exigences de traçabilité pour une maîtrise de la qualité pour cela il doit passer par plusieurs essais de caractérisation. Ces essais sont présentés ci-après :

VII.1 Résistance à la compression

Selon la norme NF XP P13-901, la BTC doit présenter une résistance à la compression sèche de 2MPa au minimum.



Figure II.22: Schéma de l'essai de compression

L'industrie de la construction utilise le plus souvent ce type de caractérisation mécanique, mais les conditions d'essai empêchent souvent de mesurer avec précision le comportement mécanique inhérent au matériau terre. Dans la littérature on a trouvé quelques recommandations pour la réalisation des essais mécaniques. Ces recommandations sont rapportées ci-après :

- La taille de l'échantillon doit être suffisante pour qu'il soit considérée comme homogène. Pour cela, les dimensions de l'échantillon doivent être au moins cinq fois plus grandes que les plus grosses particules. Dans le cas contraire, la mesure sera extrêmement sensible aux hétérogénéités du matériau, car lorsque la taille de l'échantillon est trop petite, la densité est différente de celle observée dans des blocs de taille appropriée (Collet, 2004).
- La forme a un impact sur le traitement et par conséquent, sur la qualité du matériau. Par exemple, le compactage est moins efficace aux angles de la terre comprimée, ce qui pourrait expliquer que les résistances mesurées soient inférieures à celles de cylindres de même élancement (Maniatidis, 2008).
- La différence de rigidité entre l'échantillon et les plateaux de la presse augmente avec la rugosité des surfaces de l'échantillon. Afin de créer une surface lisse et de lubrifier le contact entre l'échantillon et les plateaux, il est donc conseillé de surfacier les échantillons.

Après un essai de compression, on peut observer trois schémas de rupture primaires qui reflètent le niveau de frottement au niveau du contact entre l'échantillon et la plaque.

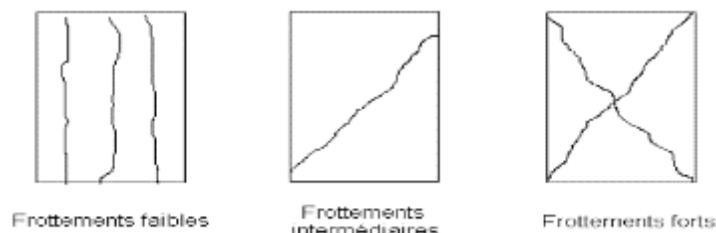


Figure II.23: Principaux modes de rupture en compression (Fontaine2004)

VII.2 Résistance à la flexion 3 point

La résistance à la traction est évaluée par un essai de flexion 3 points (figure II.24). La brique de terre prismatique est comparable à une poutre, où on applique les principes de la RDM pour déterminer la résistance à la traction par flexion.

La résistance à la traction de la terre étant jugée trop faible pour être prise en compte dans les calculs de conception, elle n'est souvent pas nécessaire d'un point de vue réglementaire.

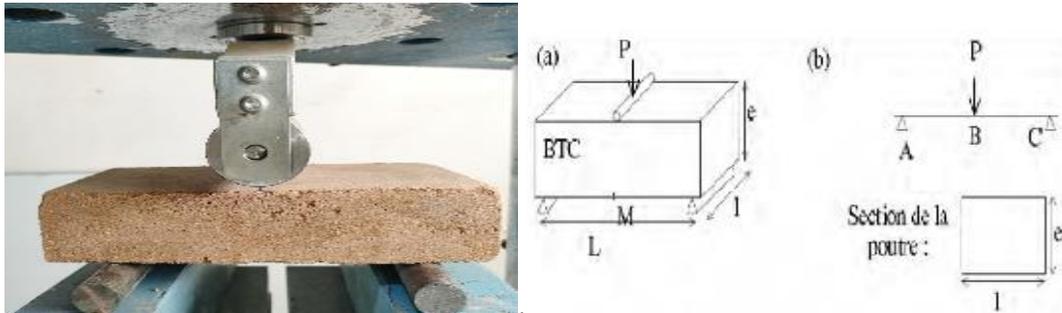


Figure II.24 : Schéma de l'essai de flexion 3 points selon la RDM (Morel, 2003).

VII.3 Tenue à l'eau par immersion

Cet essai a pour but de déterminer la perte en matière d'une brique en contact avec l'eau.

Le protocole expérimental suivi est selon la nouvelle norme NF XP P13-901 qui date de 2022. Cette partie de tenue à l'eau par immersion a été rajoutée pour la première fois dans cette version actualisée de la norme. Les principales étapes de cet essai sont :

- Emballer les éprouvettes de dimensions (20cmx10cmx5cm) par un film plastique pour activer les réactions chimiques.
- Etuver les briques à 105°C jusqu'à une masse constante (la durée est d'une semaine en moyenne)
- Après étuvage et mise à une température ambiante, les BTC sont misent verticalement et suspendues. Elles sont immergées dans 10 cm d'eau (voir figure II.25).

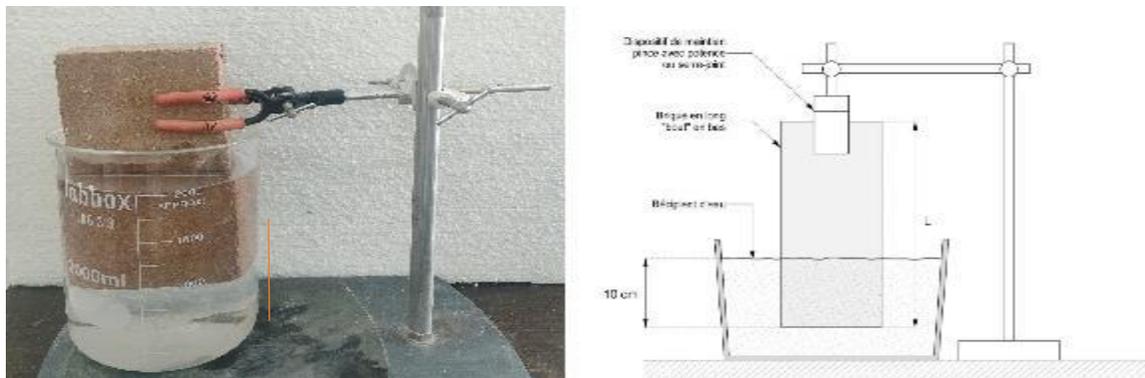


Figure II.25 : Dispositif d'essai de tenue à l'eau par immersion

La perte à l'immersion est déterminée par le rapport entre la masse des résidus et la masse initiale de la brique. Elle est exprimée en pourcentage selon l'équation II.13.

$$P = \frac{M_2 \times 100}{M_0} \quad \text{Equation II.13}$$

P : La perte de masse en %

M_0 : La masse initial de la brique avant l'essai

M_2 : La masse de la brique séchée jusqu'à masse constante après l'essai.

VII.4 Abrasion par brosse métallique

Il s'agit d'utiliser une brosse métallique qui est normalisée (NF XP P13-901). L'essai consiste à brosser la surface du bloc en appliquant uniquement une pression verticale de 3 kg, avec un aller-retour toutes les secondes pendant une minute (soit 60 allers-retours).

Compte tenu que ce matériel normalisé n'existe pas au niveau de notre laboratoire EOLE, on a réfléchi à un système équivalent qui respecte les exigences de la norme (figure II.26).

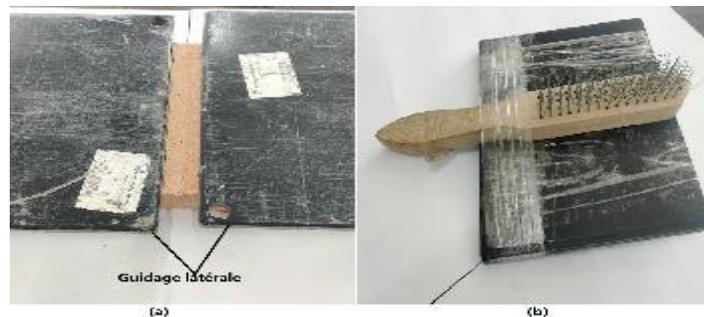


Figure II.26 : Dispositif pour essai d'abrasion :
(a) système de guidage, (b) brosse avec poids

Le coefficient d'abrasion C_a est exprimé par la formule :

$$C_a (\text{cm}^2/\text{g}) = \frac{S}{m_0 - m_1} \cdot 100 \quad \text{Equation II.14}$$

Avec :

m_0 : Masse initial de la brique.

m_1 : Masse après brossage.

On calcule la surface $S = L.l$ (en millimètres).

L: longueur de la face brossée du bloc.

l : largeur de la brosse.

VIII. Conclusion :

Après l'ensemble des essais de caractérisation qu'on a réalisés sur le tuf de béni-saf il apparaît qu'il est apte pour l'utilisation dans la fabrication des BTC suite à sa granulométrie et sa plasticité qui sont conformes à la norme XP P13-901, aussi sa faible teneur en matière organique, la teneur importante en CaCO_3 qui est de 85% aussi le faible pourcentage des fines qui contiennent le tuf de béni-saf ainsi que sa composition minéralogique nous a poussé

a le stabilisé par l'ajout de différents additions, l'essai de compactage statique nous a conduit à la détermination de la teneur en eau qui va être l'utilisé dans la formulation des différents mélanges.

Enfin l'ensemble des protocoles d'essai qu'on vas l'utiliser pour la caractérisation des échantillons sont présenté dans ce chapitre à savoir la résistance à la compression, le module d'élasticité dynamiques, la conductivité thermique, la capacité de stockage thermique l'absorption par capillarité, le vieillissement accélérer, la confection des blocks prismatiques et leurs caractérisations.

Chapitre 3 :

**Comportement
mécanique et
hygrothermique du
matériau stabilisé**

I. Introduction

Les briques de terre comprimée comme tout matériau de construction est soumis à plusieurs phénomènes et sollicitation ce qui met en évidence la caractérisation de ces briques et les classé selon leurs comportement mécanique, thermique, hydrique et de durabilité.

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes caractéristique mécaniques, thermiques, et hydrique et physico-chimique de notre matériau compacté statiquement et stabilisé avec trois types de stabilisant : pouzzolane naturelle, fumée de silice, et fines argileuses à travers les essais cités ci-dessous :

Dans la partie mécanique l'influence de l'ajout des trois stabilisant sur l'évolution de la résistance à la compression ainsi que le module d'élasticité dynamique est étudié. Aussi, la résistance la compression en fonction de la teneur en eau des échantillons à été menée.

Dans la partie thermique, nous allons montrer l'évolution des paramètres thermiques en fonction de teneur en différents additions, aussi nous allons évaluer l'influence de la densité apparente sur l'évolution de la conductivité thermique.

Dans la partie hydrique, nous allons présenter les résultats du coefficient d'absorption par capillarité et du front capillaire pour le tuf non stabilisé ainsi que le tuf stabilisé avec les différents ajouts.

Dans la partie physico-chimique nous allons présenter les résultats de la microscopie électronique a balayage pour les différents échantillons.

II. Comportement mécanique du matériau cru et stabilisé

Nous allons aborder dans cette partie la caractérisation mécanique des échantillons stabilisés et non stabilisés.

II.1 Stabilisation avec la fumée de silice

Pour évaluer les caractéristiques mécaniques des échantillons stabilisée avec différents teneurs en fumée de silice 4%, 8% et 10%, on a utilisé deux essais, un essai de compression uni axial et l'essai ultrasonique.

II.1.1 Résistance à la compression

a) Effet de l'ajout de la fumée de silice sur l'évolution de la résistance à la compression

La figure III.1 illustre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fumée de silice. On remarque une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice et cela s'explique par la taille de la fumée de silice qui est très fine qui vient colmater les pores de la matrice du sol et la rendre plus rigide par la suite. A partir de 8% de fumée de silice il se forme

un palier donc il n’y a pas une augmentation significative de la résistance au-delà de ce pourcentage.

Les valeurs obtenues sont de 1,78 MPa pour le sol non stabilisé avec une augmentation de 13% après l’ajout de 10% de fumée de silice soit 2,02 MPa.

Cependant la fumée de silice grâce à sa finesse et sa forme sphérique elle présente une teneur optimale au-delà de laquelle la résistance commence à diminuer. Car elle a tendance à occuper une partie substantielle de l’échantillon, et fragilise l’échantillon par la suite.

Avec 10% de stabilisant on a pu dépasser légèrement de 2% (2,02 MPa) la résistance minimale exigée par la norme XP-P13-901 qui est de 2MPa.

Ceci est cohérent avec les résultats obtenus avec d’autres types de liants.tel que la chaux (Milogo et all (2008)), le ciment (Sekar et all (2018)).

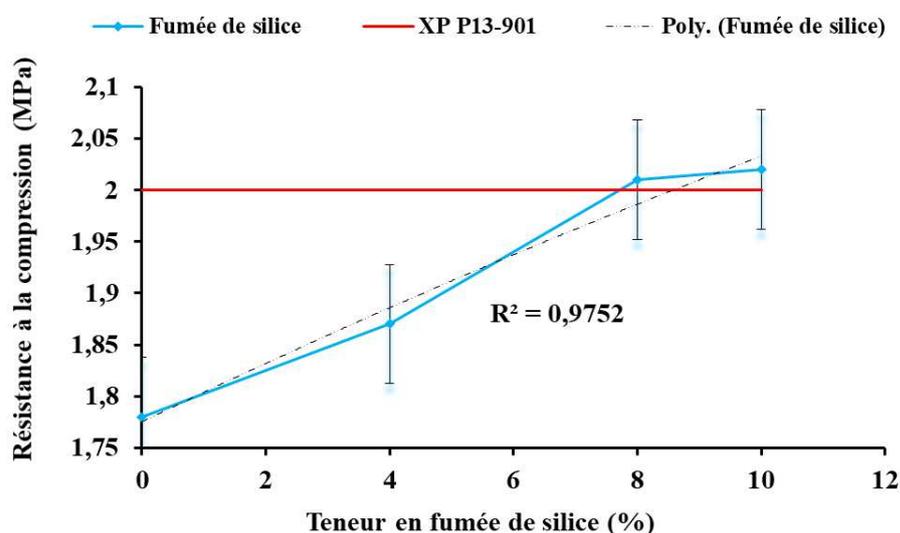


Figure III.1 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en fumée de silice

b) Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression

La mesure de la teneur en eau des échantillons le jour de l’essai de compression nous a permis de trouver une relation linéaire décroissante entre la résistance à la compression et la teneur en eau (figure III.2). L’augmentation de la teneur en eau conduit à une diminution de la résistance à la compression.

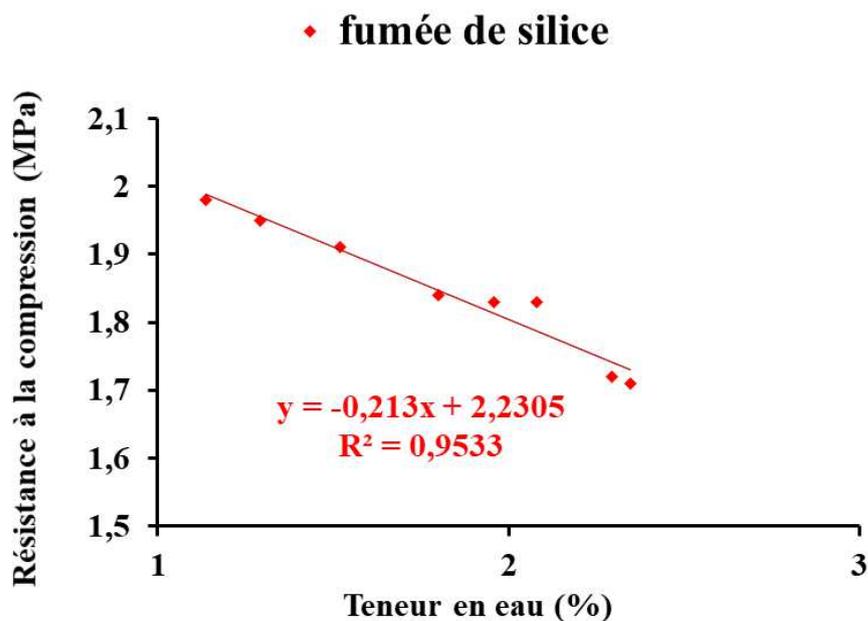


Figure III.2 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau des échantillons traité avec la fumée de silice

Le tableau III.1 donne un récapitulatif des résultats de la résistance à la compression ainsi que la teneur en eau pour les échantillons stabilisée avec la fumée de silice pour différents temps de séchage (14,21, et 28jours).

Tableau III.1 : Récapitulatif des résistances à la compression et des teneurs en eau (fumée de silice)

Type de stabilisant	Teneur en Fumée de silice (%)	Temps de cure (jours)	Teneur en eau (%)	Résistance à la compression (MPa)
Fumée de silice	0	14	2,09	1,36
		21	1,72	1,59
		28	1,15	1,78
	4	14	2,19	1,65
		21	1,7	1,71
		28	1,3	1,87
	8	14	2,01	1,72
		21	1,52	1,84
		28	1,17	2,01
	10	14	2,34	1,83
		21	1,85	1,91
		28	1,29	2,02

II.1.2 Module d'élasticité dynamique (MED)

Le module d'élasticité dynamique est mesuré sur des échantillons cylindriques par l'appareil Pundit lab.

a) Influence de l'ajout de la fumée de silice sur le MED

La figure III.3 illustre l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en fumée de silice. On constate que :

- Les valeurs trouvées varient de 2960 MPa pour le matériau tuf seul à 3800 MPa pour le matériau stabilisé avec 10% de fumée de silice. Cela s'explique par la forte teneur en calcite du sol et aussi à la taille des pores qui est très importante visualisé par la microscopie électronique à balayage (voir paragraphe IV.1.1, figure III.38).
- L'ajout de la fumée de silice a conduit à une augmentation du module d'élasticité dynamique suite à une diminution de vitesse ultrasonique. Ceci est due au remplissage des pores par ces additions qui améliorent la compacité de l'échantillon et diminue ainsi sa déformabilité.

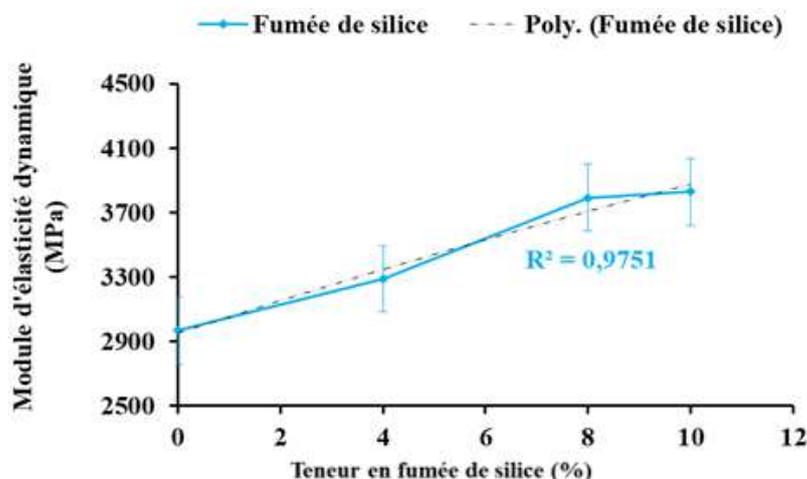


Figure III.3 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en fumée de silice.

b) Influence de la teneur en eau sur le MED

La figure III.4 montre l'influence de la teneur en eau sur le module d'élasticité dynamique. Lorsque la teneur en eau augmente le module d'élasticité diminue ce phénomène s'explique par la forte conductivité de l'eau qui tend à augmenter la vitesse d'impulsion ultrasonique d'où la diminution du module d'élasticité dynamique.

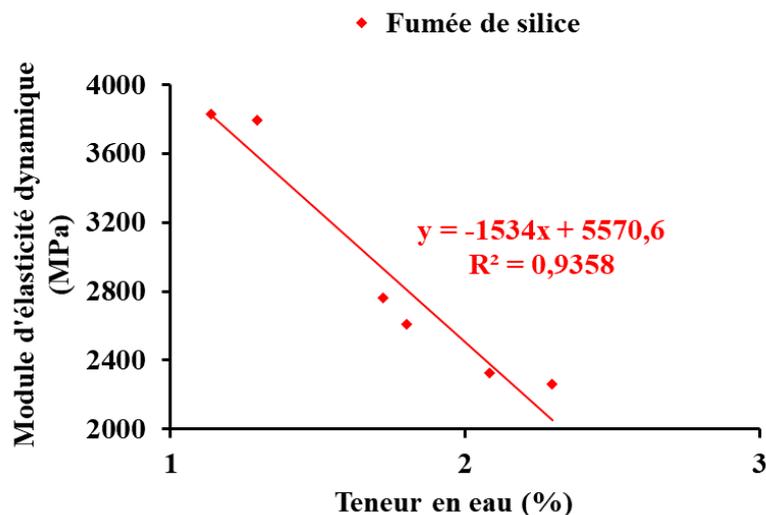


Figure III.4 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en eau des échantillons traité avec la fumée de silice

II.2 Pouzzolane naturelle

Dans cette partie on examinera l'effet de la stabilisation par l'ajout de la pouzzolane avec différents teneurs 4%, 8% et 10% sur les paramètres étudiés.

II.2.1 Résistance à la compression

a) Influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance à la compression

La figure III.5 illustre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane. On remarque une augmentation de RC avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle. On obtient une augmentation de 1,78 MPa (0% d'ajout) à 2,11MPa (10% d'ajout), soit un gain de 18% de résistance.

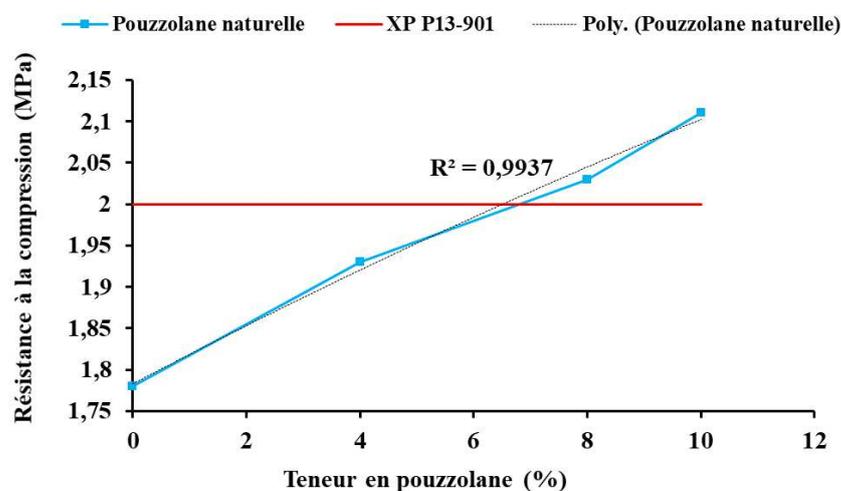


Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle

Cette augmentation est due à la présence du gel C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) formé après réaction entre le sol et les additions qui vont remplir les pores. Ces éléments hydratés (C-S-H) forment une enveloppe autour des particules du sol favorisant la création de fortes liaisons d'où une augmentation de la résistance RC (Duan et al, 2019).

Aussi avec l'ajout de la pouzzolane on a dépassé la limite minimale de résistance de 2 MPa soit 2,11 MPa (5,5% de plus par rapport à la norme).

b) Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression (pouzzolane)

La mesure de la teneur en eau des échantillons stabilisés avec la pouzzolane naturelle nous a permis de trouver la même relation comparativement avec l'ajout de la fumée de silice.

L'augmentation de la teneur en eau conduit à une diminution de la résistance à la compression, ce phénomène est peut-être lié à la disparition de l'eau qui est utilisé dans l'hydratation de la calcite pour former la portlandite qui est un élément essentiel dans la réaction pouzzolanique.

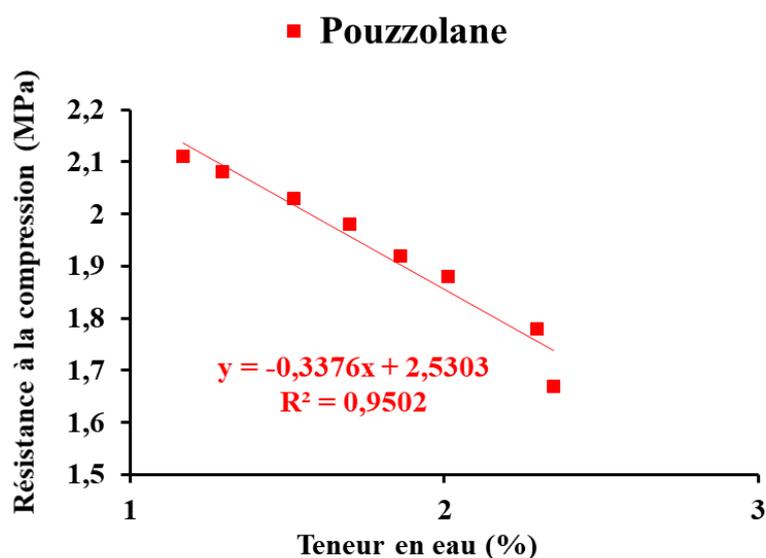


Figure III.6 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau (pouzzolane)

Le tableau III.2 donne un récapitulatif des résultats de la résistance à la compression ainsi que la teneur en eau pour les échantillons stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différents temps de séchage (14,21, et 28jours).

Tableau III.2 : Récapitulatif de la résistance à la compression ainsi que les teneurs en eau (pouzzolane)

Type de stabilisant	Teneur en pouzzolane (%)	Temps de cure (jours)	Teneur en eau (%)	Résistance à la compression (MPa)
Pouzzolane naturelle	0	14	2,09	1,36
		21	1,72	1,59
		28	1,15	1,78
	4	14	2,22	1,63
		21	1,65	1,79
		28	1,35	1,93
	8	14	2,07	1,71
		21	1,59	1,83
		28	1,12	2,03
	10	14	2,41	1,92
		21	1,79	2,01
		28	1,25	2,11

II.2.2 Module d'élasticité dynamique (MED)

a) Influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur le MED

La figure III.7 illustre l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en pouzzolane, les valeurs trouvées varient de 2960 à 4500 MPa. Ces résultats sont proches de ceux trouvés dans la littérature (Sore et al, 2018).

Avec l'augmentation de l'addition, le module d'élasticité augmente. Ceci est due au remplissage des pores après l'ajout de la pouzzolane, cette densification de l'échantillon augmente le module d'élasticité dynamique.

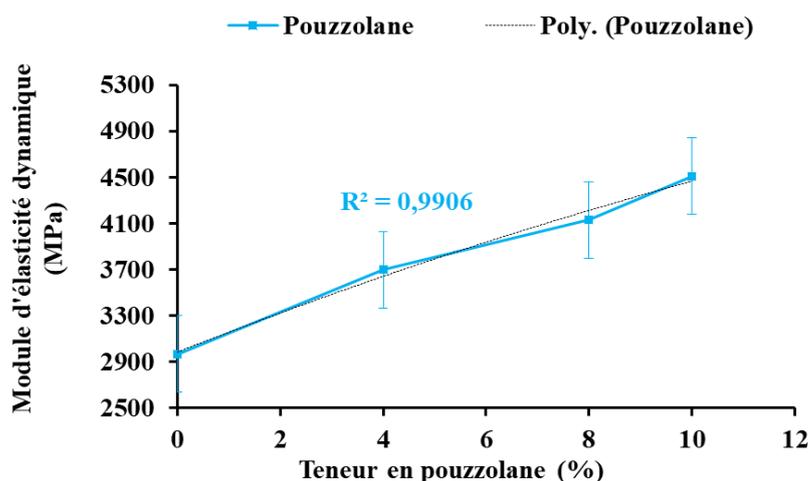


Figure III.7 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en pouzzolane

b) Influence de la teneur en eau sur le MED

La mesure de la teneur en eau des échantillons soumis à l'essai ultrasonique nous a permis de trouver une relation linéaire décroissante entre la teneur en eau et le module

d'élasticité dynamique (figure III.8), l'augmentation de la teneur en eau conduit à une diminution du module d'élasticité dynamique et cela est toujours due à la forte conductivité de l'eau qui va augmenter la vitesse d'impulsion ultrasonique ce qui va diminuer le module d'élasticité dynamique.

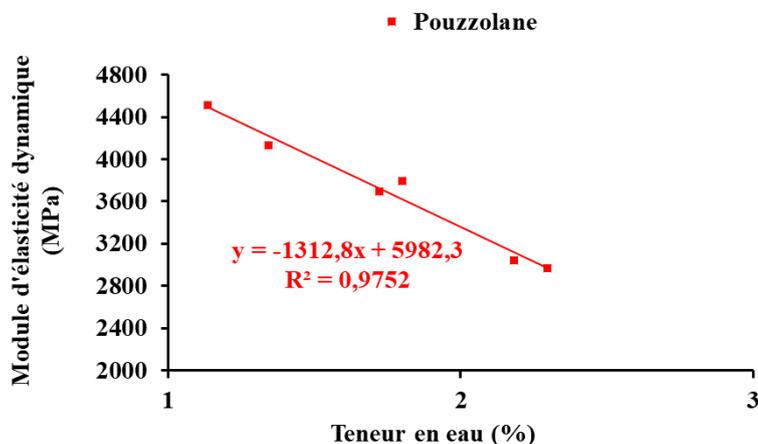


Figure III.8 : Module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en eau (Pouzzolane)

II.3 Fines Argileuses

Dans cette partie on va étudier l'influence de la variation de l'ajout de différents pourcentages d'argile de Boughrara 10%, 20% et 30% sur le comportement mécanique.

II.3.1 Résistance à la compression

a) Influence de l'ajout des fines argileuses sur la résistance à la compression

La figure III.9 représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en argile. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression avec l'ajout de 20% d'argile pour les deux modes de séchage suivi. On rappellera que le premier mode est de mettre les échantillons dans le laboratoire à l'air libre, et le deuxième consiste à mettre les échantillons dans un sachet en plastique pour favoriser les réactions chimiques.

On remarque un gain de plus de 140% de résistance par rapport à l'échantillon non stabilisé, elle passe de 1,78MPa à 4,2MPa pour le séchage à l'air et de 1,61MPa à 3,85MPa pour le séchage humide. Cette augmentation de la résistance est due en premier lieu aux réactions à court terme (floculation et agglomération) et à long terme (réaction pouzzolanique) dans l'échantillon favorisé entre l'argile et le sol qui est très riche en calcite. Ces réactions vont former les hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et les hydrates aluminates de calcium (C-A-H) ce qui donnera une cohésion importante entre les particules du sol (Sharo et al 2019). Aussi l'ajout de l'argile avec des fractions fines joue un rôle très important dans la diminution de la porosité des échantillons favorisant ainsi l'augmentation de la résistance à la compression.

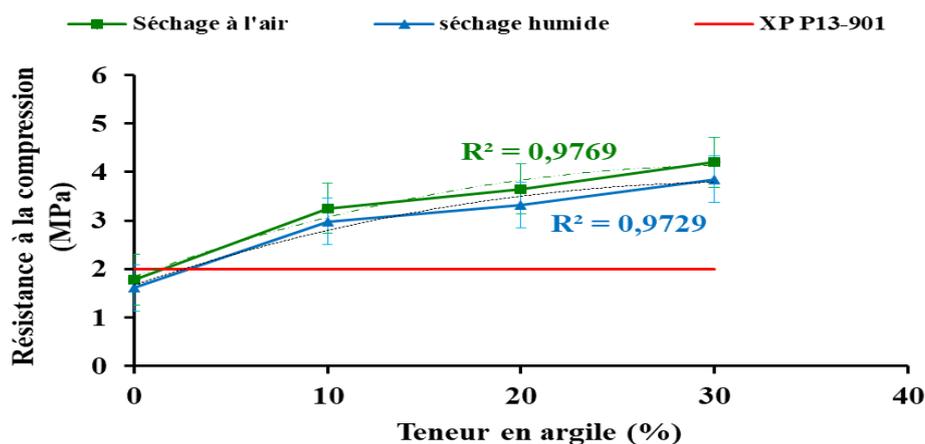


Figure III.9 :

Résistance à la compression en fonction de la teneur en argile

b) Influence de la densité sur la résistance à la compression

La figure III.10 décrit la relation entre la densité apparente et la résistance à la compression des échantillons, elle montre que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité apparente avec une relation linéaire pour les deux types de séchages, ces résultats sont conformes avec ceux trouvés par (Morel et al. 2007).

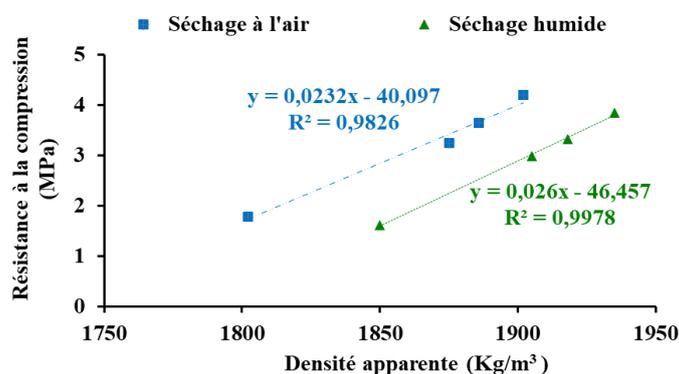


Figure III.10 : Résistance à la compression en fonction de la masse volumique apparente (argile)

C) Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression

La figure III.11, représente la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau pour les échantillons soumis au séchage à l'air libre et les échantillons soumis à un séchage humide. Les résultats ont montré une légère différence entre les deux types de séchage pour les différents mélanges. Cette différence est due à l'accélération d'hydratation et à la réaction pouzzolanique entre l'argile et le sol provoqué par le séchage à l'air libre. De plus la diminution de la teneur en eau en fonction de temps due au séchage des échantillons conduit à une augmentation de la résistance à la compression favorisée par l'augmentation de la cohésion entre les grains (Morel et al. 2007).

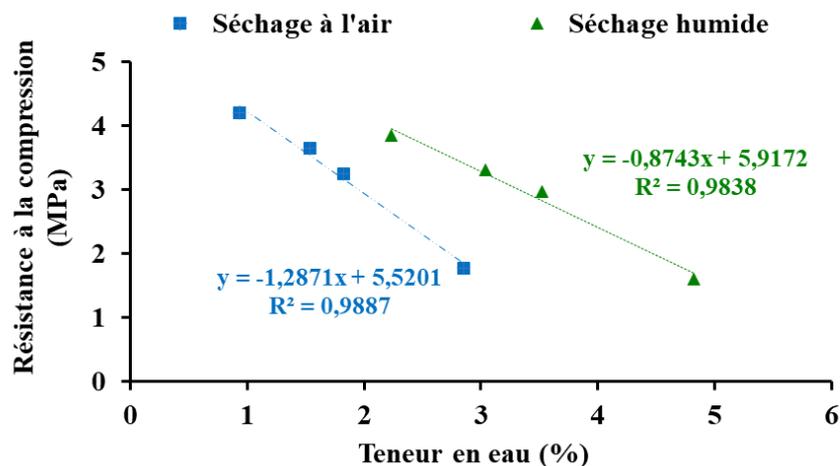


Figure III.11 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau (argile)

Le tableau III. 3 donne un récapitulatif des résultats de la résistance à la compression ainsi que la teneur en eau pour les échantillons stabilisée avec l'argile de bougharar pour différents temps de séchage (14,21, et 28jours).

Tableau III.3 : Récapitulatif de la résistance à la compression ainsi que les teneurs en eau (argile)

Stabilisant	Type de séchage	Teneur en argile (%)	Temps de cure (jours)	Teneur en eau (%)	Résistance à la compression (MPa)
Argile de Boughrara	Séchage à l' air	0	14	2,09	1,36
			21	1,72	1,59
			28	1,15	1,78
		10	14	2,46	2,93
			21	1,92	3,02
			28	1,23	3,25
		20	14	2,98	3,12
			21	2,13	3,23
			28	1,62	3,65
		30	14	3,46	3,69
			21	2,75	3,95
			28	1,85	4,2
	Séchage humide	0	14	4,03	1,22
			21	3,31	1,45
			28	2,23	1,61
		10	14	4,59	2,33
			21	3,95	2,62
			28	3,04	2,98
		20	14	5,36	2,82
			21	4,69	3
			28	3,72	3,32
		30	14	6,38	3,1
			21	5,72	3,42
			28	4,02	3,85

II.4 Récapitulatif des résultats de la résistance à la compression

La figure III.12 illustre l'ensemble des résultats de résistance à la compression en fonction du temps de cure. On peut énumérer les remarques suivantes :

- La terre crue non stabilisée offre des résistances inférieures à celle exigée par la norme qui est de 2MPa.
- Pour l'ensemble des formulations, la résistance augmente avec le temps de cure.
- L'ajout des stabilisants avec les différentes teneurs a conduit à une augmentation de la résistance à la compression.
- Concernant la fumée de silice et la pouzzolane on remarque une augmentation minimale mais on a pu atteindre 2MPa exigé par la norme avec 8% d'ajout.
- On enregistre une augmentation importante pour le sol stabilisé avec l'argile soumis aux deux modes de séchages.

La figure III.13 représente la résistance à la compression après 28 jours de séchage pour l'ensemble des stabilisants. Elle montre clairement que l'ajout de l'argile offre une meilleure résistance à la compression par rapport à la pouzzolane et la fumée de silice. Ce résultat indique que la présence des fines argileuse est très importante pour accroître la résistance de notre sol.

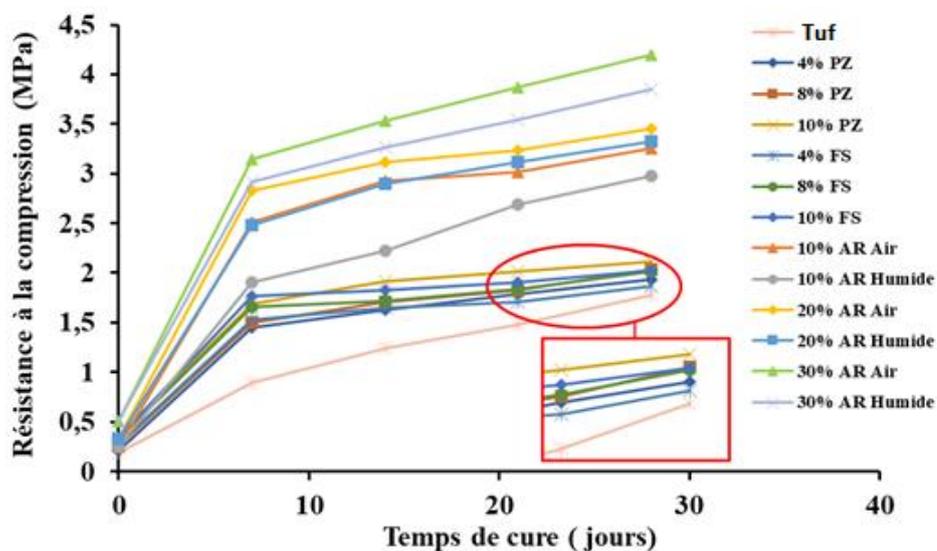


Figure III.12 : Résistance à la compression en fonction du temps de cure

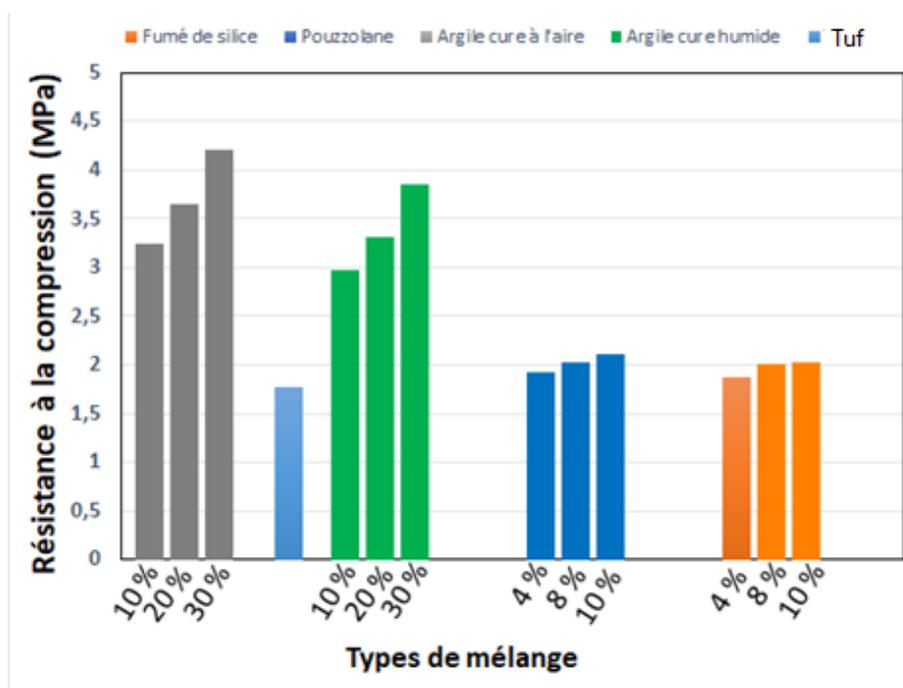


Figure III.13 : Résistance à la compression à 28 jours

III. Comportement thermique du matériau stabilisé

Pour la caractérisation thermique des échantillons, on présente ci-après les résultats des essais de la conductivité, diffusivité, et l'effusivité thermique. Aussi on étudie l'effet de la teneur en eau et de la densité sur les propriétés thermiques du matériau.

III.1 Fumée de silice

Les échantillons stabilisés avec 4%, 8%, 10% de fumée de silice seront ensuite soumis aux essais thermiques

III.1.1 Conductivité thermique

a) Influence de l'ajout de la fumée de silice sur la conductivité thermique

La figure III.14 illustre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice. Les valeurs de la conductivité thermique varient entre 0,48 et à 0,62 $W.m^{-1}.k^{-1}$. Le tuf cru non stabilisé présente la plus grande valeur de conductivité thermique. Ce qui rejoint les résultats trouvés dans la littérature (Bachar et al, 2015).

L'augmentation des pourcentages d'ajout de la fumée de silice conduit à une diminution de la conductivité thermique. Ceci s'explique par la grande surface spécifique de l'ajout qui diminue la masse volumique apparente. La diminution de la masse volumique apparente conduit à l'amélioration des propriétés thermique ce qui augmente le confort thermique (Mansour et al, 2016).

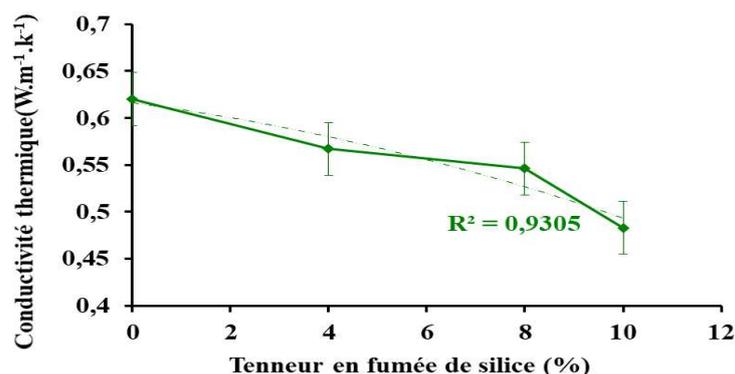


Figure III.14 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice

b) Influence de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique

L'amélioration de l'efficacité thermique des matériaux compactés destiné à la fabrication des BTC est favorisée par la diminution de la masse volumique apparente c'est-à-dire une augmentation de sa porosité (Bachar et al, 2015).

La fumée de silice est un matériau fin qui remplit les vides ce qui améliore la compacité. En parallèle elle rend la BTC plus légère d'où une diminution de sa masse volumique apparente par conséquent une amélioration des propriétés thermiques par la suite.

La figure III.15 montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente. La conductivité thermique diminue avec la diminution de la masse volumique apparente. On trouve les résultats suivants :

- Tuf avec 0% fumée de silice la conductivité thermique est de 0,62 W.m⁻¹.k⁻¹, avec une masse volumique apparente de 1902 kg/m³
- Tuf + 10% de fumée de silice : la conductivité thermique est de 0,48 W.m⁻¹.k⁻¹ avec une masse volumique apparente de 1841 kg/m³,

Ce qui est conforme avec ce qui est trouvé dans la littérature par (Huynh et al, 2017)) et (Bogas et al, 2019)).

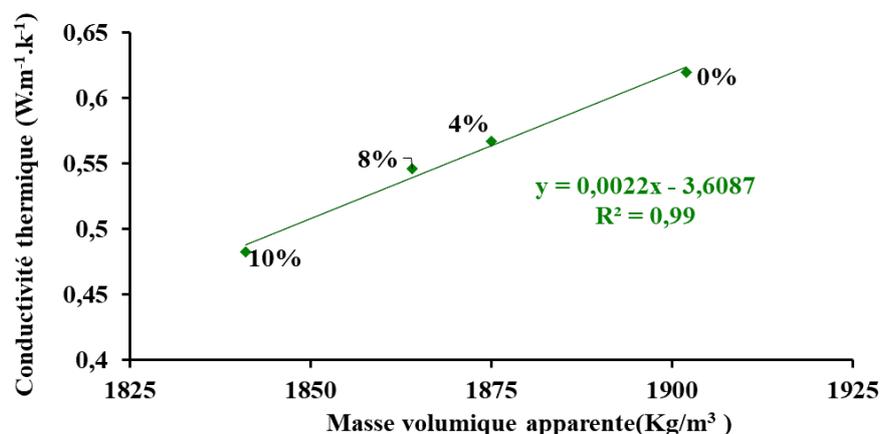


Figure III.15 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente (fumée de silice)

III.1.2 Diffusivité thermique

La variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice est illustrée dans la figure III.16. On remarque que :

- La diffusivité thermique du Tuf avec 0% fumée de silice est de $4,46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Tuf+ 10% fumée de silice la diffusivité thermique devient $3,47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Cette diminution de la diffusivité est la conséquence de la diminution de la masse volumique apparente des échantillons, qui passe de 1902 kg/m^3 (tuf non traité) à 1841 kg/m^3 (tuf+ 10% fumée de silice). Ceci est en cohérence avec les résultats de (Mansour et al, 2016) , ou il a trouvé dans son étude de BTC stabilisé avec le ciment la diffusivité thermique passe de $7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (pour $\rho=1610 \text{ kg/m}^3$) à $14 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (pour $\rho= 2200 \text{ kg/m}^3$).

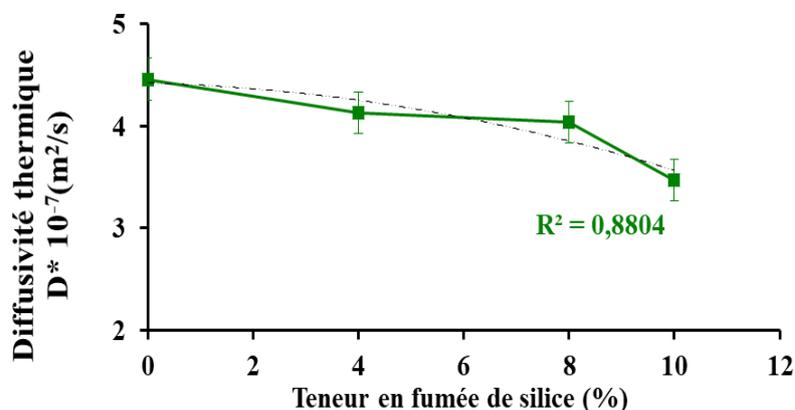


Figure III.16 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice

III.1.3 Effusivité thermique

La variation de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice est illustrée dans la figure III.17, on remarque que :

- Le tuf+ 0% fumée de silice l'effusivité thermique est de $928,33 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$
- Tuf + 10% fumée de silice l'effusivité thermique devient de $819,37 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$

Cette diminution est due à la grande finesse de la fumée de silice qui diminue la porosité de nos échantillons. Aussi la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H) à cause des propriétés pouzzolanique de notre ajout (forte teneur en SiO_2).

Les résultats obtenus sont proches de la littérature. (Aubert , 2013) à trouver des valeurs d'effusivité thermique comprises entre 850 à 1450 ($\text{J.m}^{-2}.\text{k}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$) pour des BTC stabilisées à la chaux.

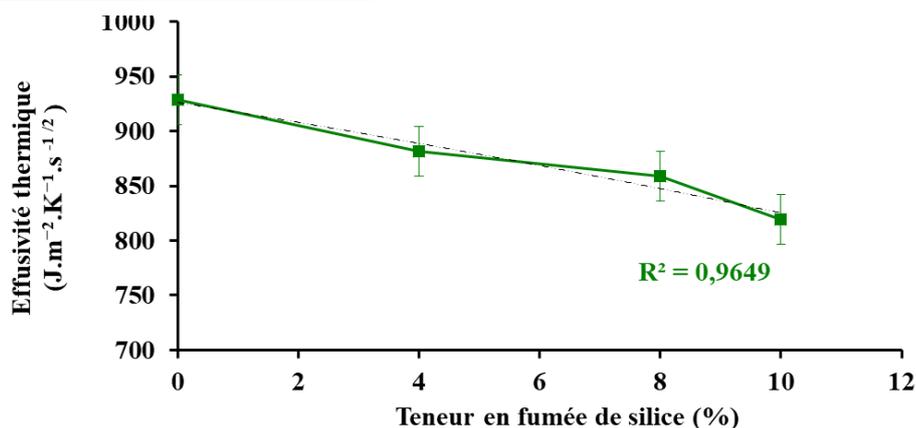


Figure III.17 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en fumée de silice

III.2 Pouzzolane naturelle

Comme pour le cas de la fumée de silice trois échantillons ont été testés pour chaque teneur en pouzzolane naturelle pour évaluer les paramètres thermiques.

II.2.1 Conductivité thermique

a) Influence de l'ajout de la pouzzolane sur la conductivité thermique

La figure III.18 illustre l'influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle avec différents teneurs sur l'évolution de la conductivité thermique des échantillons, les valeurs enregistrées sont :

- Tuf+0% pouzzolane la conductivité thermique est de 0,62 W.m⁻¹.k⁻¹
- Tuf+10% pouzzolane la conductivité thermique est de 0,54 W.m⁻¹.k⁻¹.

Cette diminution de la conductivité thermique après l'ajout de la pouzzolane peut être justifiée par le fait que la conductivité thermique du sol est le résultat des différents constituants du sol, et l'ajout de la pouzzolane favorise la formation des hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et les silicates d'aluminates de calcium hydratés (C-A-S-H) qui ont une conductivité thermique d'environ 0,1012 W.m⁻¹.k⁻¹ d'après (Norouzian et al, 2018).

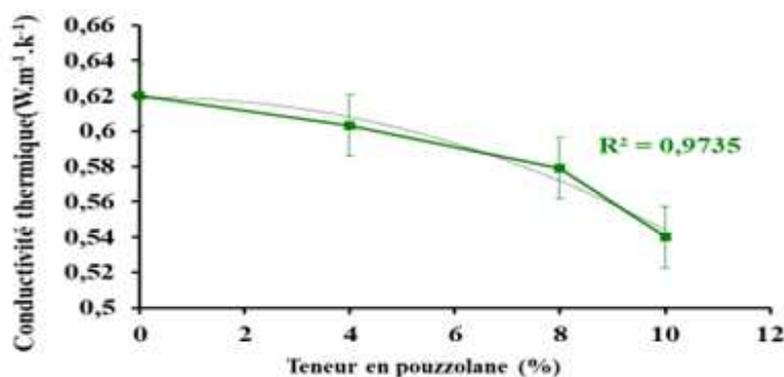


Figure III.18 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane

b) Influence de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique

L'influence de la masse volumique apparente sur l'évolution de la conductivité thermique pour les échantillons stabilisés avec la pouzzolane naturelle est illustrée dans la figure III.19, on remarque que :

- L'ajout de la pouzzolane naturelle conduit à une diminution de la masse volumique apparente des échantillons ce qui va améliorer le confort thermique par la diminution de la conductivité thermique.
- La plus grande valeur de conductivité thermique est de $0,62 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ avec une masse volumique apparente de 1902 kg/m^3
- La formulation tuf+10% pouzzolane nous a donné une conductivité thermique de $0,54 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ avec une masse volumique apparente de 1841 kg/m^3 .

Ces résultats sont similaires à ceux de la littérature (Ajouguim et al (2020)), et (Laborel-Préneron et al (2018)).

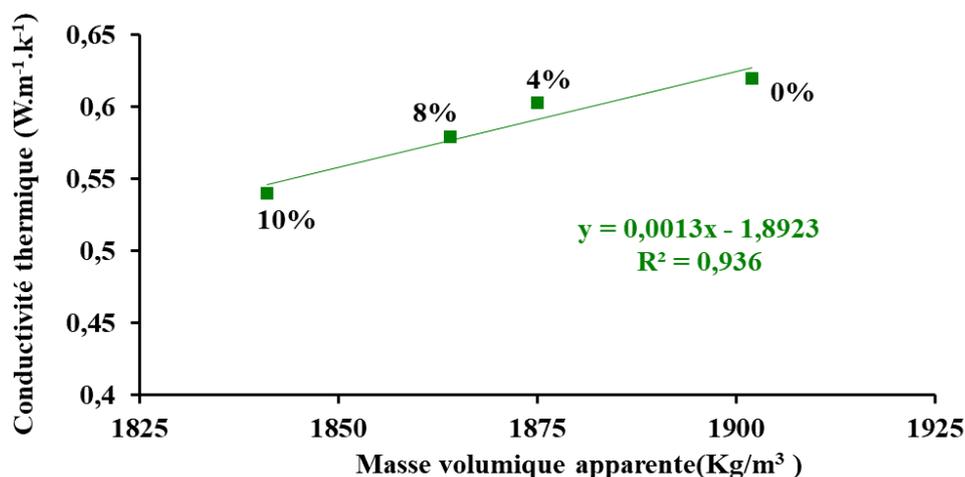


Figure III.19 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente (pouzzolane)

III.2.2 Diffusivité thermique

L'influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la diffusivité thermique est illustrée dans la figure III.20, où on peut tirer les conclusions suivantes :

- La plus grande valeur de diffusivité thermique est pour l'échantillon Tuf+0% pouzzolane $4,46 \text{ m}^2/\text{s}$.
- L'ajout de 10% de pouzzolane a fait diminuer la diffusivité thermique jusqu'à $3,9 \text{ m}^2/\text{s}$.

Cette diminution est due à la formation du gel (C-S-H) résultant d'une réaction pouzzolanique provoquée par l'ajout de la pouzzolane naturelle qui va lui-même recouvrir les grains du sol et modifier le contact thermique.

Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par (Meukem et al, 2004) après un ajout de 7% de pouzzolane la diffusivité thermique diminue pour atteindre $4.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

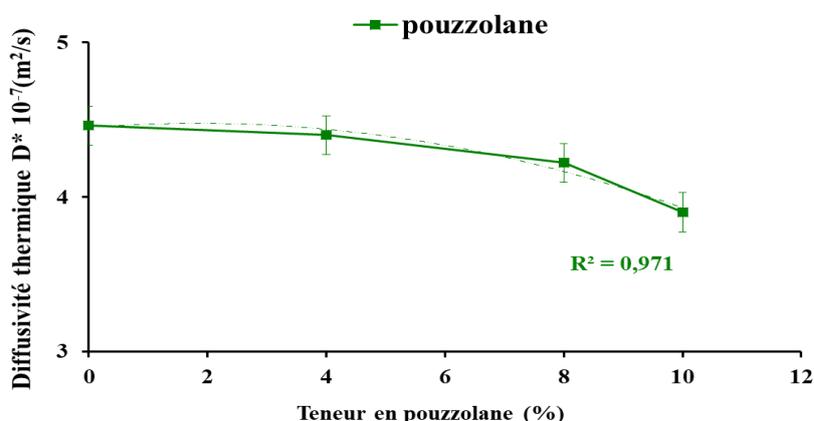


Figure III.20 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane

III.2.3 Effusivité thermique

La figure III.21 illustre la variation de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane, on remarque :

- Une diminution de l'effusivité thermique après l'ajout de la pouzzolane qui est de $928,33 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$ pour l'échantillon tuf+0% pouzzolane et elle diminue jusqu'à $863,24 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$ pour l'échantillon tuf+10% pouzzolane
- Les valeurs obtenues sont proches de celles trouvées par d'autres chercheurs tels que Nshimiyimana et al, (2020) qui ont mesuré l'effusivité thermique des briques stabilisées avec des sous-produits liant comme les résidus de carbure de calcium (CCR) et cendres de balle de riz (RHA) et ils ont trouvé des valeurs d'effusivité thermique comprises entre $974 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$ et $1108 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$.

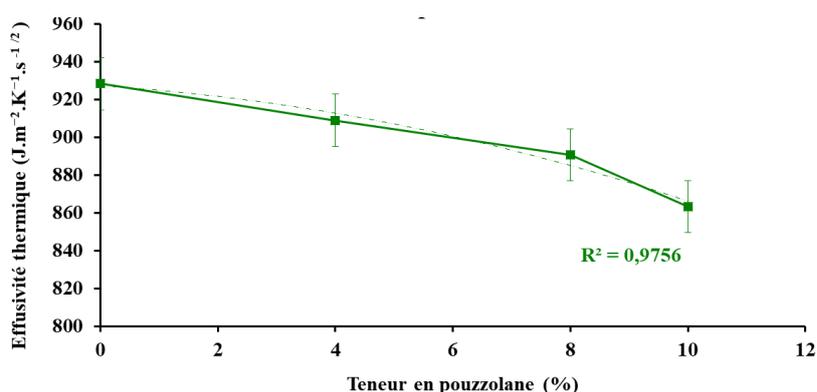


Figure III.21 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en pouzzolane

II.3 Fines argileuse

Dans le cas des échantillons stabilisés avec l'argile nous allons rajouter par rapport aux échantillons stabilisés avec la pouzzolane et la fumée de silice, l'effet de la teneur en eau sur la conductivité thermique, vu qu'on a utilisé deux types de cure.

II.3.1 Conductivité thermique

a) Influence de l'ajout de l'argile sur la conductivité thermique

La variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les deux types de séchages est illustrée dans la figure III.22. Cette figure montre que :

- L'ajout de l'argile conduit à une augmentation de la conductivité thermique ce qui induit une perte d'isolation thermique,
- D'autre part la valeur maximal enregistré de la conductivité thermique pour les différents formulation est de $0,946 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ pour la formulation sol+ 30% argile avec un séchage humide

Cette augmentation remarquable de la conductivité thermique reste toujours sous le seuil donné par la réglementation thermique algérienne (DTRC3-2) qui est de $1,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ pour des briques de masse volumique sèche entre 1700 kg/m^3 et 2000 kg/m^3 qui est conforme avec ce qu'on a trouvé.

Cette augmentation est due en premier à l'augmentation de la densité apparente des échantillons qui est un paramètre très important dans la conductivité thermique, comme montre la figure III.23 et en deuxième à la diminution de la porosité des échantillons suite au comblement des pores avec les fines argileuses ajoutée.

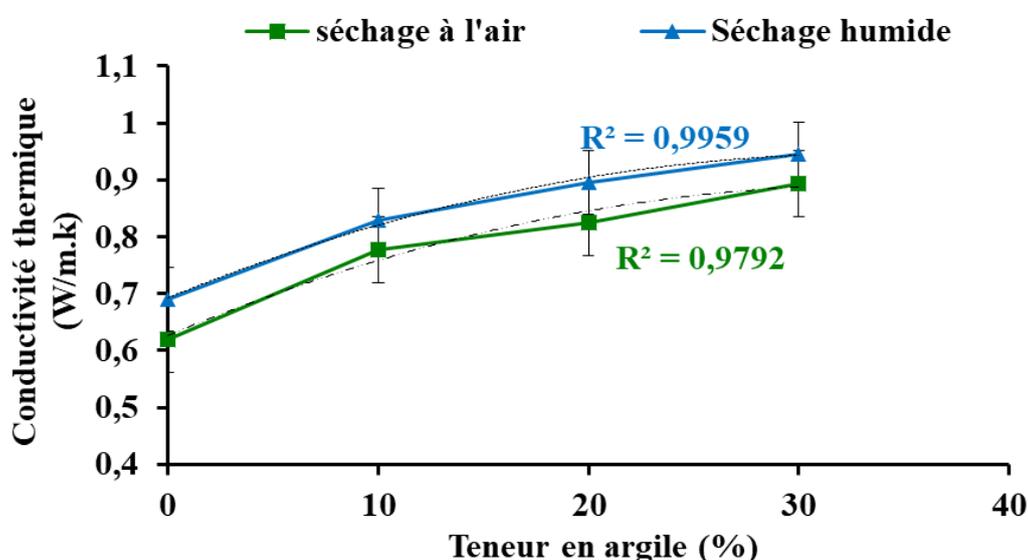


Figure III.22 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en argile

b) Influence de La densité sur la conductivité thermique (argile)

La figure III.23 nous montre la relation entre la masse volumique apparente et la conductivité thermique, les résultats ont montré que :

- Une relation quasi linéaire entre la masse volumique apparente des échantillons et la conductivité thermique pour les deux modes de séchages, l'augmentation de la densité conduit à une augmentation de la conductivité thermique

- La plus grande valeur de conductivité thermique été de $0,946 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ avec une masse volumique apparente de 1935 kg/m^3 , la plus petite valeur été de $0,62 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ avec une masse volumique apparente de 1802 kg/m^3 .

Ces résultats trouvés sont conformes aux résultats trouvés dans la littérature (Ben Mansour, et al (2016) qui ont utilisé des briques avec des masses volumiques apparentes qui varient de 1610 kg/m^3 à 2194 kg/m^3 , ils ont trouvé des conductivités thermiques qui varient entre $0.618 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ et $1,483 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$. (Laborel-Préneron et al (2018)) qui ont utilisé des briques de masse volumique sèche qui varie $1100 \pm 49 \text{ kg/m}^3$ et $1891 \pm 54 \text{ kg/m}^3$ et ils ont trouvés des valeurs de conductivité thermique qui varient de $0.14 \pm 0.01 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ et $0.57 \pm 0.03 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$.

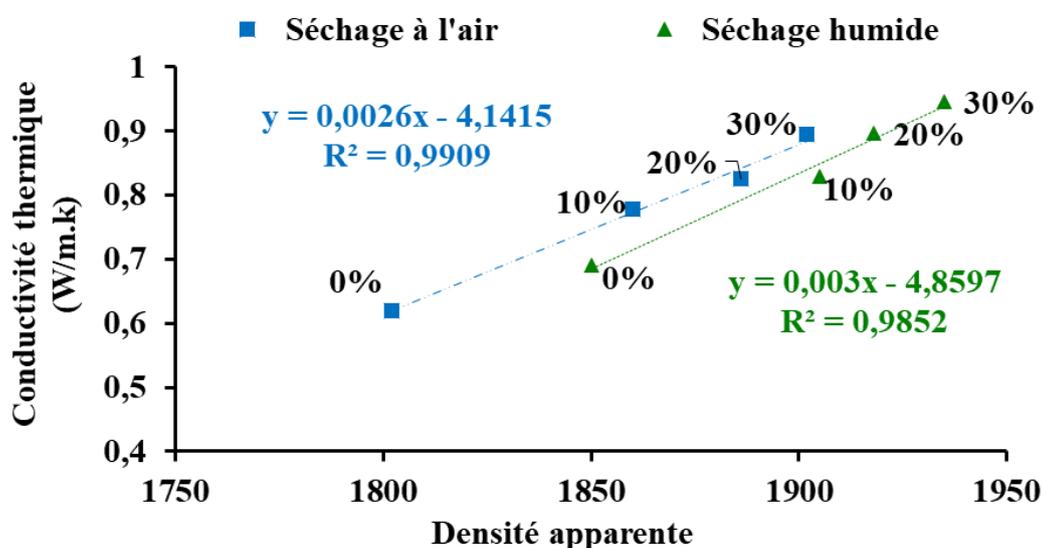


Figure III.23 : Conductivité thermique en fonction de la densité apparente

c) Influence de La teneur en eau sur la conductivité thermique (argile)

On remarque dans la figure III.24 qui illustre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau des échantillons que

- Lorsque la teneur en eau augmente la conductivité thermique augmente aussi
- Les échantillons soumis à un séchage humide ont une conductivité thermique supérieure à ceux séchés à l'air libre. Ce phénomène peut s'expliquer d'après (Alrtimi et al, (2016)) par le fait que la conductivité thermique d'un matériau est le résultat de la conductivité thermique de toutes ces constituants dans les trois phases (solide, liquide, gazeuse) surtout l'eau qui est un très bon conducteur de chaleur.

Ces résultats sont conformes avec l'étude de (Mekaidèche et al, 2021) qui a trouvé une relation linéaire entre la conductivité thermique et la teneur en eau, l'augmentation de la teneur en eau conduit à l'augmentation de la conductivité thermique,

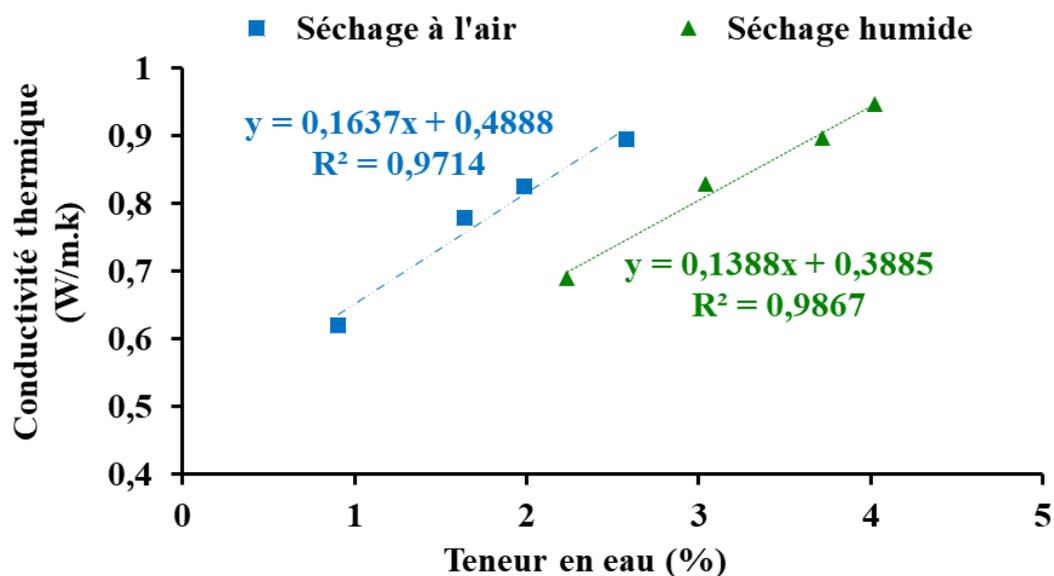


Figure III.24 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau

II.3.2 Diffusivité thermique

L'évolution de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les deux modes de séchage est présentée dans la figure III.25. Le calcul de la diffusivité thermique montre que :

- L'ajout des fines argileuses conduit à une augmentation de la diffusivité thermique
- La valeur la plus faible est enregistré pour l'échantillon tuf+0% argile avec les deux modes de séchage, $4,76 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'échantillon séché à l'air et $4,95 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'échantillon avec un séchage humide,
- Après l'ajout de 30% d'argile elle passe à $5,91 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'échantillon sécher à l'air et à $6,02 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'échantillons avec un séchage humide

Ces résultats sont similaires avec ceux trouvé par (Soudani et al, 2017). Il ont obtenu une diffusivité thermique d'une terre compactée à 10% d'eau de l'ordre de $6,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

De plus cette différence de diffusivité entre les échantillons a cure humide et cure à l'air est due à la présence d'eau dans les échantillons à cure humide ce qui va créer des ponts qui vont accélérer la transmission de la chaleur et augmenter la diffusivité thermique par la suite.

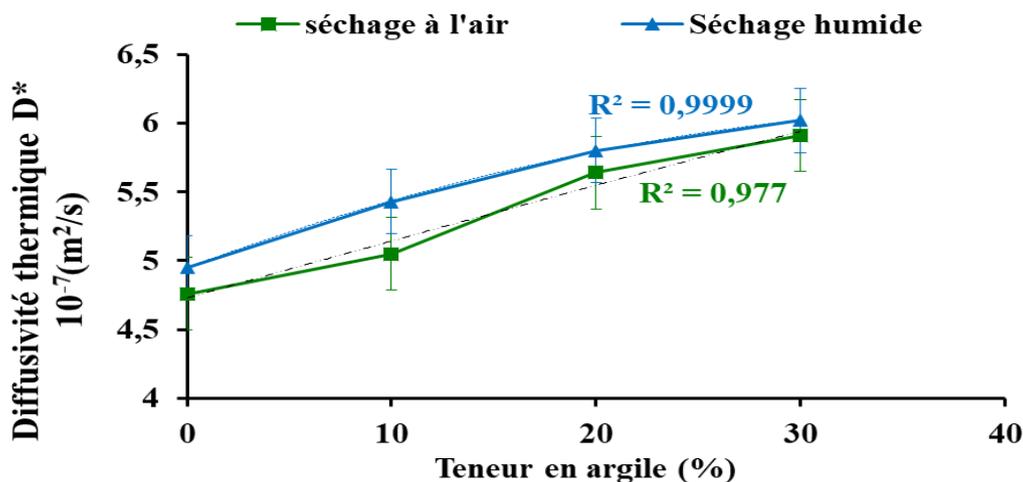


Figure III.25 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en argile

II.3.3 Effusivité thermique

La figure III.26 illustre la variation de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les deux modes de séchage, on peut remarquer que :

- L'ajout de l'argile a conduit à une augmentation de l'effusivité,
- La valeur la plus faible a été pour l'échantillon tuf+0%argile $897 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$, avec une masse volumique apparente de 1802 Kg/m^3
- Après l'ajout de 30% d'argile on passe à une effusivité thermique de $1161 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$ avec une masse volumique de 1902 Kg/m^3 ,
- Les échantillons soumis à un séchage humide ont montré une valeur d'effusivité thermique plus importante que celle des échantillons à cure à l'air.

Cette différence est toujours due à la présence d'eau dans les échantillons à cure humide, ce qui est confirmé par (Soudani et al, 2017) qui a mesuré l'effusivité thermique de la terre humide $1158 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$ et la terre sèche $820 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$.

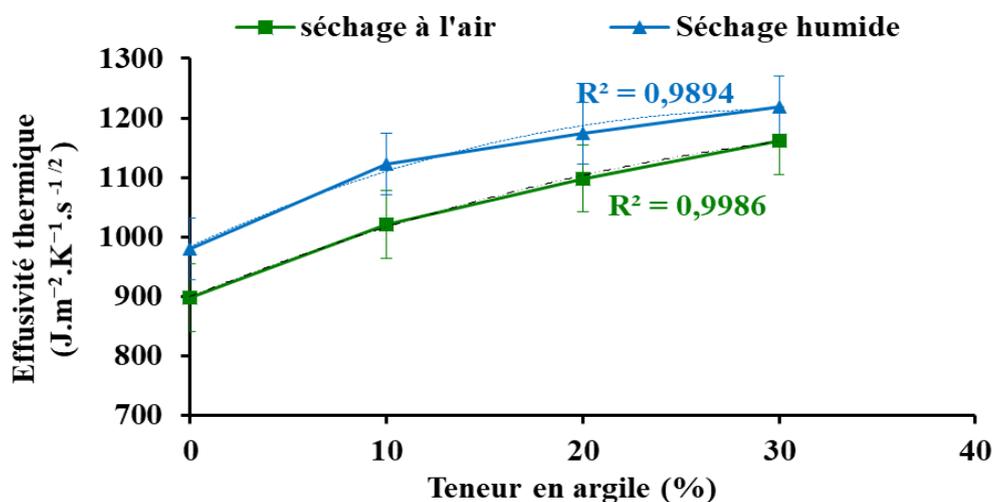


Figure III.26 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en argile

III. 4 Récapitulatif des résultats et comparaison avec la littérature

Le tableau ci-dessous donne un récapitulatif des différents résultats de conductivité thermique obtenu comparé avec celle de la littérature

Tableau III.4 Récapitulatif des résultats de la conductivité thermique et comparaison avec la littérature

Auteur	Type de stabilisant	ρ (Kg/m ³)	λ (W.m ⁻¹ .k ⁻¹)
Mansour et al, (2016)	Crue	De 313 à 2004	De 0,36 à 1,8
Sore et al, (2018)	Ciment+géopolymère	De 1740 à 1850	De 0,7 à 0,79
Ajouguim et al, (2020)	Fibres alpha traité	De 2190 à 3010	De 1,16 à 1,51
Bogas et al, (2019)	Ciment et Chaux	De 1739 à 1987	De 0,58 à 1,47
Huynh et al, (2017)	Cendres résiduelles de balle de riz activées	De 1929 à 2088	De 0,68 à 1,25
Laborel et al, (2018)	Agrégats végétaux	De 1100 à 1891	De 0,14 à 0,57
Boussaa et al (2023)	Cendre de bois	De 1830 à 1959	De 0,72 à 0,91
Cette étude	Tuf	1902	0,62
	Tuf+ Pouzzolane	De 1860 à 1880	De 0,54 à 0,6
	Tuf +Fumée de silice	De 1841 à 1875	De 0,48 à 0,56
	Tuf +Argile séchage à l'air	De 1860 à 1902	De 0,77 à 0,89
	Tuf+ Argile séchage humide	De 1850 à 1935	De 0,82 à 0,94

La figure III.27 englobe l'ensemble des résultats expérimentaux avec ceux trouvés dans la littérature. Ces points expérimentaux sont aussi calés avec deux modèles théorique établis par Al Rim et al (1999), et Laurent, (1987). On dégage quelques points :

- On trouve une grande variabilité des résultats suivant les masses volumique des sols, ainsi que le type de stabilisant.
- Pour une masse volumique de 1600 kg/m³ Mansour et al, (2016)) ont obtenu une valeur de conductivité thermique de 1,35 W.m⁻¹.k⁻¹. Par contre Laborel-Préneron et al, (2018) ont obtenu une conductivité thermique de 0,35 W.m⁻¹.k⁻¹, et pour une densité entre 1800 kg/m³ et 1900 kg/m³.
- Les résultats des essais effectués sur les échantillons stabilisée avec la pouzzolane et la fumée de silice ont montré une conductivité thermique varie entre 0,48 W.m⁻¹.k⁻¹ et 0,62 W.m⁻¹.k⁻¹ par contre l'ajout de l'argile a fait augmenter la conductivité thermique jusqu'à 0,894 W.m⁻¹.k⁻¹ pour les échantillons soumise à une cure à l'air libre et à 0,946 W.m⁻¹.k⁻¹ pour les échantillons soumis à une cure humide.

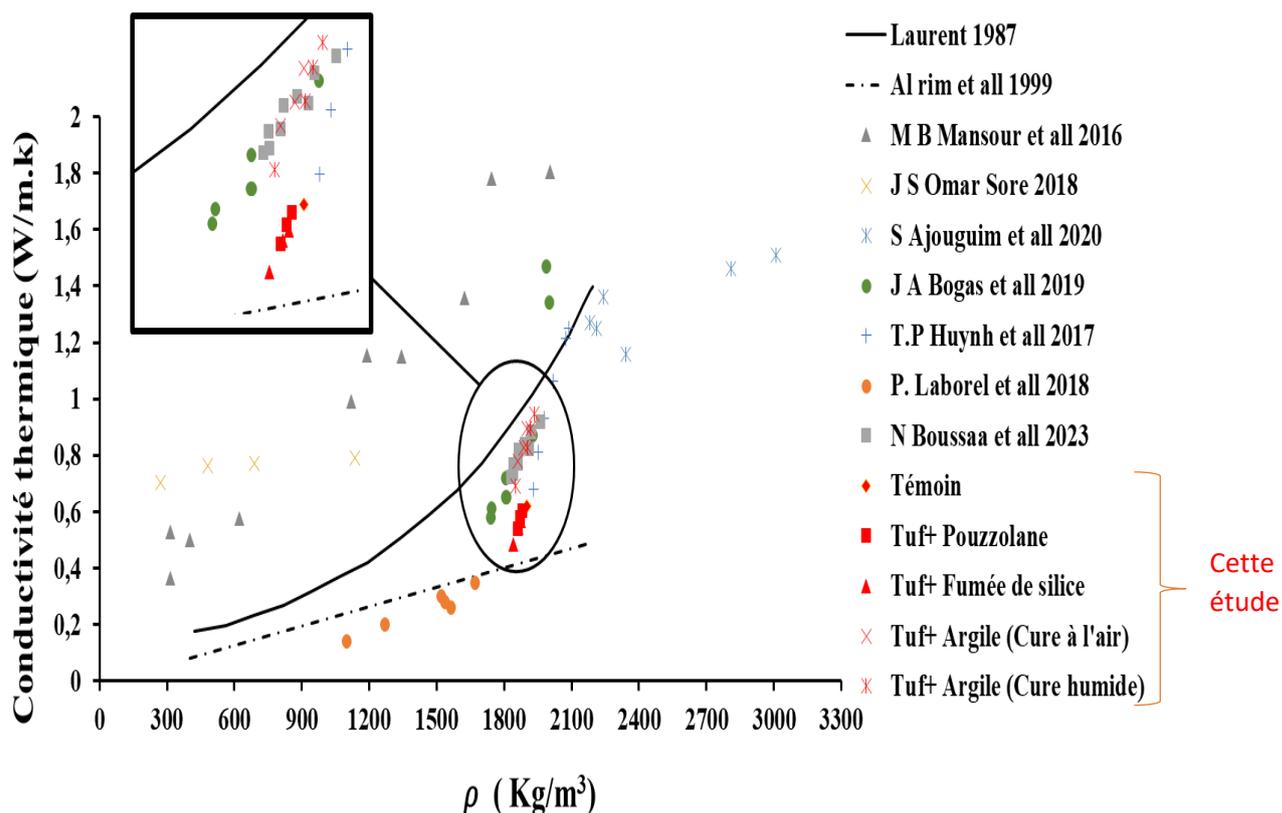


Figure III.27 : Récapitulatif des résultats de conductivité thermique et comparaison avec la littérature

IV. Comportement hydrique du matériau stabilisé

Pour la caractérisation du comportement hydrique des échantillons cru et stabilisé avec les différents ajouts, on va réaliser deux types d'essais : le premier l'absorption par capillarité, le deuxième front de remonté capillaire.

IV.1 Fumée de silice

IV.1.1 Absorption par capillarité

La variation du coefficient d'absorption par capillarité en fonction de la teneur en fumée de silice est illustrée dans la figure III.28.

On remarque que :

- Tuf+0% fumée de silice le coefficient d'absorption par capillarité est de $31 \text{ kg. m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$
- Tuf+10% fumée de silice le coefficient d'absorption par capillarité devient de $9,5 \text{ kg. m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$

Cela est due à l'amélioration de la porosité de notre échantillon par l'ajout de la fumée de silice qui devient moins poreux chose qui est confirmé par la suite par la microscopie électronique à balayage (figure III. 38),

Ces résultats sont conformes aux résultats trouvés par d'autres chercheurs, tel que l'étude de Shon et al, (2009).

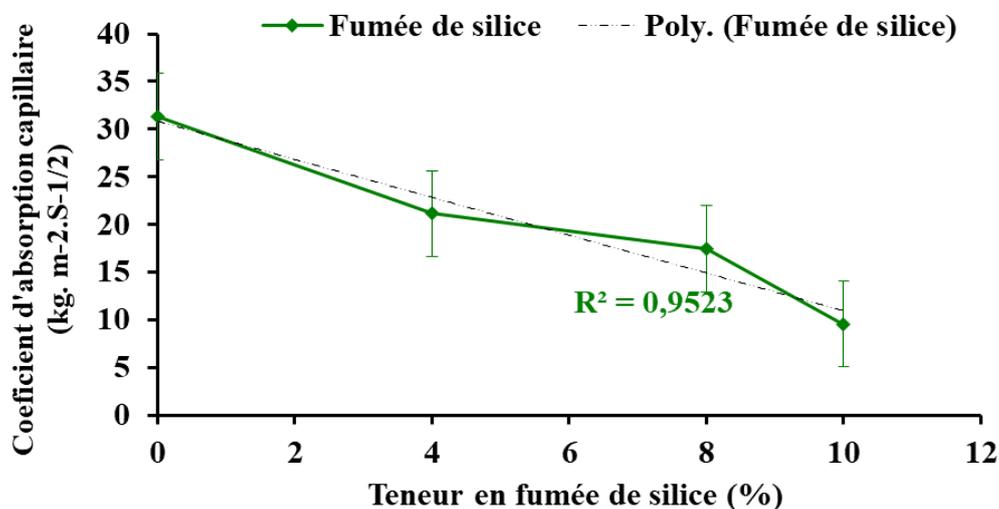


Figure III.28 : Coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en fumée de silice

III.1.2 Front de remontée capillarité

Les échantillons testés sont soumis à l'essai d'absorption capillaire pendant 2h suivant la norme EN 772-11 :2011. L'évolution de la teneur en eau en fonction de la hauteur d'échantillon est représentée dans la figure III.29.

Les constatations suivantes peuvent être émises :

- Le matériau cru absorbe l'eau qui remonte jusqu'en haut de l'échantillon
- Après l'ajout de la fumée de silice la quantité d'eau absorbé pendant l'essai diminue.
- Tuf+ 0% et tuf+4% de fumée de silice enregistrent pratiquement les mêmes teneur en eau sur toute la hauteur de l'échantillon après l'essai. Ceci est due à la forte porosité de ces deux échantillons.
- Tuf+ 8% et tuf+10% de fumée de silice sont moins affecté par la remonté capillaire donc leurs teneurs en eau est moins importante que les échantillons précédents.
- Plus on s'éloigne de la base plus la teneur en eau diminue pour les échantillons stabilisés à 8% et 10% fumée de silice (voir figure III.30).

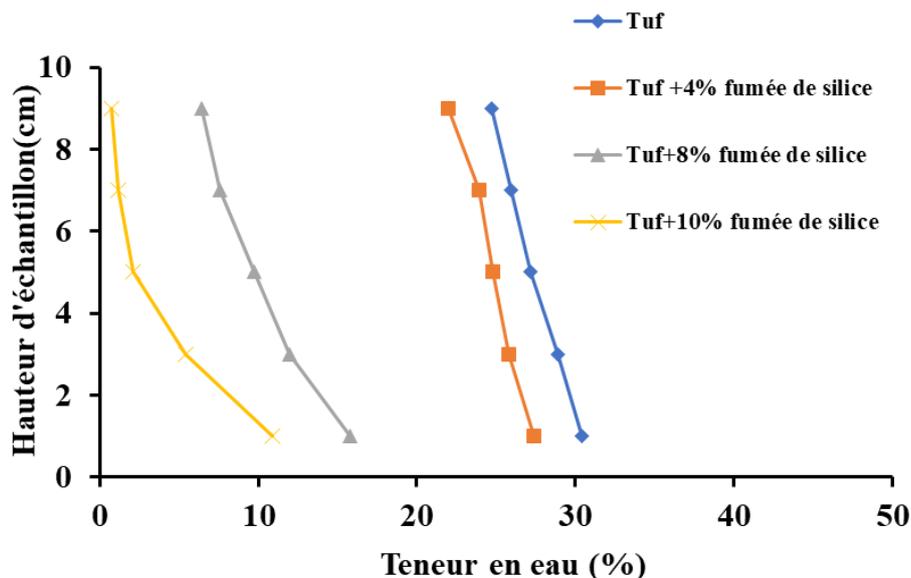


Figure III. 29 : Courbes de front capillaire (fumée de silice)

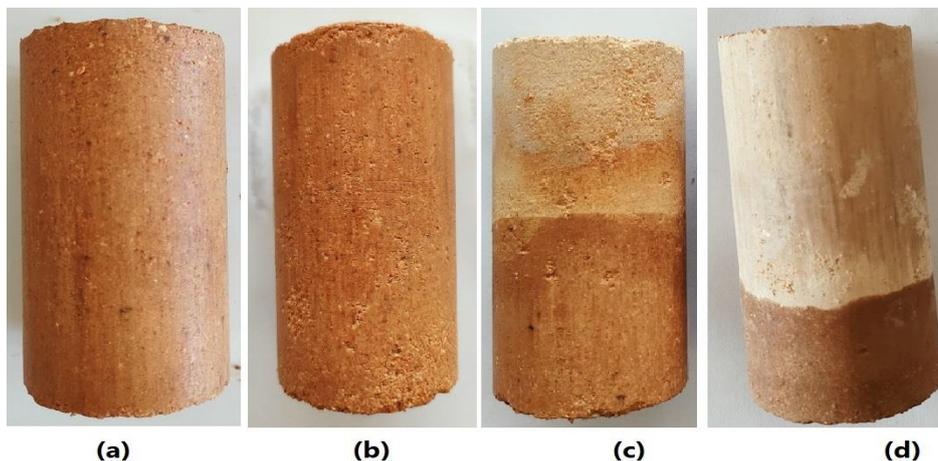


Figure III.30 : Hauteur capillaire, (a) Tuf+0%FS, (b) Tuf+4% FS, (c) Tuf+ 8% FS, (d) Tuf+10% FS

III.2 Pouzzolane

III.2.1 Absorption par capillarité

La figure III.31 nous montre l'influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire, on peut distinguer que :

- L'ajout de la pouzzolane naturel conduit à une légère diminution du coefficient d'absorption par capillarité, elle passe de $31 \text{ kg.m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$ pour le tuf +0% Pouzzolane à $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$ après l'ajout de 10% de pouzzolane,
- Les échantillons stabilisés avec la pouzzolane sont classés dans la case des briques peu capillaire selon la norme des briques de terre comprimée (AFNOR XP P13-901),

Cette diminution est due à la diminution de la taille des pores visualisé dans la figure III.39 de la microscopie électronique à balayage.

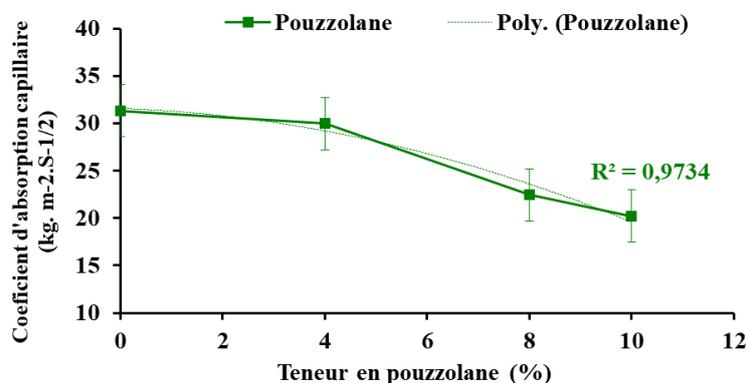


Figure III.31 : Coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en pouzzolane

V.2.2 Front de remontée capillarité

La figure III.32 illustre l'évolution de la teneur en eau sur la hauteur d'échantillon soumis à l'absorption capillaire pendant 2h. On remarque que :

- L'ajout de 4% de pouzzolane nous donne presque la même chose que l'échantillon avec 0% pouzzolane et la teneur en eau est presque la même sur toute la hauteur de l'échantillon.
- Pour les échantillons stabilisés avec 8% de pouzzolane et 10% de pouzzolane la teneur en eau à la base de l'échantillon qui est en contact direct avec l'eau est différente de celle au sommet de l'échantillon. Ceci qui implique que les échantillons sont devenus moins poreux.

L'état des échantillons après 2heures d'absorption par capillarité est illustré dans la figure III.33 ou on remarque bien les différences dans la hauteur de l'eau absorbée pour les différents mélanges.

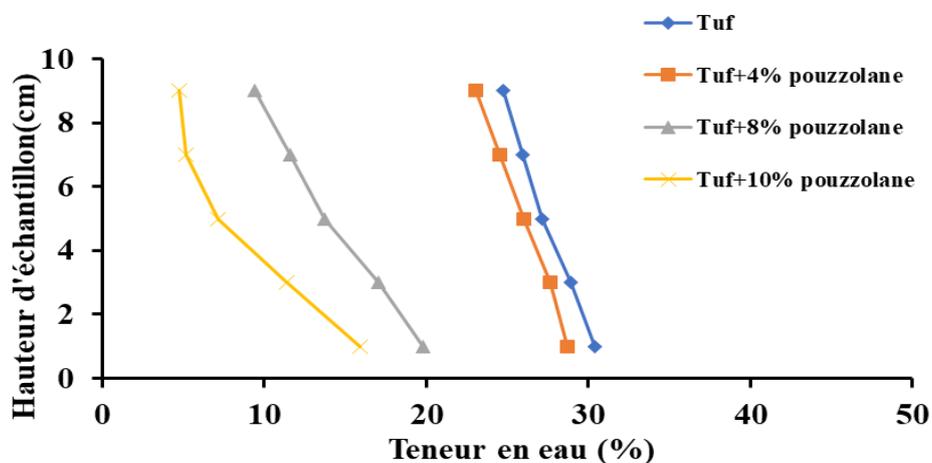


Figure III.32 : Courbes de front capillaire (pouzzolane)

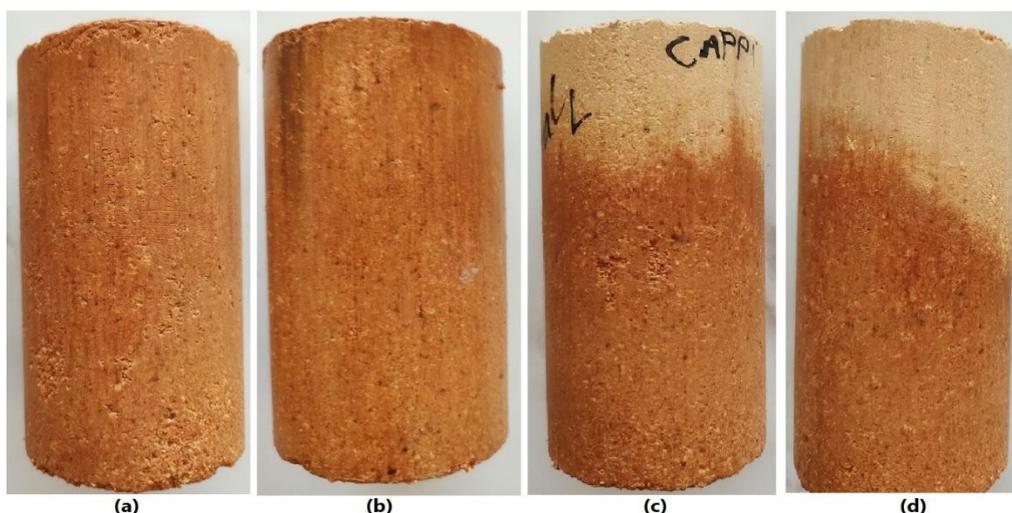


Figure III.33 : Hauteur de capillarité, (a) Tuf, (b) Tuf+4% PZ, (c) Tuf+ 8% PZ, (d) Tuf+10% PZ

IV.3 Fines argileuses

IV.3.1 Absorption par capillarité

L'analyse de l'absorption d'eau par capillarité des échantillons stabilisés avec l'argile pour deux types de séchages est illustrée dans la figure III.34, on remarque que :

- L'ajout de l'argile conduit à la diminution du coefficient d'absorption d'eau pour les deux types de séchage,
- Pour le cas d'un séchage à l'aire le coefficient d'absorption passe de $28 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$ pour l'échantillon à base de Tuf seul à $11 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$ après l'ajout de 30% d'argile.
- Pour le cas d'un séchage humide le coefficient d'absorption capillaire été de $25 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$ pour le tuf et il devient $9 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$ après l'ajout de 30% d'argile.
- D'après la norme NF XP 13-901 l'ensemble des échantillons stabilisés avec l'argile pour les deux modes de séchages sont classés comme block faiblement capillaire.

Ces résultats sont conformes aux résultats trouvés par Taallah. et al (2016). Cette diminution du coefficient d'absorption est due au volume des pores qui a été réduit par l'ajout des fines argileuse et à la formation du gel C-S-H suite à la réaction entre le sol et l'argile. Le séchage à l'air libre sous une humidité relative supérieur à 50% conduit à la formation C S-H, qui va entrainer une diminution du coefficient d'absorption d'eau (Barbero-Barrera et al, 2020), ce qui justifie dans notre étude que les échantillons séchés à l'air libre ont un coefficient d'absorption supérieur à ceux du séchage humide.

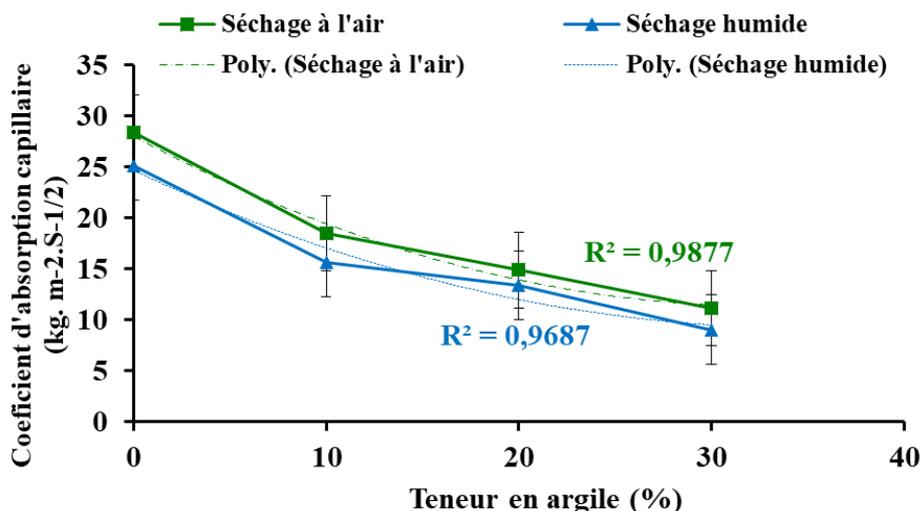


Figure III.34 : Coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en fines argileuses.

III. 3.2 Front de remontée capillarité

La figure III.35 montre la distribution de la teneur en eau sur toute la hauteur des échantillons soumis déjà à une absorption capillaire pendant 2h, on peut conclure que :

- L'ajout de seulement 10% d'argile conduit à une diminution remarquable de l'eau absorbé par l'échantillon,
- L'échantillon stabilisée avec 30% d'argile a montré un bon comportement vis-à-vis de l'absorption par capillarité il ne dépasse pas 10% de teneur en eau même dans la partie basse qui est en contact direct avec l'eau.

Cette amélioration peut être remarquable dans la figure III.36 qui montre l'état de tous les échantillons après l'essai d'absorption capillaire.

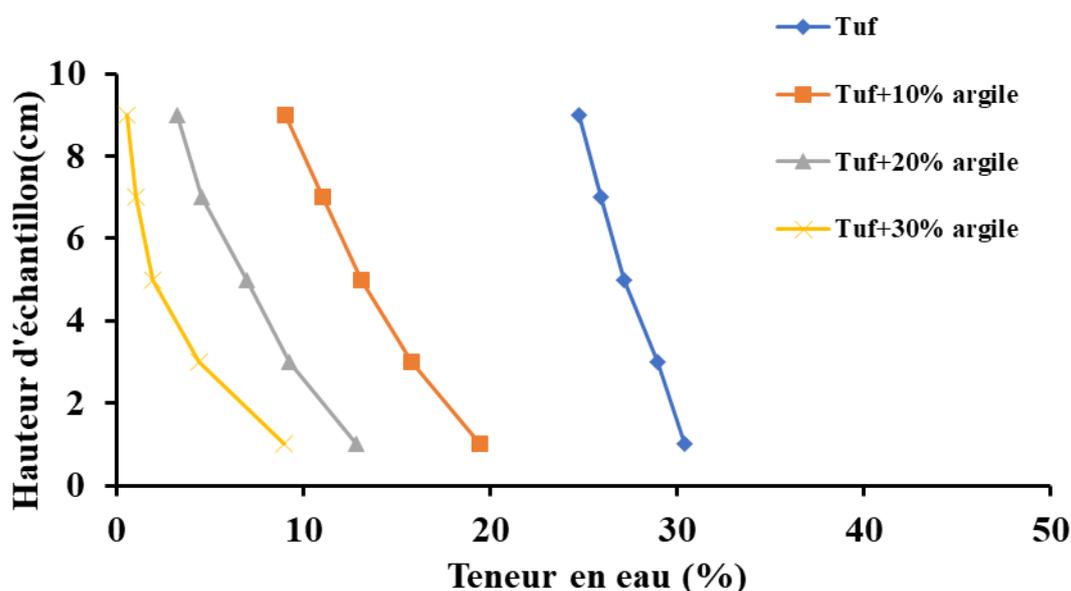


Figure III.35 : Courbes de front capillaire (argile)

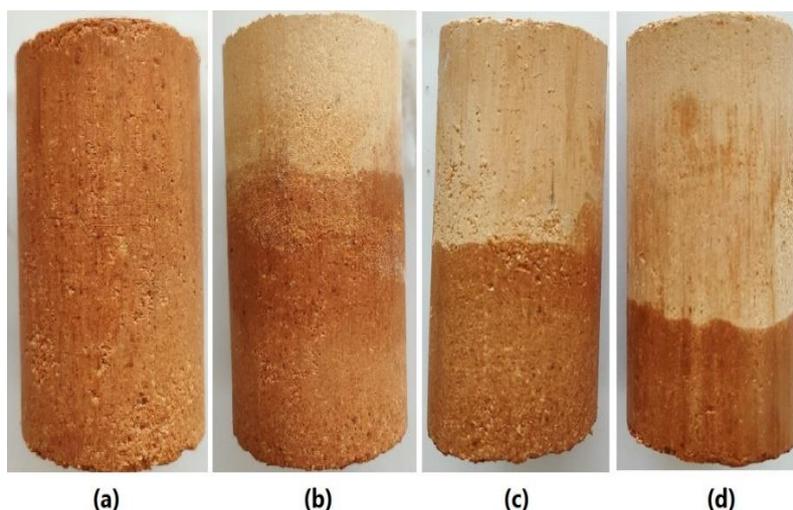


Figure III.36 : Hauteur de capillarité, (a) Tuf, (b) Tuf+10% AR, (c) Tuf+ 20% AR, (d) Tuf+ 30% AR

III.4 Récapitulatif des résultats d'absorption capillaire

La figure III.37 illustre le coefficient d'absorption par capillarité pour l'ensemble des mélanges. En comparant les différents graphiques en batônnet on constate que :

- Le tuf cru (l'échantillon témoin) a un grand pouvoir d'absorption de l'ordre de $31,33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$.
- Tuf +30% d'argile avec un séchage humide donne le coefficient d'absorption le plus petit $9,03 \text{ kg. m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$.
- Par contre la pouzzolane donne des valeurs supérieures à $20 \text{ kg. m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$ ce qui lui fait un matériau qui a un potentiel d'absorption important.
- D'autre part l'ajout de la fumée de silice et de l'argile jouent un rôle très important dans la diminution de la structure poreuse et l'amélioration de sa tenue à l'eau.
- Les échantillons stabilisés avec l'argile soumises à séchage humide présentent un coefficient d'absorption capillaire légèrement plus petit que l'argile séchée à l'air. Cette légère différence est peut-être due à la teneur en eau initiale des échantillons.

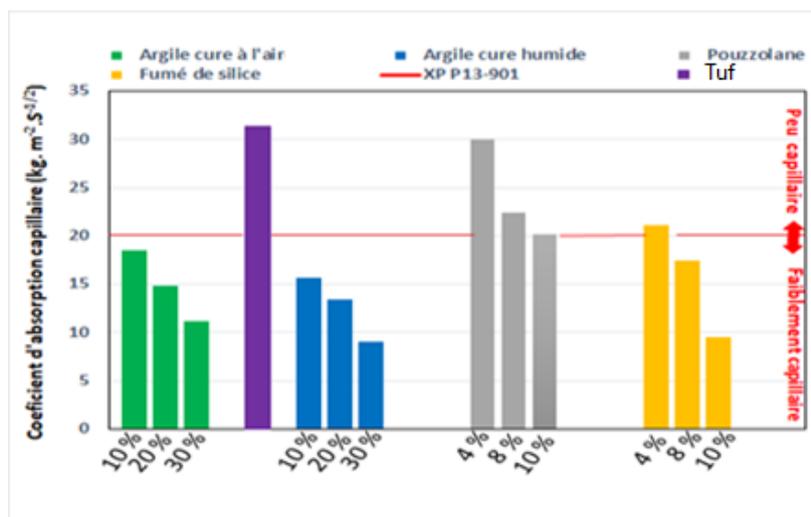


Figure III.37 : Récapitulatif des coefficients d'absorption capillaire.

Selon la norme des briques de terre comprimée XP P13-901 on distingue deux paliers, faiblement capillaire et peu capillaire. On peut classer l'échantillons a base de tuf seul et les échantillons stabilisée par la pouzzolane ainsi que les échantillons stabilisés par 4% de fumée de silice dans la classe des briques peu capillaire. Par contre les autres formulations sont classées dans la classe des briques faiblement capillaire avec un coefficient d'absorption inférieur à 20 kg. m⁻².S^{-1/2}.

V. Comportement physico-chimique du matériau stabilisé

Dans cette partie de thèse nous allons montrer l'effet de l'ajout des différents stabilisants sur la porosité des échantillons par la microscopie électronique à balayage.

V.1 Fumée de silice

La figure III. 38 illustre la microscopie électronique à balayage (MEB) des échantillons après un séchage de 28 jours. Quelques remarquent se dégagent :

- La taille des pores diminue de 38,3µm pour le tuf+0% fumée de silice (figure III.38 (a)) à 14,6 µm après l'ajout de 8% de fumée de silice (figure III.38 (b))
- L'ajout de 10% de fumée de silice réduit la taille des pores à 6,02µm (figure III.38 (c)).
- Ces résultats de microscopie électronique de MEB confirment l'importance de la formation du gel C-S-H donc la réduction de la taille des pores.

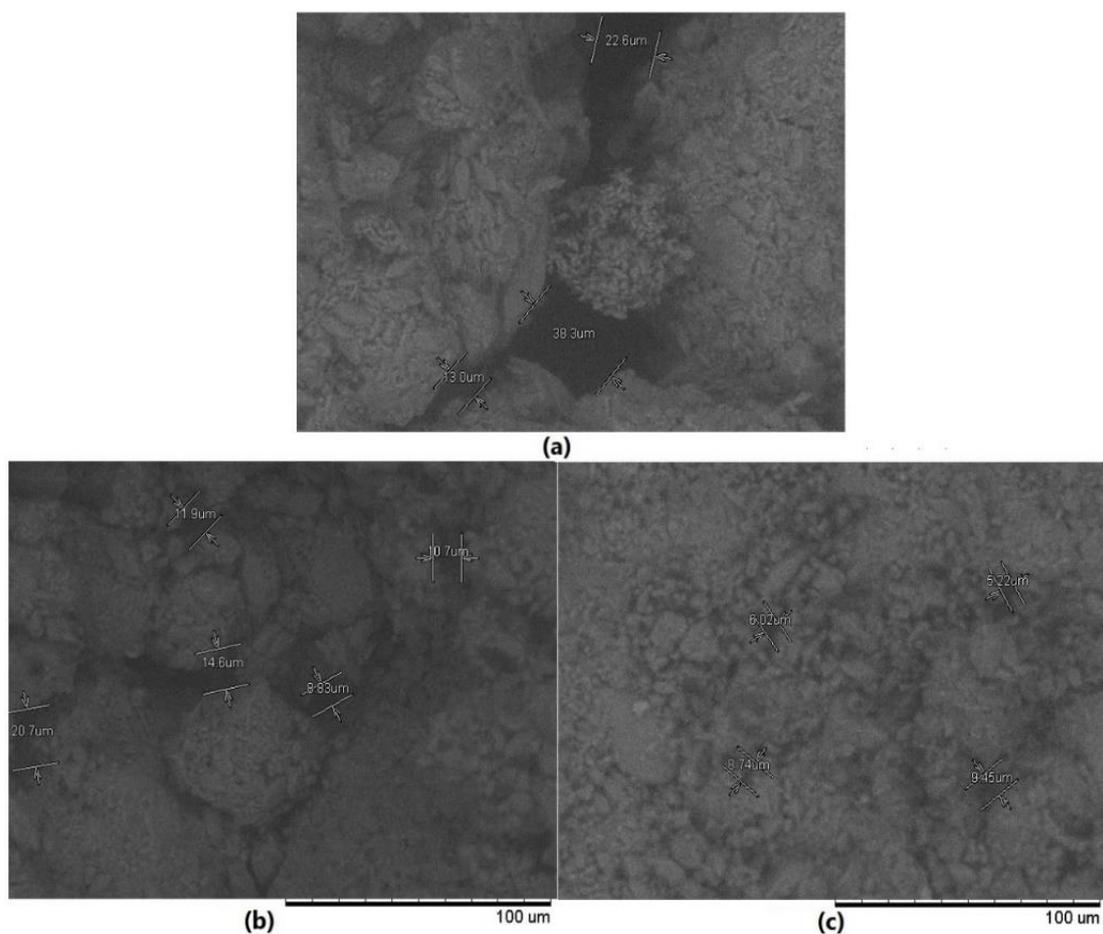


Figure III.38 : Microscopie électronique a balayage, (a)Tuf, (b) Tuf+8% FS, (c) Tuf+10% FS

IV.2 Pouzzolane

La microscopie électronique à balayage pour les échantillons stabilisés avec la pouzzolane est illustrée dans la figure III.39. On remarque que :

- La taille des pores pour l'échantillon tuf+0% pouzzolane figure III.39 (a)) été de 38,3 μm, et elle diminue jusqu'à 31,1 μm après l'ajout de 8% de pouzzolane (figure III.39 (b))
- L'ajout de 10% de pouzzolane réduit la taille des pores à 21,5 μm (figure III.39 (c)),

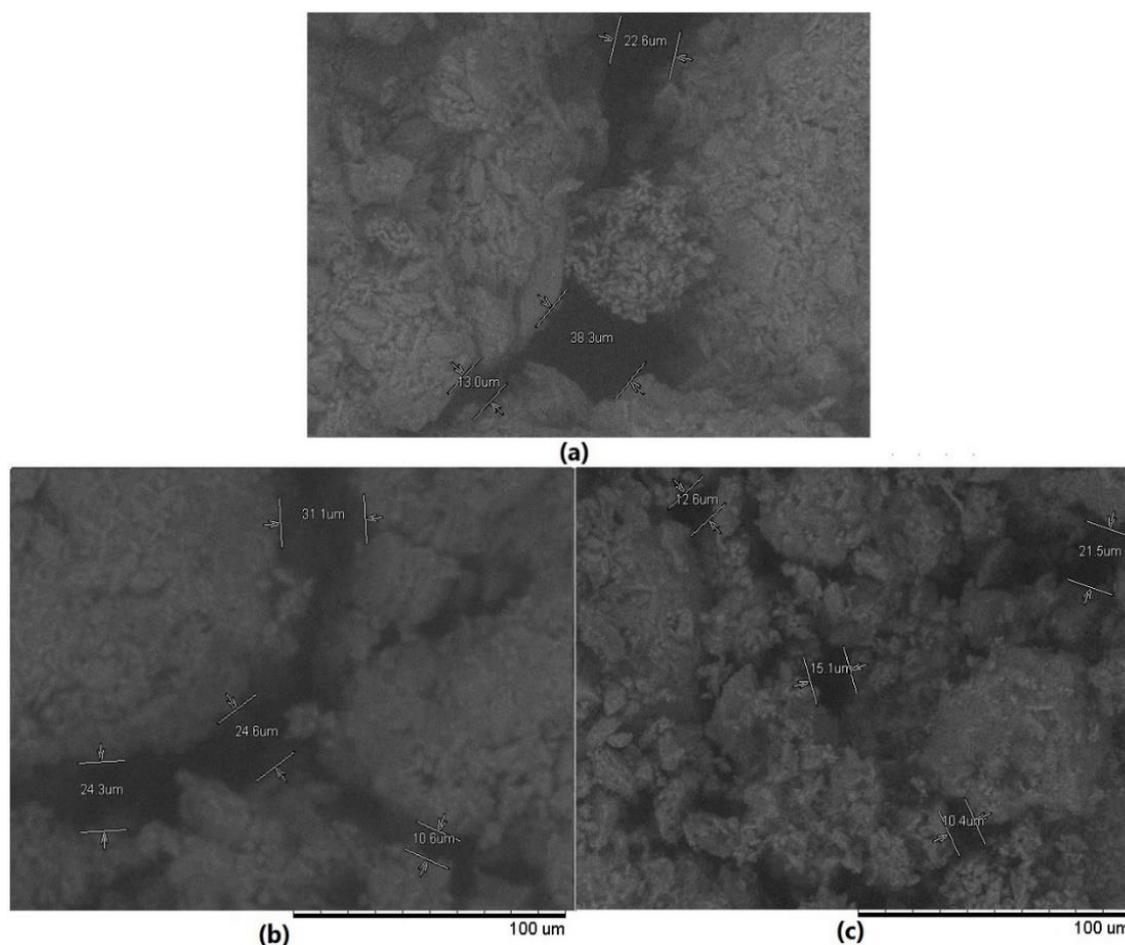


Figure III.39 : Microscopie électronique à balayage, (a)Tuf, (b) Tuf+8% PZ, (c) Tuf+10% PZ

IV. 3 Fines argileuse :

La figure III.40 illustre la taille des pores des échantillons non stabilisée et stabilisée avec l'argile visualisé par la microscopie électronique à balayage. On peut voir que :

- La taille des pores est de 38,3 μm pour (tuf+0% argile) et elle à passe à 21 μm pour le mélange (tuf+ 30% argile).
- L'ajout de 10% d'argile montre une réduction de la taille des pores qui devient égale à 14,9 μm .

Cette réduction de la taille des pores est due à la finesse de l'argile qui vient combler les vides entre les grains de sol et diminuer ainsi la porosité par la suite.

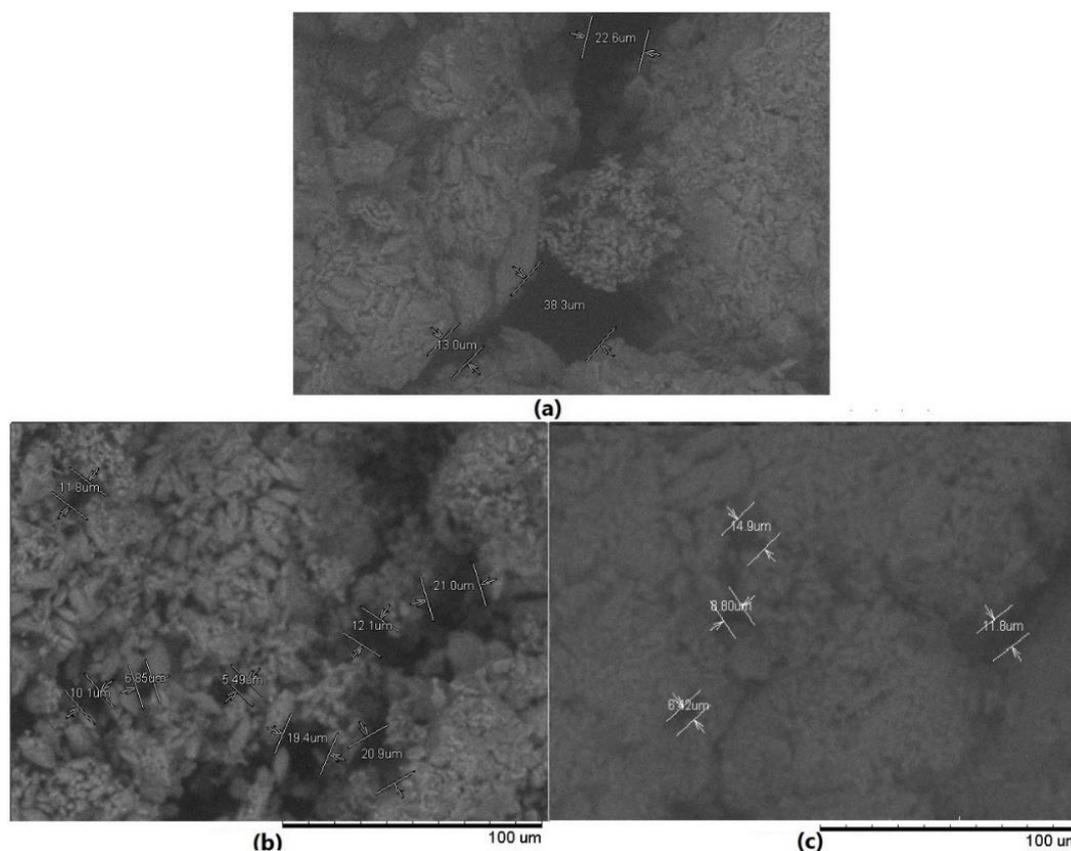


Figure III.40 : Microscopie électronique à balayage, (a)Tuf, (b) Tuf+20% AR, (c) Tuf+30% AR

V. Conclusion :

A travers l'étude du comportement mécanique, thermique, hydrique, et physico-chimique de notre matériau non stabilisé et aussi stabilisée avec les trois types de stabilisants on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le matériau brut non stabilisée ne répond pas aux exigences de la norme des briques de terre comprimée en terme de résistance mécanique.
- L'ajout de la pouzzolane naturelle et la fumée de silice conduit à une légère augmentation de la résistance à la compression qui dépasse l'exigences de la norme (2MPa) après un ajout de 10% des deux stabilisant. En parallèle l'ajout des fines argileuses offre une meilleure résistance à la compression qui dépasse le double par rapport à la terre non stabilisée.
- Le processus de séchage a une grande influence sur la teneur en eau des échantillons, par conséquent les échantillons avec une teneur en eau importante ont une faible résistance à la compression et une conductivité thermique supérieure.
- L'ajout de la pouzzolane naturelle et la fumée de silice conduit à une amélioration des paramètres thermique (diminution de la conductivité thermique), par contre l'ajout des fines argileuse augmente la conductivité thermique.

- Dans la partie hydrique les fines argileuses et la fumée de silice contribuent dans la diminution de l'absorption capillaire et le front de remonté capillaire.
- L'ajout des trois types de stabilisant conduit à une diminution de la porosité du matériau.

Chapitre 4 :

Durabilité et caractérisation des briques

I. Introduction

Dans ce chapitre les mélange tuf seul, tuf+10% fumée de silice, tuf+10% pouzzolane, et tuf+ 30% argile ont été retenus pour évaluer la durabilité des briques confectionnés avec ces formulations. Ce choix de formulation a été fait sur la base des résultats de résistance mécanique et d'absorption d'eau où ces trois formulations ont montré un bon comportement.

La partie durabilité est étudiée par le biais de l'essai de séchages mouillages dans l'eau et aussi dans deux solutions salines différentes par immersion totale et par capillarité. Ceci afin d'évaluer le comportement de notre matériau dans l'eau et aussi face à des attaques de solutions salines.

La deuxième partie est consacrée pour l'étude et la caractérisation des briques prismatiques de dimensions (20cmx10cmx5cm). Le comportement de ces briques a été analysé par différents essais : la résistance à la compression, la flexion 3 point, l'abrasion, l'absorption par capillarité et la tenue à l'eau par immersion.

II. Etude de la Durabilité

Le matériau terre est très vulnérable à l'eau. Le changement rapide de la teneur en eau ainsi que le degré de saturation du matériau engendrent des dégradations du matériau conduisant à une diminution des caractéristiques mécanique du matériau.

De nombreux chercheurs ont étudié le comportement du matériau terre vis-à-vis de l'eau pour essayer de trouver des solutions à ce problème. On peut citer (Ghomari. F et Didier 1989) qui ont simulé un essai de vieillissement rapide au laboratoire par la simulation d'une pluie à travers des gouttes d'eau battante.

Parmi les solutions salines qu'on étudie dans cette partie : on trouve les sulfates qui se trouve dans la nature sous différentes formes et dans différentes zones, on peut citer le NaCl, et le Na₂SO₄. Ce choix est dicté par le fait qu'on trouve ces deux solutions salines dans les eaux sous terrains et les eaux pluviales.

L'étude de l'influence de ces deux solutions salines sur la durabilité de notre matériau au laboratoire simule les conditions réelles de l'utilisation de la BTC.

II.1 Mécanismes d'attaques sulfatiques

Le développement important des éléments soufrés à l'intérieur d'un matériau est connu généralement par attaque sulfatique. Ces éléments peuvent réagir en présence d'eau avec d'autres minéraux tel que la portlandite ce qui va créer des phases expansives gonflante engendrant des fissures qui provoquent la ruine du matériau.

Ce phénomène d'attaque sulfatique est souvent étudié et mieux maîtrisé dans les matériaux cimentaires que dans les sols, ce qui nous a incité à explorer cet axe où on trouve peu de résultats.

II.1.1 Cas des matériaux cimentaires

Les matériaux cimentaires tel que les mortiers et les bétons peuvent aussi avoir des dégradations suite à des attaques sulfatiques. Les sulfates tel que le gypse rentre dans la composition du ciment. Avant la prise du ciment la présence des sulfates ne posent pas de problème. Par contre la présence des sulfates après des mois ou bien des année de durcissement du béton que se soit par source interne par remobilisation des sulfates de la matrice cimentaire ou bien par source externe eau pluviale ou bien eau souterrain pose un problème très important. La présence des sulfates à ce stade favorise la formation de l'ettringite différée qui est un élément expansif qui cause des fissures et l'éclatement du matériau cimentaire.

II.1.2 Cas des sols :

L'attaque sulfatique des briques de terre comprimée est très peu étudié surtout lorsqu'on a affaire à une attaque externe que se soit par immersion des matériaux dans une solution saline où bien l'exposition des matériaux aux conditions climatiques réelles.

Il y'a plusieurs chercheurs qui ont étudié l'effet des attaques sulfatique des sols qui contiennent des sulfates ou stabilisés par le ciment ou la chaux.

Les réactions sulfatiques sur un sol se résument dans les points suivants :

- Formation de l'étringite et la thaumasite après quelques semaines après la stabilisation du sol (Caban, 2004).
- L'étringite peut se former lorsque les minéraux de sulfates se dissolvent dans l'eau et s'installent dans les pores de l'échantillons, (Rajasekaran, 2005).

Dans une étude comparative de Sherwood. (1962), cité par Lan, (2002) a étudié le comportement de deux types de sols différents. Le premier argileux et le deuxième sableux. Ces sols contiennent les mêmes proportions de sulfate. Les échantillons à base de sable ont résisté pendant une année d'immersion alors que les échantillons à base d'argile se sont dégradés au bout de quelques jours. A partir de là il a conclu que l'attaque sulfatique est liée à la teneur en argile du sol.

II.2 Facteurs influant sur l'expansion des sols par attaque sulfatique

On dénombre quatre facteurs qui influent sur l'expansion du sol par attaque sulfatique. Ils sont présentés ci-après :

II.2.1 La nature du sol

La composition minéralogique d'un sol est un paramètre très important pour prévenir l'attaque sulfatique. Lorsqu'on trouve les sulfates dans le sol on évitera le contact avec l'eau ou sa stabilisation avec le ciment pour éviter la formation de l'étringite. Sherwood, (1962), cité par Lan, (2002) a étudié l'influence des sulfates sur l'évolution de la résistance à la compression. Avec 0,2% de sulfate le sol argileux a perdu environ 50%

de sa résistance à la compression. Par contre en présence de 3% de sulfate le sol sableux a gardé sa résistance à la compression.

II.2.2 Condition de cure

Les conditions de cure telle que l'humidité relative et la température ont un impact très important sur l'évolution de l'attaque sulfatique. Wang, (2002) a étudié l'expansion axiale d'un sable limoneux stabilisé avec le ciment. Il a ajouté le gypse pour favoriser l'attaque sulfatique interne et a soumis ce sol à différentes conditions de cures, (cure à T=20°C, HR=100% ; T=20°C, HR=50% ; T=40°C, HR=100% ; T=40°C, HR=50%).

En comparant les différents résultats il a conclu qu'une faible humidité relative limite l'expansion linéaire car :

- A température 40°C et humidité relative de 100% l'expansion égale à 1,2%.
- A température 20°C et une humidité relative de 50% l'expansion égale à 0,2%.

II.2.3 Les stabilisants

Généralement les sols destinés à la fabrication des briques de terre comprimée nécessitent une stabilisation par l'ajout des liants comme le ciment ou la chaux ou bien des additions minérales comme le laitier de haut fourneaux, la pouzzolane naturelle... ect d'où il faut bien choisir le type de stabilisant en basant sur la composition minéralogique du sol traité.

Wang, (2002) a trouvé que la teneur en ciment augmente l'expansion axiale des échantillons. Cette dernière augmente de 0,8% à 1,2% lorsque la teneur en ciment passe de 5% à 9%.

Avec 1% de sulfate additionné a un matériau stabilisé à la chaux, ça peut causer de grave dommage aux briques (Petry, 1994).

II.2.4 La teneur en sulfate

La quantité de sulfates a aussi une grande influence sur l'attaque sulfatique. On trouve plusieurs résultats dans la littérature :

- Sur une argile de Londres stabilisé par la chaux : avec une teneur en sulfate de 2% la résistance à la compression diminue de 67% Sherwood. (1962), cité par Lan, (2002).
- Sur un sable limoneux stabilisé au ciment (Wang, 2002) : les échantillons sont soumis à une immersion totale dans une solution de sulfates de sodium avec différentes concentrations (10g/L, 20g/L et 50g/l). Le chercheur a trouvé que l'expansion axiale des échantillons augmente avec l'augmentation de la concentration de Na₂SO₄.

II.3 Les chlorures

Les chlorures se trouvent largement dans la nature, généralement sous forme de chlorure de sodium NaCl (sel de table) ou sous forme de chlorure de potassium KCl.

La plus grande quantité de chlorures se trouve dans les océans.

On peut les trouver aussi sous forme de gisement sous terrains de sel. D'après (Bliefert et Perraud, 2001) la concentration des chlorures dans l'eau de mer peut arriver à 17500ppm (partie par million) et dans les sols 1900ppm, d'où l'étude du comportement de la BTC vis-à-vis les chlorures est d'une grande importance.

II.3.1 Influence des chlorures sur les matériaux cimentaires

Contrairement aux sulfates, les chlorures n'entrent pas dans la composition des matériaux cimentaire, par contre ils se trouvent dans les adjuvants accélérateurs de prise. Mohammed et al, (2004) ont montré qu'un béton confectionné avec l'eau de mer améliore la résistance à la compression.

II.3.2 Cas des sols

D'après Le borgne (2010). Jusqu'à un dosage de 2g/kg la présence des chlorures dans un sol n'est pas considérée comme des perturbateurs de prise. Ils agissent alors plutôt comme des accélérateurs de prise. Cette teneur est rarement rencontrée dans les terrains naturels sauf cas particuliers (roches salines, extraction en bord de mer ...).

Singh et Das, (1999), ont étudié l'influence de l'ajout de chlorures de sodium sur la résistance mécanique de deux types de sols à différentes teneurs en argile. Les auteurs trouvent que :

- La résistance à la compression augmente d'un sol argileux avec l'ajout de chlorure de sodium
- Les sols traités avec chlorure de sodium soumis à une cure à l'air libre donnent de meilleures résistances à la compression.

Hachichi et Fleureau, (1999) ont étudié l'évolution dans le temps du gonflement en d'une argile immergée dans différentes solutions salines. Les résultats ont montré que le gonflement diminue en ajoutant les chlorures (figure IV.2).

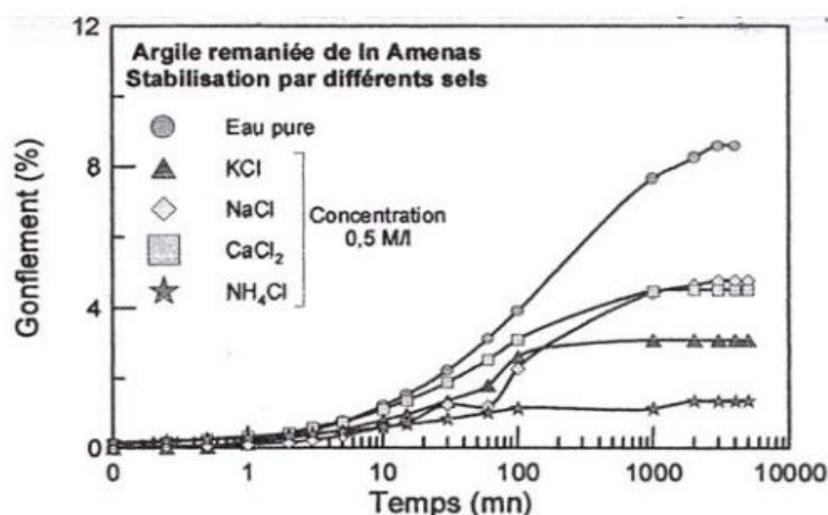


Figure IV .2 : Courbes de gonflement d'une argile d'In Amenas en présence de différents sels (Hachichi et Fleureau 1999).

II.4 Matériaux et méthodes

Dans la partie expérimentale qui suit, nous avons choisi les formulations des mélanges qui ont montré de bonnes caractéristiques mécaniques afin d'évaluer la durabilité de notre matériau par des cycles de séchages mouillages dans l'eau et aussi dans des solutions salines pour favoriser l'attaque sulfatique.

II.4.1 Cure des échantillons

Les échantillons de dimensions ($H=10\text{cm}$ et $\phi=5\text{cm}$) ont subi un séchage dans un film plastique à une température de 50°C afin de favoriser au maximum les réactions chimiques à l'intérieur de l'échantillon (figure IV. 3) jusqu'à stabilisation de la masse. Les échantillons sont ensuite retirés de l'étuve et laisser à une température ambiante pour procéder aux cycles de séchage mouillage.



Figure IV.3 : Cure des échantillons

II.4.2 Protocole d'attaque aux solutions salines

Le test d'attaque au sel par séchage/mouillage à été fait selon la norme EN 12370 pour la détermination de la résistance par un essai de cristallisation des sels. Cet essai à été utilisé par plusieurs chercheurs (Belayachi, et al 2020).

Chaque cycle de séchage/mouillage comporte trois phases étalées sur 24h :

- La première phase où les échantillons sont immergés dans l'eau distillé et dans les solutions salines utilisées : une solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 et une solution de chlorure de sodium NaCl avec une concentration de 14% selon la norme.
- Une deuxième phase qui se résume à un séchage à l'étude pendant 20h.
- Une troisième phase, un refroidissement à une température ambiante pendant 2h avant de procéder au prochain cycle. Pour la partie mouillage on à utilisé deux types d'essai, une immersion totale dans l'eau et une absorption par capillarité (figure IV.4). Chaque cycle est suivi par des pesées et des observations.

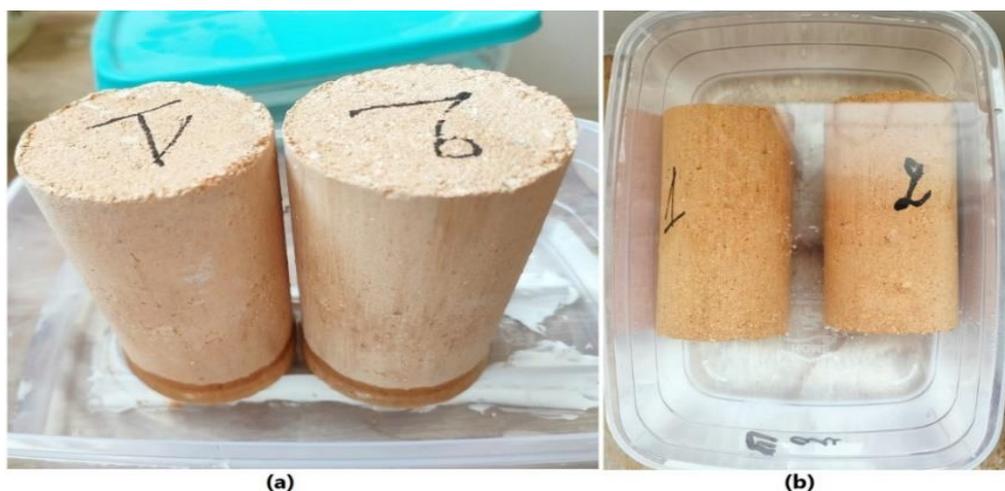


Figure IV.4 : Types de mouillage (a) mouillage par capillarité, (b) mouillage par immersion

II.5 Résultats et discussions

Dans cette partie nous allons tout d'abord commencé par la présentation de la perte de masse en fonction du nombre de cycles pour les deux types de mouillage et faire une comparaison entre les différentes formulations utilisées :

- L'échantillon témoin non stabilisé (TM).
- Tuf + 10% fumée de silice (T.10FS).
- Tuf+ 10% pouzzolane (T.10PZ).
- Tuf+ 30% argile (T.30AR).

II.5.1 Immersion totale

a) Immersion dans l'eau

Les résultats sont reportés dans un graphique où on met sur l'axe des abscisses le nombre de cycle de séchage-mouillage, et sur l'axe des ordonnées le rapport entre la masse après chaque cycle mouillage/séchage de l'éprouvette sur la masse initial sèche au début de l'essai.

La figure IV.5 représente les résultats des essais effectués sur les quatre formulations choisies. Après analyse des résultats on peut émettre les conclusions suivantes :

- L'éprouvette de tuf non stabilisé (TM) nous donne pratiquement les mêmes valeurs, entre le gain et perte de masse, elle résiste jusqu'au 14^{ème} cycle.
- L'échantillon à base de 30% d'argile (T.30AR) montre pratiquement le même comportement que celui de l'échantillon témoin avec une résistance à l'immersion plus importante jusqu'à 18 cycles de séchage/mouillage. Ceci est due à la diminution de la porosité de l'échantillon après l'ajout de l'argile.
- L'éprouvette stabilisée par la pouzzolane (T.10PZ) suit le même chemin aussi mais elle perd un peu de grain en surface vers le 11ème cycle ensuite elle suit le même comportement jusqu'au 16ème cycle où elle va se ruiner.

- L'échantillon à base de fumée de silice (T.10FS) montre un comportement différent des autres échantillons. On remarque une augmentation de la masse saturée jusqu'au 5^{ème} cycle où la masse se stabilise jusqu'au 20^{ème} cycles, l'échantillon commence à perdre une peu de matière d'où une diminution de sa masse jusqu'à la ruine totale après 29 cycles. Cette amélioration est due à l'augmentation du PH qui va causer la dissolution de silice pour former les produits cimentaires qui vont jouer un rôle très important dans l'augmentation de la cohésion entre les grains.

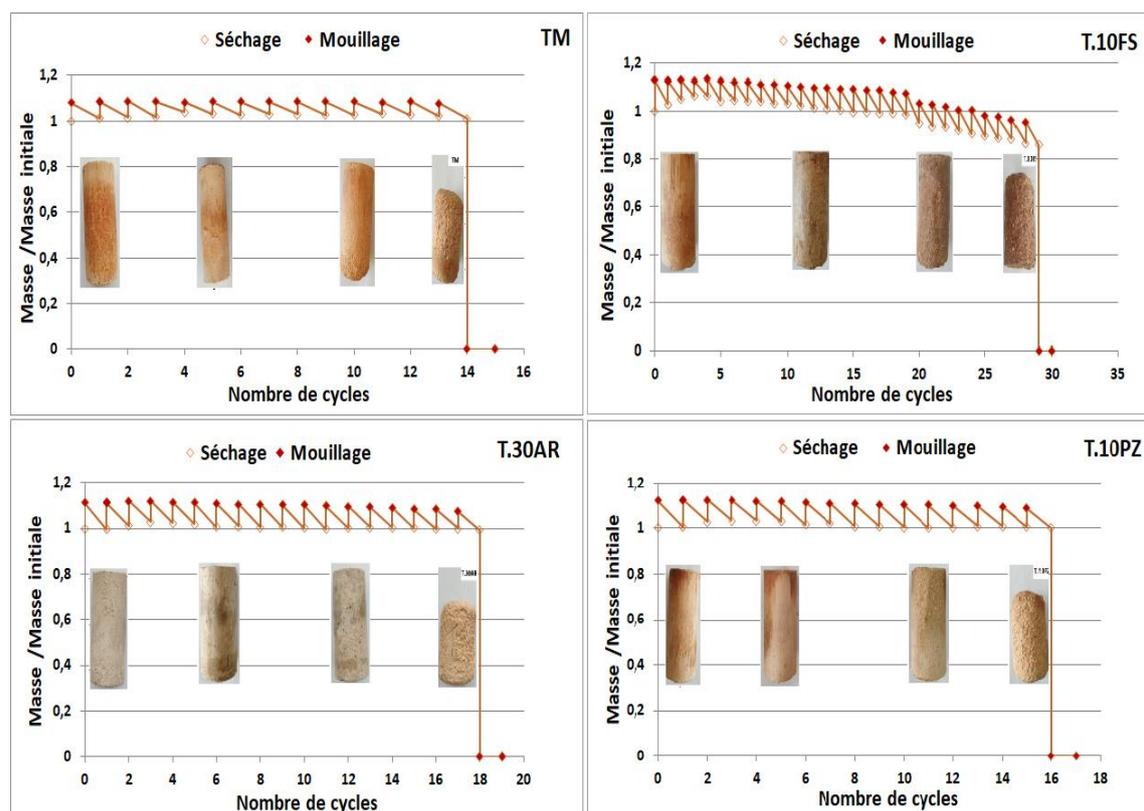


Figure IV.5 : Evolution de la masse en fonction des cycles (immersion totale dans l'eau).

La figure IV.6 représente l'évolution de l'aspect extérieurs des éprouvettes soumises aux cycles mouillage/séchage dans l'eau. On constate clairement aux derniers stades la détérioration des matériaux pour les différents types de stabilisants.

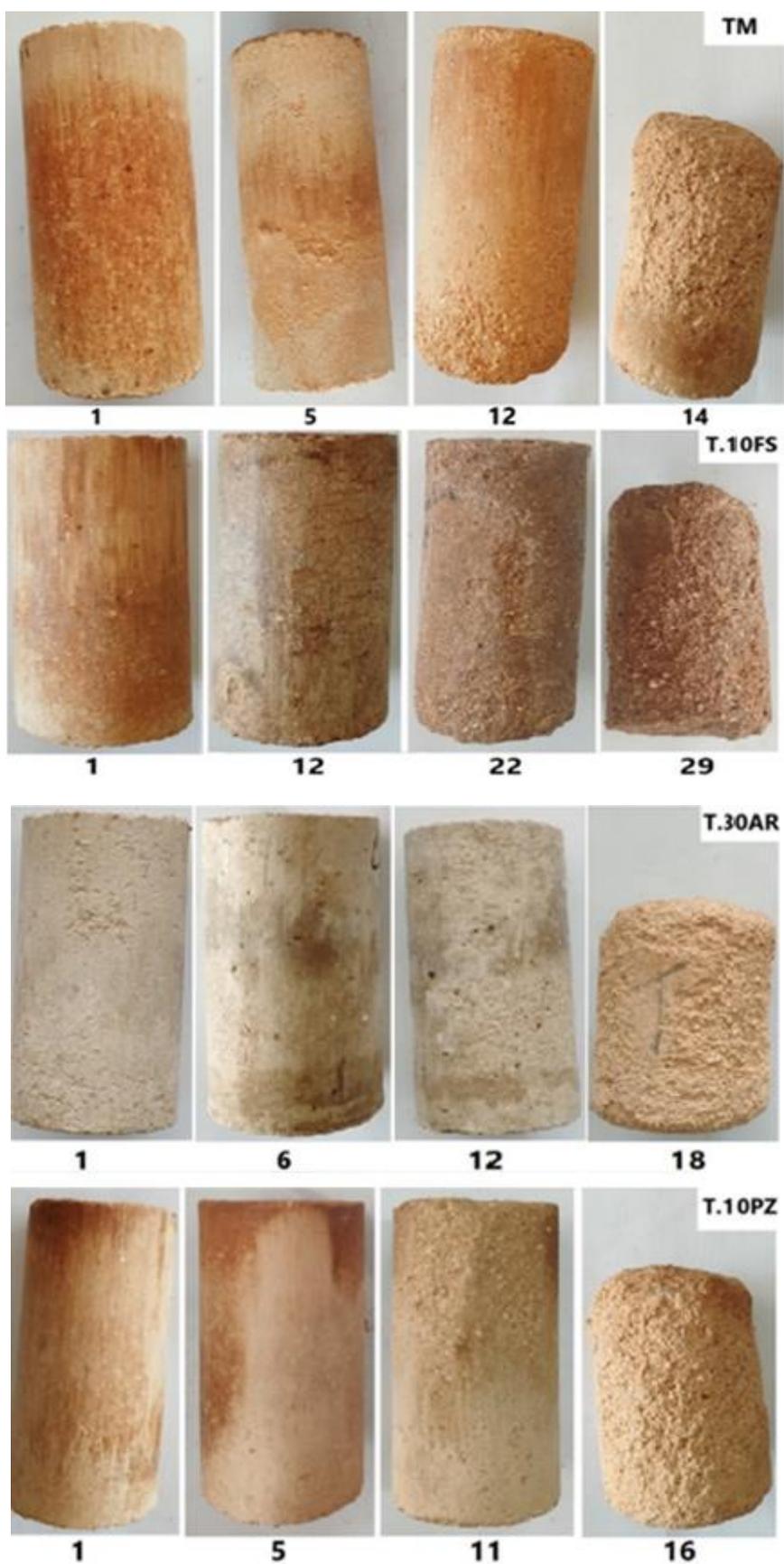


Figure IV.6 : Dégradation des échantillons suivant les cycles (immersion totale dans l'eau)

Dans le domaine de la BTC on ne trouve pas de recommandation exigeant un nombre minimal de cycles mouillage/séchage pour dire que notre matériau résiste à l'immersion dans l'eau, par contre il existe une norme ASTM D559 (Méthodes d'essai pour Mouillage et séchage des mélanges sol-ciment compactés) qui est spécifique au matériau terre compacté stabilisé avec le ciment

En analysant l'ensemble des résultats et en comparant avec la norme ASTM D559 qui préconise que le nombre minimal de cycles de séchage/mouillage accepté est de 12 cycles, l'ensemble de nos échantillons répondent à cette exigence.

b) Immersion dans la solution NaCl

La variation de la masse en fonction du nombre de cycles pour les échantillons immergés dans une solution NaCl est illustrée dans la figure IV.7. On remarque que :

- Pour l'ensemble des échantillons il y'a une augmentation de poids sec et saturé en fonction du nombre de cycles. Cette augmentation est due au stockage du sel dans la structure poreuse des échantillons ainsi sur la surface des échantillons.
- La différence entre le poids sec et saturé devient de plus en plus petite pour l'ensemble des échantillons, surtout pour le cas d'échantillon T.30AR, cela est expliqué par K. Beck, M. Al-Mukhtar, (2010) qui ont étudié aussi un tuf immergé dans une solution NaCl. Ils ont dit que cette diminution de la différence entre le poids sec et saturé est due au sel stocké dans les pores qui va rendre le séchage complet des échantillons plus difficiles. En outre ce sel va être transféré vers la surface lors du séchage créant ainsi des cristaux qui vont former une barrière. Ce qui réduit la cinétique d'évaporation et la migration des fluides en phase de séchage.
- On note aussi qu'il n'y a pas une perte de masse progressive due à une perte de matière des échantillons. On garde la même masse jusqu'à la ruine des échantillons sauf pour le cas de T.10FS ou on remarque une légère perte de masse vers le 19^{ème} cycle. On peut justifier cette perte par le fait que pendant la phase d'immersion une partie de sel stocké dans la surface de l'échantillon se dissout ce qui engendre une perte de poids avant la phase de séchage.

Pour l'effet de chaque stabilisant sur l'amélioration de la durabilité des échantillons en présence des chlorures, on remarque que :

- L'échantillon de tuf seul (TM) a résisté jusqu'au 12^{ème} cycle.
- L'ajout de la fumée de silice a un effet très important on passe de 12 cycles pour l'échantillon témoin (TM) à 27 cycles après l'ajout de 10% de fumée de silice (T.10FS) qui est connu par sa résistance dans les milieux agressives.
- Pour le cas de l'échantillon T.30AR on remarque une légère amélioration par rapport à l'échantillon témoin on passe de 12 cycles à 15 cycles après l'ajout de 30% d'argile.
- D'autre part l'ajout de la pouzzolane a fait diminuer le nombre de cycles à 8 cycles. On peut justifier cette diminution par le fait que la pouzzolane a besoin

de plus de temps pendant la phase de séchage pour la formation des silicates de calcium hydraté (C-S-H) qui ont un rôle très important dans l'amélioration de la durabilité en présence des sels.

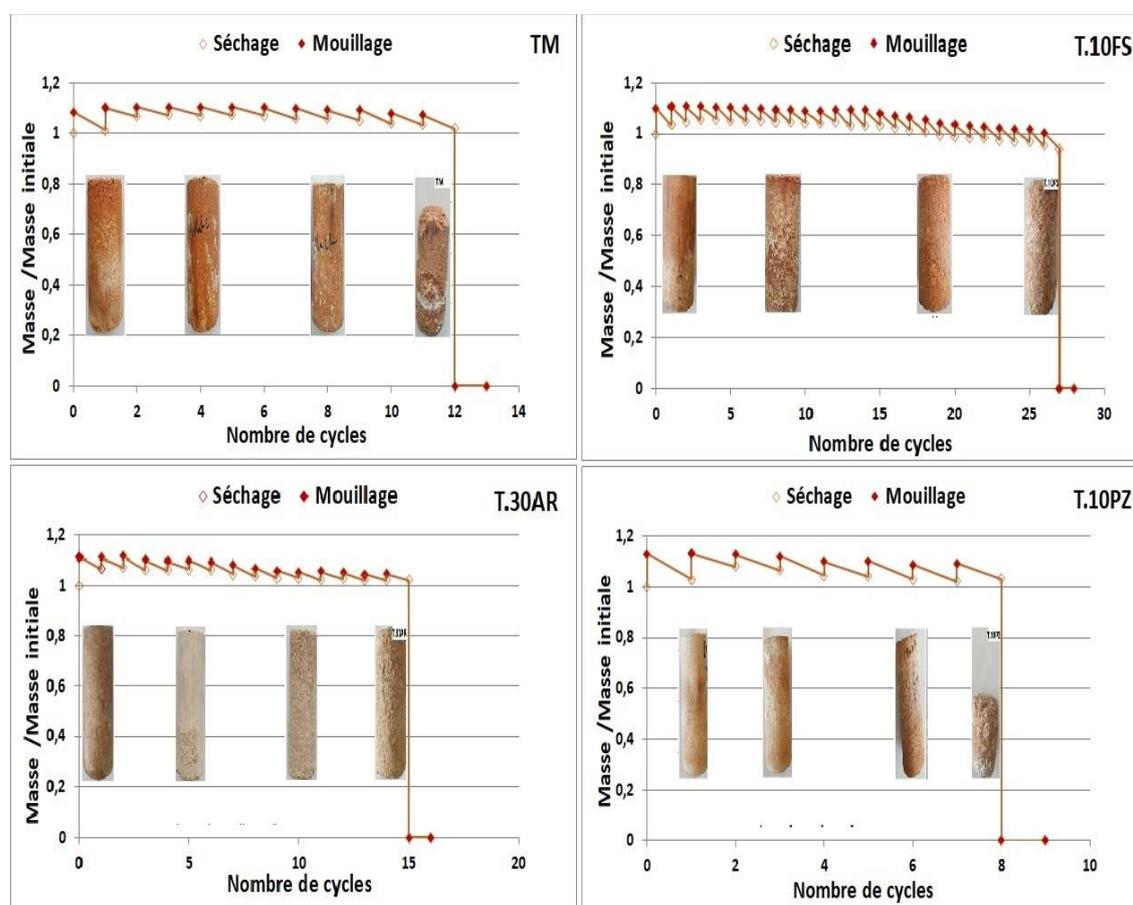


Figure IV.7 : Evolution de la masse en fonction des cycles (immersion totale dans solution NaCl)

Pour les observations visuelles de l'état des échantillons au cours des différents cycles de séchage/mouillage illustrés dans la figure IV.8, on remarque des efflorescences due au stockage des sels dans la surface avec une rugosité de surface et une érosion des bords pour certains échantillons.



Figure IV.8 : Dégradation des échantillons suivant les cycles (immersion totale dans solution NaCl)

c) Immersion dans la solution Na_2SO_4

Flatt (2002) a dit que l'action du sulfate de sodium est différente des autres sels car il génère des pressions de cristallisations avec un changement de phase. Ceci est confirmé dans notre cas où on remarque que les dégâts sont plus importants.

La figure IV.9 représente la perte de masse en fonction du nombre de cycles pour les échantillons soumis à des cycles de séchages mouillages dans une solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 , ou on peut tirer les conclusions suivantes :

- La variation de la masse sur la masse initiale est la même que les échantillons immergés dans la solution de chlorure de sodium. La masse augmente au début suite au stockage des sels dans les pores jusqu'à la détérioration de l'échantillon sauf pour l'échantillon témoin où on a une perte de masse dans le 4ème cycle suite à une érosion des bords ce qui peut être observé dans la figure IV.10.
- L'ajout de l'argile et la pouzzolane n'a montré aucun impact on reste à 5 cycles pour l'échantillon (T.30AR) et 4 cycles pour (T.10PZ) alors que l'échantillon témoin (TM) a résisté pendant 5 cycles.
- L'ajout de la fumée de silice (T.10FS) engendre une amélioration remarquable où on passe à 12 cycles de séchage/mouillage dans une solution Na_2SO_4 avec une concentration de 14%. Ceci est dû à la diminution de la porosité de l'échantillon après l'ajout de la fumée de silice ce qui empêche la pénétration des sulfates chose qui est remarqué dans la figure IV.10.

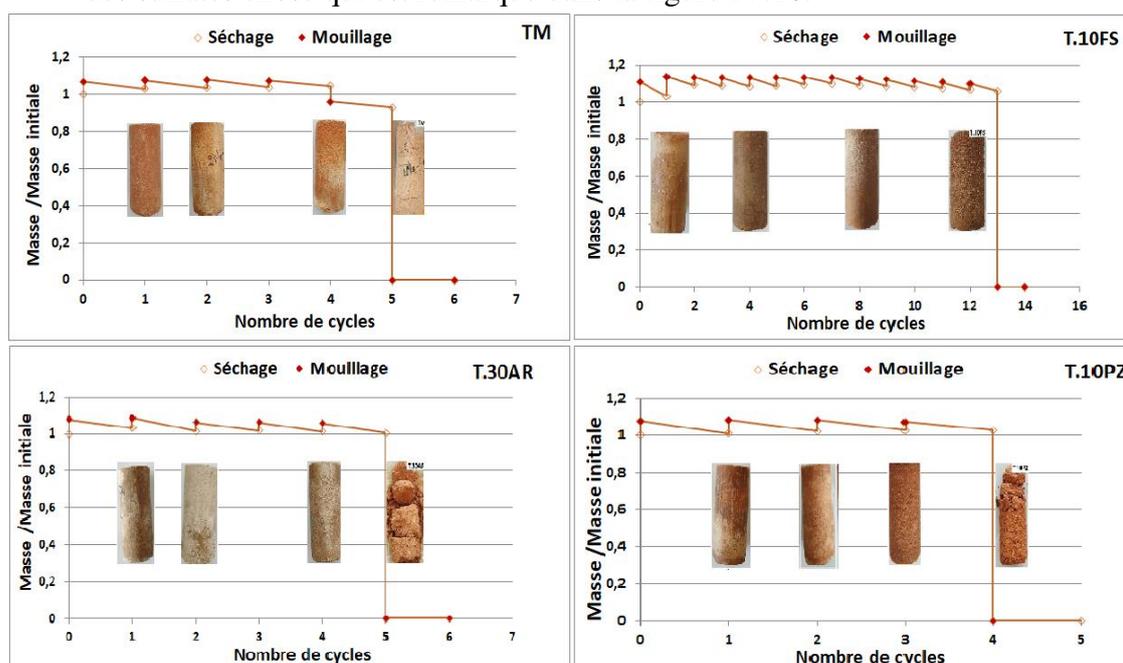


Figure IV.9 : Evolution de la masse en fonction des cycles (immersion totale dans solution Na_2SO_4)

La figure IV.10 montre l'état des échantillons après différents cycles, où on remarque que :

- Les échantillons à base de fumée de silice ont une détérioration superficielle par contre les autres échantillons ont subi un éclatement.
- Autre chose qui a été remarqué pour l'ensemble des échantillons que la présence des sulfates de sodium leurs change la texture elle devient plus sombre.

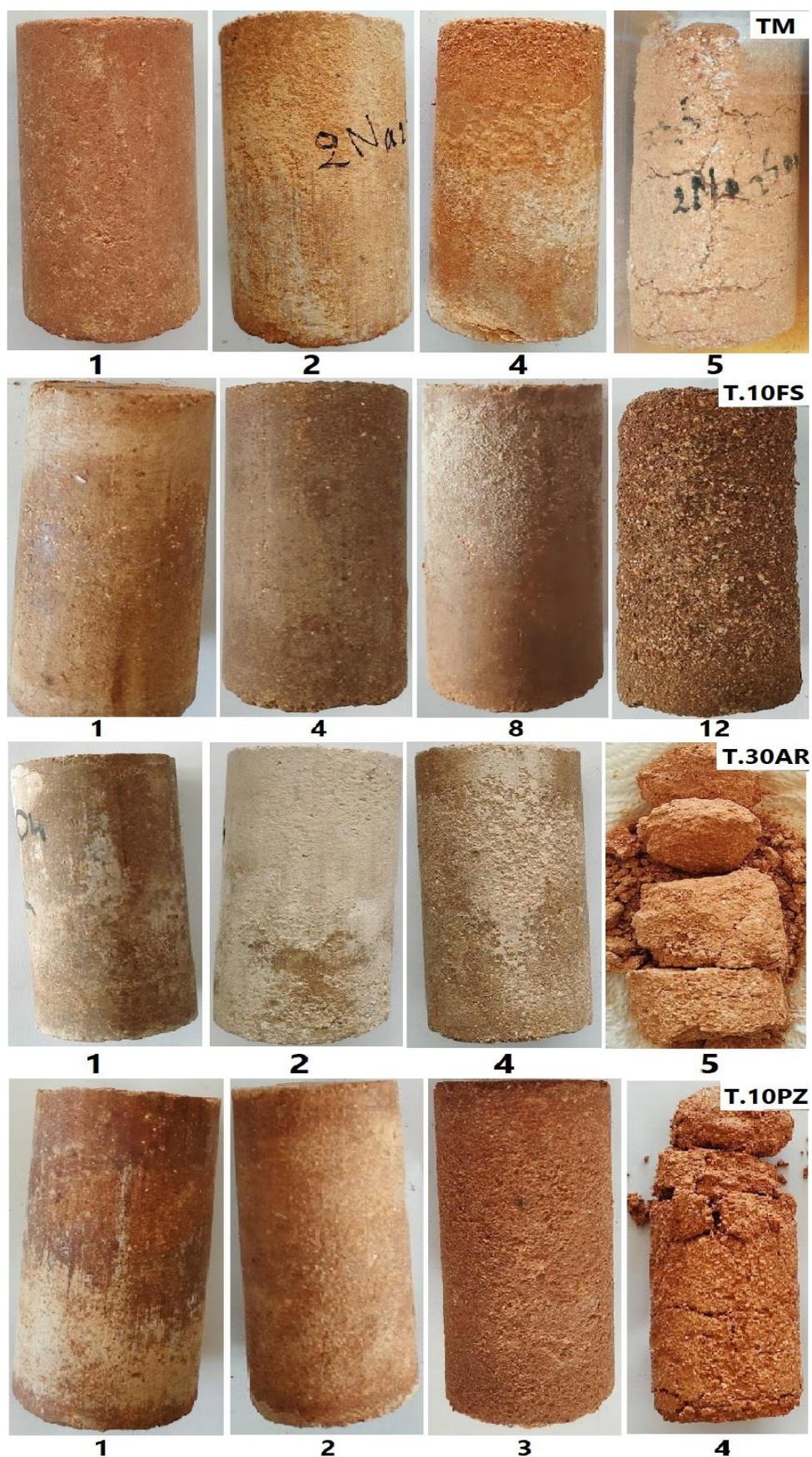


Figure IV.10 Dégradation des échantillons suivant les cycles (immersion totale dans solution Na_2SO_4)

d) Récapitulatif des résultats d'immersion totale

La figure IV.11 donne une récapitulation des résultats des échantillons qui ont subies une immersion totale dans l'eau et aussi ceux immergé dans les solutions salines où on remarque que :

- L'ajout des différentes additions améliore la résistance des échantillons dans le cas d'immersion dans l'eau. Par contre pour le cas de résistance aux chlorures on voit que l'ajout de la pouzzolane a rendu l'échantillon plus fragile et l'ajout de l'argile a montré une légère amélioration on passe de 12 cycles pour l'échantillon témoin à 15 cycles après l'ajout de l'argile, par contre l'ajout de la fumée de silice nous a donné une bonne résistance aux chlorures, l'échantillon a pu résister jusqu'au 26^{ème} cycles.
- Pour le cas de résistance au sulfate par l'immersion dans une solution Na_2SO_4 , on ne voit pas une amélioration pour la formulation T.10PZ, et T.30AR. Par rapport à l'échantillon témoin, par contre la formulation T.10FS montre une bonne résistance au sulfate où elle résiste jusqu'au 12^{ème} cycles alors que pour les autres formulations on n'a pas dépassé le 5^{ème} cycle.

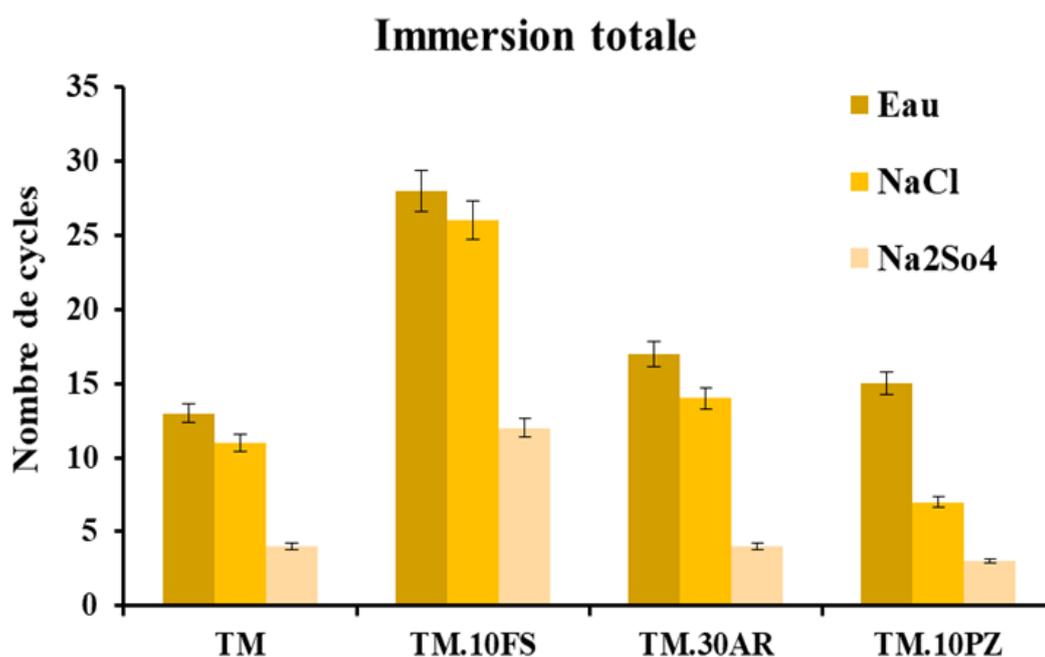


Figure IV.11 : Récapitulatif des résultats d'immersion totale

II.5.2 Absorption par capillarité

Les échantillons soumis à une absorption par capillarité ont montré une dégradation plus importante que ceux soumis à une immersion totale, cela est due au phénomène très important qui rentre en jeu en plus de la diffusion qui est le phénomène de succion qui va générer des forces de tensions superficielles de film d'eau entre les grains pendant l'absorption par capillarité face à une évapotranspiration pendant le séchage

des échantillons. Ceci cause l'expansion des échantillons au milieu (interaction entre zone humide et zone sèche).

a) Absorption par capillarité dans l'eau

La perte de masse en fonction de nombre de cycles pour les échantillons soumis à une absorption par capillarité dans l'eau est illustrée dans la figure IV.12. On remarque que :

- L'absorption par capillarité est aussi agressive que l'immersion totale.
- L'échantillon témoin (TM) ainsi que l'échantillon stabilisé avec l'argile (T.30AR) montre le même comportement pendant tout l'essai. Un gain de poids après immersion et une perte de poids après séchage jusqu'à la rupture de l'échantillons ou l'échantillon témoin résiste pendant 12 cycles et l'échantillon stabilisé avec l'argile 16 cycles. Cette légère amélioration est due au comblement des vides après l'ajout d'argile ce qui rend l'échantillon moins poreux et améliore son absorption capillaire.
- Par contre les échantillons stabilisés avec la pouzzolane (T.10PZ) et par la fumée de silice (T.10FS) ont montré un comportement différents où on remarque deux paliers un premier palier où il y'a un gains de masse pendant le mouillage et une perte de masse pendant le séchage jusqu'au 8ème cycle pour l'échantillon stabilisé avec pouzzolane et 13ème cycles pour l'échantillon stabilisé avec la fumée de silice. Ce qui correspond à une perte de masse importante pendant le séchage due à une perte de matière, et ensuite on remarque un deuxième palier où l'échantillon suit le même comportement que dans le premier jusqu'à rupture de l'échantillon au 15ème cycle pour le mélange TM.10PZ et au 25ème cycle pour le mélange TM.10FS,

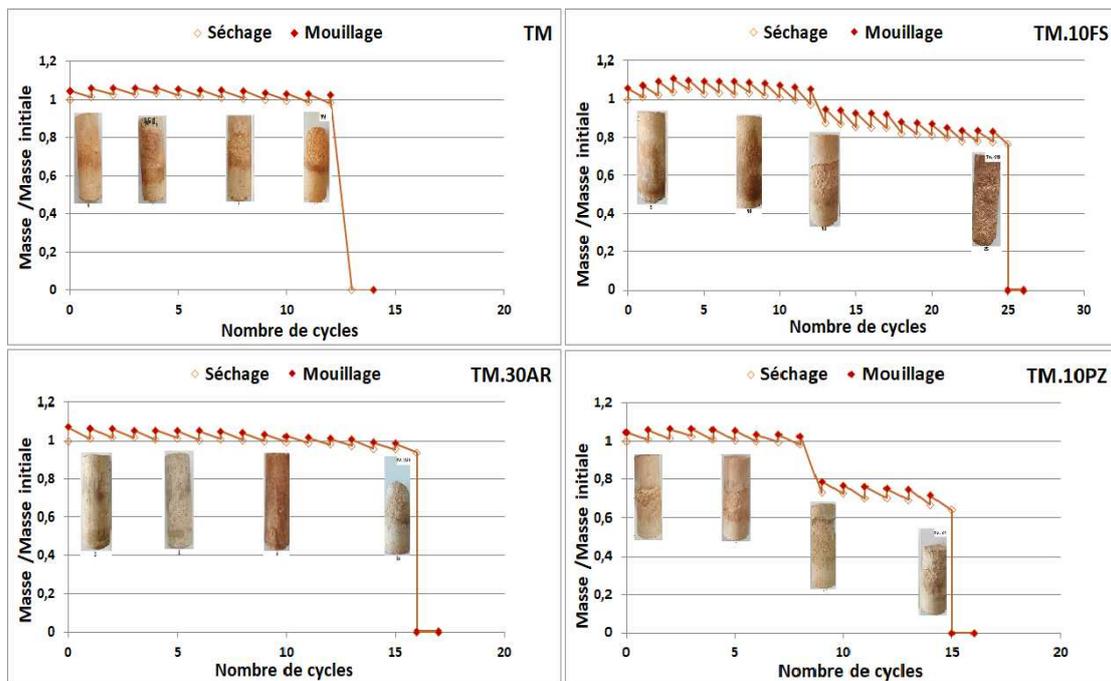


Figure IV.12 Evolution de la masse en fonction des cycles (absorption par capillarité dans l'eau)

La figure IV.13 représente l'état des échantillons après différents cycles de mouillage/séchage.

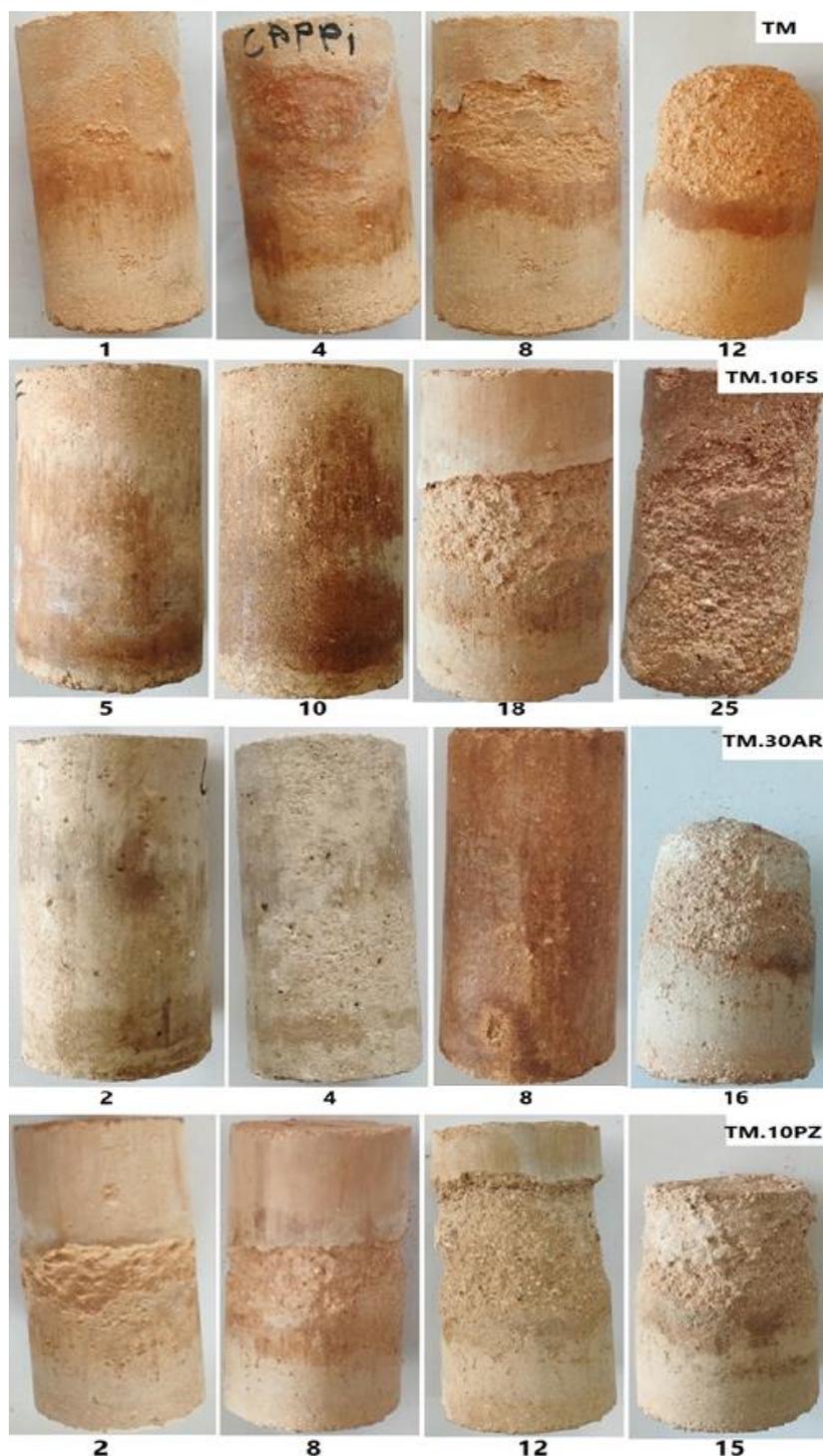


Figure IV.13 Dégradation des échantillons suivant les cycles (absorption par capillarité dans l'eau).

b) Absorption par capillarité dans la solution NaCl

La figure IV.14 illustre la perte de masse en fonction du nombre de cycles pour les différents mélanges soumis à une absorption par capillarité dans une solution de chlorure de sodium NaCl. On note les points suivants :

- L'échantillon témoin (TM) ainsi que les échantillons stabilisés avec la pouzzolane (TM.10PZ) et l'argile (T.30AR) ont montré le même comportement une perte de masse progressive due à une perte de matière jusqu'à rupture de l'échantillon où on peut remarquer ça aussi dans la figure IV.14 qui montre l'état des échantillons après différents cycles.
- Par contre pour les échantillons stabilisés avec la fumée de silice on a un gain de masse dans les premiers cycles ce qui implique que la perte de matière été faible et cette augmentation de la masse est due au sels stockés dans la structure poreuse de l'échantillons. Après le 5ème cycle, on constate une perte de masse progressive jusqu'au rupture de l'échantillon.
- La rupture de l'ensemble des échantillons été dans la phase séchage cela peut expliquer par le fait que le sel est transporté vers la surface pendant le séchage et vue qu'on est dans le cas d'une absorption capillaire avec une partie sèche et une partie humide (selon la porosité de chaque échantillon) le sel va être transporté dans la zone d'interaction entre la partie humide et la partie sèche ce qui cause l'éclatement de l'échantillon dans cette partie, (figure IV.15).
- Enfin pour l'influence de chaque stabilisant on remarque que l'ajout de l'argile nous a permis d'aller jusqu'au 19ème cycles et la fumée de silice 29 cycles alors qu'on été a 11 cycles pour l'échantillons non stabilisée. Par contre après l'ajout de la pouzzolane nous à réduit le nombre de cycle à 9 cycles chose qui s'est arrivé aussi dans la cas d'immersion totale dans la solution NaCl.

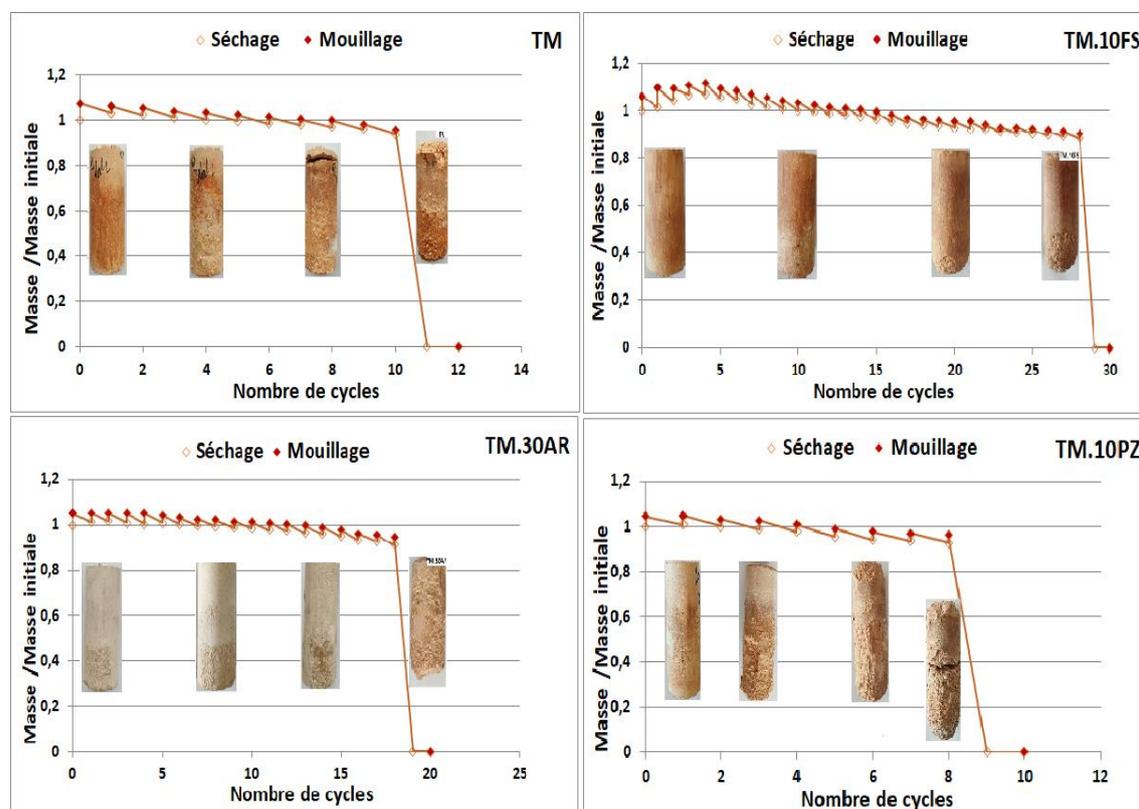


Figure IV.14 Evolution de la masse en fonction des cycles (absorption par capillarité dans solution NaCl)

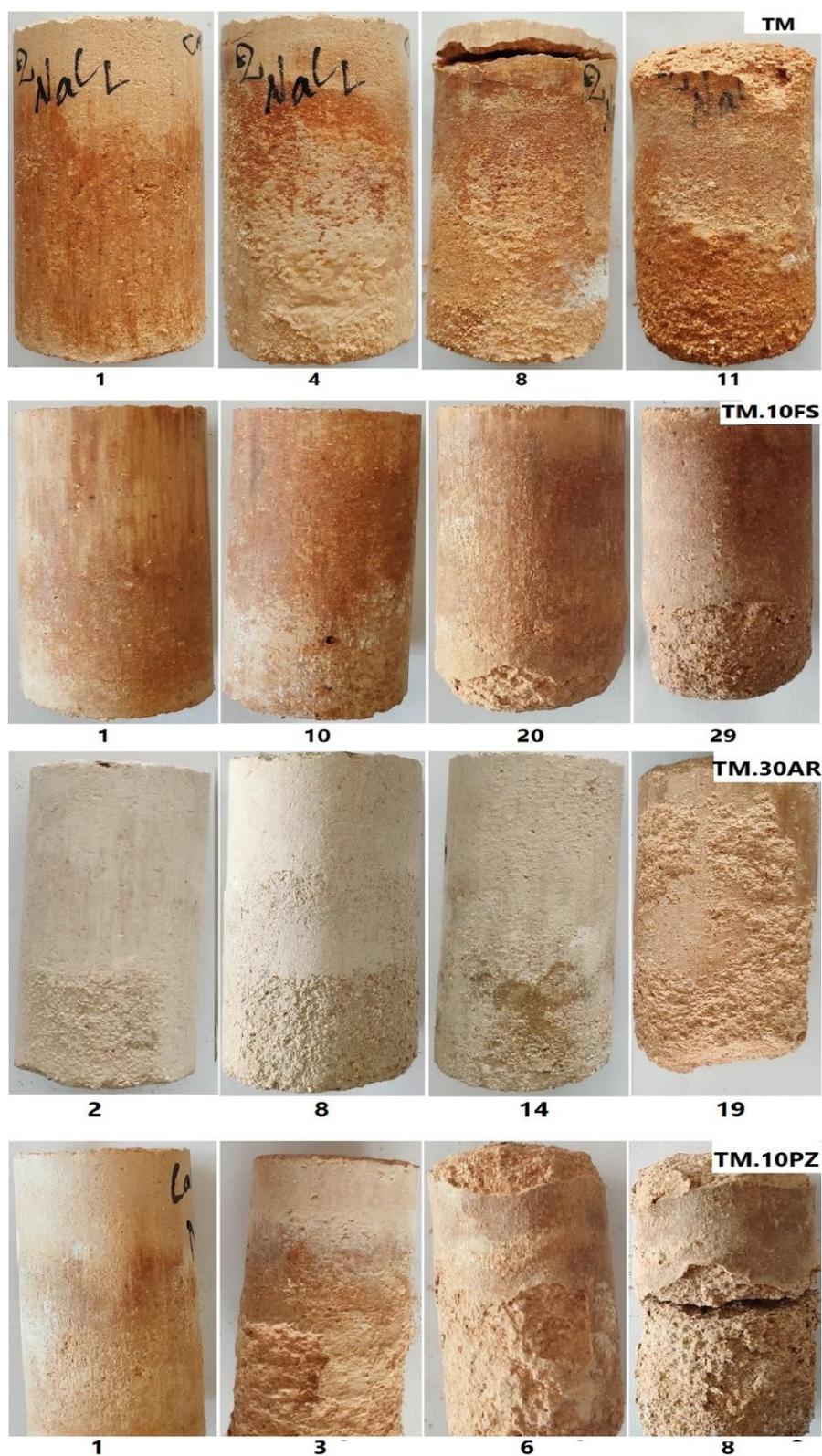


Figure IV.15 Degré de dégradation des échantillons suivant les cycles (absorption par capillarité dans solution NaCl)

c) Absorption par capillarité dans la solution Na_2SO_4

La perte de masse en fonction des cycles pour les différents mélanges qui ont subi une absorption par capillarité dans une solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 est illustrée dans la figure IV.16, on voit que :

- La présence des sulfates a tendance à accélérer le processus d'altération des échantillons et leurs ruines par rapport au échantillons immergés dans l'eau et dans la solution de chlorure de sodium.
- Les échantillons non stabilisés (TM) ainsi que les échantillons stabilisés avec la pouzzolane (T.10PZ) et ceux avec l'argile (T.30AR) ont montré une fragilité aux sulfates vue la perte progressive de la matière jusqu'à la ruine de l'échantillon, cela est due à la perte de cohésion des matériaux constituants. Ceci est produit d'autant plus vite pour l'échantillon stabilisée avec la pouzzolane.
- Par contre l'échantillons stabilisée avec la fumée de silice a montré un très bon comportement vis-à-vis des sulfates on est aller jusqu'au 13ème cycles de séchage/mouillage. Ce qui nous permet de dire que la fumée de silice A un effet favorable sur la résistance à l'érosion des échantillons.
- On remarque aussi que dans le cas de l'échantillons stabilisé avec la fumée de silice la différence entre le poids sec et le poids humide est très faible tout le long de l'essai ce qui implique que la fumée de silice avec sa surface spécifique très importante rend l'échantillons moins capillaire et la quantité de sel qui va pénétrer sera faible.

Kota et al. 1996 ont montré que les stabilisants à faible teneur en calcium (laitier de haut fourneau, les cendres volantes, et la fumée de silice) sont les plus approprié pour la stabilisation des sols qui sont soumis à des sulfates. Ceci est conforme à nos résultats expérimentaux pour le sol stabilisé avec la fumée de silice.

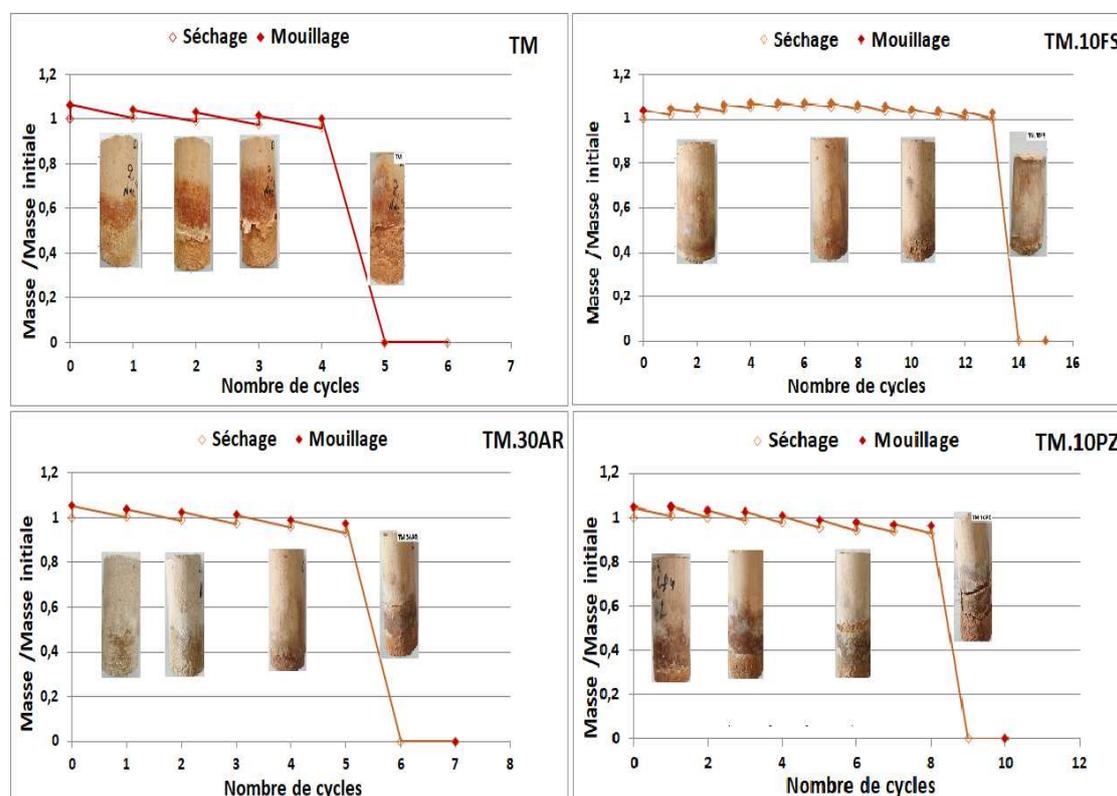


Figure IV.16 Evolution de la masse en fonction des cycles (absorption par capillarité dans solution Na₂SO₄)

La figure IV.17 montre l'état de chaque échantillon après différents cycles où on remarque une perte de matière surfacique qui est remarquable après le cycle de séchage sauf pour l'échantillon stabilisé avec la fumée de silice qui garde sa forme jusqu'à la ruine de l'échantillon.

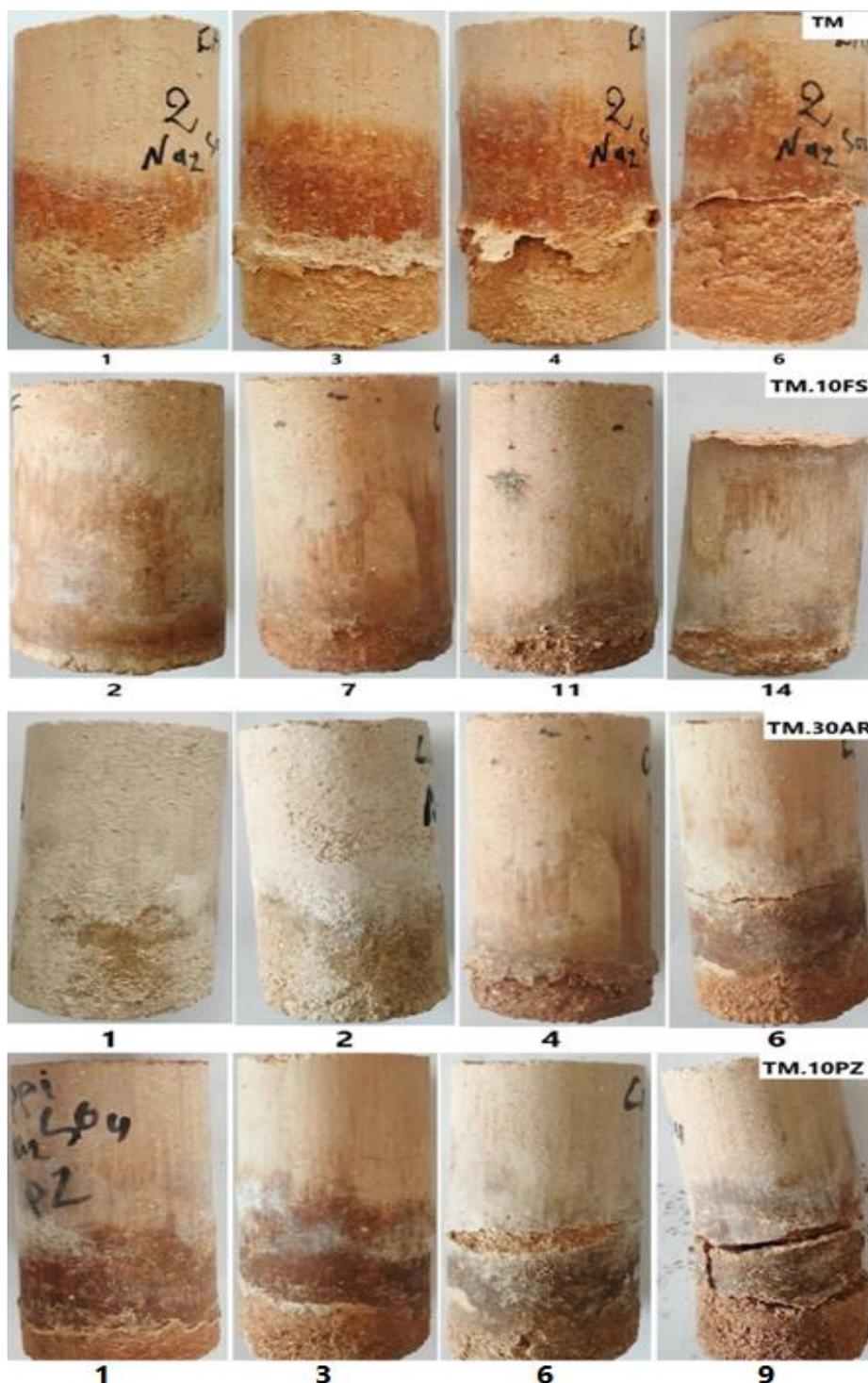


Figure IV.17 Dégradation des échantillons suivant les cycles (absorption par capillarité dans solution Na_2SO_4)

d) Récapitulation des résultats d'absorption par capillarité

La figure IV.18 regroupe les résultats de l'ensemble des échantillons soumis à une absorption par capillarité. On peut voir l'influence des différents ajouts sur la résistance des échantillons lors des cycles d'absorption capillaire. On constate les points suivants :

- Dans l'eau (H_2O) : en été à 12 cycles pour l'échantillon TM, et on passe à 15 cycles pour les échantillons TM.30AR, et TM.10PZ, et on arrive jusqu'à 24 cycles pour l'échantillon TM.10FS.
- Dans les chlorures ($NaCl$) : l'ajout de la pouzzolane (TM.10PZ) a fait diminuer le nombre de cycles par rapport à l'échantillon témoin (TM), par contre l'ajout de l'argile (TM.30AR) et l'ajout de la fumée de silice (TM.10FS) améliore la résistance au chlorures le nombre de cycles dépasse même celui des échantillons soumis à une absorption capillaire dans l'eau seul.
- Dans les sulfates (Na_2SO_4) la même chose que le cas d'immersion totale on ne voit pas une amélioration après l'ajout de l'argile et l'ajout de la pouzzolane. Par contre l'ajout de la fumée de silice a un effet bénéfique dans ce sens, on passe de 4 cycles pour l'échantillon témoin à 13 cycles après l'ajout de la fumée de silice.

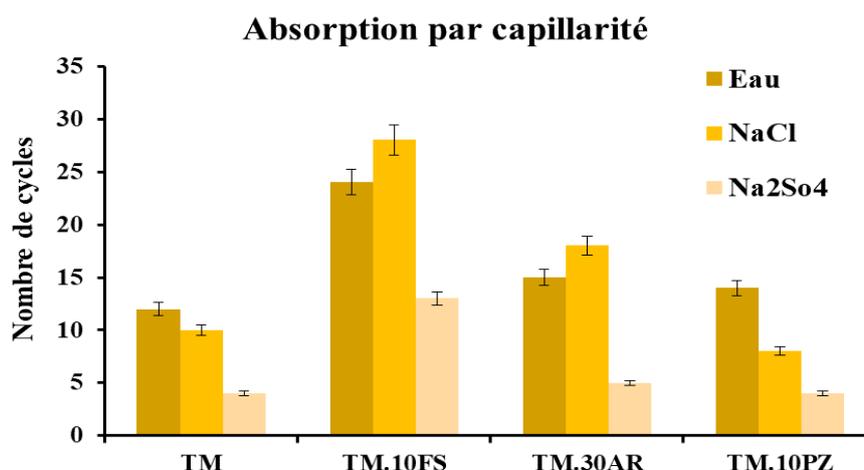


Figure IV.18 : Récapitulatif des résultats d'absorption par capillarité

III. Confection et caractérisation des blocs prismatiques

La finalité de toutes ces recherches est de valoriser le matériau compacté tuf en brique de terre compressée prismatique destiné à l'écoconstruction. C'est pour cela qu'on va réaliser ces briques stabilisées et non stabilisées en respectant le protocole expérimental suivant :

- Des blocs prismatiques de dimension 10cmX20cmX5cm seront réalisés au moyen du compactage statique avec une énergie de 4MPa.
- Ces briques sont ensuite emballées dans un film en plastique et mises dans une étuve ventilée à 40°C jusqu'à stabilisation de la masse.

- Ces BTC seront soumises à plusieurs essais : résistance à la compression, à la flexion, absorption par capillarité, résistance à l'abrasion et tenue à l'eau par immersion.

III.1 Résistance à la compression

La figure IV.19 illustre la résistance à la compression pour les différents briques, On émis les conclusions suivantes:

- Une légère amélioration de la résistance après l'ajout de la pouzzolane (5,32 MPa) par rapport à l'échantillon non stabilisée (5,06 MPa) ,
- Par contre on remarque un gain très important de résistance 34% avec une résistance de 6,8 MPa pour les briques stabilisées avec l'argile,
- L'ajout de la fumée de silice a conduit à une gain très important de résistance à la compression qui est de 40% avec une résistance à la compression de 7,1MPa. Cette augmentation est due essentiellement à la diminution de la porosité des briques après l'ajout des additions qui sont très fines, et aussi due aux liaisons chimiques développées après la réaction entre les additions et le sol.

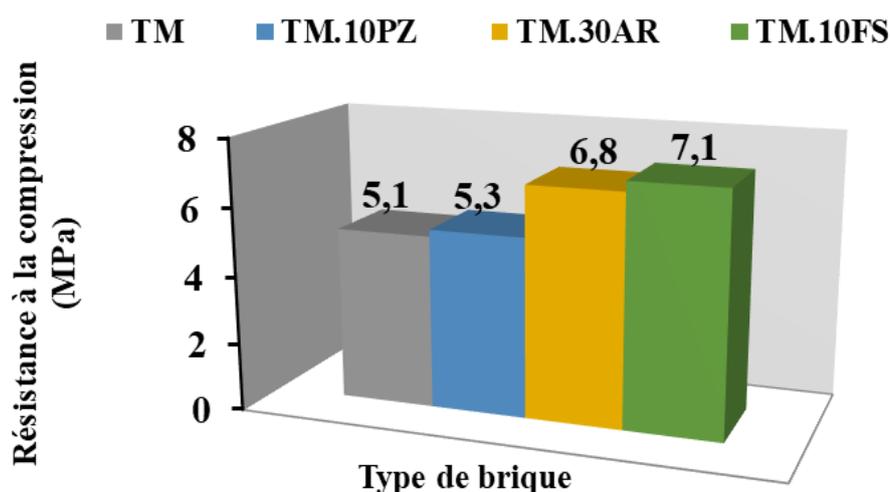


Figure IV.19 Résistance à la compression en fonction du type de brique

Une comparaison avec les résultats de résistance à la compression trouvés par d'autres chercheurs est illustrée dans la figureIV.20. On remarque que les résultats obtenus pour l'ensemble des briques sont très proches de celles trouvé par d'autres chercheurs, tel que Bogas et al, (2019) qui a trouvé une résistance à la compression de 5,4 MPa pour une brique stabilisé avec le ciment.

Sore et al (2018) qui ont utilisé une combinaison de stabilisation entre le ciment et un géopolymère, la plus grande valeur de résistance obtenu est de 8,95 MPa.

Ben mansour et al, (2016) a trouvé une valeur maximale de résistance à la compression de l'ordre de 4,2 MPa pour une brique crue non stabilisé.

Limami et al, (2023) ont étudié l'effet de l'ajout des fibres de sciure recyclées renforcées sur la résistance à la compression d'une BTC, et ils ont réussi à obtenir une résistance de 8,75MPa,

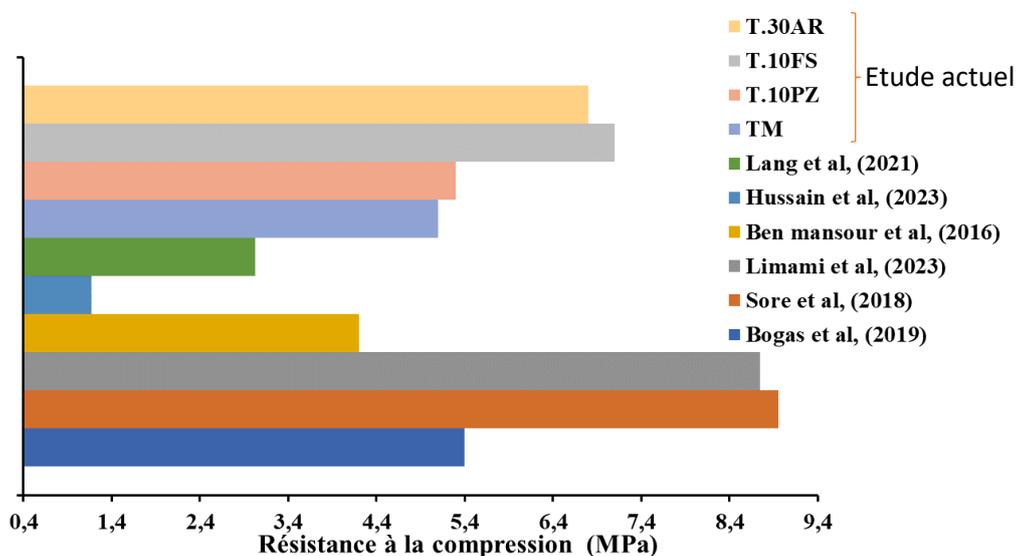


Figure IV.20 Comparaison des résultats de résistance à la compression avec la littérature

III.2 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion pour les différentes briques est montrée dans la figure IV.21, on remarque que :

- Une perte de résistance après l'ajout de la pouzzolane, cette diminution peut être liée à ce que la pouzzolane a besoin de plus de temps pour durcir (réaction à long terme),
- Par contre l'ajout de l'argile augmente la résistance à la flexion (26% de gain par rapport à l'échantillon non stabilisé),
- Aussi l'ajout de la fumée de silice a fait augmenter la résistance à la flexion (33% de gain par rapport à l'échantillon non stabilisé).

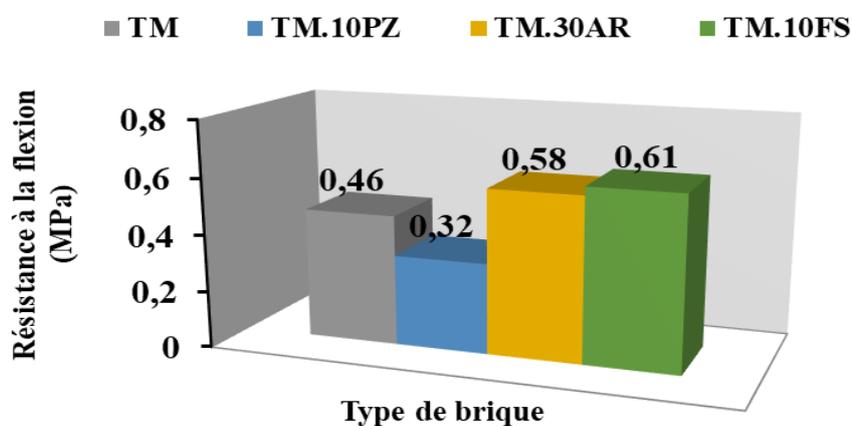


Figure IV.21 Résistance à la flexion de la BTC en fonction du type de stabilisant

III.3 Absorption capillaire

Le suivi de l'absorption par capillarité des briques en fonction du temps est illustré dans la figure IV.22, on remarque que :

- Deux phases d'absorption : Une première phase où le taux d'absorption est important jusqu'à 20 minutes. Dans la deuxième phase on remarque une faible augmentation du coefficient d'absorption jusqu'à stabilisation après une heure. Ce comportement est le comportement typique des matériaux poreux où l'absorption d'eau se fait progressivement jusqu'à un équilibre avec les conditions du laboratoire.
- On remarque aussi que l'ajout des différentes additions a fait diminuer l'absorption de la brique.
- La brique qui a montré le bon comportement avec le faible coefficient d'absorption capillaire c'est la brique stabilisée avec 10% de fumée de silice.

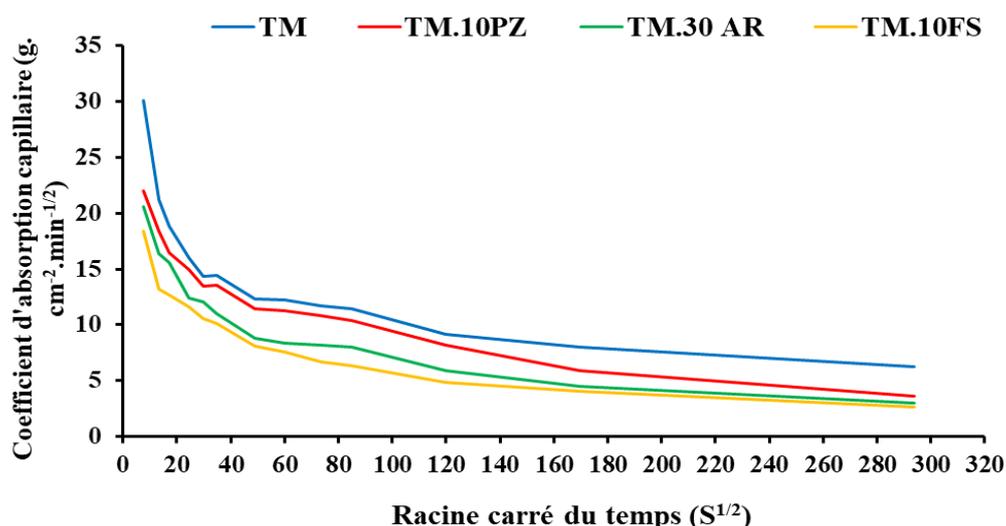


Figure IV.22 Coefficient d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps

III.4 Résistance à l'abrasion

L'essai de résistance à l'abrasion en réalité c'est l'effet du vent de sable sur les briques qui est A effet abrasif, ce qui se passe généralement dans les zones sahariennes.

La figure IV.23 illustre le coefficient d'abrasion obtenu pour les différents types de briques, où on note que :

- Le brique (TM) a présenté le coefficient d'abrasion le plus important 0,58 g/cm².
- L'ajout de la pouzzolane n'a pas montré une amélioration de la résistance à l'abrasion 0,41 g/cm².
- Par contre le brique stabilisée avec l'argile ainsi que le brique stabilisée avec la fumée de silice ont présenté une amélioration significative de la résistance à

l'abrasion. Pour la brique (T.30AR) on a un coefficient d'abrasion de $0,13 \text{ g/cm}^2$ et pour la brique (T.10FS) il est de $0,09 \text{ g/cm}^2$.

La norme AFNOR XP P13-901 nous donne un classement des briques selon son coefficient de résistance à l'abrasion où on peut classer la brique stabilisée avec 10% de fumée de silice et la brique stabilisée avec 30% d'argile dans la classe de résistance à l'abrasion Ab 1, et la classe Ab 3 pour la brique stabilisée avec 10% de pouzzolane. Par contre la BTC qui contient le tuf seul elle est hors classement avec un coefficient d'abrasion supérieur à $0,5 \text{ g/cm}^2$.

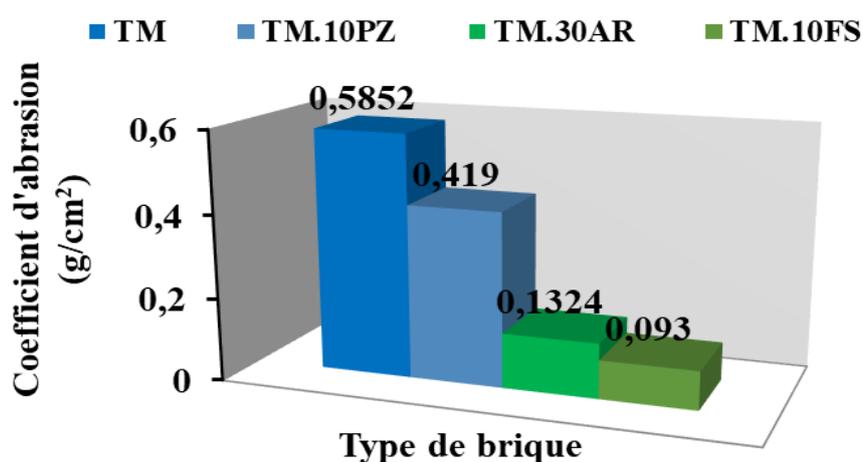


Figure IV.23 Coefficient d'abrasion de la BTC en fonction de type de stabilisant

La figure V.24 illustre l'état de l'ensemble des BTC après l'essai d'abrasion avec la brosse métallique. Il est bien remarquable que la brique stabilisée avec l'argile ainsi que celle stabilisée avec la fumée de silice ont bien résisté à l'effet abrasif de la brosse. On ne voit pas des rayures profondes, par contre pour la brique témoin et la brique stabilisée avec la pouzzolane les rayures profondes sont bien remarquables.

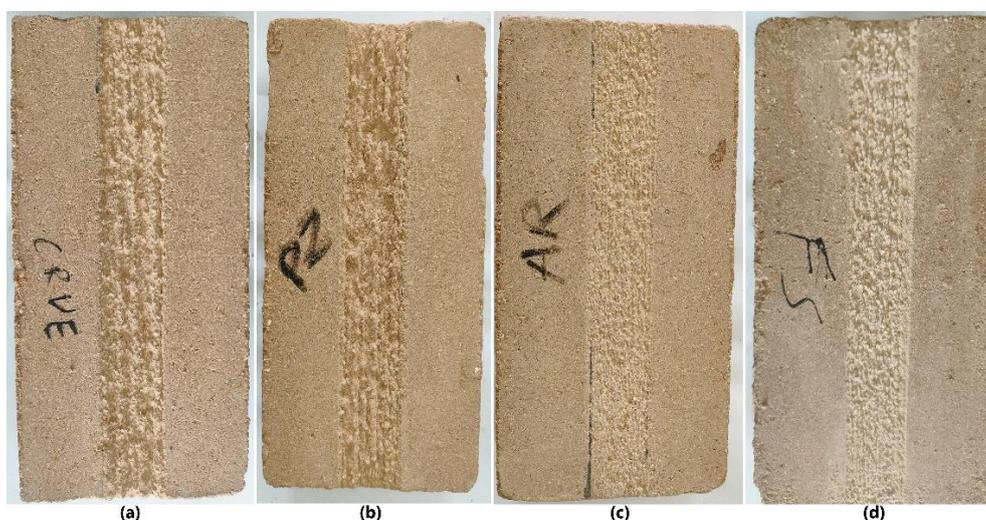


Figure IV.24 Etat des briques après essai d'abrasion, (a) TM, stabilisée, (b) T.10PZ, (c) T.30AR, (d) T.10FS

III.5 Tenue à l'eau par immersion

La figure IV.25 illustre la perte de masse en % par un essai d'immersion pour l'ensemble des briques, on remarque que :

- La perte de masse pour le Tuf seul (TM) est très importante, elle est de l'ordre de 9,59%.
- L'ajout de 10% de pouzzolane diminue cette perte de matière pendant l'essai d'immersion à 3,34%.
- La perte de masse est de 2,46% pour la brique stabilisée avec de 30% d'argile
- La brique stabilisée avec 10% de fumée de silice a montré une très bonne tenue à l'eau, on a enregistré une perte de masse minimale de l'ordre de 0,86%.

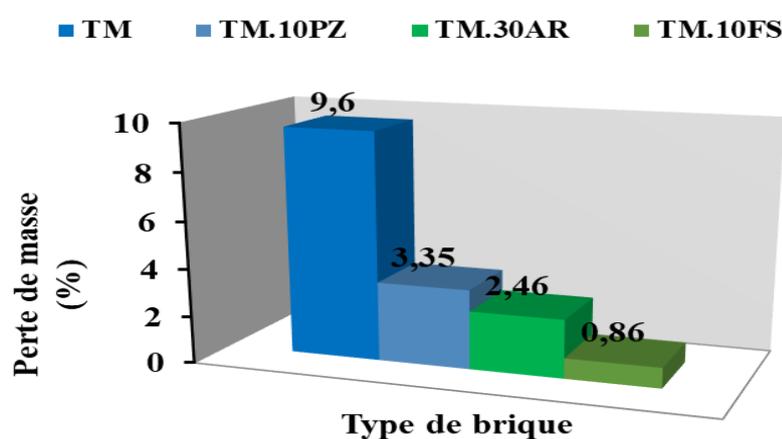


Figure IV.25 Tenue a l'eau par immersion en fonction de type de brique

La figure IV.26 qui montre l'état des briques après l'essai, on constate une dégradation de la surface suite à une perte de matière dans la partie immergée de brique non stabilisée et aussi dans la brique stabilisée avec la pouzzolane. Par contre aucune dégradation remarquable pour les briques stabilisées avec l'argile et la fumée de silice.

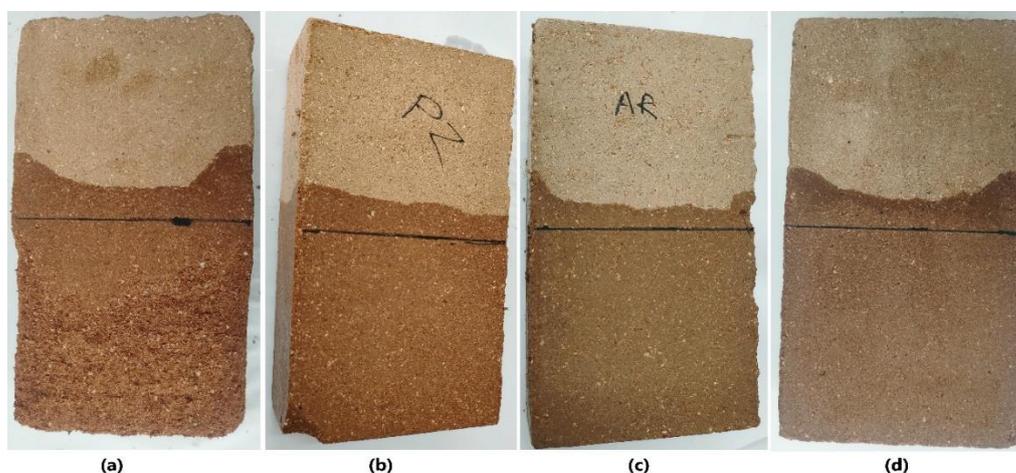


Figure IV.26 Etat des briques après l'essai de tenue à l'eau par immersion, (a) TM, stabilisée, (b) T.10PZ, (c) T.30AR, (d) T.10FS IV. Conclusion :

IV. Conclusion

A la suite de ce chapitre et à partir des résultats expérimentaux trouvés, on peut dire que les formulations présentant un bon comportement mécanique et thermique ont été soumises à des essais spécifiques afin d'évaluer leurs durabilités à travers des cycles de séchage/mouillages dans l'eau et les solutions salines. A la lumière de ces expérimentations on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'utilisation de la fumée de silice dans la stabilisation de notre sol offre les meilleurs résultats en termes de tenue à l'eau, résistance au chlorure, et résistance aux attaques sulfatiques externe. Ce qui rend notre brique stabilisée avec la fumée de silice capable d'être utilisée même dans des milieux agressifs.
- Pour l'ensemble des mélanges l'absorption par capillarité semble plus agressive que l'immersion totale à long terme. Cela s'explique par le fait que l'échantillon soumis à une absorption par capillarité est sollicité par deux phénomènes : une diffusion et une succion, alors que l'échantillon immergé totalement est soumis qu'à la diffusion.
- Selon le coefficient de résistance à l'abrasion, les briques stabilisées avec l'argile et la fumée de silice peuvent être utilisées dans les zones sahariennes ou le vent à un effet abrasif.
- A travers la perte de masse des briques soumises à une tenue à l'eau par immersion, les briques stabilisées avec l'argile et les briques stabilisées avec la fumée de silice peuvent être utilisées dans la construction des murs extérieurs soumises aux intempéries.

Chapitre 5 :

**Modélisation par
homogénéisation
numérique**

I. Introduction

La terre crue est un matériau composite et hétérogène dont sa modélisation s'avère difficile en raison de la diversité de ses composants et les additions ajoutées pour sa stabilisation. Plusieurs méthodes d'homogénéisation ont été mises au oeuvre pour transcender cette complexité. Parmi celles-ci, les méthodes linéaires, généralement analytiques qui conviennent pour les matériaux à comportement linéaire (Pipard, 2012). Les méthodes semi-analytiques permettant une certaine prise en compte de la non-linéarité et les méthodes d'homogénéisation purement numériques qui se sont imposées pour la caractérisation de matériaux aux comportements plus complexes et non-linéaires (Smit et al. 1998).

Dans ce chapitre, nous étudierons le comportement mécanique d'un mélange de tuf et de fumée de silice destiné à la fabrication de briques de terre comprimée. Une approche d'homogénéisation numérique sera adoptée, reposant sur un modèle non-linéaire pour la matrice de tuf et un modèle élastique linéaire pour les inclusions. Cette approche a pour objectif de modéliser le comportement du mélange et le valider via les résultats d'études expérimentales abordés précédemment dans le chapitre 4. La caractérisation des constituants et l'analyse microstructurale du matériau nous a permis de définir un Volume Élémentaire Représentatif (VER). Les simulations numériques comparées avec les tests expérimentaux nous permettront à la fin de cette partie de valider l'applicabilité de la méthode utilisée et évaluer la précision du modèle proposé.

II. Prélude sur les méthodologies d'homogénéisation

L'étude des propriétés macroscopiques d'un matériau composite hétérogène est fondamentalement ancrée dans la caractérisation fine des entités microscopiques, à savoir la taille, la forme, et la distribution des grains et des pores. Dans ce contexte, l'homogénéisation multi-échelle se présente comme un outil efficace.

Cette technique utilise un Volume Élémentaire Représentatif (VER), qui capte efficacement les attributs du milieu hétérogène, comme point de départ permettant ainsi l'évaluation du comportement macroscopique du matériau homogénéisé.

Le processus d'homogénéisation s'articule autour de trois étapes (Figure V.1) :

- Définition du VER: Identification d'un volume qui incarne de manière fiable les propriétés statistiques du milieu hétérogène.
- Localisation (Transition Macro-Micro): Les variables macroscopiques, comme le tenseur de déformation, sont utilisées pour prescrire les conditions aux limites microscopiques.
- Homogénéisation (Transition Micro-Macro): Selon Hill (1963), les variables macroscopiques sont calculées sur la base du comportement microscopique au sein du VER.

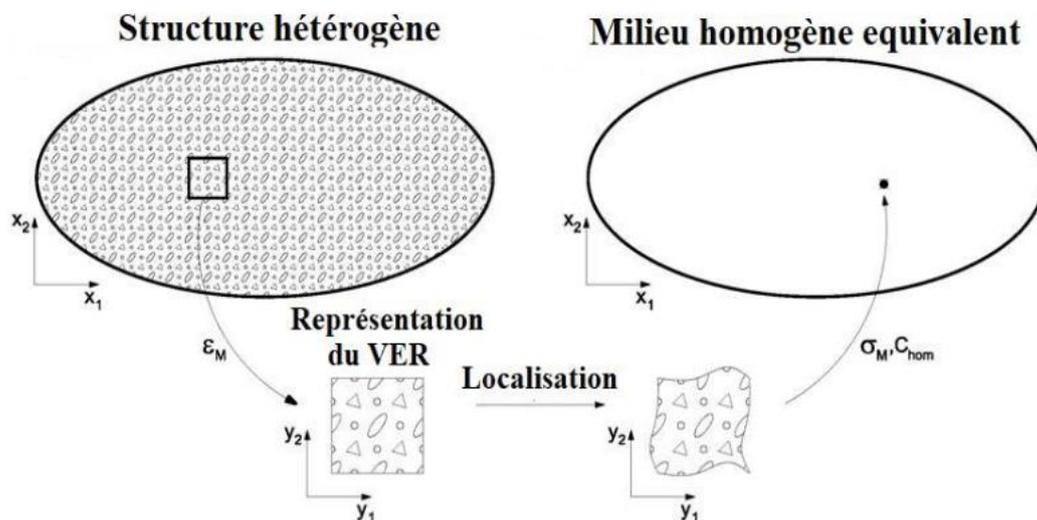


Figure V.1 : Etapes d'homogénéisation à deux échelles (Dahhaoui, (2018)).

Deux principales méthodologies sont couramment employées pour réaliser l'homogénéisation. Les méthodes analytiques, basées sur des équations différentielles et font appel à des solutions exactes ou approximatives, et les méthodes numériques, généralement des simulations par éléments finis ou méthodes stochastiques pour obtenir des approximations numériques. Le Tableau V.1 montre les avantages et limites de chacun de ces méthodes.

Tableau V.1 Avantages et Limites des Méthodes Analytiques et Numériques

Méthodologie	Avantages	Limites
Méthodes Analytiques	<ul style="list-style-type: none"> - Solutions exactes ou approximatives - Faible coût computationnel - Élégance mathématique 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité croissante avec la géométrie et les propriétés des matériaux - Approximations parfois nécessaires
Méthodes Numériques	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité pour traiter des géométries complexes - Applicabilité à une large gamme de matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût computationnel élevé - Nécessite des compétences en simulation numérique - Sensibilité aux conditions aux limites

II.2 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques offrent des avantages significatifs en termes de coût computationnel et de compréhension théorique. La transformée de Laplace-Carson permet de simplifier grandement les équations différentielles en convertissant les fonctions temporelles en des fonctions plus facile à manipuler dans le domaine de La

place (Doetsch, 2011). L'approximation de l'équation constitutive locale peut être effectuée via des expansions de Taylor ou des approximations polynomiales. L'impact de ces approximations sur les solutions d'homogénéisation doit être soigneusement examiné pour garantir la pertinence des résultats (Thouroude, (2012)).

Prenons l'exemple d'un matériau composite comme la terre crue. En appliquant la transformée de Laplace-Carson sur la loi de comportement élasto-viscoplastique de ses composants microscopiques, une linéarisation est possible. Cette linéarisation facilite ensuite la résolution du problème dans le domaine de Laplace, avant d'effectuer une transformée inverse pour revenir dans le domaine temporel. L'erreur d'approximation dans ce cas peut être évaluée en comparant les résultats avec des simulations numériques, telles que les analyses par éléments finis à l'échelle des microstructures (Fernandes (2009)).

Les méthodes analytiques, en particulier celles basées sur les transformées inverses de Laplace-Carson, offrent un cadre robuste pour la modélisation par homogénéisation des matériaux composites. Bien que des approximations soient nécessaires, leur influence sur la précision des résultats peut être quantifiée et minimisée, offrant ainsi un équilibre optimal entre exactitude et efficacité computationnelle.

II.3 Méthodes numériques

Les méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis (MEF), offrent une flexibilité sans précédent dans le traitement des géométries complexes et des lois de comportement des matériaux non-linéaires.

Considérons le cas d'un matériau composite comme la terre crue, qui présente des inclusions de matière organique et des phases minérales diverses. Pour aborder ce problème par cette méthode numérique, nous pourrions discrétiser un Volume Élémentaire Représentatif (VER) de la terre crue en un maillage d'éléments finis. Des lois de comportement élasto-viscoplastiques seront attribuées à chaque phase du matériau au niveau microscopique.

Ensuite, nous appliquerons les conditions aux limites appropriées pour simuler, par exemple, un chargement mécanique ou un déplacement. L'utilisation de solveurs itératifs permettrait de résoudre les équations d'équilibre mécanique au sein du VER. Les résultats de ces simulations vont permettre d'avoir des informations précieuses sur les réponses élastiques, visqueuses et plastiques de la terre crue à l'échelle macroscopique globale.

L'erreur d'approximation dans les méthodes numériques peut également être évaluée en comparant les résultats à des solutions analytiques ou avec les résultats des données expérimentales, si disponibles. Ainsi, malgré le coût computationnel élevé, les méthodes numériques offrent une voie viable pour résoudre des problèmes complexes et non-linéaires, notamment en l'absence de solutions analytiques.

III. Cellules unitaires et morphologies des inclusions

En raison des difficultés inhérentes à la résolution des problèmes non linéaires locaux, ces solutions sont généralement obtenues pour des hypothèses assez étroites concernant les lois de comportement et la morphologie de la microstructure. Plusieurs chercheurs ont étudié la morphologie de l'inclusion dans une homogénéisation numérique. Les simulations numériques multi-échelles effectuées par Wenan et al (2022) pour étudier les propriétés hydromécaniques efficaces d'un mélange sol-roche, aborderaient l'ajustement de quatre formes différentes : circulaire, carrée, hexagonale et elliptique, comme illustré sur la figure V.2. Ils ont trouvé que dans l'ensemble, l'influence de la taille et de la forme du bloc sont assez légères et peuvent être négligeable.

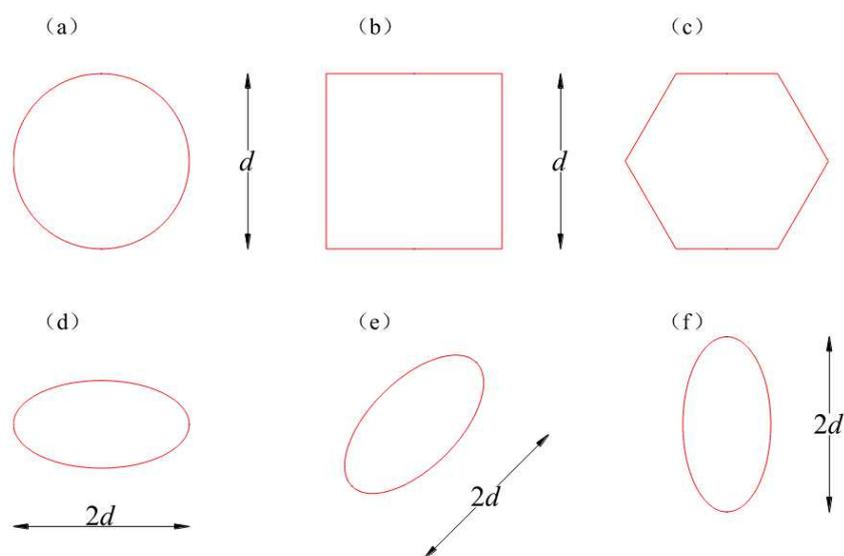


Figure V.2 : Définition de la taille pour des blocs de formes différentes. (a) En forme de cercle ; (b) De forme carrée ; (c) En forme d'hexagone ; (d) En forme d'ellipse avec l'angle d'orientation étant 0° ; (e) En forme d'ellipse avec l'angle d'orientation étant de 45° ; (f) En forme d'ellipse avec l'angle d'orientation étant de 90° (Wenan et al (2022))

La morphologie des inclusions minérales sur le comportement macroscopique d'une roche composite a été étudiée par Belayachi et al. (2012). Les différentes formes sphériques, cubiques, cylindriques et octogonales (figure V.3), étaient considérées comme des particules dures et sous forme de vides pour évaluer l'impact des différences de forme entre inclusions et pores. Les résultats de la simulation ont montré que pour les vides, l'impact de la morphologie sur les formes testées est négligeable, alors que pour les inclusions minérales, la forme des inclusions semble jouer un rôle qui est plus important pour la distribution des contraintes et les déformations, et il semble que l'impact de la morphologie de l'inclusion dépende aussi de sa rigidité.

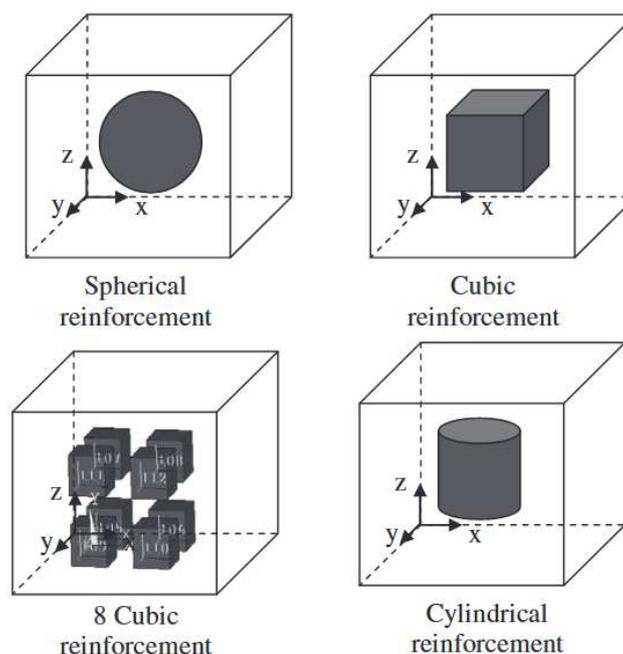


Figure V.3 : Cellule unitaire 3D géométrique schématique pour sphérique, cubique et renforcement cylindrique (Belayachi et al. 2012).

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une approche de modélisation numérique d'homogénéisation basée sur les méthodes de cellule unitaire et d'éléments finis pour évaluer les réponses mécaniques effectives de notre matériau. Tout d'abord, des analyses de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été observées afin de sélectionner de manière appropriée le volume élémentaire représentatif (VER). Le choix du VER est crucial pour s'assurer que le volume modélisé est suffisamment représentatif du matériau hétérogène réel. Dans un second temps, nous avons étudié l'effet de la morphologie des inclusions sur le comportement macroscopique.

La figure V.4 montre les différentes formes d'inclusions qui seront testées dans la partie suivante du présent chapitre. Les simulations par éléments finis seront réalisées en faisant varier ces formes géométriques au sein de la microstructure. Les courbes contrainte-déformation obtenues pour les différentes morphologies seront ensuite comparées afin d'évaluer l'influence de la forme des inclusions sur la réponse mécanique macroscopique non linéaire de notre matériau. Cette approche va nous permettre d'étudier numériquement comment les propriétés microscopiques impactent le comportement global observé.

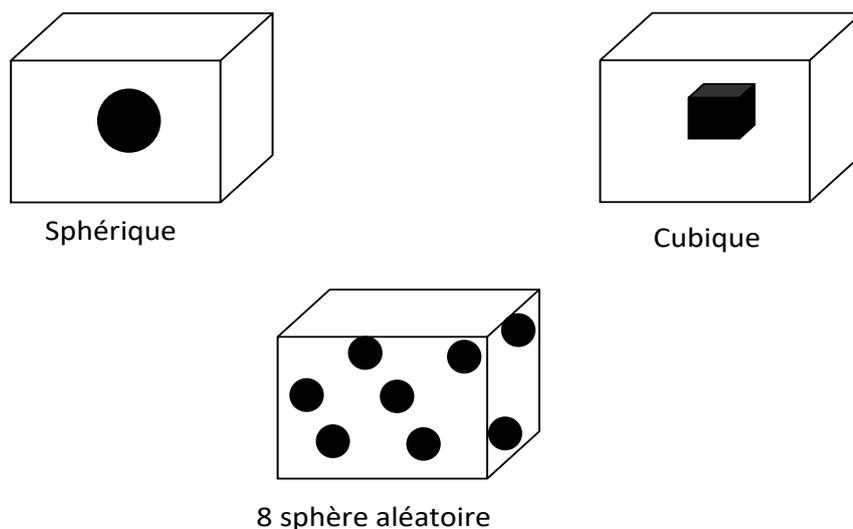


Figure V.4 : Représentation schématique 3D de la cellule unitaire pour le renforcement sphérique, cubique et aléatoire à 8 sphères

IV. Modélisation numérique du matériau BTC

Comme mentionné précédemment, la microscopie électronique à balayage (Figure V.5) est utilisée pour décrire le volume élémentaire représentatif (VER) du matériau, tenant compte de la distribution spatiale des phases et des grains de fumée de silice dans le tuf. La porosité intrinsèque du matériau BTC, observée sur les images MEB, est prise en compte dans la matrice à base de tuf. Trois géométries différentes de cellules unitaires sont modélisées par éléments finis, conformément aux formes présentées en figure V.4 : une sphère, un cube, et une cellule contenant 8 sphères positionnées aléatoirement. Le positionnement et la taille relative des inclusions dans la cellule unitaire sont définis de manière à s'approcher de la microstructure observée au MEB.

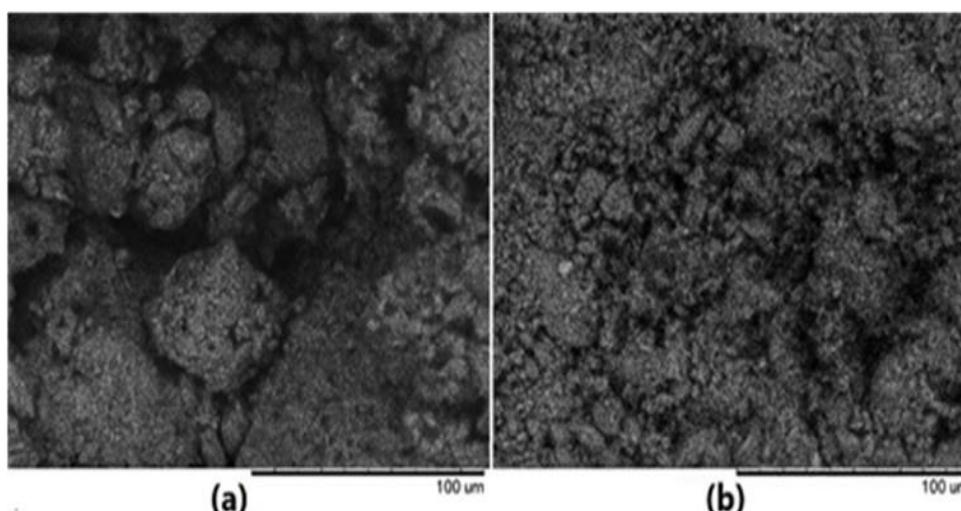


Figure V.5 : Microscopie électronique à balayage (a) Tuf+8% fumée de silice, (b) Tuf+ 10% fumée de silice

La résolution numérique du VER prend en compte les hétérogénéités locales et l'interaction entre les différents constituants. Les contraintes et déformations sont ensuite homogénéisées pour remonter à la réponse macroscopique effective du matériau composite. Cette démarche numérique rigoureuse est cruciale pour assurer la qualité de la prédiction fournie par le modèle multi-échelle.

IV.1 Comportement local des constituants

L'utilisation de la méthode d'homogénéisation numérique par le biais de simulation sous le code de calcul ANSYS est particulièrement utile pour résoudre d'une part, l'équation du comportement de la matrice à base de Tuf NLISO (Eq.1) et construire d'autre part, un modèle macroscopique (contrainte-déformation) du matériau composite (tuf+silice).

Le fumé de silice est décrit par un comportement élastique linéaire. Les composants macroscopiques de contrainte-déformation sont calculés par la moyenne volumique des composants microscopiques (Eq.2).

$$H(\varepsilon_e^p) = R_0 \cdot \varepsilon_e^p + R_{inf} \cdot (1 - e^{-b \cdot \varepsilon_e^p}) \quad (1)$$

Où R_0 , R_{inf} , b sont des paramètres matériau caractérisant le comportement d'écrouissage isotrope des matériaux.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV \quad (2)$$

Les dimensions du volume élémentaire représentatif (VER) dépendent de la taille des grains de fumée de silice. Les fractions volumiques des deux phases (matrice et inclusion) satisfont la partition unitaire (Eq.3).

$$f_t + f_s = 1 \quad (3)$$

Les paramètres élastiques des constituants sont issus de données de la littérature (Chiarelli et al., 2007). Les propriétés mécaniques décrivant le comportement non linéaire de la matrice ont été identifiées par la méthode des moindres carrés à partir des données expérimentales (Tableau V.2).

Tableau V.2 Paramètre mécanique du matériau

Propriétés mécaniques		Matrice du sol	Fumée de silice
Paramètres élastiques Giraud et all (2007)	E (MPa)	84000	96400
	ν	0,3	0,08
Paramètres du modèle	σ_0 (MPa)	0.009	
	R_0 (MPa)	50.47	
	R_{inf} (MPa)	1.515	
	b (MPa)	100.05	

IV.2 Maillage et conditions aux limites

Les conditions aux limites de symétrie utilisées sont identiques à celles de l'étude de Belayachi et al. (2012). Des conditions de symétrie sont appliquées sur deux faces ($x = 0$; $y = 0$) de la cellule unitaire, des conditions de périodicité sont imposées sur la face ($X=R$) et un déplacement uniforme selon l'axe x est imposé pour réaliser un chargement de compression uniaxiale.

Le chargement uniaxial est simulé en imposant le déplacement uniforme selon l'axe y sur la face ($Y = H$). R désigne le rayon initial de la cellule unitaire, H sa hauteur initiale et r le rayon initial de l'inclusion sphérique (Figure V.6).

Des éléments finis tétraédriques quadratiques (SOLID187) sont utilisés pour le maillage. Ce type d'élément est bien adapté pour représenter les fortes variations de contrainte/déformation au voisinage des inclusions.

La convergence du maillage a été étudiée en comparant les résultats numériques à des solutions analytiques et à des résultats expérimentaux. Cette analyse a permis de déterminer un maillage optimal, généré automatiquement avec un raffinement localisé dans la zone des inclusions (Figure V.6). Ce raffinement au niveau de l'interface matrice/inclusion est indispensable pour capturer précisément les concentrations de contrainte. Un rapport de taille de maille de 1:5 entre l'inclusion et la matrice s'est avéré un bon compromis précision/temps de calcul.

L'application rigoureuse des conditions aux limites et le choix d'un maillage adapté sont donc deux étapes cruciales pour assurer la qualité des simulations par éléments finis sur cellules unitaires.

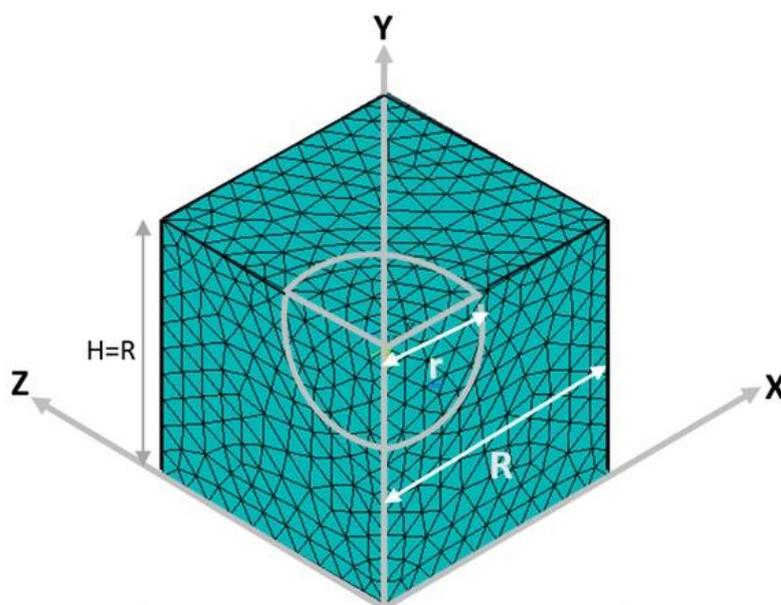


Figure V.6 : Exemple du maillage pour le cas d'une inclusion sphérique

V. Résultats et discussions

V.1 Test de compression uni-axiale

Afin de déterminer expérimentalement les propriétés mécaniques des matériaux étudiés, des essais de compression uni-axiale ont été réalisés selon la norme EN 1015-11/A1. Le dispositif utilisé comprend une presse hydraulique instrumentée avec un capteur de force de 50 kN. Les échantillons cylindriques ont été chargés à vitesse constante de 1 mm/min, avec un soin particulier apporté au parallélisme des surfaces en contact avec les plateaux.

L'objectif de ce test est d'obtenir les courbes contrainte-déformation et les résistances à la rupture en compression simple des deux formulations testées. Ces données expérimentales serviront de référence pour la comparaison avec les simulations numériques par éléments finis présentées dans la partie suivante de ce chapitre.

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure V.7. On constate que l'échantillon avec 10% de fumée de silice (FS) présente une contrainte à la rupture plus élevée que celui avec 8% FS, pour un même niveau de déformation. Ceci met en évidence l'influence positive du dosage en fumée de silice sur la résistance en compression du mélange de sol étudié.

En effet, la fumée de silice est un matériau ultra-fin qui vient combler les pores du sol, conduisant à une densification de la microstructure. Les échantillons enrichis en FS peuvent donc supporter des contraintes plus importantes avant d'atteindre leur point de rupture. De plus, la réaction pouzzolanique des particules de FS avec la chaux du sol génère des hydrates supplémentaires (C-S-H) qui consolident la matrice et améliorent ses propriétés mécaniques.

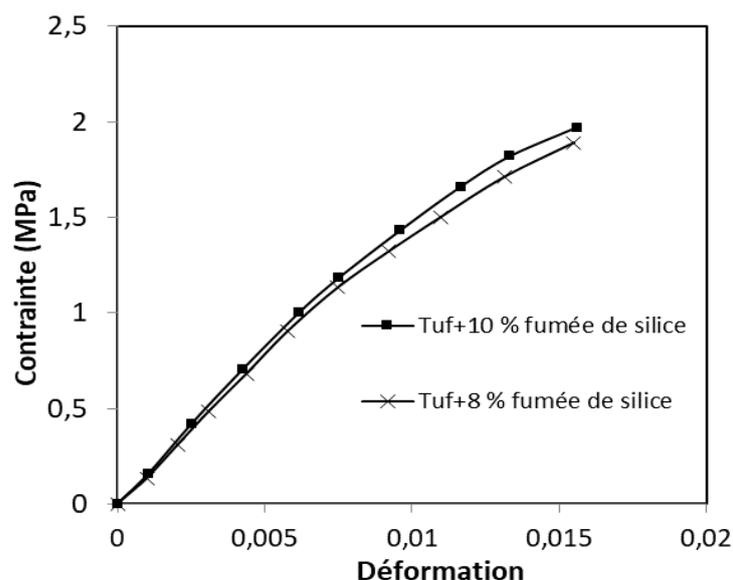


Figure V.7 : Courbe contrainte déformation des deux mélanges

V.2 Effet de la fraction volumique de silice

Afin d'évaluer numériquement l'influence du dosage en fumée de silice sur le comportement mécanique des mélanges, des simulations par éléments finis d'essais de compression uni-axiale ont été réalisées en faisant varier la fraction volumique de FS. Trois types d'inclusions ont été testés : sphérique unique, cubique unique et 8 inclusions sphériques. Les propriétés mécaniques du modèle sont issues du tableau V.2.

Les résultats présentés sur la figure V.8 montrent que l'effet de la teneur en FS dépend fortement de la forme des inclusions. Pour une inclusion sphérique isolée, l'augmentation de 8 à 10% ne provoque qu'une légère différence sur la courbe contrainte-déformation. En revanche, avec une inclusion cubique, on observe un gain significatif de rigidité avec 10% de FS par rapport à 8%. Ceci s'explique par le fait que la forme cubique conduit à une densification plus importante de la matrice pour un même dosage.

Pour le cas de 8 inclusions sphériques, les courbes se superposent quasiment pour les deux fractions volumiques. Il semblerait donc qu'à partir d'un certain seuil de densification assuré par les inclusions, l'effet bénéfique d'un supplément de FS soit négligeable.

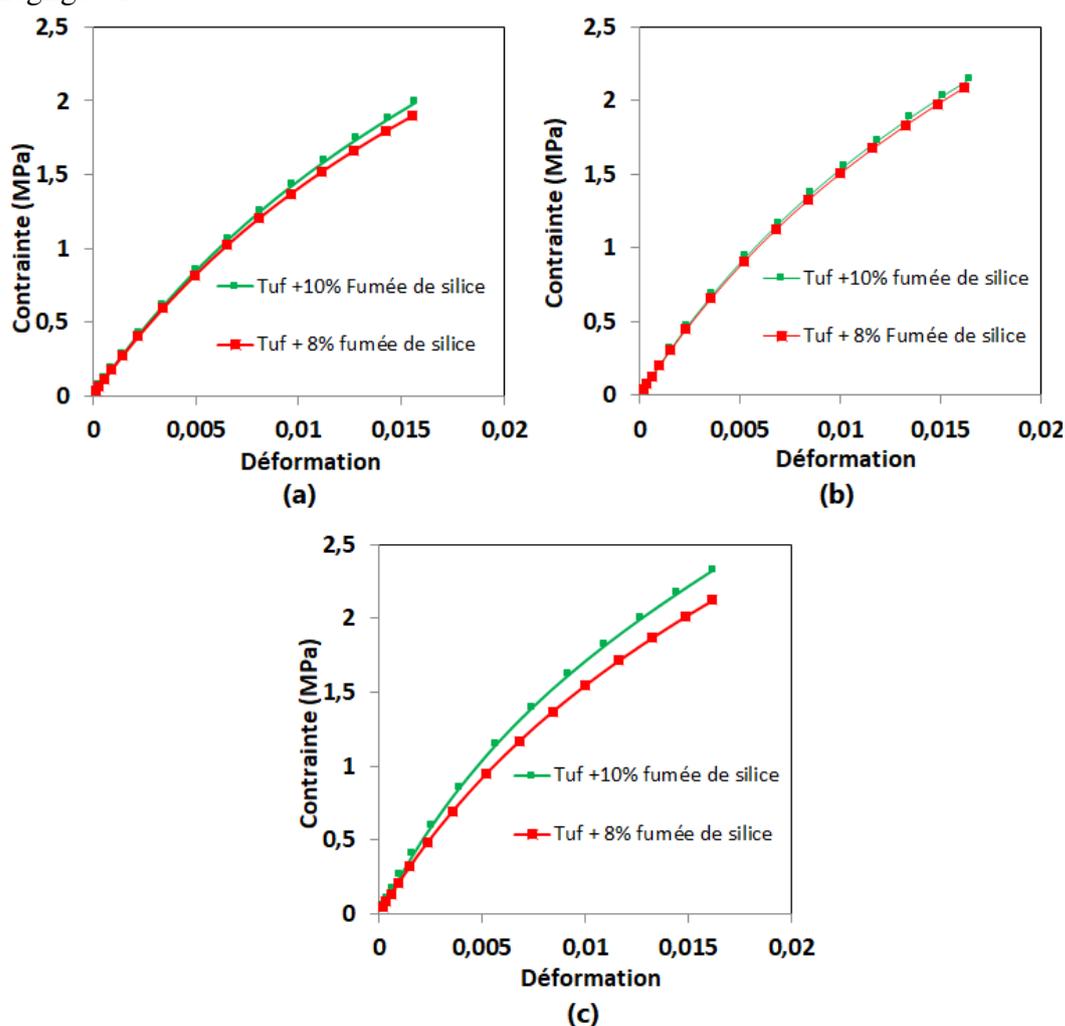


Figure V.8 : Comportement macroscopique contrainte/déformation pour (a) inclusion sphérique, (b) 8 inclusion sphérique, (c) inclusion cubique

Ces résultats mettent en évidence que l'influence positive de la fumée de silice sur les propriétés mécaniques dépend à la fois du dosage mais aussi de la disposition géométrique des inclusions. Pour confirmer ces tendances, des essais expérimentaux complémentaires sont nécessaires en faisant varier la morphologie des inclusions de FS. L'approche numérique permet néanmoins d'identifier des pistes prometteuses pour optimiser le renforcement apporté par cet ajout minéral.

V.3 Effet de la morphologie des inclusions

La figure V.9 met en évidence l'importance de la forme des inclusions de silice, avec une différence de 12% entre les inclusions sphériques et cubiques pour le mélange (sol + 10% fumée de silice), et de 18% pour le mélange (sol + 10% fumée de silice). Cet effet est particulièrement marqué pour des niveaux de contrainte et de déformation élevés.

On constate également que l'impact de la forme des inclusions sur la réponse effective du matériau composite est plus important lorsque la rigidité des inclusions augmente (comme dans le cas d'inclusions cubiques). Ce résultat est cohérent avec d'autres travaux, tels que ceux de Belayachi et al. (2012), qui ont montré que les contraintes sont moins concentrées dans les inclusions rigides de forme anguleuse. Les coins et arêtes vives ont tendance à créer des zones de plasticité locale avec de forts gradients, ce qui réduit les contraintes dans ces zones singulières.

Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte la forme et la rigidité relatives des inclusions lors de la conception de matériaux composites. La distribution spatiale des inclusions ainsi que leurs interactions mutuelles sont également des paramètres clefs qui peuvent impacter les propriétés effectives. Des modélisations numériques fines permettant de simuler la microstructure réelle sont nécessaires pour optimiser la composition et la microstructure de ces matériaux hétérogènes.

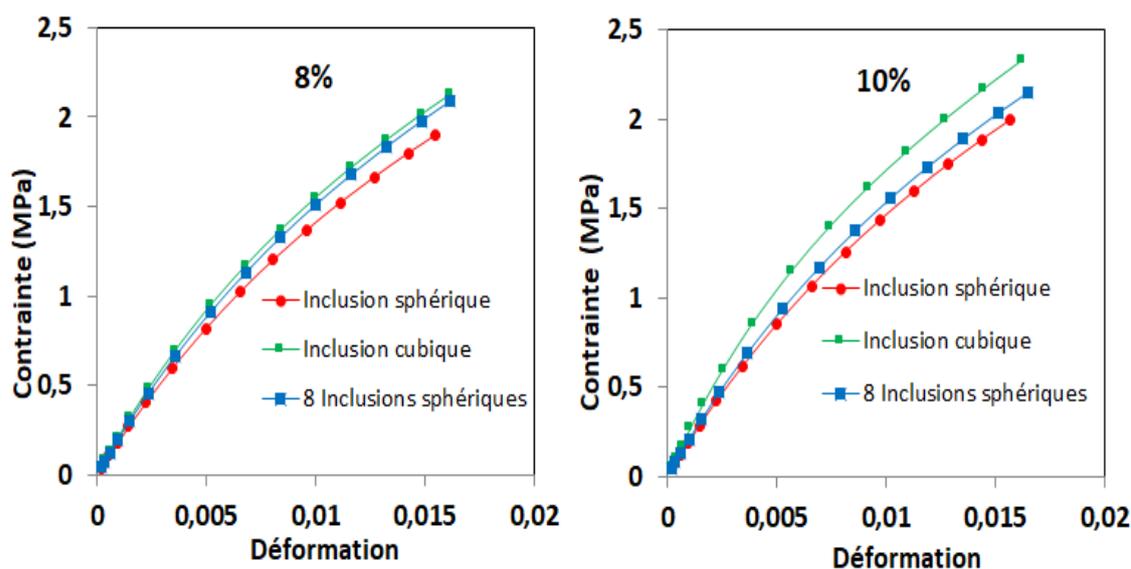


Figure V.9 : Effet de la morphologie de l'inclusion sur le comportement contrainte/déformation pour les deux teneurs en fumée de silice

V.4 Comparaison avec l'expérimental

La figure V.10 compare les courbes contraintes-déformations obtenues avec les différentes formes d'inclusions aux résultats expérimentaux. On constate que les réponses des inclusions sphériques et ellipsoïdales sont très proches, excepté pour les inclusions cubiques où la rigidité augmente avec la teneur en fumée de silice.

Les courbes pour les inclusions sphériques et les résultats expérimentaux se superposent parfaitement pour les deux teneurs en fumée de silice. Cela implique que la forme sphérique représente le mieux la microstructure réelle des particules de fumée de silice dans le composite.

Cette observation est cohérente avec d'autres études, comme celle de Armengaud (2016), qui a montré par analyse MEB que les particules de fumée de silice sont de forme approximativement sphérique, de taille nanométrique autour de 0.1 μm . D'après Aïtcin et Mindess (2013), la grande surface spécifique de ces nano-sphères favorise la formation de liens durables avec la matrice cimentaire.

Pour confirmer ces hypothèses, il serait intéressant de compléter l'étude numérique par des observations microstructurales directes via des images de tomographie aux rayons x, permettant une analyse plus fine de la distribution de taille, de la sphéricité et de l'agencement spatial des inclusions et pourrait permettre d'affiner encore la représentativité du modèle par éléments finis.

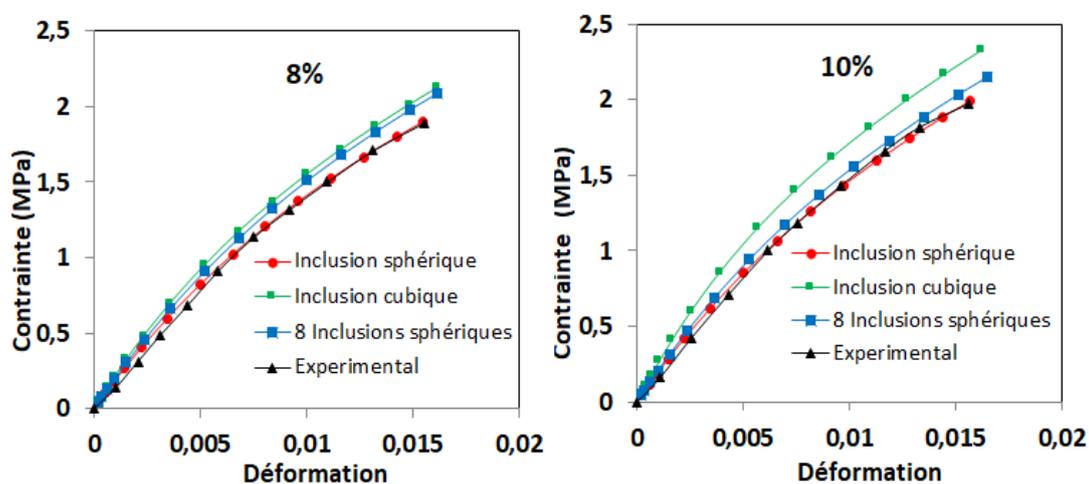


Figure V.10 : Comparaison du comportement de contrainte/déformation pour les différentes inclusions avec l'expérimental

VI. Conclusion :

La récente étude que nous avons menée souligne avec force l'importance cruciale de la forme des inclusions de silice dans la modélisation des matériaux biphasés, particulièrement dans le contexte de briques en terre comprimée avec une matrice en tuf. Nos simulations ont mis en exergue que cette forme ne peut être ignorée, surtout dans des situations où les contraintes et déformations macroscopiques sont élevées. En effet,

lorsque la rigidité est amplifiée, comme c'est le cas pour des inclusions de forme cubique, l'impact sur la réponse effective est d'autant plus notable.

Nos observations tant expérimentales que numériques suggèrent que l'inclusion sphérique reflète de la manière la plus fidèle la microstructure réelle des grains de fumée de silice. Ceci est essentiel pour reproduire les caractéristiques naturelles de ces matériaux et, par conséquent, obtenir des modèles précis et fiables.

La méthode que nous avons adoptée, axée sur une microstructure périodique et faisant appel à la technique des éléments finis, s'est avérée particulièrement efficace pour traiter les complexités associées au comportement viscoplastique non linéaire des matériaux biphasés. La validation des résultats numériques par des tests expérimentaux renforce notre confiance dans la pertinence de ce modèle de microstructure simplifié.

Il est également clair, d'après nos résultats, que la quantité de fumée de silice et la morphologie de l'inclusion jouent un rôle prépondérant dans la détermination du comportement macroscopique. Ceci contraste avec certaines approches analytiques qui, bien qu'elles soient utiles dans certains contextes, se basent souvent sur des hypothèses simplificatrices, supposant des formes régulières pour les inclusions, qu'elles soient sphériques ou elliptiques.

En somme, pour une modélisation précise et efficace des briques en terre comprimée à matrice en tuf, l'importance de la forme et de la morphologie des inclusions de silice est indiscutable. Leur prise en compte minutieuse est impérative pour assurer l'intégrité et l'exactitude des simulations par homogénéisation.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre de la valorisation des sols compactés, destinés à l'éco-construction en faveur du développement durable. Nous nous concentrons sur l'amélioration des performances de la Brique de Terre Compressée (BTC) en utilisant des ressources locales telles que le tuf de Béni-saf, actuellement en abandon, la fumée de silice, un déchet industriel, l'argile de Boughrara, et la pouzzolane de Béni-saf, l'une des ressources les plus abondantes de la région, encore sous-utilisée aujourd'hui. En utilisant ces additions, nous avons caractérisé le comportement mécanique de la BTC ainsi que sa sensibilité à l'eau et aux solutions salines.

A travers l'ensemble des investigations élaborées dans le cadre de cette thèse on peut émettre les conclusions suivantes :

Point de vue mécanique :

- La caractérisation géotechnique n'est pas suffisante pour dire que le sol peut être utilisée dans la fabrication des BTC, une caractérisation physico-chimique est indispensable afin d'identifier les différents minéraux présents dans ce sol pour choisir le stabilisant le plus adéquat qui peut réagir avec ces minéraux et rendre notre brique plus résistante répondant ainsi aux normes en vigueur.
- L'ajout de la fumée de silice conduit à l'amélioration de la résistance à la compression à jeune âge.
- L'ajout d'argile à des sols riches en calcaire offre des résistances à la compression significatives, avec un gain de plus de 100% après l'ajout de 30% d'argile.
- Le processus de cure et le pourcentage de teneur en eau de l'échantillon ont une grande influence sur l'évolution de la résistance à la compression.

Point de vue thermique :

- L'ajout de la fumée de silice et la pouzzolane conduit à une diminution de la conductivité thermique et amélioration du confort thermique, suite à la diminution de la densité des échantillons après l'ajout de ces deux types d'additions.
- L'ajout de l'argile augmente la conductivité thermique des échantillons suite à la diminution de la porosité de l'échantillon et l'augmentation de sa densité en présence des fines argileux.
- La méthode de cure des échantillons à une grande influence sur les propriétés thermiques de la brique, les échantillons soumis à une cure humide ont montré

une conductivité thermique supérieure à celle des échantillons soumis à une cure à l'air libre.

Point de vue hydrique :

- Les échantillons non stabilisés ne montrent pas un bon comportement en présence d'eau, ce qui les rend très sensible à l'eau, et commencent à s'effriter après quelques minutes.
- L'ajout des différents additions réduit la capillarité de la brique par la diminution de la structure poreuse suite au colmatage des pores par les fines et la création des liaisons dans la matrice du sol.

Point de vue durabilité :

- La fumée de silice améliore la durabilité des briques en présence d'eau et même en présence des chlorures et des sulfates, par contre l'argile semble plus résistante en présence d'eau et même en présence de chlorure mais il est très fragile en présence des sulfates, et enfin les échantillons stabilisés avec la pouzzolane sont très sensibles en présence de chlorures et de sulfates et un peu résistant en présence d'eau seul.
- L'absorption par capillarité semble plus agressive que l'immersion totale, les échantillons soumis à une absorption par capillarité se dégradent plus vite que ceux soumis à une immersion totale. On peut expliquer ceci ça par le fait que dans le cas d'une absorption capillaire l'échantillon est soumis à la fois à une diffusion et une succion, par contre dans une immersion totale l'échantillon est soumis qu'à la diffusion.
- En termes de résistance à l'abrasion la brique stabilisée avec 10% de fumée de silice et celle stabilisée avec 30% d'argile ont montré une très bonne résistance à l'abrasion où on peut les utiliser selon la norme dans la réalisation des parois extérieurs. Par contre la brique stabilisées avec 10% de pouzzolane et celles non stabilisées n'ont pas montré un bon comportement à l'abrasion.

Afin de compléter cette étude sur les éco-matériaux, nous proposons les axes de recherches suivants :

- Faire une analyse chimique approfondie sur les sols et stabilisants constituants la BTC. Ceci afin de savoir exactement ce qui se passe en termes de réactions chimiques, des liaisons créés, et aussi les minéraux apparus après stabilisation.
- Réalisation des murets tests et les exposer aux conditions climatiques réelles.
- Modélisation numérique de la brique par un couplage thermo-hydro-mécanique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adam, E.A. and Agib A.R. *Compressed Stabilized Earth Block Manufacture in Sudan*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, July 2001.

AFNOR Standards- XP P13-901: Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions - Specifications - Test methods - Delivery acceptance conditions, October 2001.

ASTM D559, Wetting and Drying Compacted Soil- Cement Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989.

Aïtcin, P.-C. & Mindess, S., Ecostructures en béton : Comment diminuer l’empreinte carbone des structures en béton. Eyrolles. Jouve, Mayenne, France 2013.

Ajouguim , S. Talibi , C. Djelal-Dantec , H. Hajjou , M. Waqif , M. Stefanidou , L. Saadi Effect of Alfa fibers on the mechanical and thermal properties of compacted earth bricks. *Materials today: proceedings*. 37. 10.1016/j.matpr.2020.07.539 (2020)..

Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. *Quarterly*

Al Rim. K., A. Ledhem, O. Douzane, R.M. Dheilily, M. Queneudec, Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites, *Cem. Concr. Compos.* 21 (4) (1999) 269–276.

Alrtimi, A., M. Rouainia, and S. Haigh. —Thermal Conductivity of a Sandy Soil. *Applied Thermal Engineering* 106 (August 2016): 551–560. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.06.012.

Anglade.E, (juillet 2022), « Évaluation des performances des matériaux en terre crue par homogénéisation poro-mécanique analytique non linéaire », Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 - Paul Sabatier.

Armengaud, Julie. (2016). Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche, Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier).

Azeredo, G., Morel, J.C., Barbosa, N.P. *Compressive strength testing of earth mortars*. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, Vol. 1, N° 1, pp. 26 - 35, 2007.

Bachar, M, .L. Azzouz, M. Rabehi, and B. Mezghiche, “Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermomechanical properties: Experimental study and modeling,” *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 259–267, 2015

Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. *Performance of compacted cement stabilised soil*. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633- 641, 2004.

Barbero-Barrera M. Mar, Félix Jové-Sandoval, Sonia González Iglesias, 2020, Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks, *Construction and Building Materials*, Vol 260, 119877, ISSN 09500618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119877>.

- Beck, K. M. Al-Mukhtar,** (2010). Evaluation of the compatibility of building limestones from salt crystallization experiments, Geological Society of London, SP 2010, Vol. 333, p.111-118. doi:10.1144/SP333.11
- Belayachi, N., Beck, K., & Sghaier, C.** (2020). Comportement d'enduits à porosité contrôlée vis-à-vis de l'attaque au sel. *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(1), 241-244. <https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.5>
- Belayachi, N., Do, D. P., & Hoxha, D.** (2012). A note on the numerical homogenisation of the mechanical behaviour of an argillaceous rock. *Computers and Geotechnics*, 41, 70–78
- Bell FG.** Methods of treatment of unstable ground. New nes-Butterworth, London, 1975.
- Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS.** *Soft Ground Improvement* Blocks. Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.
- Bindiganavile, V. and Banthia, N.,** 'Rebound in Dry-mix Shotcrete: Influence of Type of Mineral Admixture', *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 2, Mar-Apr 2000, pp. 115-119.
- BLIEFERT C., PERRAUD R.** Chimie de l'environnement – Air, eau, sols, déchets De Boerck Université, 2001,477 p.
- Bogas. J.A. et al.,** Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates, *International Journal of Architectural Heritage* 13 (4) (2019) 569–584, <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- Boussaa. N, Fatma Kheloui, Nasser Chelouah,** Mechanical, thermal and durability investigation of compressed earth bricks stabilized with wood biomass ash, *Construction and Building Materials*, Volume 364, 2023, 129874, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129874>.
- Bowles, J.E.** Foundation Analysis and Design, 5th ed., McGraw-Hill, 1996
- Bui, Q.B.** *Stabilité des structures en pise: Durabilité, caractéristiques mécaniques.* Thèse, INSA Lyon, 250 p., 2008.
- Cabane N.** *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation,* Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne, Université Jean Monet, 182 p, 2004.
- Chan, C. M.** "Effect of natural fibers inclusion in clay bricks: physico-mechanical properties," *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 3, pp. 51–57, 2011.
- Chiarelli. A.S, J.F. Shao, N. Hoteit,** Modeling of elastoplastic damage behavior of a claystone, *International Journal of Plasticity*, Volume 19, Issue 1, 2003, Pages 23-45, ISSN 0749-6419,
- Collet, F.** *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil a faibles impacts environnementaux.* Thèse, INSA Rennes, 252 p., 2004.
- DAHHAOUI. H, (2018),** « Influence de la non saturation et de la température sur le fluage des sols argileux », Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr. Belkaid, Tlemcen.
- Danso H, Adu S** (2019) Characterization of Compressed Earth Blocks Stabilized with Clay Pozzolana. *J Civil Environ Eng* 9: 331.

Danso, H. D. B., Martinson, M. Ali, and J.B. Williams, “Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres,” *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 797–809, 2015.

Danso, H. *Use of agricultural waste fibres as enhancement of soil blocks for low-cost housing in Ghana* [Ph.D. thesis], School of Civil Engineering and Surveying, University of Portsmouth, 2016, <http://eprints.port.ac.uk/id/eprint/20762>.

DeJong-Hughes J, Moncrief JF, Voorhees WB, Swan JB. *Soil Compaction: Causes, Development* Technology Unit, Warwick University, 2001.

Didier. G et Ghomari. F (1990) *Méthodologie d'étude au laboratoire de la tenue à l'eau du matériau terre*. I.N.S.A. Département génie civil Laboratoire Géotechnique p393

Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. *Construire en terre*. Editions Alternatives doctorat de l'Université d'Artois, France, 2009.

Drugan, W. J., & Willis, J. R. (1996). A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(4), 497–524.

DTRC3-2, Thermal regulation of residential buildings e calculating methods for determining building heat losses, CNERIB, Algiers [in French] www.cnerib.edu.dz, 1997.

Duan, X.L., J. S. Zhang, Mechanical properties, failure mode, and microstructure of soil-cement modified with fly ash and polypropylene fiber, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019

Eades, JL, Grim, RE. *A quick test to determine lime requirements for lime stabilization*. Highway Research Board Bulletin, n°139, 61-72, 1966.

El Fgaier F. *Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue*. Thèse, ECOLE CENTRALE DE LILLE, 2013. et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979.

EN 12370 STANDARD. 1999. Natural stone test methods – determination of resistance to salt crystallization.

NF EN 993-15 (2005-10-01): Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses -Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)

Fernandes, Roméo (2009) « Modélisation numérique objective des problèmes couplés hydromécanique dans le cas des géo matériaux ». (Thèse de doctorat).

Feyel. F., “Multiscale FE2 elastoviscoplastic analysis of composite structures,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 16, no. 1–4, pp. 344–354, 1999.

Giraud A, Huynh QV, Hoxha D, Kondo D. Effective poroelastic properties of transversely isotropic rock-like composites with arbitrarily oriented ellipsoidal inclusions. *Mech Mater* 2007;39:1006–24.

Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks.

Guettala, A. Abibsi, H. Houari, *Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure*, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 119–127,

- Guillaud H., Joffroy T., Odul P** 1985 Compressed Earth Blocks. Manual of Design and Construction. Volume 2 (1985)
- Hachichi A., Fleureau J-M.** 1999, Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie, *Revue Française Géotechnique* N°86, pp. 37-51,
- Hakimi, A. M. El Kortbi, H. Ouissi, N. Yamani.** *Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment.* *Materials and Structures*, Vol. 31, pp.20 - 26, 1998.
- Hall, M., Djerbib, Y.** *Moisture ingress in rammed earth: Part 3 - Sorptivity, surface receptiveness and surface inflow velocity.* *Construction and Building Materials*, Vol. 20, N° 6, pp. 384 - 395, 2006.
- Hall, Matthew R.** *Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber.* *Building and Environment*, Vol. 42, N° 1, pp. 139 - 145, 2007.
- Heathcote, K, and Piper R.** Strength of Cement Stabilised Pressed Earth Blocks with Low
- Heathcote, Kevan Aubrey** *An investigation into the erodibility of earth wall units.* These, University of Technology, Sydney, pp. 272, 2002.
- Hill, R.** (1963). Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles. *Journal of*
- Houben H, Guillaud H.** *Earth construction –a comprehensive guide.* London: Intermediate Technology; 1994.
- Houben H, Guillaud H.** *Traité de construction en terre.* CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- Houben H. Guillaud H.** *Earth construction: A comprehensive guide.* U.S.A: Intermediate technology publications. University of Michigan, 1994.
- Houssame Limami, Imad Manssouri, Othmane Noureddine, Silvia Erba, Hassane Sahbi, Asmae Khaldoun,** Effect of reinforced recycled sawdust-fibers additive on the performance of ecological compressed earth bricks, *Journal of Building Engineering*, Volume 68, 2023, 106140, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106140>.
- Hussain, M.; Zmamou, H.; Provost, A.; Mahieu, A.; Leblanc, N.; Levacher, D.; Chenot, E.; Kane, A.** Feasibility for the Recovery of Excavated Soils in Compressed Earth Blocks as a Sustainable Building Material. *Environments* **2023**, *10*, 131. <https://doi.org/10.3390/environments10080131>
- Humphrey, D** *Experimental Investigation on the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilised with a Liquid Chemical*, (2017).
- Hutcheon, N.B., Ball, W.H.** *Thermal conductivity of rammed earth.* Report, Housing Research Committee of the College of Engineering, University of Saskatchewan, 1949. *inlowland and other Environments.* ASCE Press. New York, 1996.
- Huynh T.P. et al.,** Effect of residual rice husk ash on mechanical microstructural properties and thermal conductivity of sodium-hydroxide activated bricks, *Environ. Prog. Sustainable Energy* 37 (5) (2017) 1647–1656, <https://doi.org/10.1002/ep.12848>
- Ikram Ameen Saeed et al** 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 745 012126 DOI 10.1088/1757-899X/745/1/012126

Izemouren O, Guettala A. *Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra.* Matec web of conférence, vol 11 02001, 2014.

Izemouren, O. K. Gadri, A Guettala ‘ Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée’ (2013)

Jagadish, K.S. and Ventakarama, R.B. (1981). *A Manual of Soil Block Construction. Alternative Building Series-I*, Centre for Application of Science and Technology, Indian Institute of Science. Bangalore, India.

Jase D. Sitton, YashaZeinali, William H. Heidarian, Brett A. (2018) “*Effect of mix design on compressed earth block strength*” *Journal of Engineering Geology London*, Vol. 18, 173-180, 1985.

Kerali A.G *Durability of compressed and cement-stabilised building blocks.* Thèse de doctorat université de Warwick, école de l'ingénierie, (2001).

Kerali, A.G., T.H. Thomas, *Effect of mix retention and curing on low-cement walling blocks*, *Build. Res. Inf.* 30 (2002) 362–366,

Kota, P. B. V. S., Hazlett, D., & Perrin, L. (1996). Sulfate-Bearing Soils: Problems with Calcium-Based Stabilizers. *Transportation Research Record*, 1546(1), 62–69. <https://doi.org/10.1177/0361198196154600107>

Laborel-Préneron, A., C. Magniont, J-E. Aubert. (2018). Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and Buildings*. 178. 10.1016/j.enbuild.2018.08.021.

Lan G, Chao S, Wang Y, Cui Y. Methods to Test the Compressive Strength of Earth Blocks. *Advances in Materials Science and Engineering* 2021; 2021:1767238. <https://doi.org/10.1155/2021/1767238>.

Lan Wang (2002). Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfate. A Dissertation Submitted to Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Wuhan University of Technology.

Lasledj A. *Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques*, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 359 p, 2009.

Laurent J.-P. *La durabilité des protections sur terre stabilisée: l'expérience des 'murets Dreyfus' de Dakar.* Rapport de synthèse CSTB, Programme interministériel Rexcoop, 88 p., 1985.

Laurent, J. Quenard, D. Sallee, H. *Caractérisation thermique du matériau terre.* Actes de colloques – Modernité de la construction en terre, 10-11-12 octobre 1984, pp. 67 - 88, 1984.

Laurent. J.-P., Études et Recherches, Propriétés thermiques du matériau terre, CSTB, 1987.

Lawson, W. D., Kancharla, C., & Jayawickrama, P. W. “*Engineering Properties of Unstabilised Compressed Earth Blocks*”, 2011.

Le borgne T. Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France. 2010.

- Lenci, S. Clementi, F. T. Sadowski**, *Experimental determination of the fracture properties of unfired dry earth*, Eng. Fract. Mech. 87 (2012) 62–72. Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- Locat J, Trembley H, Lerouil S.** *Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime*. Canadian Geotechnical Journal, 33 (4), 654-669, 1996.
- M. Olivier, A. Mesbah**, *Le matériau terre: Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées*, Bull. Liaison Labo P Ch 146 (1986) 37–43.
- Maniatidis, V., Walker, P., Heath, A., and Hayward, S.** *Mechanical and thermal characteristics of rammed earth*. B.V.
- Maniatidis, V., Walker, P.J.** *Structural capacity of rammed earth in compression*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, N° 3, pp. 230 - 238, 2008.
- Mansour, M.B, A. Jelidi, A. Soukaina Cherif, S.B. Jabrallah**, Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), Constr. Build. Mater. 104 (2016) 44–51, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Martin, S., Mazarron, F.R., Canas, I.** *Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia*. Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 666 - 676, 2010.
- Medala, M.** Etudes des interactions entre les phases minérales constituent le ciment Portland et des solutions salines concentrées Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2005
- Mekaideche, K. & Derfouf, Feth-Ellah & Laimeche, A. & Nabil, Abou-Bekr.** (2021). Influence of the Hydric State and Lime Treatment on the Thermal Conductivity of a Calcareous Tufa. Civil Engineering Journal. 7. 419-430. 10.28991/cej-2021-03091663.
- Mekaideche, K, (2021)**, « Comportement hygrothermique de la terre crue partiellement saturée », Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr. Belkaid, Tlemcen.
- Meukam P, Jannot Y, Noumowe A, Kofane TC.** Thermo physical characteristics of economical building materials. Construction and Building Materials, Volume 18, issue 6, pp.
- Millogo, Y. J.-C. Morel, J.-E. Aubert, and K. Ghavami**, “*Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers*,” Construction and Building Materials, vol. 52, pp. 71–78, 2014.
- Millogo. Y, M. Hajjaji, R. Ouedraogo**, Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks, Constr. Build. Mater. 22 (2008) 2386–2392, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.002>.
- Mohamed Ben Mansour, Ahmed Jelidi b** (2016) “*Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB)*” 104 PP 44–51
- Mohammed T.U., Hamada H., Yamaji T.** Performance of seawater-mixed concrete in tidal environment Cement and Concrete Research, vol. 34, 2004, pp.593-601
- Morel J.-C., P'kla A., Di Benedetto H** (2003). *Essai in situ sur blocs de terre comprimée, Interprétation en compression ou traction de l'essai de flexion en trois points*. Revue française de génie civil, Vol. 7, N° 2, pp. 221 - 237, 2003.

- Morel Jean-Claude, Pkla Abalo, Walker, P.**, 2007, 'Compressive strength testing of compressed earth blocs', *Construction and Building Materials*, 21, 303-309.
- Morel, J.C. A. Mesbah, M. Oggero, P. Walker**, *Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction*, *Build. Environ.* 36 (2001) 1119–1126.
- Muntohar. A.S.**, *Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick*, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 4215–4220,
- Nana, K. L.** Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés kaolinite-muscovite. Limoges : Thèse Doctorat de l'Université de Limoges (France), (2004)
- NF EN 1745** Maçonnerie et éléments de maçonnerie - Détermination des valeurs thermiques de calcul. AFNOR, Novembre 2002.
- NF EN 933-8.** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : Évaluation des fines — Équivalent de sable. Paris: Association Française de Normalisation (AFNOR), (Août 1999).
- NF P 94-047** AFNOR-Standards: Soils investigation and testing - Determination of the organic matter content - Ignition method, (December 1998)
- NF P 94-048** AFNOR-Standards: Soils investigation and testing. Determination of the carbonate content – Calcimeter method, (October 1996).
- NF P 94-054** AFNOR-Standards: Soils investigation and testing Determination of particle density. Pycnometer method, (October 1991).
- NF P94-068.** Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche. AFNOR, (Novembre 1993).
- NFP94-051** AFNOR-Standards: Soils investigation and testing. Determination of Atterberg's limits. Liquid limit test using Cassagrande apparatus. Plastic limit test on rolled thread, Mars (1993).
- NFP94-057** AFNOR-Standards: Soils investigation and testing. Granulometric analysis. Hydrometer method. , Mai (1992).
- NFP94-093.** Détermination des références de compactage d'un matériau. AFNOR, (Octobre 1999).
- NFP-P94-041** AFNOR Standards, Soils investigation and testing. Granulometric description. Wet sieving method. - Sols: reconnaissance et essais, Décembre (1995)
- Norouzian, K., Abbasi, N., & Koupai, J. A.** (2018). Evaluation of softening of clayey soil stabilized with sewage sludge ash and lime. *Civil Engineering Journal*, 4(4), 743-754.
- Nshimiyimana, P., Messan, A., & Courard, L.** (2020). Physico-mechanical and hygro-thermal properties of compressed earth blocks stabilized with industrial and agro by-product binders. *Materials*, 13(17), 3769.
- Ogunye, F. O., Boussabaine, H.** *Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment*. *Construction and Building Materials*, Vol. 16, N°3, pp. 173 - 180, 2002.
- Olivier, M.**, (1994), '*Le matériau terre-compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre*', PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France

- Orakoglu, M.E., J. Liu, F. Niu**, Experimental and modeling investigation of the thermal conductivity of fiber-reinforced soil subjected to freeze-thaw cycles
- Oti, J.E., J.M. Kinuthia, J. Bai**, *Engineering properties of unfired clay masonry bricks*, Eng. Geol. 107 (2009) 130–139,
- Petry, T. M.**, 1994. Studies of factors causing and influencing heave of lime treated clay soils. Contract Pep., U.S. Army Engineers, Waterways experiment station, Vicksburg, Miss.
- P'kla, A.** (2002) *Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries "BTC-Mortier de terre"*. These, INSA Lyon, 242 p., 2002. pp. 1-6, 1996.
- Pipard, J.-M. (2012)**. Modélisation du comportement élasto-viscoplastique des aciers multiphasés pour la simulation de leur mise en forme, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (Thèse de doctorat).
- Prakash Dulal, Swastika Maharjan, Milan Prasad Timalisina, Yug Maharjan, Ashok Giri, Amrita Tamang**, Engineering properties of cement-stabilized compressed earth bricks, Journal of Building Engineering, Volume 77, 2023, 107453, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107453>.
- Protas, J.** Diffraction des rayonnements Introduction aux concepts et méthodes. Dunod, (1999)
- Rigassi, 1995** Compressed Earth Blocks. Manual of Production. Volume 1 (1985)
- Robert J. Flatt**, Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated, Journal of Crystal Growth, Volume 242, Issues 3–4, 2002, Pages 435-454, ISSN 0022-0248, [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)01429-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)01429-X).
- SEBAA. K, (2021)**, « INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA TERRE CRUE NATURELLE ET TRAITEE », Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr. Belkaid, Tlemcen.
- Sekhar, D.C. S. Nayak**, Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks, Constr. Build. Mater. 166 (2018) 531–536.
- Sharo,A, Y. Alhowaidi and M. S. Al-Tawaha**, Improving Properties of Expansive Soil Using Cement, Quick Lime and Cement-Lime Blend, International Review of Civil Engineering, Vol. 10(Issue 2), ISSN 2036 – 9913, March 2019.
- Sherwood, P. T.**, 1962. Effect of sulfates on cement and lime-stabilized soils. Highway Research Board Bulletin, 353, National Research Council, Washington, D.C. pp. 98-107.
- Shon, C.S, D. Saylak, D.G. Zollinger**, Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 2062–2071, <https://doi.org/10.1016/j.constr.build.mat.2008.08.025>
- Singh, G., & Das, B. M.** (1999). Soil Stabilization with Sodium Chloride. Transportation Research Record, 1673(1), 46–54. <https://doi.org/10.3141/1673-07>

- Smit, R. J. M., Brekelmans, W. A. M., & Meijer, H. E. H.** (1998). Prediction of the mechanical behavior of nonlinear heterogeneous systems by multi-level finite element modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 155(1–2), 181–192
- Sore, S. O., A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, F. Tsobnang,** Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, *Constr. Build. Mater.* 165 (2018) 333–345.
- Soudani, L., Woloszyn, M., Fabbri, A., Morel, J. C., & Grillet, A. C.** (2017). Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Solar Energy*, 141, 70-80.
- Staljanssens M, Miuy J, Marcoen Fabry J, RasseL A.** Destruction de la matière organique par calcination a basse température en vue de l'analyse minéralogique des sols. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 98: 393-403, (1975).
- Taallah B., A. Guettala,** The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilised with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers, *Constr. Build. Mater.* 104 (2016) 52–62, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>.
- Thouroude, Gilles (2012)** « Homogénéisation et analyse numérique d'équations elliptiques et paraboliques dégénérées ». (Thèse de doctorat).
- Tran, N T.** Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat
- UNE EN 1015-11/A1** (2007). Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. AENOR
- United Nations. Earth Construction Technology.** United Nations Centre For Human Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.
- Venkatarama Reddy, B. V. and Jagadish, K. S.,** (1993), '*The static compaction of soils*', *Geotechnique* 43(2), 337–341
- Venkatarama Reddy, B. V.,** (1983), '*On the technology of pressed soil blocks for wall construction*', MSc (Engg) thesis, Dept. of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India
- Venkatarama Reddy, B.V., Jagadish, K.S.** *Spray erosion studies on pressed soil blocks.* Building and Environment, Vol. 22, N° 2, pp. 135 - 140, 1987.
- Venuat, M.** *Le traitement des sols à la chaux et au ciment.* Publié par l'auteur, 66 av. C.Perrière, 92320 Châtillon -sous-Bagneux, 459 p, 1980.
- Verdyen J., Roisin V, Nuyens J.** *Applications de la mécanique des sols*", Dunod Ed. Paris,
- Walker P.** Specifications for Stabilised Pressed Earth Blocks. *Masonry International*, 10, (1),
- Walker, P. and Stace, T.** (1997) "*Properties of some cement stabilized compressed earth blocks and mortars*" *Materials and Structures*, Vol. 30, pp. 545
- Walker, P.** Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil
- Wenan Wu, Yongtao Yang, Hong Zheng, Shuqing Wang, Ning Zhang, Yichen Wang,** Investigation of the effective hydro-mechanical properties of soil-rock mixtures using the multiscale

numerical manifold model, *Computers and Geotechnics*, Volume 155, 2023, 105191, ISSN 0266-352X, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105191>.

Wang, Lan, (2002). "Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfate" *LSU Doctoral Dissertations*. 997.

Wetzel, M., Kempka, T., & Kühn, M. (2017). Predicting macroscopic elastic rock properties requires detailed information on microstructure. *Energy Procedia*, 125, 561–570

ملخص:

إن تميم الأرض المضغوطة باعتبارها مادة بيئية متاحة وقابلة لإعادة التدوير يقع ضمن مجال حماية الموارد والبيئة. الهدف من الأطروحة هو التوصيف التجريبي للمواد الأرضية المضغوطة بهدف صنع الطوب الأرضي المضغوط المستقر التي تلبى متطلبات المقاومة الميكانيكية والحرارية والمتانة. كما يتضمن أيضًا استكشاف الإضافات المختلفة التي تعمل على تحسين خصائص الطوب الأرضي المضغوط المستقرة من خلال مراعاة الجوانب المختلفة (المقاومة، ومقاومة الماء، وما إلى ذلك). الأرض المستخدمة هي طوب من منطقة بني صاف، وهو مطابق لمتطلبات معيار الطوب الترابي المضغوط من حيث الحجم الحبيبي واللدونة. المثبتات المستخدمة في هذه الدراسة هي غبار السيليكا، البوزولان الطبيعي، ودقائق الطين. تم إجراء التوصيف الميكانيكي عن طريق اختبار الضغط أحادي المحور، والحراري عن طريق التوصيل الحراري، والماء عن طريق الامتصاص الشعري، والمتانة عن طريق اختبار الشخوخة السريعة من خلال دورات التجفيف، والترطيب في الماء وفي المحاليل الملحية. ثم يتم إجراء الاختبارات الميكانيكية والمتانة على عينات منشورية على شكل طوب. وأخيرًا، يتم تقديم محاولة لنمذجة السلوك الميكانيكي للعينات المستقرة مع دخان السيليكا باستخدام طريقة التجانس الرقمي في نهاية هذا العمل البحثي.

الكلمات المفتاحية: المواد البيئية، الدمك، الطوب الأرضي المضغوط، المثبت، المقاومة، المتانة، التجانس الرقمي

Résumé :

La valorisation de la terre compactée comme un éco-matériau disponible et recyclable rentre dans le domaine de la protection des ressources et de l'environnement.

L'objectif de la thèse est de caractériser expérimentalement le matériau terre compacté en vue de confectionner des BTC qui répondent aux exigences de résistance mécanique, thermique et de durabilité. Il s'agit aussi de prospecter différents ajouts qui optimisent et améliorent les caractéristiques de la BTC stabilisée en tenant compte de différents aspects (résistance, tenue à l'eau, etc.).

La terre utilisée est un tuf provenant de la région de Béni-saf, qui satisfait aux exigences de la norme des briques de terre comprimée en termes de granulométrie et de plasticité. Les stabilisants utilisés dans cette étude sont la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, et les fines argileuses.

Une caractérisation mécanique a été faite par un essai de compression uni axial, thermique par une conductivité thermique, et hydrique par une absorption capillaire, et la durabilité par un essai de vieillissement rapide à travers des cycles de séchages mouillages dans l'eau et dans des solutions salines.

Ensuite des essais mécaniques et de durabilités sont effectués sur des échantillons prismatiques sous forme de briques.

Enfin une tentative de modélisation du comportement mécanique des échantillons stabilisée avec la fumée de silice par la méthode d'homogénéisation numérique est présentée à la fin de ce travail de recherche.

Mots Clés : Eco-matériau, compactage, BTC, stabilisant, résistance, durabilité homogénéisation numérique.

Summary:

The utilization of compacted earth as an accessible and recyclable eco-material aligns with the conservation of resources and environmental protection.

The objective of this thesis is to experimentally characterize compacted earth material to produce Compressed Earth Bricks (BTCs) that meet mechanical, thermal resistance, and durability standards. Additionally, the research aims to explore various additives that optimize and enhance the properties of stabilized BTCs, considering factors such as strength, water resistance.

The soil selected for this study is tuff from the Beni-Saf region, meeting the specifications outlined in the compressed earth brick standard concerning grain size and plasticity. Stabilizers employed in the study include silica fume, natural pozzolan, and fine clay.

Mechanical characterization involved uniaxial compression testing, thermal characterization focused on thermal conductivity, and hydrous characterization encompassed capillary absorption. Durability was assessed through a rapid aging test, involving cycles of drying and immersion in water and saline solutions. Subsequent tests were conducted on prismatic samples in the form of bricks to evaluate mechanical and durability aspects.

Finally, the research concludes with an attempt to model the mechanical behavior of samples stabilized with silica fume using the numerical homogenization method.

Keywords: Eco-material, compaction, BTC, stabilizer, strength, durability, numerical homogenization.