



Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Filière : Génie Civil  
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**Ramdani Aya**

Le : jeudi 13 juin 2024

**Effet des cendres de déchets de tomates et de piments  
sur les propriétés rhéologiques, physiques et  
mécaniques de mortier de terre à base de chaux**

---

Jury : .....

**Encadrant : Pr. TAALLAH Bachir**

**Année universitaire : 2023/2024**

# Remerciements

*Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant, qui m'a donné la santé, la force, le courage et la volonté pour réaliser mon mémoire.*

*Mes remerciements vont en premier lieu à mon encadreur, Pr. TAAALAH Bachir Je lui exprime ma profonde gratitude et reconnaissance de m'avoir orienté et dirigé durant toute la période de conception et d'élaboration de mon mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent également aux membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger et vos efforts dans l'évaluation ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles que nombreux, pour mes futurs travaux,*

*Je tiens également à remercier sincèrement Salah Labed doctorant en génie civil pour toute l'aide que m'as apporté dans mon travail et son soutien constant et kamal saleh almeasar doctorant en génie civil pour m'aider dans mon travail.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à tous mes professeurs, et Monsieur Tour Abdelmoneem le responsable du laboratoire de matériaux de la construction et toutes les personnes qui par leurs conseils ont guidé mes réflexions et ont accepté de m'accueillir de m'encourager et répondre à mes questions durant mon travail.*

## *Dédicace :*

*Avec tous mes sentiments de respect, avec d'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie*

*A mon cher père*

*A mon cher père NOURFEDDINE ; aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.*

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation, Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie de bonheur.*

*A ma chère mère*

*A ma très chère mère, honorable, aimable FIROUZ ; tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager, Ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices depuis ma naissance, durant mon enfance et même l'âge adulte*

*A mes chers frères*

*A mes chers frères IMAD et RAMI et BADIS en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Vous êtes toujours dans mon cœur. Je remercie d'être l'épaule sur laquelle je peux toujours compter.*

*Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

*A mes chers amis*

*Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des frères sur que je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble.*

*Aya Ramdani*

## Résumé

La terre a été largement utilisée par l'homme depuis l'Antiquité dans la construction pour plusieurs raisons importantes. Principalement, la terre est abondante et souvent disponible localement, ce qui en fait un matériau de construction économique comparé à d'autres matériaux plus coûteux, résolvant ainsi le problème de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone. Le mortier de terre souffre d'un déficit de résistance, de fissurations systématiques dues au retrait et exposés à des problèmes de durabilité liés à sa sensibilité à l'eau.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du mortier de terre, en substituant partiellement la chaux par des cendres de déchets de tomates CT et de piments CP.

Dans cette étude, différentes proportions de cendres de déchets de tomates CT et de piments CP par rapport au poids de chaux, 3 %, 6 %, 9 %, 12% et 15 % sont utilisées. Les échantillons de mortier de terre ont été soumis à des différents essais, à savoir : l'essai de maniabilité, des essais de compression et de flexion, les essais d'absorption totale et capillaire, les masses volumique et l'essai de gonflement par immersion.

Les résultats obtenus ont montré que la substitution de la chaux par 6 % de Cendres de piments et de cendres de tomates a conduit à une amélioration de la résistance mécanique que ce soit à la compression ou à la flexion du mortier de terre de 20,96% cendres de tomates et 72.46 % de cendres de piments. L'augmentation de la densité apparente varient entre 1533 kg/ m<sup>3</sup> et 1554 kg/m<sup>3</sup> et la réduction de l'absorption à l'eau totale est de 7.87 % de cendres de tomates et de 25.6% de cendres de piments et pour l'absorption capillaire de 14.5% de cendres de tomates et 8% de cendres de piments et le gonflement de 1.7 de cendres de piments ont été observés.

**Mots clés :** Mortier de terre - Chaux - Cendres de déchets de tomates et piments - Résistance mécanique - Absorption capillaire - Gonflement par immersion.

## الملخص

لقد استخدم البشر التربة على نطاق واسع منذ العصور القديمة في البناء لعدة أسباب مهمة. أهمها الوفرة وغالبا ما تكون متاحة محليا، مما يجعلها مادة بناء اقتصادية مقارنة بالمواد الأخرى الأكثر تكلفة، وبالتالي حل مشكلة استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. يعاني الملاط الترابي من ضعف المقاومة والتشقق المنهجي بسبب الانكماش كما انه معرض لمشاكل الديمومة المرتبطة بحساسيته للماء.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو المساهمة في تحسين الخواص الريولوجية والفيزيائية والميكانيكية للملاط الترابي عن طريق استبدال الجير جزئياً بالرماد الناتج عن نفايات الطماطم **CT** والفلل **CP**.

في هذه الدراسة، تم استخدام نسب مختلفة من رماد مخلفات الطماطم **CT** والفلل الحار **CP** بالنسبة إلى وزن الجير 3%، 6%، 9%، 12% و15%. تم إخضاع عينات الملاط الترابي إلى اختبارات مختلفة وهي: اختبار قابلية التشغيل، اختبارات الضغط والانحناء، اختبارات الامتصاص الكلي والشعري، اختبار الكثافة والانتفاخ بالغمر في الماء.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن استبدال الجير بنسبة 6% من رماد الفلّ والرماد الطماطم أدى إلى تحسن في المقاومة الميكانيكية سواء للضغط أو الإنحناء للملاط الترابي بنسبة 20.96% رماد الطماطم و72.46% رماد الفلّ. وقد تم تسجيل زيادة في قيمة الكثافة الظاهرة فانتقلت من 1533 كجم/م<sup>3</sup> إلى 1554 كجم/م<sup>3</sup> و التخفيض في الامتصاص الكلي للماء 7.87% من رماد الطماطم و25.6% من رماد الفلّ الحار و الامتصاص الشعري 14.5% من رماد الطماطم و 8% من رماد الفلّ الحار و الإنتفاخ 1.7 من رماد الفلّ الحار.

الكلمات المفتاحية: الملاط الترابي - الجير - رماد مخلفات الطماطم والفلّ - المقاومة الميكانيكية - الامتصاص الشعري - الكلي بالغمر.

# Table de matières

Remerciement .....	I
Dédicace.....	II
Résumé .....	III
المخلص .....	IV
Table de matières .....	V
Liste des figures .....	VIII
Listes des tableaux .....	X
Liste des abréviations .....	XI
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Partie I : Etude bibliographique</b> .....	4
<b>Chapitre 1 : Construire en terre et utilisation des cendres agricoles</b> .....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Construction en terre .....	5
1.3 les avantages de la terre .....	6
1.3.1 les avantages .....	6
1.3.2 les inconvénients .....	7
1.4 Techniques de construction en terre .....	7
1.4.1 Le pisé.....	7
1.4.2 L'adobe.....	8
1.4.3 La bauge .....	9
1.4.4 Le torchis.....	10
1.4.5 La brique de terre compressée (BTC) .....	11
1.4.6 La brique de terre extrudée (ou filée) .....	11
1.5 Argiles et leurs propriétés .....	12
1.5.1 Définition .....	12
1.5.2. Classification des minéraux argileux .....	13
1.5.3. Leurs propriétés.....	14
1.6 Mortier de terre .....	15
1.6.1 Définition .....	15
1.6.2 caractéristique des mortier .....	15
1.6.3 Résistance à la compression.....	16

1.6.4	Résistance à la l'abrasion .....	16
1.6.5	Adhérence et absorption d'eau.....	16
1.6.6	Masse volumique .....	16
1.6.7	Dimension maximale .....	16
1.6.8	Mesure des caractéristiques .....	16
1.6.8.1	Les caractéristiques mécaniques.....	16
1.6.3.2	Les caractéristiques rhéologiques et physiques .....	19
1.6.3.2.1	Les caractéristiques rhéologiques .....	19
1.6.3.2.2	Les caractéristiques physiques.....	21
1.7	Effet des cendres agricoles sur le comportement des matériaux cimentaires .....	21
1.7.1	Déchets agricoles dans la construction .....	21
1.7.2	Types des cendres .....	22
1.7.2.1	Cendres volantes.....	22
1.7.2.2	Cendres biomasse .....	23
1.7.2.2	Cendres de bois.....	24
1.7.2.2	Cendres de papeterie.....	24
1.7.2.2	Cendres des déchets des palmiers dattiers .....	25
1.8	Conclusion .....	26
	<b>Partie II: Etude expérimentale</b> .....	27
	<b>Chapitre 2 : Matériaux et procédures</b> .....	28
2.1	Introduction .....	28
2.2	Matériaux utilisés .....	28
2.3	Sol .....	28
2.4	Caractéristiques physiques du sol .....	28
2.4.1	Masse volumique apparente.....	29
2.4.2	Masse volumique absolue .....	29
2.4.3	Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie .....	30
2.4.4	L'imites d'Atterberg .....	30
2.4.5	Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache .....	32
2.6	la chaux .....	35
2.7	Eau .....	36
2.8	Cendres de déchets de tomates et de piments .....	36
2.8.1	: Fabrication de cendres .....	37

2.8.2 Essais sur cendres .....	37
2.8.2.1 La finesse .....	37
2.8.2.2 La masse volumique absolue (Méthode de Lechatelier) .....	38
2.9 les caractéristiques physiques des matériaux .....	39
2.10 Les mélanges .....	39
2.11 Mode opératoire .....	40
2.11.1 Matériel spécifique.....	40
2.11.2 Préparation des mélanges .....	40
2.11.3 La quantité d'eau dans la fabrication de mortier de terre.....	41
2.12.1 Essais réalisés à l'état frais .....	41
2.12.1.1 Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses .....	41
2.13.1 Essais réalisés à l'état durci .....	42
2.13.1.1 Résistance mécanique .....	42
2.13.1.1.2 Résistance à la traction par flexion .....	42
2.13.1.2 Mesure de la masse volumique .....	42
2.14. Les essais durabilité .....	43
2.14.1 L'absorption capillaire .....	43
2.14.2 Absorption totale .....	44
2.14.3 Gonflement .....	45
2.15 Conclusion .....	46
<b>Chapitre 3 : Résultats et discussions</b> .....	48
3.1 Introduction .....	48
3.2 Effet du dosage de la chaux sur la résistance à la compression de mortier de terre....	48
3.3 La maniabilité à la table à secousse .....	49
Partie 1 .....	50
3.4 Etude des propriétés mécaniques .....	50
3.4.1 La résistance à la compression de mortier .....	50
3.4.2 La résistance à la flexion de mortier .....	52
Partie 2 .....	53
3.5 Etude des propriétés physiques .....	53
3.5.1 La masse volumique (la densité) .....	53
3.5.2 : Absorption totale .....	54
3.5.3 Absorption capillaire .....	55

3.5.4 Gonflement par immersion .....	56
3.6 Conclusion.....	58
<b>Conclusion générale</b> .....	61
<b>Références</b> .....	64
...	

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> : Construction en terre crue dans le monde ( <a href="http://www.theconversation.com">www.theconversation.com</a> ).....	6
<b>Figure 1.2</b> : Plus ancienne Technique de construction en terre (Pascal Maillard 2013	7
<b>Figure 1.3</b> : L' Alhambra de Grenade en Pisé (Smith and Augarde, 2014) .....	8
<b>Figure 1.4</b> : (a) Petites briques retournées après 2 jours de séchage, (b) Construction en adobe au Yémen, (c) Mise en œuvre (Pomiculture Design, 2018), Cité par (Belkebir, 2019).....	9
<b>Figure 1.5</b> : (a) Construction d'un mur en bauge, Gaoua, Pays Lobi, Burkina Faso (Terki Y., 2013)(b) Cases Obus de Musgum, Cameroun, (Anger R. et Fontain L., 2010) .....	10
<b>Figure 1.6</b> : (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France. (Champire, 2017), Structure en colombage de bois hourdée de couche(s) de terre (Pascal Maillard 2013) .....	10
<b>Figure 1.7</b> : Différents produits de blocs de terre comprimée. (Taallah, 2014) .....	11
<b>Figure 1.8</b> : La brique de terre extrudée (ou filée) (Pascal Maillard, 2013), fabrication des blocs de Terre extrudée (source : <a href="https://youtu.be/sQaXOxe9O1I">https://youtu.be/sQaXOxe9O1I</a> ).....	12
<b>Figure 1.9</b> Processus de formation des argiles. (HERNOT, 2016) .....	12
<b>Figure 1.10</b> : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	17
<b>Figure 1.11</b> : La machine de flexion. (Chourouk and Abdia (2022)).....	17
<b>Figure 1.12</b> : Schéma type de l'essai de compression.....	18
<b>Figure 1.13</b> : La machine de compression.....	18
<b>Figure 1.14</b> : Courbe contrainte déformation du mortier en terre (Hafsa 2022).....	19
<b>Figure 1.15</b> : Bétons différents qui présentent l'un des paramètres de Bingham identique ( $\sigma_0 =$ seuil d'écoulement et $\eta =$ Viscosité plastique (Azeredo et al. 2005)	19
<b>Figure 1.16</b> : différents types de retrait (Sabatier, 2008).....	21
<b>Figure 1.17</b> : Images au MEB des cendres volantes ; (a) cénoosphères et sphères solides ; (b) chaux libre massive ; (c) plérosphère, (d) de quartz angulaires. ; (e) sphère recouverte de magnétite et (f) cristal de calcite ; (g) carbone non brûlé avec des microsphères et (h) cristaux de mellite agglomérés (Tokyay, 2016) .....	23
<b>Figure 1.18</b> : schéma de principe d'une chaufferie bois. (Wikipédia).....	24
<b>Figure 1.19</b> : Résistance maximale à la flexion et module d'élasticité en flexion en fonction de la teneur de cendres des palmiers dattiers. (Almeasar, 2023).....	26
<b>Figure 2.1</b> : le Sol .....	28
<b>Figure 2.2</b> : la masse volumique apparente de sol .....	29
<b>Figure 2.3</b> : Analyse granulométrique par tamisage .....	30
<b>Figure 2.5</b> : Appareil de Casagrande. ....	31
<b>Figure 2.6</b> : Représentation des limites d'atterberg...	31
<b>Figure 2.7</b> : La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe. (Delgado, 2007).....	32
<b>Figure 2.8</b> : Agitation mécanique de la suspension de sol et les taches de bleu de méthylène sur le papier filtre...	33
<b>Figure 2.9</b> : Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068).....	33

<b>Figure 2.10:</b> le sable concassé.....	34
<b>Figure 2.11 :</b> Chaux broyée de Saida (chaux vive).....	35
<b>Figure 2.12:</b> le broyeur.....	36
<b>Figure 2.13:</b> les cendres avant le broyage.....	37
<b>Figure 2.14:</b> les cendres dans les bols.....	37
<b>Figure 2.15 :</b> les cendres après le broyage.....	37
<b>Figure 2.16 :</b> l'essai de la masse volumique de cendres.	38
<b>Figure 2.17 :</b> distribution granulométrique du sol, sable concassé et sol corrigé.....	39
<b>Figure 2.18 :</b> Le moule utilisé pour le moulage et la confection des éprouvettes de mortier de terre	40
<b>Figure 2.19 :</b> le malaxeur	41
<b>Figure 2.20 :</b> table à secousse...	41
<b>Figure 2.21:</b> Appareil triaxial (Avec dispositif de compression)	42
<b>Figure 2.22:</b> Appareil triaxial (avec dispositif de flexion)	42
<b>Figure 2.23 :</b> La mesure des dimensions à l'aide de pied à coulisse électronique.	43
<b>Figure 2.24 :</b> Schéma de l'essai d'absorption capillaire.	43
<b>Figure 2.25 :</b> Essai d'absorption capillaire d'eau	44
<b>Figure 2.26 :</b> Immersion totale des échantillons	44
<b>Figure 2.27 :</b> Schéma de l'essai du gonflement.....	45
<b>Figure 2.28 :</b> L'essai du gonflement...	45
<b>Figure 3.1 :</b> L'effet de dosage de la chaux et le temps de cure sur la résistance mécanique...	49
<b>Figure 3.2 :</b> l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (T) et piment (P) sur la maniabilité du mortier de terre...	50
<b>Figure 3.3 :</b> L'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (A) et piment (B) sur la résistance à la compression du mortier de terre...	51
<b>Figure 3.4 :</b> L'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (A) et piment (B) sur la résistance à la flexion du mortier de terre...	53
<b>Figure 3.5 :</b> l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (T) et piment (P) sur la densité volumique du mortier de terre...	54
<b>Figure 3.6 :</b> l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (A) et piment (B) sur l'absorption totale du mortier de terre...	55
<b>Figure 3.7 :</b> l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (T) et piment (P) sur l'absorption capillaire du mortier de terre...	56
<b>Figure 3.8 :</b> l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (T) et piment (P) sur le gonflement du mortier de terre.....	57

## Liste des Tableaux :

<b>Tableau 1.1</b> Les avantages généraux de la terre crue (Grigoletto, 2015) .....	6
<b>Tableau 1.2</b> Identification des principaux minéraux argileux (CE : cations échangeables) – en jaune : les minéraux les plus couramment rencontrés dans les sols de fondations géotechniques. (Myriam, 2020).....	14
<b>Tableau 2.1</b> Indice de plasticité (Ip) et type de sol.....	31
<b>Tableau 2.2</b> limite d'Atterberg de sol.....	32
<b>Tableau 2.3</b> : Valeur du bleu de méthylène.....	34
<b>Tableau 2.4</b> : les propriétés physiques de sable concassé.....	34
<b>Tableau 2.5</b> : la composition chimique de sable concassé.....	34
<b>Tableau 2.6</b> : Les propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida-Algérie	35
<b>Tableau 2.7</b> : les caractéristiques physiques de cendres, sol, sable concassé, chaux...	39
<b>Tableau 2.8</b> : Composition et codification des mélanges...	40

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFNOR : Association française de normalisation

Mvapp : masse volumique apparente

MVabs : Masse volumique absolue.

ACE : l'Absorption capillaire d'Eau.

ATE : l'Absorption Totale d'Eau.

T : déchets de tomates, P : déchets de piments

M : Mortier de terre

RC : Résistance à la compression (MPa), Rf : Résistance à la flexion (MPa).

MCT0 : Mélange en teneur 0 % de cendres tomates par rapport au poids de la chaux

MCP0 : Mélange en teneur 0 % de cendres piments par rapport au poids de la chaux

MCT3 : Mélange en teneur 3 % de cendres tomates par rapport au poids de la chaux

MCP3 : Mélange en teneur 3 % de cendres piments par rapport au poids de la chaux

MCT6 : Mélange en teneur 6 % de cendres tomates par rapport au poids de la chaux

MCP6 : Mélange en teneur 6 % de cendres piments par rapport au poids de la chaux

MCT12 : Mélange en teneur 12 % de cendres tomates par rapport au poids de la chaux

MCP12 : Mélange en teneur 12 % de cendres piments par rapport au poids de la chaux

MCT15 : Mélange en teneur 15 % de cendres tomates par rapport au poids de la chaux

MCP15 : Mélange en teneur 15 % de cendres piments par rapport au poids de la chaux

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Depuis des milliers d'années, la majorité des civilisations anciennes du monde entier utilisaient la terre comme matériau de construction en raison de son faible coût, de sa sécurité et de sa contribution au confort thermique, résolvant ainsi le problème de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone, qui sont parmi les problèmes majeurs actuels du globe. La maçonnerie en terre est constituée de briques (adobes, briques de terre comprimée, etc.) et de mortier de terre composé de terre argileuse, de sable et d'eau et d'autres stabilisants (chaux, ciment, gypse et fibres végétales). Il est vrai que le développement des nouveaux matériaux de construction comme le béton et le mortier a largement contribué à transformer l'industrie de la construction. Ces matériaux offrent souvent des avantages en termes de résistance, de durabilité et de facilité de mise en œuvre, ce qui les rend très populaires dans de nombreux projets de construction modernes. Cependant, cela ne signifie pas nécessairement que l'homme oublie les avantages de la terre dans la construction. La construction en terre, également connue sous le nom d'architecture en terre crue, reste une pratique importante dans de nombreuses régions du monde. Elle offre des avantages uniques tels que la durabilité environnementale, l'isolation thermique, la régulation de l'humidité et la disponibilité locale des matériaux.

Le recyclage des déchets joue un rôle de plus en plus crucial dans le domaine de la construction, en particulier dans le génie civil. En adoptant des pratiques de recyclage efficaces, il est possible de réduire la quantité de déchets envoyés dans les décharges, tout en créant des ressources renouvelables et durables pour la construction.

Le mortier de terre peut présenter des défis en termes de résistance, de fissuration et de durabilité. Les techniques de stabilisation, telles que l'ajout de ciment, de chaux ou d'autres matériaux, sont souvent utilisées pour améliorer ces propriétés. L'utilisation d'ajouts minéraux, tels que les cendres volantes, les scories, les fumées de silice ou les pouzzolanes naturelles, ainsi que l'incorporation de fibres, peuvent également contribuer à renforcer le mortier de terre et à améliorer sa durabilité, tout en réduisant les coûts associés à l'utilisation de liants plus traditionnels comme le ciment et la chaux.

La gestion des déchets végétaux des serres de culture de tomates et de piments est en effet un enjeu important. Plutôt que de les brûler, ces déchets pourraient être valorisés de différentes manières, telles que le compostage pour produire un engrais organique ou la transformation en biomasse pour la production d'énergie. Cela permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la combustion des déchets et de créer une source de revenus supplémentaire

pour les producteurs. L'innovation dans le domaine de la construction, y compris l'amélioration des matériaux de construction comme le mortier de terre, et la gestion durable des déchets agricoles sont deux domaines clés pour promouvoir la durabilité et la résilience dans nos sociétés modernes.

### **Problématique :**

Le recyclage des déchets est devenu aujourd'hui une bonne pratique qui peut offrir de nouvelles ressources renouvelables et durables, qui contribuent au développement du domaine de la construction et la protection de l'environnement.

Les tomates sont les premières cultures cultivées sous serre, suivies par les piments. Les travaux d'entretien de ces serres génèrent des quantités importantes de déchets végétaux, généralement brûlés par les producteurs.

Plusieurs recherches ont été menées sur l'effet de l'introduction des cendres dans les mélanges des matériaux cimentaires. Les résultats obtenus sont satisfaisants. Donc, peut-on aboutir à des résultats similaires avec l'utilisation des cendres des déchets de tomates et piments en substitution du liant employé dans le mortier de terre ?

### **Objectif :**

A travers une étude expérimentale et dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, l'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du mortier de terre, en substituant partiellement la chaux par des cendres de déchets de tomates et de piments.

À travers cet objectif visé et pour étudier l'effet des déchets des cendres. Le mémoire est scindé en trois chapitres :

**Le chapitre 1 :** présente une synthèse bibliographique qui comporte des généralités sur la construction en terre, en particulier l'adobe ainsi que les techniques de mise en œuvre et les avantages et les inconvénients. Ce chapitre présentera aussi l'effet des cendres agricoles sur le comportement des matériaux cimentaires.

**Le chapitre 2 :** est dédié aux caractéristiques des matériaux utilisés (sol, chaux, sable concassé, et les déchets des cendres de tomates et piments). Il présente les mélanges, la procédure de confection des éprouvettes et le mode de conservation et finalement les essais réalisés.

**Le chapitre 3 :** expose les résultats et la discussion de l'étude expérimentale. Ces résultats montrent les effets de déchets des cendres de tomates et piments sur les propriétés physiques et mécaniques. Finalement, notre mémoire sera achevé par une conclusion générale.

# **Partie I :**

Etude bibliographique

# **Chapitre 1 :**

## Synthèse bibliographique

## **1.1. Introduction**

La terre est un matériau fascinant qui a été utilisé dans la construction depuis des millénaires, ce qui en fait l'un des habitats les plus répandus dans le monde. Sa disponibilité ubiquitaire en fait une ressource précieuse pour la construction selon Paulus (Paulus, 2015), disponible partout dans le monde. En effet, la construction en terre offre un confort et une sécurité aux habitants, ce qui en fait un choix attrayant pour de nombreuses communautés. Il est estimé qu'une partie considérable de la population mondiale habite dans des maisons en terre (Doat, 1979), soulignant ainsi son importance et sa pertinence dans de nombreuses régions du monde. Effectivement, comme le soulignent Anger et Fontaine (Anger, 2009), la construction en terre crue présente plusieurs avantages, en commençant par le côté économique et passant par le confort thermique et par l'intérêt environnemental.

## **1.2. La construction en terre crue**

La terre crue, ou matériau terre, est un terme qui désigne la terre utilisée avec peu de transformations en tant que matériau de construction. Comme on l'a déjà mentionné, la terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les humains depuis des milliers d'années. Même à l'heure actuelle, plus d'un tiers de la population mondiale vit dans des bâtiments construits en terre (Houben, 2006). Dans de nombreux pays en développement, la construction en terre crue reste une pratique répandue, tant dans les zones rurales que dans les zones urbaines et périurbaines. En Inde, en 1971 on enregistre bien l'ampleur de cette utilisation : avec 72,2 % du parc immobilier construit en terre, cela représente environ 67 millions de maisons où vivaient près de 375 millions de personnes. En Europe, pour de nombreux pays, l'habitat rural en terre fait partie du patrimoine culturel. En France, 15 % de la population, à majorité rurale, et le Sud-ouest des U.S.A, la construction en adobe concerne 97 % et de 30 % par an en Californie comme le montre la figure (1.1) (Houben, 2006).



**Figure 1.1.** Construction en terre crue dans le monde ([www.theconversation.com](http://www.theconversation.com))

### 1.3 Les avantages et les inconvénients de la terre

Il est certain que la terre crue connaît un renouveau dans le domaine de la construction, en partie en raison de ses qualités constructives remarquables, mais aussi en raison de ses propriétés qui répondent aux enjeux environnementaux contemporains. Comme le mentionne Grigoletto (Grigoletto, 2015), la terre crue contribue pleinement à une véritable démarche de développement durable.

#### 1.3.1 Les avantages

Voir tableau 1.1.

**Tableau 1.1.** Les avantages généraux de la terre crue (Grigoletto, 2015).

<b>Avantages constructifs</b>	<b>Avantages environnementaux</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>-C'est un bon régulateur de l'humidité Ambiante grâce à sa perméabilité à la vapeur d'eau.</li> <li>- Elle possède de bonnes qualités phoniques (Absorption).</li> <li>- La terre résiste fort bien dans le temps si elle Est protégée de la pluie.</li> <li>- Elle résiste bien au feu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-peu d'énergie requise et d'émissions de CO2,</li> <li>Matériau abondant et renouvelable, souvent Disponible localement.</li> <li>- peu de déchet et possibilité de recyclage.</li> <li>- C'est un matériau qui n'a pas d'impact négatif sur la santé des occupants.</li> </ul>
<b>Avantages sociaux</b>	<b>Avantages économiques</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elle valorise le patrimoine et le savoir-faire Ancestral.</li> <li>- réponse à la demande d'habitat dans les Pays du Sud et lutte contre la précarité des populations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-réduction de la fuite des devises par une Substitution aux matériaux importés, (ciment, Acier, bois).</li> <li>- Production manuelle caractérisée par une haute intensité de main d'œuvre</li> </ul>

### 1.3.2 Les inconvénients

- Pas des règles professionnelles, ni de normalisation.
- Sensible à l'eau (soluble).
- Main d'œuvre nombreuse et qualifiée, pouvant engendrer un surcoût.
- Mise en œuvre lente avec un temps de séchage, plus ou moins long.

### 1.4 Techniques de construction en terre

Historiquement, plusieurs techniques sont utilisées pour concevoir des habitations : pisé, adobe, etc. Voir figure (1.2) (Maillard, 2013).



*Ziggourat*" (cité religieuse) ~ 1250 av JC, Iran



Mosquée de 1907, Mali

**Figure 1.2.** Plus ancienne Technique de construction en terre (Pascal Maillard 2013)

#### 1.4.1 Le pisé

Le pisé est l'une des techniques de construction en terre qui crée un sol compacté dynamiquement entre des formes temporaires pour former un mur monolithique (Hall and Djerbib, 2004). L'épaisseur de la paroi est généralement comprise entre 300 et 600 mm. La technique de construction en pisé consiste à placer des couches de sol humidifiées et bien mélangées dans les coffrages (traditionnellement en bois, mais actuellement ils peuvent être en métal figure (1.3). Chaque couche est ensuite compactée au-dessus de la couche précédente à l'aide d'un pilon avant le retrait du coffrage, révélant un mur porteur continu (Smith and Augarde, 2014). On laisse le mur se sécher naturellement jusqu'à atteindre sa pleine résistance.



**Figure 1.3.** L'Alhambra de Grenade en Espagne (Smith and Augarde, 2014)

### 1.4.2 L'adobe

Le terme « ADOBE » vient de l'égyptien « THOBE » signifiant (brique). Il a donné naissance au mot (arabe) « ATTOB » (Houben et Guillaud, 1994), devenu « ADOBE » en Espagnol, et « TOUB » en Français. On le connaît aussi sous le nom de « Brique de terre crue ».

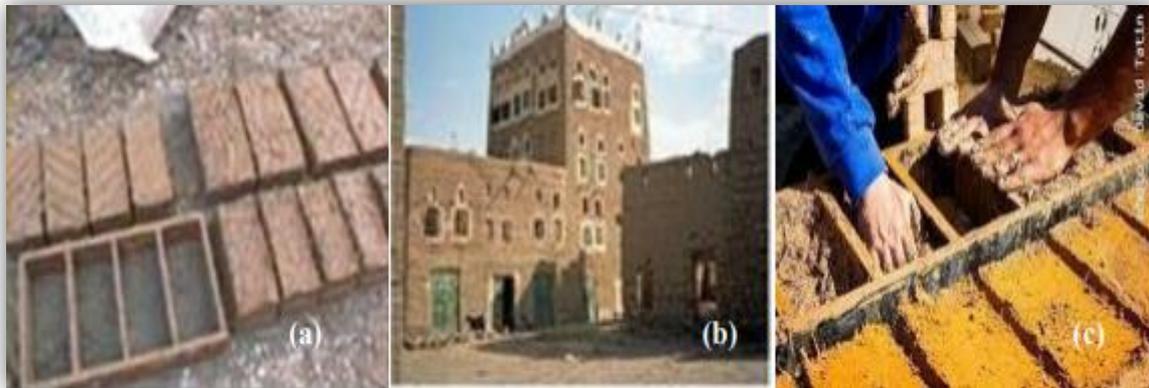
La technique de construction en adobe est l'une des plus vieilles techniques de construction naturelle qui existent. Elle a été utilisée pour la construction de temples de plus de 3000 ans et de villes entières, comme la ville de Shibām, au Yémen (Minke, 2006). L'adobe est une brique de terre crue façonnée à la main ou moulée, puis séchée pendant quelques jours à l'air libre ou sur des aires couvertes figure (1.4). Argiles, limons et sables sont mélangés à de l'eau pour atteindre l'état plastique, et parfois à des fibres pour réduire les fissures lors du séchage. Pour des chantiers de taille modeste, fabriquer les briques dans de petites unités de production est rapide et économique, avec des conditions variables selon les pays (Rigassi, 1995).

Les sols qui conviennent le mieux à la fabrication d'adobe sont ceux constitués de sable, de limon et d'argile, avec les proportions suivantes (Houben et Guillaud, 1994) :

- Sable...55% à 75% ;
- Limon...10% à 28% ;
- Argile...15% à 18% ;
- Matières organiques ...

Plusieurs cas peuvent se présenter :

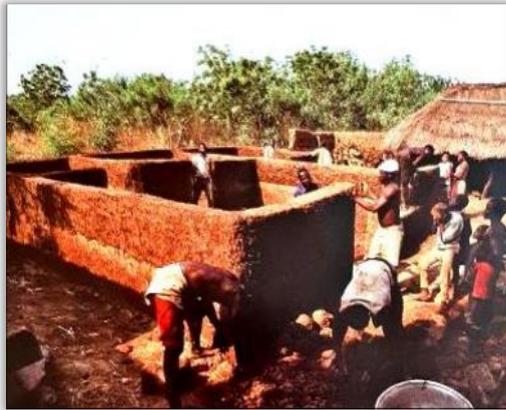
- Trop d'argile : des fissures se produiront dans les briques lors de séchage.
- Trop de sable : les grains trop nombreuses ne pourront être tous suffisamment liés la cohésion sera trop faible et les briques se désagrègeront.
- Trop de matière organique : l'effet de leur décomposition se traduit par une instabilité des caractères du matériau dans le temps, une porosité et une mauvaise durabilité en présence d'eau.



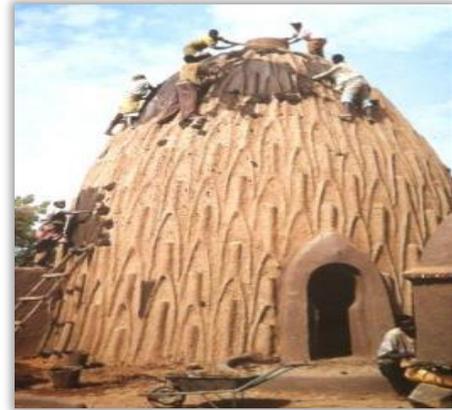
**Figure 1.4.** (a) Petites briques retournées après 2 jours de séchage, (b) Construction en adobe au Yémen, (c) Mise en œuvre (Pomiculture Design, 2018), Cité par (Bellebcir, 2019).

### 1.4.3 La bauge

C'est une technique porteuse monolithique qui permet de modeler des formes directement sans l'aide de moule ou de coffrage. Elle nécessite l'utilisation d'une terre plastique (15 à 20% d'eau), ou en façonnant la terre directement comme une poterie (Doat P., 1979). Les proportions de chaque composant sont : 33% gravier, 33% sable, 33% argiles et limons (Galmiche, 2019). Les dimensions courantes des murs sont : 10 à 30 cm d'épaisseur à la base, et 5 à 15 cm au sommet figure (1.5.a). Le montage des murs s'effectue sur des soubassements en pierre ou en brique de 50cm à 1m avec un mortier à la chaux ou à la terre (Galmiche, 2019). Les Cases Obus de Musgum, en Cameroun, présentent un exemple de la construction en bauge qui existent jusqu'à nos jours Figure (1.5.b). Ces cases sont construites avec une hauteur de 9m et une forme aérodynamique qui diminue l'effet de l'impact des gouttes d'eau, ensuite les nervures décoratives contribuant à les ralentir et les dévier. Cette technique est en disparition aujourd'hui. Son utilisation est limitée à la réhabilitation des anciennes constructions.



(a) Construction d'un mur en bauge,

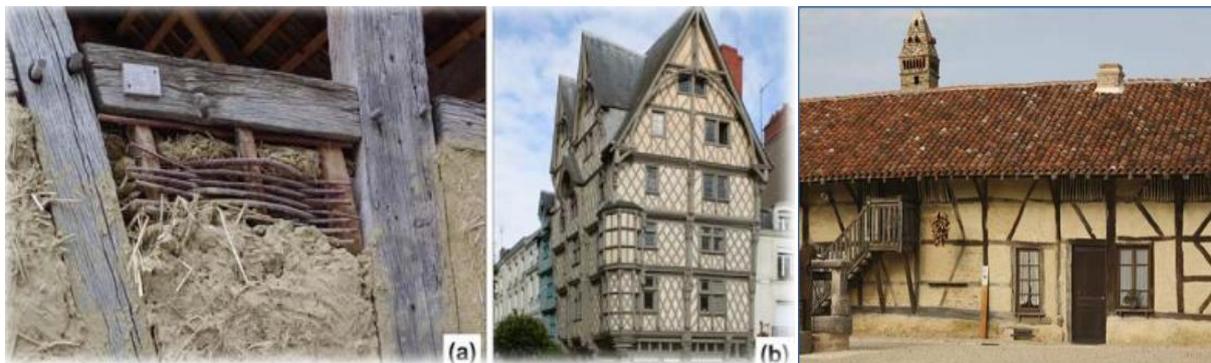


(b) Cases Obus de Musgum, Cameroun

**Figure 1.5.** (a) Construction d'un mur en bauge, Gaoua, Pays Lobi, Burkina Faso (Terki Y., 2013)  
 (b) Cases Obus de Musgum, Cameroun, (Anger R. et Fontain L., 2010)

#### 1.4.4 Le torchis

Les éléments de base de la construction en torchis sont de la terre argileuse à laquelle on ajoute de la paille ou tout autre débris végétal figure (1.6). Le mélange peut se faire aux pieds ou dans un malaxeur prévu à cet effet. Contrairement aux constructions en pisé, le torchis a besoin d'une structure (sur une ossature en bois) pour supporter la toiture. Les murs en torchis ne sont pas porteurs et leur épaisseur est généralement comprise entre 15 et 20 cm (Champire, 2017) et une Structure en colombage de bois hourdée de couche(s) de terre (Pascal Maillard, 2013).

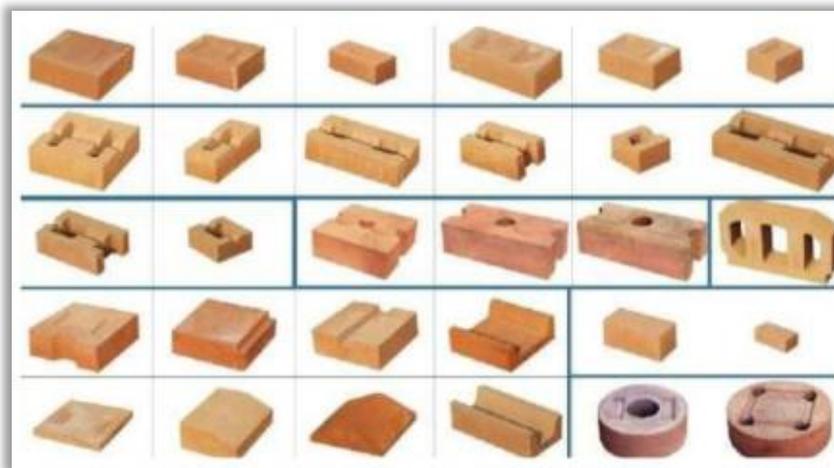


**Figure 1.6.** (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France. (Champire, 2017), Structure en colombage de bois hourdée de couche(s) de terre (Pascal Maillard 2013).

### 1.4.5 La brique de terre compressée (BTC)

La brique de terre compressée B.T.C. est d'une certaine manière, une version plus moderne de l'adobe. Les avantages des briques de terre compressée résident dans leur grande résistance et leur souplesse d'utilisation. Elles sont généralement stabilisées avec de la chaux ou du ciment, souvent de 6 à 8 % en masse sèche, le reste étant composé de terre crue, comme le mentionnent et all. (Doat ,1983).

Effectivement, dans la fabrication des briques de terre compressée (BTC), le mélange de terre avec un stabilisant est d'abord préparé. Ce mélange est ensuite moulé et compacté l'aide d'une presse mécanique ou manuelle pour former les briques. Les dimensions des BTC varient en fonction des moules utilisés. La Figure (1.7) présente les différentes formes de B.T.C.



**Figure 1.7.** Différents produits de blocs de terre comprimée. (Taallah, 2014).

### 1.4.6 La brique de terre extrudée (ou filée)

La brique de terre extrudée (ou filée) est une technique de construction en terre, généralement issue de la filière terre cuite, sortie du cycle de fabrication après séchage. Son rendement est élevé (fabrication industrielle) (Pascal Maillard, 2013), Ou la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à la construction. Figure (1.8).



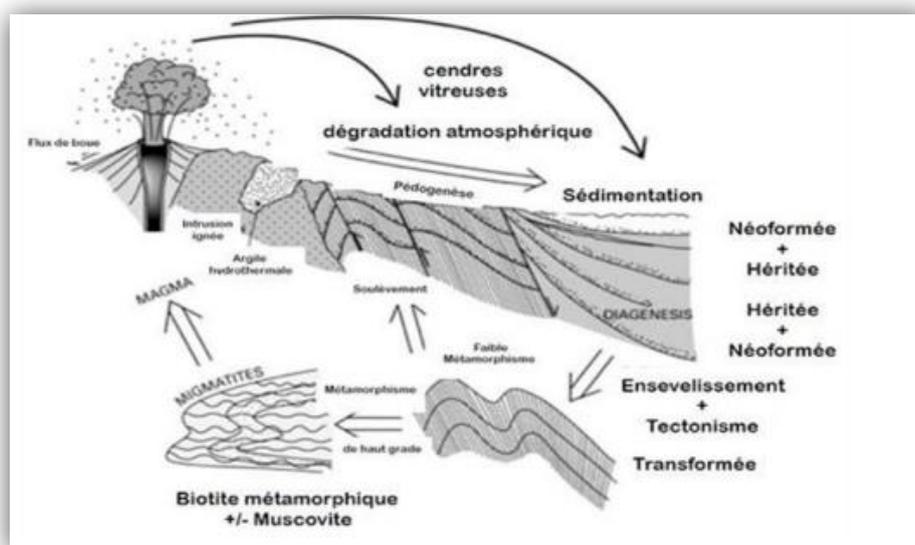
**Figure 1.8.** La brique de terre extrudée (ou filée) (Pascal Maillard, 2013), fabrication des blocs de Terre extrudée (source : <https://youtu.be/sQaXOxe9O1I>).

## 1. 5 Argiles et leurs propriétés :

### 1.5.1 Définition :

Les argiles, les limons et les marnes représentent en extension une fraction importante des terres émergées. En génie civil, ils apparaissent trop souvent comme de mauvais matériaux avec lesquels l'ingénieur doit composer. Dans certains cas particulièrement défavorables, l'ingénieur se voit contraint de mettre à la décharge des milliers de mètres cubes de sol argileux et de les remplacer par des matériaux d'apport, ceci malgré le coût de telles opérations.

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur composition diffèrent selon les conditions dans lesquelles elles se sont formées (HERNOT, 2016) figure (1.9).



**Figure 1.9.** Processus de formation des argiles. (HERNOT, 2016).

### 1.5.2. Classification des minéraux argileux

La minéralogie des argiles (Bergaya, 2006) est largement étudiée depuis de nombreuses années et continue d'intéresser les chercheurs notamment la minéralogie des argiles interstratifiées (Neumann, 2011 ; Moore et Reynolds, 1989 ; Lanson, 2005 ; Inoue, 1989 ; Caner, 2011). Il existe en effet différents types d'argiles selon une classification basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet argileux.

On distingue ainsi 3 groupes :

- Les minéraux à  $d = 7 \text{ \AA}$  (TO ou 1 :1) - Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique (T) siliceuse et d'une couche octaédrique (O) alumineuse ou magnésienne. Les couches liées par des liaisons hydrogène ont une distance fixe.

- Les minéraux (TOT ou 2 :1) - Le feuillet fortement ou faiblement chargé est constitué de deux couches T tétraédriques siliceuses avec substitutions isomorphiques et d'une couche octaédrique alumineuse (ou magnésienne, ferreuse...) pouvant également être substituée. La distance inter feuillet est soit fixe, soit variable et des cations compensateurs de la charge sont présents dans l'inter feuillet soit K, soit Ca ou Na...respectivement.

- Les minéraux à  $d = 14 \text{ \AA}$  (TOTO' ou 2 :1 :1) - Le feuillet est constitué par une alternance de structures TOT et d'une couche octaédrique supplémentaire O' dans l'espace inter feuillet. Cette couche est de nature gibbsitique [Al(OH)] ou brucitique [Mg(OH)]. Cette couche ne partage pas de sommets (liaisons ioniques) avec les couches tétraédriques des feuillets (2 :1) qui l'entourent mais neutralise les charges du feuillet en question.

Les travaux de l'A.I.P.E.A. (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles) (Bailey, 1980) citant les travaux de Brindley et Mackenzie depuis les années 1960) et plus tard ceux de Pédro (Pédro, 1994), ont permis d'aboutir à la classification du Tableau 2 qui repose sur l'utilisation des critères : type de feuillet, charge globale du feuillet et nature des cations interfoliaires.

**Tableau 2. Identification des principaux minéraux argileux** (CE : cations échangeables) – en jaune : les minéraux les plus couramment rencontrés dans les sols de fondations géotechniques. (Myriam, 2020)

Charge (x) Moles / demi-maille	dioctaédrique	trioctaédrique
<b>FEUILLET 1:1 ou TO</b>		
0	Kaolinite $Al_2 Si_2 (O_5) (OH)_4$ Dickite, Nacrite, Halloysite	Serpentine $Mg_3 Si_2 (O_5) (OH)_4$ Antigorite, Chrysotile*, Berthierine
<b>FEUILLET 2:1 ou TOT</b>		
0	Pyrophyllite $Al_2 Si_4 (O_{10}) (OH)_2$	Talc $Mg_3 Si_4 (O_{10}) (OH)_2$
<b>SMECTITES</b>		
0,2 à 0,6	substitutions octaédriques	
	montmorillonite $(Al_{2-x}Mg_x) Si_4 (O_{10}) (OH)_2 (CE)_x$	Hectorite - Stevensite $(Mg_{3-x}Li_x) Si_4 (O_{10}) (OH)_2 (CE)_x$
	substitutions tétraédriques	
	Beidellite (forme Al) $Al_2 (Si_{4-x}Al_x) (O_{10}) (OH)_2 (CE)_x$ Nontronite (forme Fe) Vermiculite (di-octa)	Saponite $Mg_3 (Si_{4-x}Al_x) (O_{10}) (OH)_2 (CE)_x$
<b>MICAS</b>		
0,6 à 0,9	Illite $(Al_{1,75}R_x) Si_{3,5} Al_{0,5} (O_{10}) (OH)_2 K_{0,75}$	Vermiculite tri-octa $(MgFe_3)(Si_{4-x}Al_x) (O_{10}) (OH)_2 Mg_x$
1	Muscovite $Al_2 (Si_3Al) (O_{10}) (OH)_2 K$	Phlogopite $Mg_3 (Si_3Al) (O_{10}) (OH)_2 (K)$
	glaucosite $(Al_{2-x}Fe^{3+} \cdot Fe^{2+} \cdot Mg_x) (Si_{3,75}Al_{0,25}) (O_{10}) (OH)_2 K$ paragonite : CEC Na glaucosite	Lépidolite Biotite $(Mg,Fe)^{2+}_3 (Si_3Al) (O_{10}) (OH)_2 (K)$
2	margarite : CEC Ca	clintonite : CEC Ca
<b>FEUILLET 2:1:1 ( ou TOTO' )</b>		
X	Donbassite, Cookeite, Sudoite	Chlorite $Fe, Mg, Al)_6 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$
		Chamosite, Nimite, Chlinochlore
<b>Feuille 2 : 1 en ruban</b>		
	Sépiolite $Si_{12} Mg_8 O_{30} (OH)_4 (OH, H^+)_4, 8H_2O$ Palygorskite $Si_8 Mg_5 O_{20} (OH)_2 (OH, H^+)_4, 4H_2O$ Attapulqite	

### 1.5.3. Les propriétés des minéraux argileux :

Dans le domaine du génie civil et de la construction, le champ d'utilisation des argiles est vaste tant leurs propriétés sont intéressantes et leur disponibilité quasi illimitée. Les argiles sont utilisées pour leurs propriétés remarquables.

- Comme matière première pour des matériaux de construction : brique, tuile ou matériau terre crue pour la construction, source d'alumine et de silice dans la fabrication par calcination du clinker, de la fibre de verre, de liant géo polymérique et de pouzzolane (ces derniers sont des alternatives au ciment portland), dans la fabrication du plâtre, de granules pour revêtements de toiture (kaolinite)...
- Les argiles avec leurs faibles tailles confèrent une forte réactivité chimique et Physique ainsi une importante surface de contact.

- Les argiles sont des minéraux aluminosilicates appartenant à la famille des phyllo silicates dont l'unité de base est le feuillet.
- La présence des sels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.
- Les argiles ont des propriétés chimiques du fluide hydratant.

## **1.6 Mortier de terre**

### **1.6.1 Définition**

Le mortier de terre est un mortier fait avec de l'argile ou de la terre crue. De par la disponibilité de la matière première, ce type de mortier est ou a été probablement employé partout dans le monde depuis des temps immémoriaux éventuellement en remplacement de la chaux ([Wikipédia \(wikipedia.org\)](http://Wikipédia (wikipedia.org))).

### **1.6.2 Caractéristiques des mortiers**

Le mortier permet de (Confédération de terre crue, 2020) :

- Transférer les charges entre les différentes briques jusqu'en pied d'élément d'ouvrage
- Donner une cohésion d'ensemble et ainsi contribuer à la stabilité du mur
- Contribuer au parement du mur
- Il est généralement préparé directement sur le chantier. En règle générale la terre utilisée pour produire le mortier est la même que celle utilisée pour produire les briques, mais l'utilisation d'une autre terre est possible.

#### ***Critère de choix des mortiers :***

Le mortier est choisi selon les trois critères suivants :

- Les caractéristiques mécaniques requises
- L'absorption d'eau par capillarité des éléments à monter
- Les conditions climatiques au moment du montage

Les caractéristiques mécaniques requises peuvent être de plusieurs types et sont à adapter à

L'usage considéré :

- La résistance à la compression
- La résistance à l'abrasion à l'eau et aux frottements
- L'adhérence et l'absorption d'eau
- La masse volumique
- La dimension maximale des granulats

### **1.6.3 Résistance à la compression**

La résistance de l'élément d'ouvrage sera celle des éléments les plus fragiles et il n'est donc pas Nécessaire d'avoir un mortier plus résistant que la brique, et réciproquement.

D'autre part, un contraste de rigidité trop fort entre le mortier et les briques peut être responsable de pathologies à long terme.

Les mortiers de terre crue sont ainsi les plus adaptés pour hourder des briques de terre crue.

### **1.6.4 Résistance à l'abrasion**

Dans le cas de l'abrasion, une différence de résistance peut être nuisible dans la mesure où Celle-ci entraîne des érosions différentielles.

Il est donc recommandé, en cas d'exposition à des contraintes d'exposition à la pluie ou de Frottement, et en l'absence de parement rajouté (bardage, enduit) d'avoir un mortier ayant une Résistance la plus proche de celle des briques. Là aussi, les mortiers de terre crue sont ainsi les plus adaptés pour hourder des briques de terre crue.

### **1.6.5 Adhérence et absorption d'eau**

Pour que le mortier adhère aux briques et participe ainsi à la stabilité de l'ouvrage, il faut que Celui-ci ait des variations dimensionnelles lors de sa vie en œuvre compatibles avec (proches de) celles des briques. Pour cette raison également, les mortiers de terre crue sont ainsi les plus adaptés pour hourder des briques de terre crue.

Lors de sa mise en œuvre et son séchage, les phénomènes d'absorption d'eau et de retrait peuvent également nuire à la bonne cohésion du mortier. Pour cela il est nécessaire de tester

L'adhérence du mortier sur la brique dans les conditions de mise en œuvre qui seront appliquées.

### **1.6.6 Masse volumique**

La masse volumique peut avoir un effet sur les caractéristiques acoustiques et thermiques de l'élément d'ouvrage.

### **1.6.7 Dimension maximale des grains**

Il est recommandé que la taille des plus gros grains n'excède pas 2/3 de la taille des joints les plus, fins.

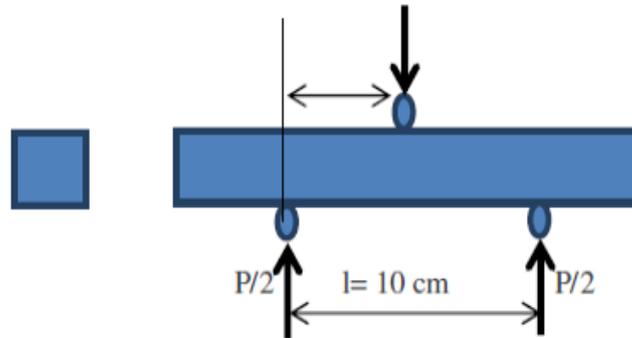
### **1.6.8 Mesure des caractéristiques :**

#### **1.6.8.1 Les caractéristiques mécaniques (NF EN12390-5) (NF P94-077) :**

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé (NF EN12390-5). Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être soumises à une force de compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm.

**-Résistance à la flexion :**

La machine utilisée est la machine de flexion trois points (deux appuis et un une force concentrée au milieu) figure (1.10) :



**Figure 1.10.** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

- Si  $P$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $P l/4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette.

$R_f$  : (en  $N/mm^2$ ) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1.5 F_f l}{b^3} \quad (1.1)$$

**D'où :**

$R_f$  : est la résistance en flexion en MPa.

$b$  : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

$P$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

$L$  : est la distance entre les appuis, en millimètres

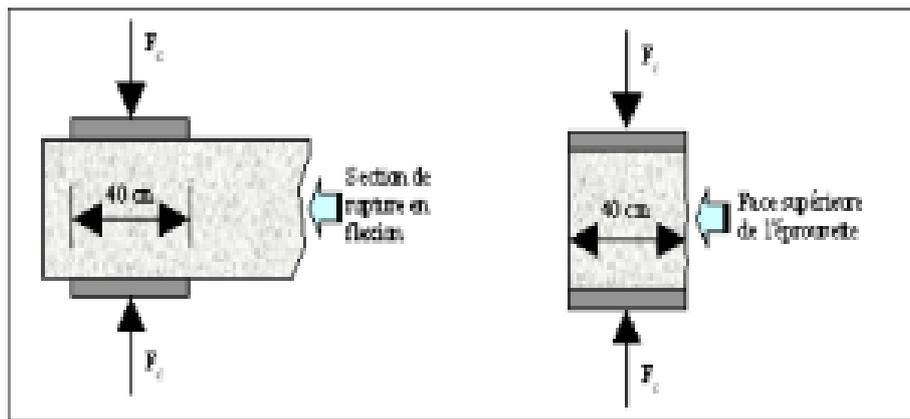
La machine utilisée est la machine de flexion trois points (deux appuis et un une force concentrée au milieu). figure (1.11).



**Figure 1.11.** La machine de flexion. (Chourouk ,2015)

**-Résistance à la compression (NF P94-077) :**

Les éprouvettes récupérées après essai de flexion sont sujets encore fois à un autre essai de compression. Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à  $\pm 0.5$  mm en utilisant le dispositif comportant la surface d'application de  $4 \times 4$  cm<sup>2</sup> puis la charge sera appliquée en augmentation avec une vitesse providence jusqu'à la rupture. figure (1.12).



**Figure 1.12.** Schéma type de l'essai de compression.

-La machine utilisée est la machine de compression, conforme à la norme EN 12390-4 avec un dispositif de surface  $4 \times 4$  cm<sup>2</sup> figure (1.13).



**Figure 1.13.** La machine de compression.

La résistance en compression RC (en N/mm<sup>2</sup>) est calculée au moyen de la formule :

$$RC = \frac{Fc}{b^2} \quad (1.2)$$

Avec :

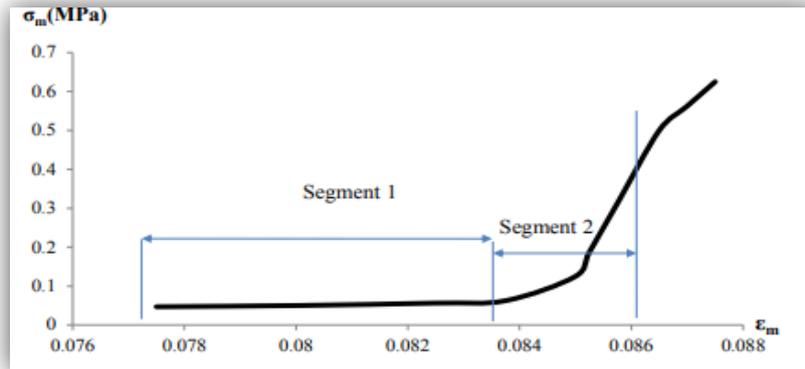
**RC** : Résistance à la compression en (MPa).

**FC** : Charge de rupture en (N).

**b** : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

### -Les déformations :

Les déformations sont aussi enregistrées à l'aide d'un capteur de déplacement. L'appareillage est connecté à un système d'acquisition des données pour l'enregistrement des résultats. La courbe contrainte déformation et les propriétés mécaniques (module de Young, résistance à la compression, déformations) figure (1.14).



**Figure 1.14.** Courbe contrainte déformation du mortier en terre (Hafsa,2022)

### 1.6.3.2 Les caractéristiques rhéologiques et physiques

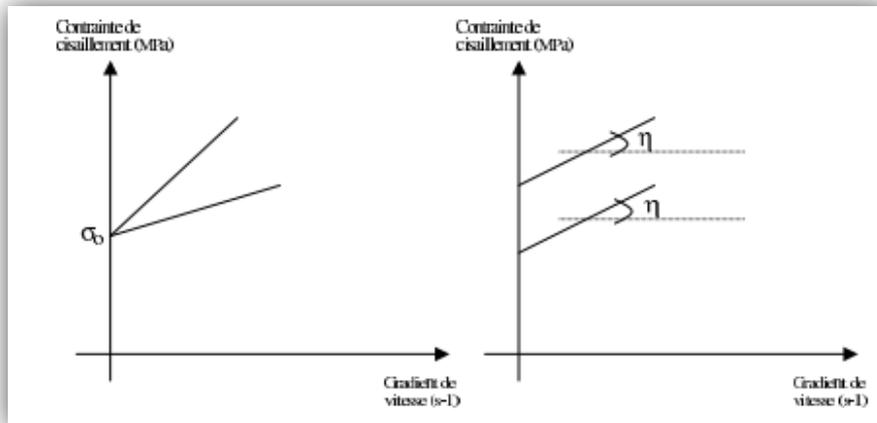
#### 1.6.3.2.1 : Les caractéristiques rhéologiques :

L'étude de la rhéologie des mortiers est un domaine très complexe. Cette complexité tient au fait que le mortier est tout d'abord un milieu multiphasique (granulats, liant, eau, air) et il s'ensuit que ces phases agissent fortement dans le temps sur sa rhéologie. En plus, quand en interaction avec des blocs, ceux-ci vont aussi intervenir sur les propriétés rhéologiques du mortier, sans oublier les efforts sur leur cure dus aux conditions climatiques dans un chantier par exemple. A cause de cette complexité, contrairement, nous pensons que les maçons ont difficultés pour trouver naturellement un compromis entre toutes ces contraintes. la seule préoccupation d'un maçon d'aujourd'hui, en général, même s'il agit d'une exigence qui lui est faite, est d'avoir une fluidité suffisante pour bien poser les blocs les uns sur les autres avec le moindre effort et le plus rapidement possible. Or, un bon maçon devrait essayer de travailler avec un mortier le plus sec possible afin de favoriser une bonne résistance mécanique à l'états durci. Un bon maçon devrait aussi faire attention à la cure de mortier dans un chantier.

La rhéologie est la science responsable de l'étude de la déformation et l'écoulement d'un matériau (milieu continu), sous l'influence de contraintes. (Tattersall,2005) ajoute que ces concepts sont tout à fait adéquats pour étudier le comportement à la déformation des liants, dans l'états frais, matériaux ' complexes' qui ne peuvent pas être classées tout simplement comme un solide, liquide ou gaz.

Le seuil d'écoulement et la viscosité plastique définissent les paramètres de la loi rhéologique du fluide de Bingham. Plusieurs recherches sur les pâtes, mortiers et bétons

ont montré que la loi rhéologique de ces mélanges s'approchait de celle du fluide de Bingham. (Azeredo et al. 2005), figure (1.15) .



**Figure 1.15.** Bétons différents qui présentent l'un des paramètres de Bingham identique ( $\sigma_0 =$  seuil d'écoulement et  $\eta =$  Viscosité plastique (Azeredo et al. 2005)

Selon (Azeredo et al. 2005) , nous avons trois propriétés physiques responsables pour les caractéristiques rhéologiques des mortiers :

- Cohésion :** il s'agit de l'union des constituants du mortier. Cette propriété est directement liée aux constituants les plus fins, c'est-à-dire à la surface spécifique des liants.
- Viscosité :** c'est la vitesse de déformation d'un corps. Elle est directement liée à la pâte. La viscosité des matériaux cimentaires est diminuée par agitation, ce qui provoque une diminution dans la cohésion entre les particules et aussi dans le frottement interne du volume travaillé.
- Frottement interne :** contrairement à la cohésion, cette propriété est plutôt liée aux constituants les plus gros et à leur distribution dans le mélange. Il peut varier avec la forme, la surface et la dimension des grains. Le frottement est aussi lié au volume de pâte interstitielle et sa teneur en eau.

Ils ont étudié la rhéologie des pâtes de chaux hydratée pour que les résultats servent de base lors de l'étude de la rhéologie d'un mortier proprement dit à base de chaux.

D'après son étude, l'évolution du seuil d'écoulement avec le temps est représentée par la prise qui est l'effet mécanique du aux phénomènes d'hydratation pour des matériaux comme le ciment. Dans le cas d'une chaux, la cohésion n'est pas résultante de l'hydratation mais de phénomènes d'interaction eau-chaux. On ne pas de prise d'une pâte de chaux, mais le phénomène est similaire.

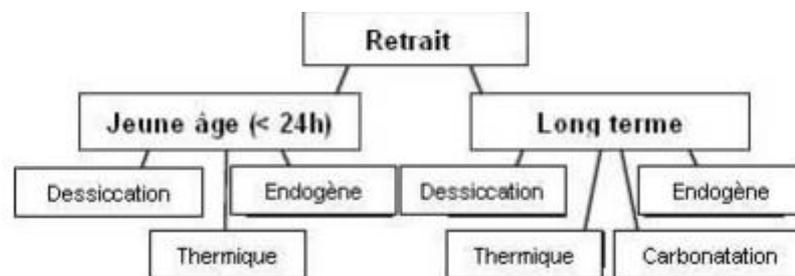
### 1.6.3.2.2: Les caractéristiques physiques :

Pour La masse volumique sèche d'une éprouvette donnée de mortier durci est déterminée par le quotient de sa masse à l'état sec en étuve par le volume qu'elle occupe lorsqu'elle est immergée dans l'eau, à l'état saturé Hamel et all (Hamel ,2021).

Et pour l'absorption d'eau La capacité d'absorption d'eau (CAE) des matériaux de constructions est leurs pouvoirs d'absorber et de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé dans l'eau et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique La CAE varie principalement en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions. Elle est aussi influencée par la nature de la substance et son pouvoir hydrophile. La CAE des mortiers de finissage à agrégats en sable de quartz, pas plus de 8 % ; et celle des mortiers à agrégats en roches de 12 % au maximum Riad et all (Riad, 2002). Et pour le mode opératoire voir le chapitre 2 figure (2.25).

#### -Retrait :

A partir de la prise du mortier, le retrait est le raccourcissement spontané du matériau non chargé. Le retrait peut être divisé en plusieurs types présentés dans la figure (1.16).



**Figure1.16.** différents types de retrait (Iii and Sabatier, 2008)

## 1.7 Effet des cendres agricoles sur le comportement des matériaux cimentaires :

### 1.7.1 Déchets agricoles dans la construction :

Les opérations de récolte et après récolte dans le domaine de l'agriculture génèrent annuellement d'énormes quantités de déchets agriculture, ces déchets connaissent un gros gaspillage soit par brulement où évacuation à des décharges. Ce qui influe notre planète par des émissions de GES et pollution de l'eau. Le grand défi actuellement est de minimiser les émissions du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) libéré par la combustion dans le monde (Zami and Lee, 2009). Les déchets de source agricoles peuvent être utilisés dans la construction en les

incorporant dans les matériaux de construction pour améliorer leurs propriétés techniques. Plusieurs déchets agricoles comme la paille et les feuilles de cultures, les fibres de fruits, de coques et de tiges ainsi que les coquilles contiennent une teneur en fibres qui pourrait être utilisée comme ingrédient dans les matériaux de construction composites (Rowell, and 1996 ; Chee-Ming, 2011).

## **1.7.2 Types de cendres :**

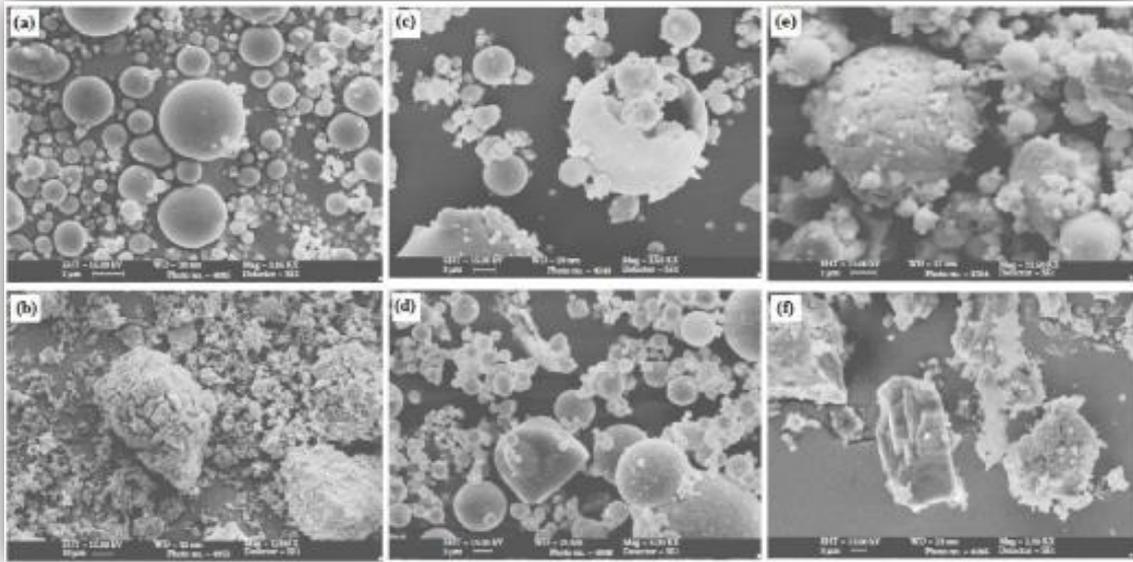
### **1.7.2.1 Cendres volantes :**

Les cendres volantes peuvent présenter différentes compositions chimiques et phases, qui dépendent des impuretés présentes dans le charbon utilisé. Leur forme se caractérise généralement par de petites sphères, avec un diamètre variant de 1  $\mu\text{m}$  à 200  $\mu\text{m}$  (avec 50 % des particules ayant un diamètre inférieur à 30  $\mu\text{m}$ ). Leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 400  $\text{m}^2/\text{kg}$ , une plage similaire à celle des ciments. La forme et la granulométrie des cendres volantes exercent une influence significative sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais, comme le souligne (Amouri ,2009).

Cette variabilité peut affecter les propriétés et la performance des bétons dans diverses applications de construction. Les cendres volantes sont principalement composées de particules sphériques, mais leur morphologie peut varier en fonction du type de charbon utilisé, de sa finesse, des conditions de combustion et du processus de collecte dans la centrale thermique. Ainsi, ces particules peuvent être sphériques, angulaires ou irrégulières, et leur surface peut être lisse, rugueuse ou revêtue. Cette diversité morphologique peut influencer les propriétés et les performances des cendres volantes dans diverses applications, notamment dans la construction. (Tokyay, 2016) Figure (1.17).

Parmi les six mélanges minéraux différents testés, les cendres volantes ultrafines (UFFA) ont été déterminées pour donner les meilleurs résultats en réduisant la limite d'élasticité et la viscosité (Ferraris, Obla and Hill, 2001).

Une étude de réalise par Mourad temimi (Mourad ,1995) Le chercheur à constater que l'évolution des résistances (compression ou traction) des différents mortiers au cours de temps pour la même proportion de liant (ciment), les éprouvettes de mortier constituent que les cendres manifestent une réactivité due à leur caractère pouzzolanique et intervenant après 28jours de durcissement environ.



**Figure 1.17.** Images au MEB des cendres volantes ; (a) cénoosphères et sphères solides ; (b) chaux libre massive ; (c) plérosphère, (d) de quartz angulaires. ; (e) sphère recouverte de magnétite et (f) cristal de calcite ; (g) carbone non brûlé avec des microsphères et (h) cristaux de mellite agglomérés (Tokyay, 2016).

### 1.7.2.2 Cendres biomasse :

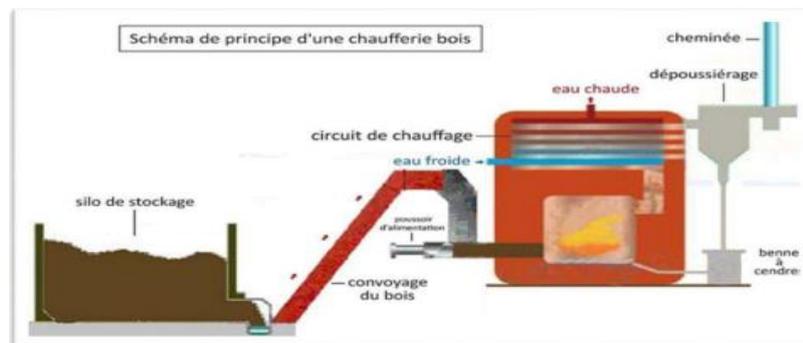
La cendre de biomasse est en effet le résidu minéral qui reste après la combustion de matériaux organiques tels que le bois et d'autres types de biomasse, ainsi que des métaux lourds qui étaient présents dans les matériaux d'origine. De plus, la cendre de biomasse a souvent un pH élevé en raison de la présence de composés alcalins formés pendant le processus de combustion (Viviani, 2018).

Leur utilisation dans la production de matériaux de construction représente actuellement les plus grandes opportunités de valorisation, notamment comme composant dans les ciments et bétons (effet pouzzolanique et activateur chimique).

D'autres pistes étudiées sont leur incorporation comme charge minérale dans les peintures, matières plastiques et mélanges bitumineux. Leur capacité d'adsorption importante pourrait aussi permettre une valorisation qui serait moins chère que le charbon actif. Enfin, la récupération des imbrûlés (cendres encore riches en C) peut trouver une valorisation en tant que combustible, sorbant, fillers, pigment, ou bio char. (Martin, 2015).

### 1.7.2.2 Cendres de bois :

Les cendres de chaufferies bois sont des résidus de combustion et d'incinération. Ce sont aussi des produits susceptibles d'être utilisés en tant que matières fertilisantes, Dans le domaine de la construction, les cendres de chaufferies bois pourraient être utilisées comme ajout à des matériaux de construction traditionnels ou comme composants principaux dans des matériaux écologiques et durables. Leur utilisation dans le bâtiment et les travaux publics pourrait contribuer à réduire l'empreinte carbone des projets de construction tout en valorisant un sous-produit souvent considéré comme un déchet (Ademe,2001). Et en technique routières, cendre de bois pourraient entrer dans la constitution de remblais et sous couches de chaussées en tant que liant à faible caractère pouzzolanique, correcteur granulométrique ou filler dont le rôle est de compléter la granulométrie d'un matériau pauvre en fraction fine (inférieure à 500 µm). (Baali, 2015).



**Figure 1.18.** Schéma de principe d'une chaufferie bois. (Wikipédia)

### 1.7.2.2 Cendres de papeterie :

Les cendres de papeterie sont sous-produits essentiellement composés de calcium, de silicium et d'aluminium : à eux trois, ils représentent entre 70 et 90 % des matériaux. (Segui ,2011).

Les cendres de papeterie peuvent être produites à partir d'une variété de sources, y compris des déchets primaires de papeterie tels que la sciure et les copeaux de bois, ainsi que des boues provenant des stations d'épuration de l'usine. Ces matériaux sont souvent utilisés comme combustibles dans les chaudières des installations de papeterie pour produire de la chaleur et de l'énergie, les proportions relatives de ces différents matériaux d'alimentation, ainsi que les conditions de combustion et de calcination, peuvent varier d'une installation à une autre. Ces variations entraînent des différences dans les caractéristiques des cendres produites. Par exemple, la composition chimique, la granulométrie et les propriétés physiques des cendres peuvent être influencées par les types de matériaux brûlés, les conditions de combustion, la température de calcination, etc.

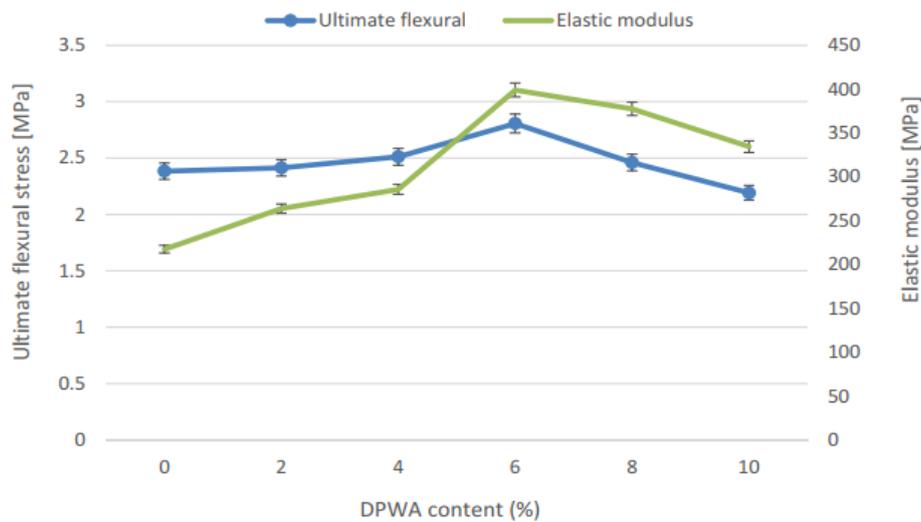
Ces différences dans les caractéristiques des cendres de papeterie peuvent avoir un impact sur leur utilisation potentielle dans diverses applications, notamment comme matières fertilisantes, charges minérales dans les matériaux de construction, A part dans le cas des cendres produites en laboratoire, peu de données sont disponibles concernant les entrants dans les chaudières et leurs proportions. (Segui, 2011). Actuellement, de nombreuses recherches essayent de valoriser les cendres volantes de papeterie comme des ajouts dans l'industrie cimentaire.

### **1.7.2.2 Cendres des déchets des palmiers dattiers :**

Les cendres issues de la combustion des déchets de palmiers dattiers sont en effet un résidu riche en minéraux résultant de la pyrolyse et de la combustion de divers matériaux organiques et inorganiques. Ces cendres sont souvent basiques en raison des minéraux présents dans les matériaux brûlés. Parmi les minéraux couramment retrouvés dans les cendres de palmier dattier, on peut citer :

1. Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) : un minéral silicaté présent dans de nombreux matériaux rocheux et sédimentaires.
2. Sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) : également connu sous le nom de gypse, il est souvent présent dans les sols et les matériaux de construction.
3. Oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) : un composé chimique important utilisé dans diverses applications industrielles.
4. Chlorure de potassium ( $\text{KCl}$ ) et chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) : des sels minéraux courants présents dans de nombreux environnements naturels (Rezig, 2012).

La valorisation l'utilisation de cendre de palmier dattier (CPD) dans le domaine de la construction en terre et précisément dans la fabrication du mortier en terre a fait l'objet d'une étude réalisée par Almeasar et al. (Almeasar, 2023). L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'amélioration des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du mortier de terre en substituant partiellement la chaux par des cendres de déchets (CPD). Les résultats obtenus montrent que les mélanges préparés à la dose de 6% de (CPD), étaient optimum. Cet ajout de (CPD) a entraîné une réduction de 40% du retrait linéaire, soit une augmentation de 83,4% en module élasticité figure (1.20) et une amélioration des propriétés physiques, mécaniques et hygroscopiques.



**Figure 1.19.** Résistance maximale à la flexion et module d'élasticité en flexion en fonction de la teneur de cendres des palmiers dattiers. (Almeasar, 2023)

### 1.8 Conclusion :

Dans cette synthèse bibliographique, les différents types d'argiles, leurs propriétés et leurs avantages et inconvénients dans le domaine de construction en terre sont présentés. A travers cette recherche bibliographique, nous avons remarqué aussi que de nombreux travaux de recherche ont confirmé que les cendres de différentes natures sont utilisées dans la fabrication des matériaux cimentaires pour améliorer leurs propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques ainsi que leur durabilité. Les résultats des études expérimentales réalisées dans le domaine de la construction en terre, notamment sur le mortier de terre à base de ciments ou de chaux, ont montré l'effet bénéfique de l'introduction des cendres de déchets agricoles comme le cas des cendres de déchets de palmiers dattiers dans les mélanges des matériaux en terre crue. Mais il faut mentionner qu'on n'a pas trouvé de travaux réalisés sur l'utilisation des déchets de tomates ou de piments dans le domaine de construction en terre, c'est pour cette raison qu'on s'est intéressé à ce sujet à travers l'étude expérimentale présentée dans les chapitres 2 et 3.

**Partie II :**  
Etude expérimental

# **Chapitre 2 :**

## **Matériaux et procédures**

## 2.1 Introduction

L'industrie de mortier dépend principalement de la connaissance des propriétés physiques, chimiques et mécaniques les plus importantes des matériaux qui entrent dans sa composition, à travers laquelle nous jugeons la qualité des matériaux utilisés dans la composition de mortier. Dans ce chapitre on s'intéresse au mortier de terre crue avec cendre de déchets de tomates et de piments en caractérisant ces constituants et en présentant la procédure de fabrication des échantillons et les essais à réaliser.

## 2.2. Matériaux utilisés

Dans ce travail, nous avons cherché à utiliser de différents matériaux naturels (Sol, sable concassé et cendres de déchets de tomates et de piments) en procédant par substitution substituant partielle de la chaux par des cendres de déchets de tomates et piments.

## 2.3 Sol

Le sol utilisé dans cette recherche est ramené de la région de Biskra figure (2.1).



**Figure 2.1.** Le Sol

## 2.4. Caractéristiques physiques du sol

Le sol utilisé est écrêté à 2 mm avant de procéder aux divers essais. (Houben and Guillaud, 1994) recommandent l'interdiction de la formation des nodules de taille supérieure à 10 mm causé par les éléments fins présents dans les sols. La résistance à la compression peut être réduite à la moitié si 50% des nodules sont supérieure à 5mm.

Les essais de caractérisation du sol utilisé sont comme suit :

- Masse volumique apparente ;
- Masse volumique absolue ;
- Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.

- Limite d'Atterberg ;
- Essai au bleu de méthylène et surface spécifique.

### 2.4.1. Masse volumique apparente NF P 18-554 et NF P 18-555 et NA 255

#### 2.4.1.1 : Définition :

Elle est définie comme étant la masse de l'unité (mètre au cube) de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient, et l'intérêt en génie civil est la détermination de la masse volumique apparente sèche  $P$  des granulats.

Cette propriété est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (2.1)$$

$M_0$  : la masse du récipient propre et vide .

$M_1$  : la masse du récipient rempli .

$V$  : Le volume du récipient .



**Figure 2.2.** La masse volumique apparente de sol

### 2.4.2. Masse volumique absolue NF P 18-554 et NF P 18-555 et NA 255

La masse volumique absolue  $P_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. On détermine par l'équation suivante par méthode de l'éprouvette graduée :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.2)$$

$M$  : un échantillon de granulats secs de masse  $M$  (environ 300 g).

$V_1$  : l'eau dans l'éprouvette (presque demi hauteur).

$V_2$  : le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette.

### 2.4.3. Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (P94-056)

L'analyse granulométrique par tamisage est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension, cet essai utilise pour classer les différents types de sols (Figure 2.3). Une fraction du passant du tamis 0,08 a été analysée par l'essai de sédimentométrie selon la norme NF P 94-056.



**Figure 2.3.** Analyse granulométrique par tamisage

### 2.4.4. L'imites d'Atterberg (P94-051)

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) : teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol. Et le principe recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol place dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés (Figure 2.5).

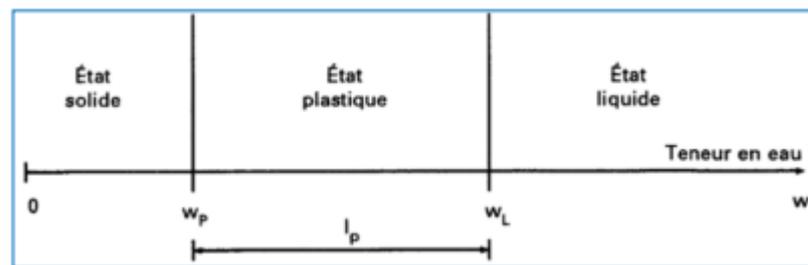


**Figure 2.5.** Appareil de Casa grande.

- Limite de liquidité ( $Wl$ ) : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- Limite de plasticité ( $Wp$ ) : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- Indice de plasticité ( $Ip$ ) : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$Ip = Wl - Wp \quad (2.3)$$

Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension figure (2.6) et les résultats dans le tableau (2.2).

**Figure 2.6.** Représentation des limites d'atterberg.

La classification décrite ci-après distingue les seuils suivants :

**Tableau 2.1 :** Indice de plasticité ( $Ip$ ) et type de sol

Indice de plasticité ( $Ip$ )	Type de sol
$Ip < 12$	Faiblement argileux
$12 \leq Ip < 25$	Moyennement argileux
$25 \leq Ip < 40$	Argileux
$Ip \geq 40$	Très argileux

L'indice de consistance ( $Ic$ ) : rapport défini par la formule suivante :

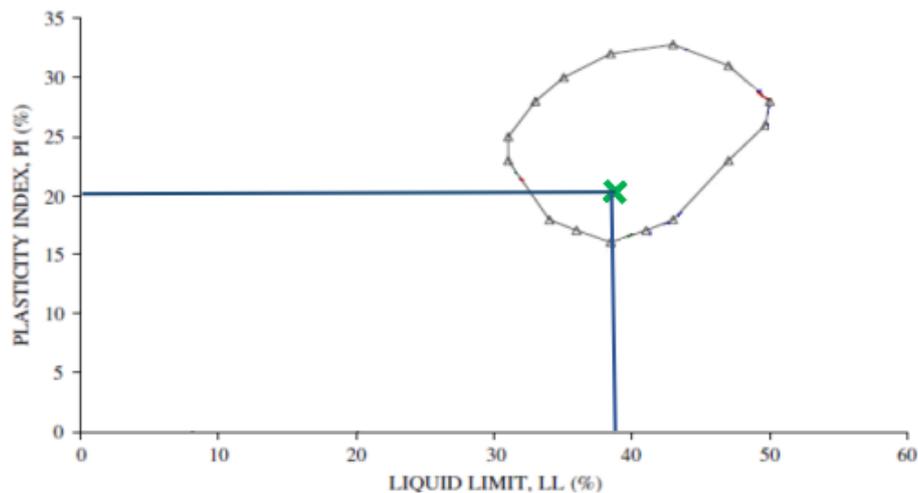
$$Ic = \frac{Wl - W}{Ip} \quad (2.4)$$

**Tableau 2.2 :** limite d'Atterberg de sol

Limites d'Atterberg (%)

Sol	Limite de liquidité Wl	Limite de plasticité Wp	Indice de plasticité IP
	34	16	18

Mettre les deux valeurs  $w_l = 34$  avec  $I_p = 18$  sur la zone des limites d'Atterberg de l'Adobe comme le montre la figure (2.7). Si On constate que le sol se situe dans la zone, donc le sol présente une plasticité tout à fait adaptée à la production de l'Adobe (Delgado, 2007).



**Figure 2.7.** La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe. (Delgado, 2007)

#### 2.4.5 Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache (ANF P 18-592)

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sol à adsorber du bleu de méthylène à la surface externe et interne des particules étudiées.

C'est un essai particulièrement adapté à l'étude des argiles ou fraction argileuse d'un sol qui présente, selon leur composition minéralogique, des surfaces spécifiques plus au moins importantes. Le test consiste à imbiber 30 grammes de sol dans 100 cm<sup>3</sup> d'eau distillée pendant une heure ; cette solution est ensuite agitée pendant cinq minutes et on injecte des doses successives bien déterminées de bleu de méthylène de 5 cm<sup>3</sup> dans la suspension de sol jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argiles. Au bout d'une minute, une goutte de solution est prélevée et déposée sur un papier filtre, figure (2.8) Une auréole incolore indique que tout le bleu injecté a été adsorbé et une auréole bleue, que nous avons atteint le degré de saturation d'adsorption.

Cet essai a été réalisé selon la norme française NF P18-592 au Laboratoire de mécanique de sol du département de génie civil et d'hydraulique de l'université Biskra. Une valeur au bleu de méthylène de VBS a été présentée dans le tableau (2.3) et On détermine par l'équation suivante :

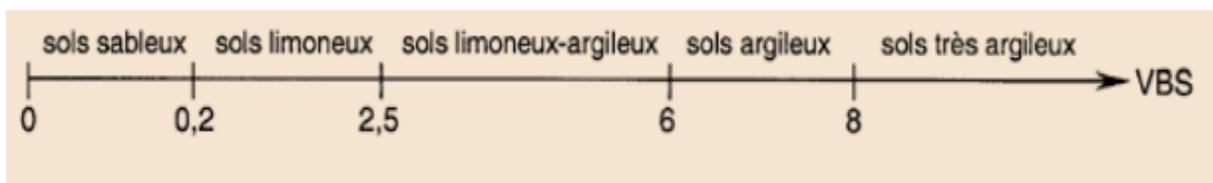
$$V_{BS} = 100 \times \frac{B \times C}{M_s} \quad (2.5)$$

Où :

- B : Masse du bleu introduite (grammes).
- Ms : Masse de l'échantillon à l'état sec.
- C : concentration de la solution du bleu (0.1g/l).



**Figure 2.8.** Agitation mécanique de la suspension de sol et les taches de bleu de méthylène sur le papier filtre.



**Figure 2.9.** Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068).

**Tableau 2.3 :** Valeur du bleu de méthylène.

Echantillon	Valeur du Bleu VBS (g/ml)	Classification du sol
Sol (région de Biskra)	3.03	Sols limoneux-argileux

## 2.5 Sable concassé

Le sable utilisé dans tous les mélanges des blocs est un sable concassé (0/3) provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie) figure (2.10). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granulaire du sol. Les caractéristiques physiques du sable déterminées selon les normes AFNOR, les propriétés physiques et la composition chimique sont représentées dans le Tableau (2.4) et le Tableau (2.5).

**Tableau 2.4 :** les propriétés physiques de sable concassé.

M. V. AP. (Kg/m <sup>3</sup> )	M. V. ABS. (Kg/m <sup>3</sup> )	Distribution de la taille des grains (%)		
		< 0.08 mm	0.08- 1.00 mm	1.00 -5 mm
1550	2300	25	27	48



**Figure 2.10.** Le sable concassé.

**Tableau 2.5 :** la composition chimique de sable concassé.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Loss on ignition
1.07	0.31	0.14	57.22	0.07	0.06	0.02	0.57	40.21

## 2.6 la chaux

Il est couramment connu que les ajouts de chaux avec des teneurs optimales aux sols comportant une fraction argileuse entraînent le développement de calcite et d'hydrate de silicate de calcium (CSH). Ce qui se traduit par l'amélioration des propriétés mécaniques et la compacité des briques d'adobe. Par conséquent, il y a lieu d'avoir des briques d'adobe amendées à la chaux convenable à la construction (Millogo, 2008). Tous les types de chaux sont à employer en

principe dans la stabilisation du matériau terre destiné à la construction, néanmoins, la préférence est donnée aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de moins 20 % (Doat, 1979b).

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par l'unité de chaux de Saida–Algérie figure (2.11). Ses propriétés physiques et chimiques sont présentées sur le Tableau (2.6) (Taallah, 2016).



Figure 2.11. Chaux broyée de Saida (chaux vive).

Tableau 2.6: Les propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida-Algérie.

Propriétés physique	Propriétés chimique	
Masse volumique apparente (g/l) = 600-900	CaO (%)	< 83.3
Plus de 90 $\mu m$ (%) < 10	Mgo (%)	<0.5
Plus de 630 $\mu m$ (%) (0)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<1.5
	SiO <sub>2</sub> (%)	<2.5
	SO <sub>3</sub> (%)	<0.5
	Na <sub>2</sub> O(%)	0.4-0.5
	CO <sub>2</sub> (%)	<5
	CaCO <sub>3</sub> (%)	<10
	Matériau insoluble	<1

### 2.7 Eau :

En référence à la norme NF EN 1008, l'eau potable toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui se trouvent, donc l'eau de gâchage doit être vérifiée dans le cas où elle présente un doute. Pour éviter tout risque nous avons opté pour une eau de gâchage qui est l'eau potable qui ne présente aucun risque d'après la norme suscitée. L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable (eau de robinet) fournie au laboratoire de génie-civil à l'université de

Biskra. Celle-ci provient du réseau public et ayant une température de  $20 \pm 1$  ° C. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404 (Taallah, 2014b ; Izemmouren, 2016).

## 2.8 Cendres de déchets de tomates et de piments

Le déchet de cendres de tomates et piments utilisé dans les mélanges des déchets sont récupérés des zones agricoles de la région de Biskra, (Algérie). Le broyage des déchets est réalisé au niveau du laboratoire de matériaux de construction de l'université de Biskra via le broyeur présenté sur la figure (2.12).



**Figure 2.12.** Le broyeur.

### 2.8.1 : Fabrication de cendres :

Dans la figure (2.13) les cendres des déchets sont broyées selon les étapes suivantes : La premier étape est de mettre les cendres dans chaque bol et mettre dix boules dans chaque bol comme la figure (2.14), ensuite on fixe les bols et on ferme le couvercle du broyeur. On fixe la vitesse de broyage à 270 tr/min pendant dix-minutes ensuite, on le retire les cendres broyées des bols figure (2.15).



**Figure 2.13.** Les cendres avant le broyage



**Figure 2.14.** Les cendres dans les bols.



**Figure 2.15.** Les cendres après le broyage.

## 2.8.2 Essais sur cendres :

### 2.8.2.1 La finesse :

La finesse d'un ciment ou d'une poudre est généralement exprimée par sa surface massique. On appelle surface massique ou spécifique d'une poudre, la surface (exprimée en  $\text{cm}^2$ ) d'un gramme de cette poudre dont tous les grains seraient développés.

L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface par la méthode de perméabilité à l'air (méthode Blaine) (NF EN 196-6).

#### Mode Opératoire :

- 1- Placer grille + papier filtre + CT ou CP (quantité calculée) + papier filtre,
- 2- Tasser et ôter le piston,
- 3- Vérifier le niveau de liquide : il doit arriver au trait inférieur (4) ; si nécessaire, parfaire ce niveau,
- 4- Placer la cellule sur l'ajutage. La jonction doit être étanche (très mince couche de vaseline). S'assurer de l'étanchéité de l'ensemble (boucher la cellule avec le pouce, aspirer avec la poire

pour faire monter le liquide aux environs du trait supérieur (1), si on ferme le robinet, le niveau doit rester constant),

5- L'étanchéité étant réalisée, aspirer le liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le trait supérieur (1), et fermer le robinet.

6- L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse : chronométrer le temps que met le liquide à passer du 2 trait au 3 trait ; soit  $t$  (en secondes) la moyenne des temps résultant de 3 mesures consécutives.

7- Noter la température,

8- En déduire la surface spécifique :

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1\eta}} \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad (2.6)$$

$K$  : Constante de l'appareil,

$e$  : porosité du lit,

$t$  : temps mesuré en secondes (s),

$\rho$  : Masse volumique du CT ou CP en grammes par centimètres cubes.

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai extraite du tableau 1 en pascals secondes (Pa.s)

Avec la porosité  $e = 0.500$  et la température d'essai de  $20 \pm 2$  °C .

### 2.8.2.2 La masse volumique absolue (Méthode de Lechatelier) :

On fait cet essai par rapport cendre de CT et CP, nous avons pesé de masse ( $M$ ) 10.03g de CT et 10.09g pour CP et ajouter le l'essence dans l'éprouvette de 50ml, de Volume 25 ml et l'utilisation de l'essence par ce qu'il ne réagit pas avec la cendre. Figure (2.16)

$M$  : un échantillon de granulats secs de masse  $M$

$V_1$  = l'essence dans l'éprouvette (presque demi hauteur).

$V_2$  = le nouveau volume d'essence dans l'éprouvette.



**Figure 2.16.** L'essai de la masse volumique de cendres.

## 2.9 les caractéristiques physiques des matériaux :

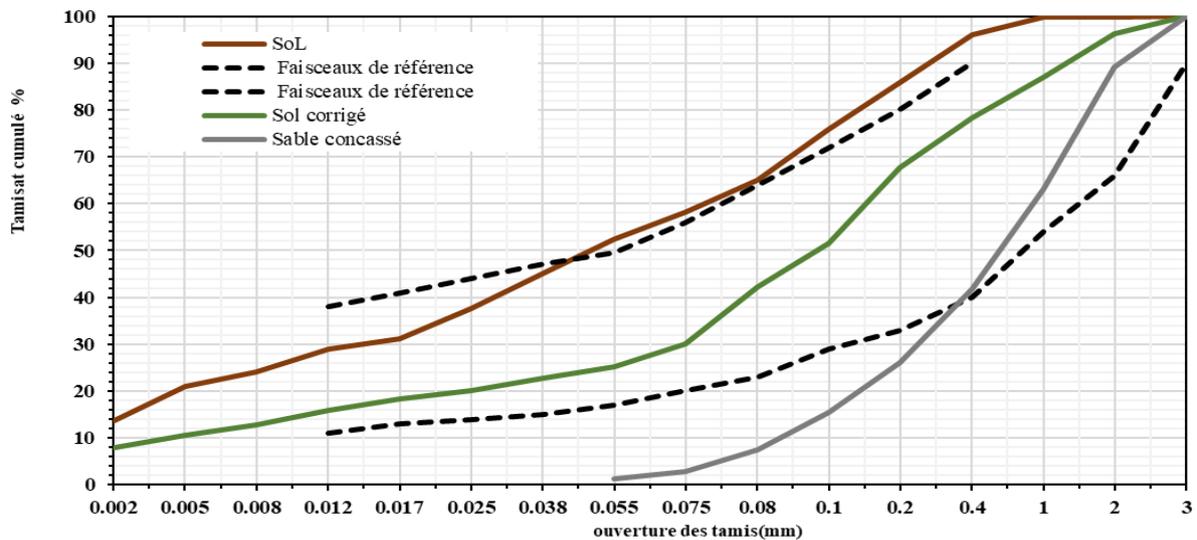
On a déterminé les caractéristiques physiques, les résultats de caractérisation sont présentés sur le tableau (2.7), et les Analyses granulométrique des ajouts présenté sur la figure (2.17).

**Tableau 2.7** : les caractéristiques physiques de cendres, sol, sable concassé, chaux.

Les matériaux	$MV_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$MV_{abs}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	La finesse (cm <sup>2</sup> /g)
Les cendres	T : 567	T : 2507	T : 7000
T et P	P : 522	P : 2018	P : 6850
Sol	1280±15	2510±7	
Sable concassé	1570±7	2600±6	
Sol corrigé	1345±7	2539±5	
Chaux	600-900	-	-

$MV_{app}$  = Masse volumique apparente.

$MV_{abs}$  = Masse volumique absolue.



**Figure 2.17.** Distribution granulométrique du sol, sable concassé et sol corrigé.

## 2.10 Les mélanges :

### ❖ Composition et codification des mélanges

Durant toute cette étude expérimentale, l'ensemble des mélanges sont préparés selon la composition présentée dans le Tableau (2.8), sachant que les cendres des déchets de tomates et

piments ont été ajoutées par différentes proportions par rapport au poids de chaux, à savoir : 3 %, 6 %, 9 %, 12% et 15 %. Les mélanges utilisés dans cette partie d'étude sont codifiés afin de faciliter la lecture avec : **M** (mortier de terre), **C** (cendre), **T** (déchet de tomate), **P** (déchet de piment) et le chiffre représente le pourcentage de cendre par rapport au.

**Tableau (2.8) :** Composition et codification des mélanges

Mélange	Codification des mélanges	Mélange (sol+sable)		Chaux (par rapport au poids (sol+ sable))	Teneur en eau par rapport au poids (sol+sable+chaux)	CT/CP (Par rapport au poids de chaux)
		Sol	Sable			
1	MCT0/ MCP0	75 %	25%	12%	37%	0%
2	MCT3 / MCP3					3%
3	MCT6 / MCP6					6%
4	MCT9 / MCP9					9%
5	MCT12 / MCP12					12%
6	MCT15/ MCP15					15%

## 2.11 Mode opératoire :

### 2.11.1 Matériel spécifique :

Dans notre travail, tous les essais sont réalisés sur des éprouvettes (4×4×16) cm<sup>3</sup> dans des moules en acier selon la norme EN 1015-11, figure (2.18) :



**Figure 2.18.** Le moule utilisé pour le moulage et la confection des éprouvettes de mortier de terre.

### 2.11.2 Préparation des mélanges :

Tout d'abord, on a commencé par mélanger le sol pendant 2 min dans un malaxeur avec une vitesse de 139tr/min figure (2.19), ensuite on a ajouté la chaux et les cendres pendant une minute et après l'eau pour 2 min. Le mélange est soumis après à l'essai d'étalement via la table à secousse (voir 2.12.1.1 et figure (2.20)). Les mélanges sont mis dans des moules métalliques ( $4 \times 4 \times 16$ ) cm<sup>3</sup>. Après 24h, on procède au démoulage et ensuite les éprouvettes sont mises dans des sachets en plastique bien fermé ensuite sont mises dans l'étuve à 65°C, pendant 7 jours pour accélérer le séchage selon la procédure de Taallah (2016). Après 7 jours, on les sort des sachets et on les laisse dans l'étuve à la même température jusqu'à ce qu'ils soient complètement secs (poids stable). Enfin, les échantillons sont soumis aux essais en prenant comme résultat final la moyenne des résultats de trois tests pour chaque composition.



**Figure 2.19.** le malaxeur



**Figure 2.20.** table à secousse

### 2.11.3 La quantité d'eau dans la fabrication de mortier de terre : Voir le chapitre 1

La teneur en eau est déterminée par les limites d'Atterberg du sol corrigé, tableau (2.2).

#### 2.12.1 Essais réalisés à l'état frais :

##### 2.12.1.1 Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses :

La maniabilité du mortier s'est mesurée par l'essai d'étalement à la table à secousse. Selon la norme EN12-358, cet essai d'étalement mesure plus particulièrement l'aptitude du mortier à s'étaler par écoulement.

L'essai est exécuté sur une table à laquelle on peut imprimer des secousses verticales à l'aide d'une manivelle figure (2.20).

Un cône de dimensions ( $D_0 = 10$  cm ;  $d_0 = 7$  cm ;  $h = 6$  cm) a été rempli en deux couches. Pour chaque couche 10 coups sont appliqués avec la tige de piquage.

On démoule ensuite le cône sur la table, et on la soumet à une série de 15 secousses, en suite on mesure le diamètre d'étalement "d".

### 2.13.1 Essais réalisés à l'état durci :

#### 2.13.1.1 Résistance mécanique : Voir le chapitre 1

##### 2.13.1.1.1 Résistance à la compression (NF P94-077) :

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. La mesure de la résistance à la compression a été déterminée par écrasement sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm<sup>3</sup> à l'aide de la presse de l'appareil triaxial du laboratoire de mécanique de sols en utilisant un dispositif de compression, figure (2.21).

##### 2.13.1.1.2 Résistance à la traction par flexion (NF EN12390-5) :

Pour mesurer la résistance en traction par flexion on a utilisé la même presse en utilisant un dispositif de flexion par la méthode de trois points, figure (2.22).



**Figure 2.21.** Appareil triaxial  
(Avec dispositif de compression)



**Figure 2.22.** Appareil triaxial  
(avec dispositif de flexion)

##### 2.13.1.2 Mesure de la masse volumique (NF P94 054) :

La masse volumique d'un sol ( $\rho$ ) est le quotient de la masse ( $m$ ) du sol par le volume ( $v$ ) qu'il occupe l'équation suivant :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.7)$$

Dans notre travail, le volume a été obtenu en mesurant les dimensions des éprouvettes de différents côtés avec le pied à coulisse électronique figure (2.23).



**Figure 2.23.** La mesure des dimensions à l'aide de pied à coulisse électronique.

## 2.14. Les essais durabilité :

### 2.14.1 L'absorption capillaire AFNOR XP P 13-901 :

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaire des éprouvettes non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique figure (2.24). L'essai de l'absorption capillaire détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette prismatique 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup> place dans un bac contenant de l'eau, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur presque de 5mm de la profondeur du bac, figure (2.25). On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps selon l'équation suivante :

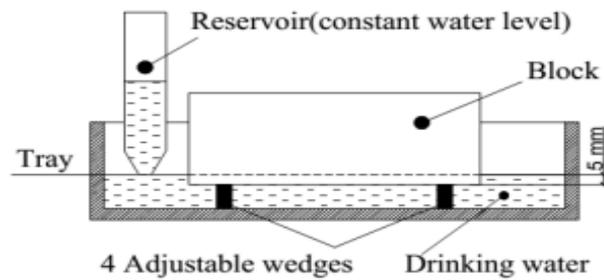
$$C_b = \frac{100 \times p}{S \sqrt{t}} \quad (2.8)$$

Où :

P : (Mh-Md) Poids d'eau absorbée en (g).

t : Le temps en heures (t = 10 min).

S : Surface de la face sciée (cm<sup>2</sup>).



**Figure 2.24.** Schéma de l'essai d'absorption capillaire.



**Figure 2.25.** Essai d'absorption capillaire d'eau

### 2.14.2 Absorption totale :

L'importance de l'absorption totale de l'eau (ATE) réside dans la perception qu'elle peut nous donner sur la sensibilité du matériau à l'eau et sa porosité. Cette dernière a un lien direct avec la conductivité thermique et résistance mécanique. Cet essai consiste à immerger les échantillons, dans un bac à eau pendant des durées différentes : 1, 2, 3 et 4 jours figure (2.26), et mesurer l'augmentation du poids  $P_h$  par rapport au poids du bloc à l'état sec  $P_s$ . L'absorption totale est déterminée par l'équation suivante (Taallah,2014b) :

$$ATE(\%) = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (2.9)$$

Où :

$P_h$  : poids de l'échantillon à l'état humide.

$P_s$  : poids de l'échantillon à l'état sec.



**Figure 2.26.** Immersion totale des échantillons

### 2.14.3 Gonflement :

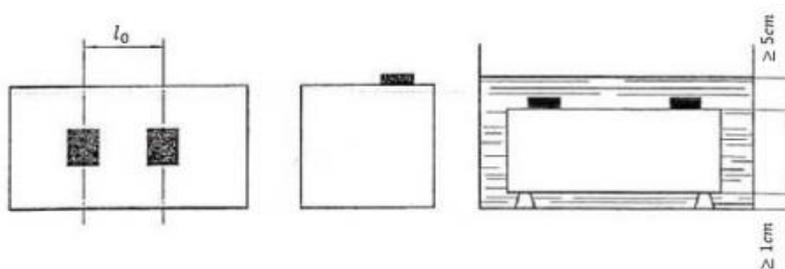
La mesure du gonflement des blocs d'adobe se fait selon la procédure suivante (norme XP 13-901) :

- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure selon la figure (2.27).
- Mesurer la distance entre plots :  $I_0$ .
- Placer les blocs dans un bac d'eau.
- Après une durée  $D$  d'immersion de 96 heures, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots :  $I_1$ . Figure (2.28).
- L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par l'équation suivante :

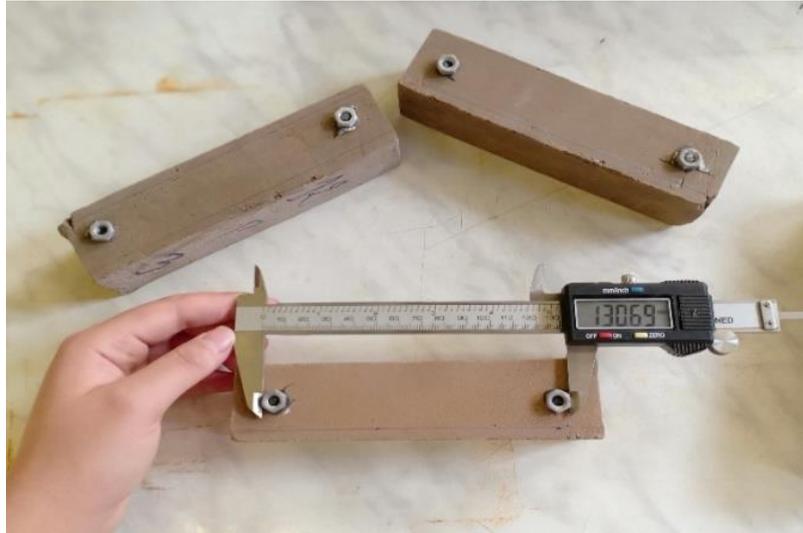
$$\Delta Lg = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \text{ (mm/m)} \quad (2.10)$$

$I_0$  : la distance avant immersion

$I_1$  : la distance après immersion



**Figure 2.27.** Schéma de l'essai du gonflement.



**Figure 2.28.** L'essai du gonflement.

### **2.15 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a réalisé des essais physiques qui nous permettent de déterminer les caractéristiques des différents matériaux composant le mortier de terre stabilisée et de donner une idée générale sur les principales propriétés des matériaux utilisés, à savoir : le sol, le sable concassé, la chaux, et les déchets de cendres tomates et piments. Ce chapitre a illustré la composition des différents mélanges, la procédure de préparation et les conditions de conservation et finalement les essais réalisés sur les éprouvettes du mortier de terre stabilisée.

Les données présentées dans ce chapitre proviennent de la bibliographie ou des essais de caractérisation réalisés au cours de notre étude. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux et à mieux comprendre l'effet des différents paramètres étudiés sur les propriétés du mortier de terre.

# Chapitre 3 :

## Résultats et discussions

### 3.1 Introduction :

Ce chapitre est destiné principalement à l'étude de l'effet de déchets broyés de cendres tomates et piments sur les propriétés mécaniques, physiques et la maniabilité de mortier de terre, à noter que le travail expérimental sur le mortier de terre a été scindé en deux principales parties.

La première partie est consacrée à l'étude des propriétés mécaniques de mortier de terre corrigée en termes de granularité avec du sable concassé, stabilisée avec une teneur de 12% de chaux vive et chargés par des teneurs progressives en déchet de cendres tomates et piments (0%,3%,6%,9%,12% et 15%).

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet de l'introduction de cendres sur les propriétés physiques de mortier de terre. En outre, l'étude s'intéresse aussi à la prospection du comportement mécanique de mortier étudié. A cet effet, l'analyse et l'interprétation des résultats de ce programme expérimental sont répertoriés dans ce chapitre.

### 3.2 Effet du dosage de la chaux sur la résistance à la compression de mortier de terre :

On peut clairement voir à partir des résultats présentés à la Figure (3.1), que la résistance à la compression augmente lorsque la teneur en chaux passe de 8 % à 12 %, Cela peut être attribué à la formation d'hydrates de silicate de calcium (CSH) ainsi qu'à l'apparition de petites quantités de calcite et de portlandite. Néanmoins, lorsque la teneur en chaux est passée de 12% à 14%, la résistance à la compression a légèrement diminué, l'augmentation de la teneur en chaux vive a conduit à la création de plus de portlandite, ce qui a un impact négatif sur les propriétés mécaniques des matériaux de terre.

Les résultats suggèrent que la brique après 7 jours de temps de cure a l'étuvage à 65°C présentait une résistance à la compression plus élevée avec une valeur de 5.1 MPa pour une teneur en chaux de 12%. Cette opération a permis d'accélérer l'hydratation, ainsi que la réaction pouzzolanique entre la chaux et le sol. Finalement, il est apparu que la résistance optimale à la compression a été obtenue à 12% de chaux.

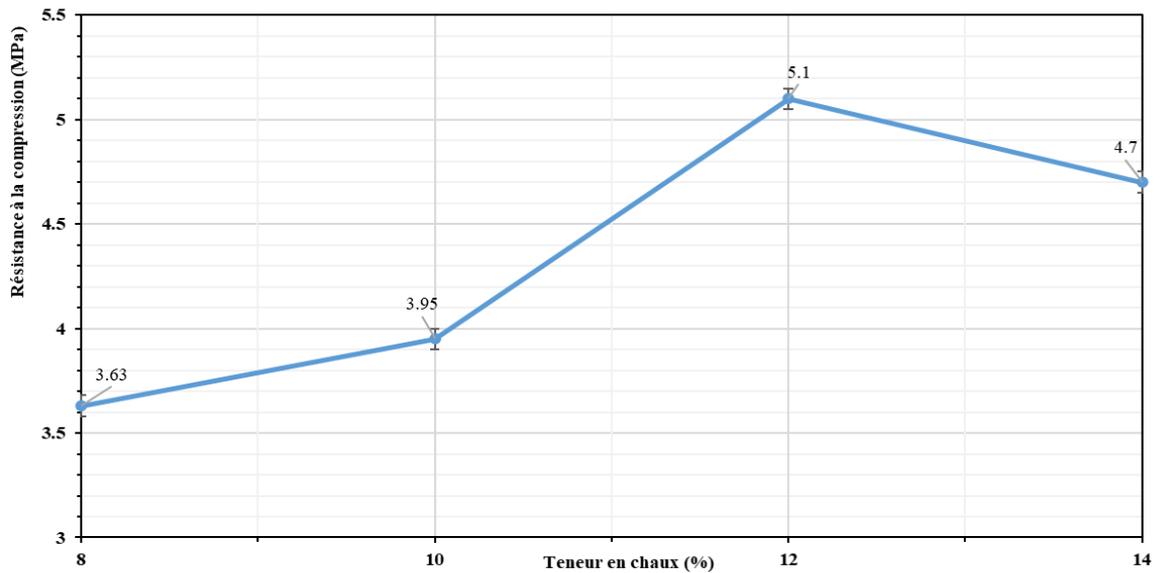
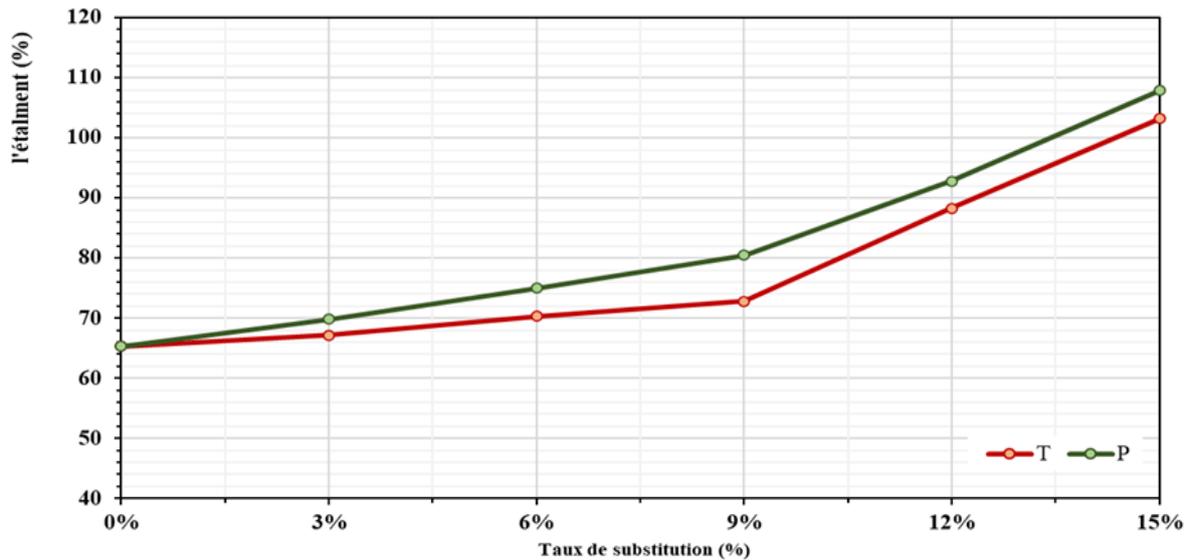


Figure 3.1 : L'effet de dosage de la chaux et le temps de cure sur la résistance mécanique.

### 3.3 La maniabilité à la table à secousse :

Pour but la connaissance du comportement des mélanges à l'état frais au cours de taux de substitution, Les résultats trouvés sont présentés sur la Figure (3.2), La figure montre l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (CT) et piment (CP) sur la maniabilité des mélanges à l'état frais sur La Figure 3.2. Les valeurs de l'étalement à la table à secousses montrent que l'étalement augmenté avec l'augmentation de la teneur en cendres de tomate (CT) et piment (CP) dans les mélanges.

On remarque que l'étalement dans l'état frais passe d'un mélange normal pour le cas de 0% sans substitution de la chaux, jusqu'à un état très mou à liquide pour les mélanges avec substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (CT) et de piment (CP). Globalement, selon l'analyse des données, il est immédiatement observable que l'augmentation progressive de la substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (CT) et de piment (CP) de 0% à 15% dans les échantillons de mortier de terre peut entraîner une augmentation de l'étalement (%) par rapport à leurs blocs de référence respectifs. À partir des résultats, il semble que l'augmentation de la teneur en cendres de tomate (CT) et de piment (CP) entraîne une diminution de la teneur en chaux. D'autre part, la diminution de la chaux se traduit par un excès d'eau libre, en considérant le rapport entre la quantité d'eau et la quantité de chaux, cela conduit à la présence d'une proportion d'eau libre ce qui rendant les mélanges plus souples avec l'augmentation de substitution de la chaux.



**Figure 3.2 :** l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (T) et piments (P) sur la maniabilité du mortier de terre.

## Partie 1 :

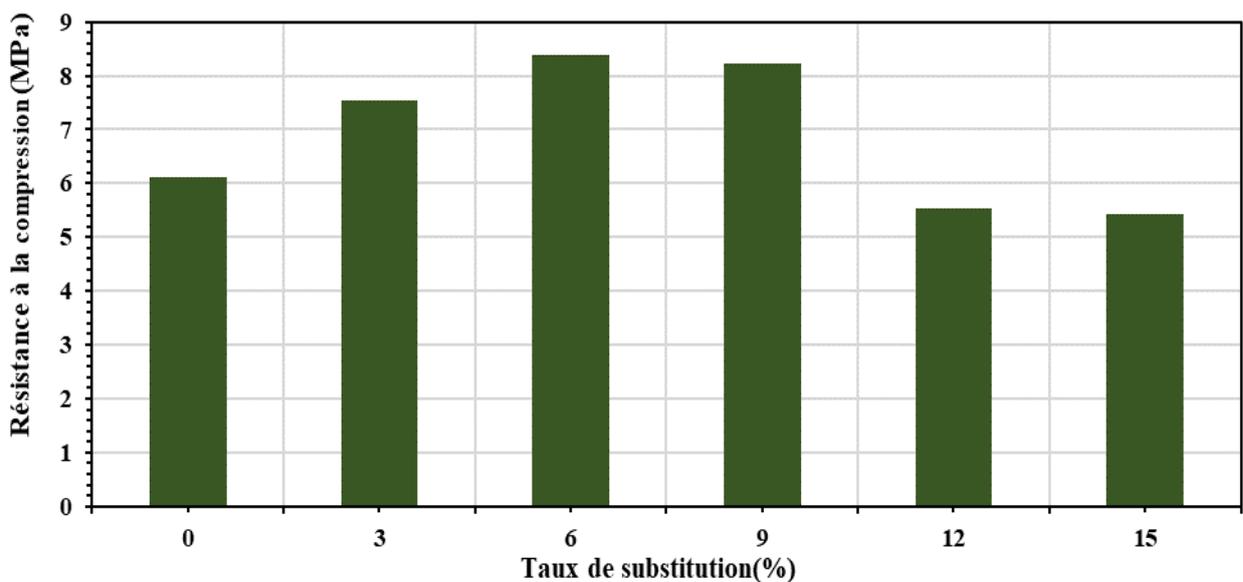
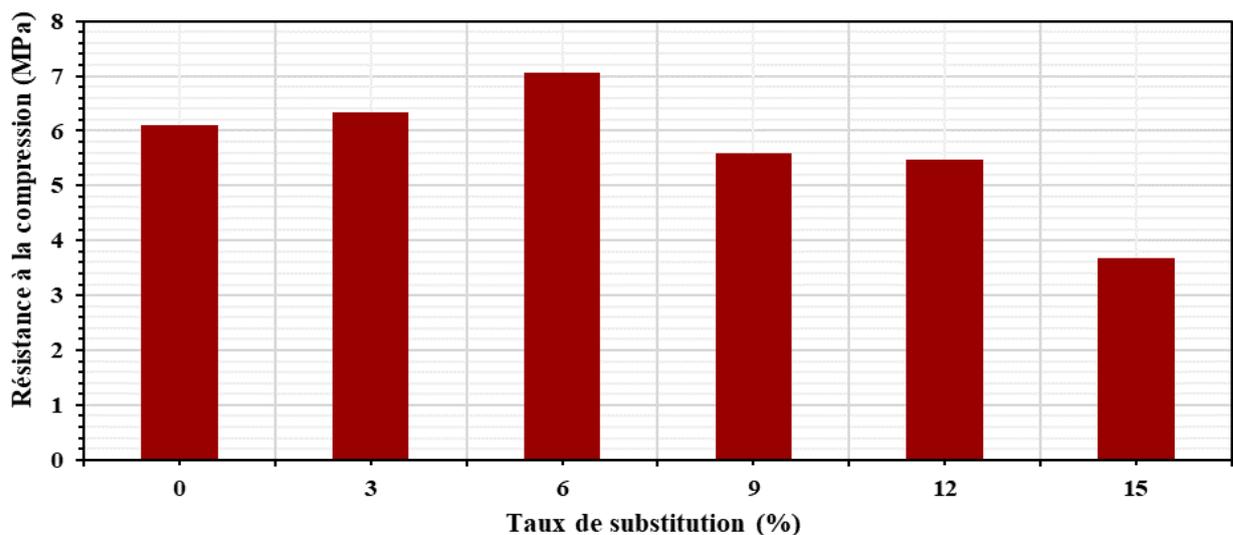
### 3.4 Etude des propriétés mécaniques :

Afin d'étudier l'effet du dosage et la nature du cendres T ou P sur les résistances physico-mécaniques de mortier de terre, en substituant partiellement la chaux par les cendres de T ou P par 5 pourcentages (3%,6%,9%,12% et 15%). Le mortier a été stabilisé par 12% de chaux vive et conservées à l'étuve avec une température de  $(65 \pm 2 \text{ C}^\circ)$  pendant 7 jours.

#### 3.4.1 La résistance à la compression de mortier :

La figure (3.3) illustre les résistances à la compression des échantillons de mortier de terre incorporant différents contenus d'agrégats de CT (cendre de tomate) et de CP (cendre de piment). Globalement, selon l'analyse des données, il est immédiatement observable que l'augmentation progressive du contenu de CT et de CP de 0% à 15% dans les échantillons de mortier de terre peut entraîner une augmentation de la résistance à la compression par rapport à leurs blocs de référence respectifs. À partir des résultats, nous avons remarqué qu'il y a une amélioration claire des résistances lors du remplacement partiel de la chaux par différentes proportions de CT et de CP. Les forces augmentent à 3% et 6%, et diminuent à 9%, 12% et 15%. De plus, il est démontré que le point optimal est atteint à 6% comme une étude selon (Almeasar,2023) a conduit à une amélioration de la résistance à la flexion par un substitution partielle des cendres de deshets de palmier dattiers par rapport au poids de chaux . Dans ce cas, les échantillons de mortier de terre avec CT et CP augmentent respectivement de 15,57% et 37,54%.

Cette augmentation peut être expliquée par la formation de silicate de calcium hydraté résultant des réactions pouzzolaniques entre la chaux, les composants minéraux du sol, la silice et l'alumine présents dans le CT et de CP. De plus, l'ajout de CT et de CP réduit la porosité, renforçant ainsi la résistance. Cependant, la déficience de résistance observée au-delà de 6% de CT et de CP peut être attribuée à un manque de chaux pour faciliter la réaction pouzzolanique, ce qui implique qu'un remplacement partiel de la chaux dépassant 6% par du CT et du CP ne confère aucun bénéfice supplémentaire en termes de résistance.

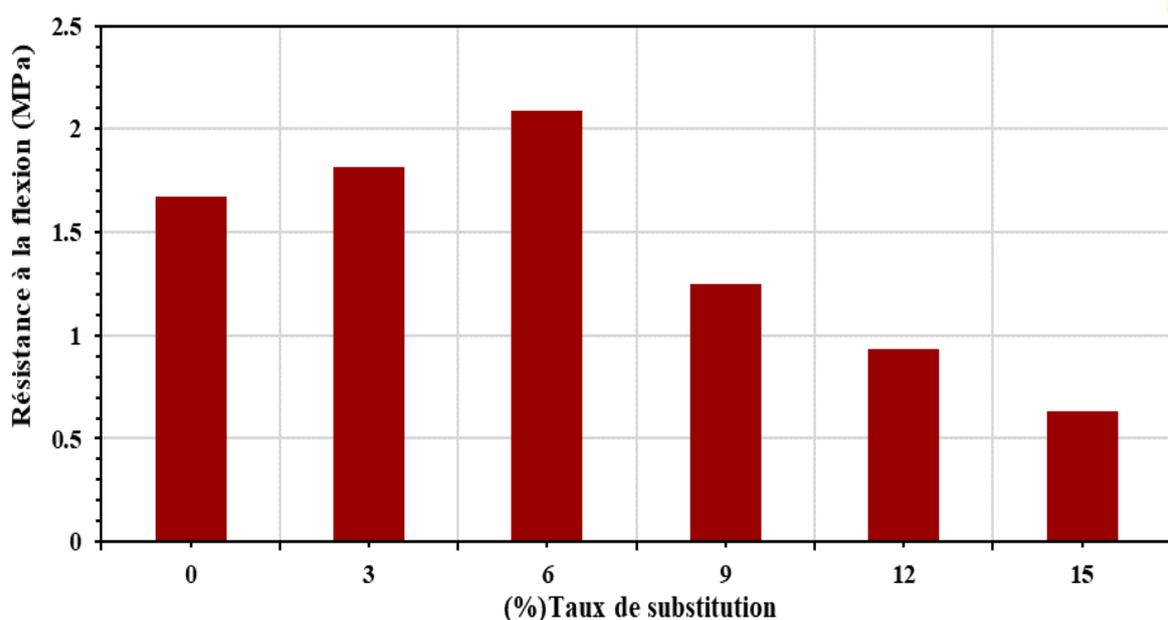


**Figure 3.3 :** L'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (A) et piments (B) sur la résistance à la compression du mortier de terre.

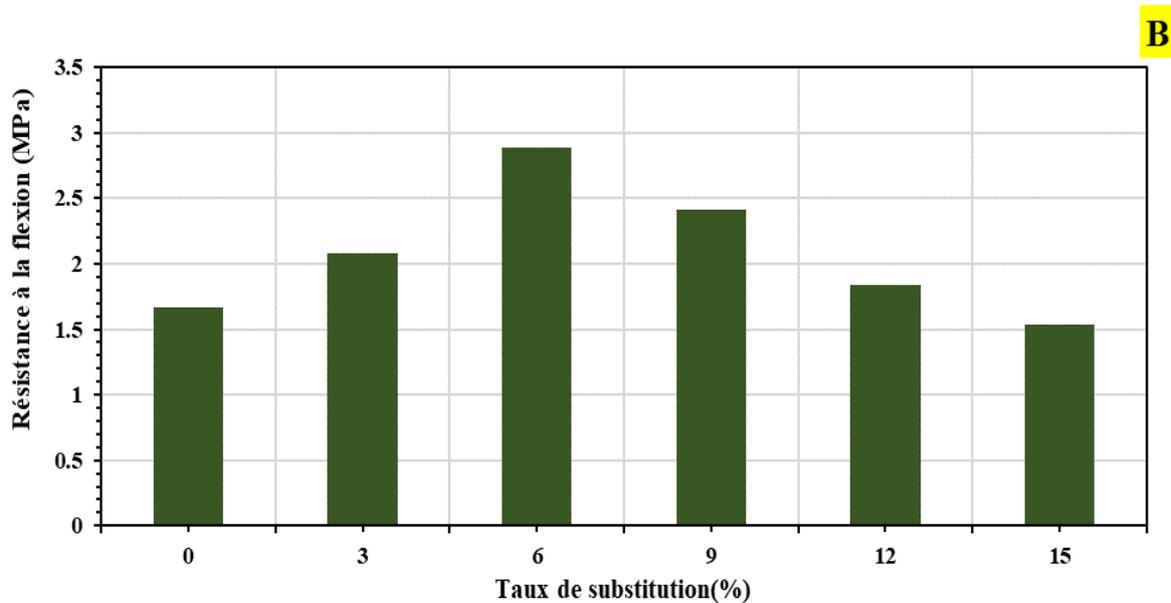
### 3.4.2 La résistance à la flexion de mortier :

Un essai de flexion à trois points a été réalisé pour évaluer les propriétés mécaniques des échantillons de mortier de terre. Les résultats ont été illustrés sous forme de courbes de résistance à la flexion. Selon les figures (3.4) présentées, on observe une tendance notable dans les valeurs de résistance à la flexion en ce qui concerne le contenu des additifs de CT et de CP. Initialement, il y a une augmentation de la résistance à la flexion avec l'ajout de CT et de CP jusqu'à 6%. Cependant, au-delà de ce seuil, il y a une diminution de la résistance à la flexion avec une augmentation supplémentaire du rapport CT et de CP. Cette diminution observée peut être attribuée à divers facteurs, notamment la possibilité d'agglomération des additifs ou un excès de contenu de charges, ce qui peut compromettre l'intégrité structurelle globale.

Remarquablement, l'ajout de 6% de CT et de CP au mélange de mortier de terre a entraîné des améliorations significatives de la résistance à la flexion, comme une étude selon (Almeasar,2023) a conduit à une amélioration de la résistance à la flexion par un substitution partielle des cendres de deshets de palmier dattiers par rapport au poids de chaux. Plus précisément, la résistance à la flexion a augmenté de 20,96% et 72,46% pour CT et de CP respectivement, par rapport à l'échantillon de référence. Cette amélioration des propriétés mécaniques peut être attribuée à l'augmentation de la teneur en hydrates de silicate de calcium (C-S-H) dans le mélange de mortier, ce qui renforce la liaison entre les particules et renforce ainsi le matériau.



A



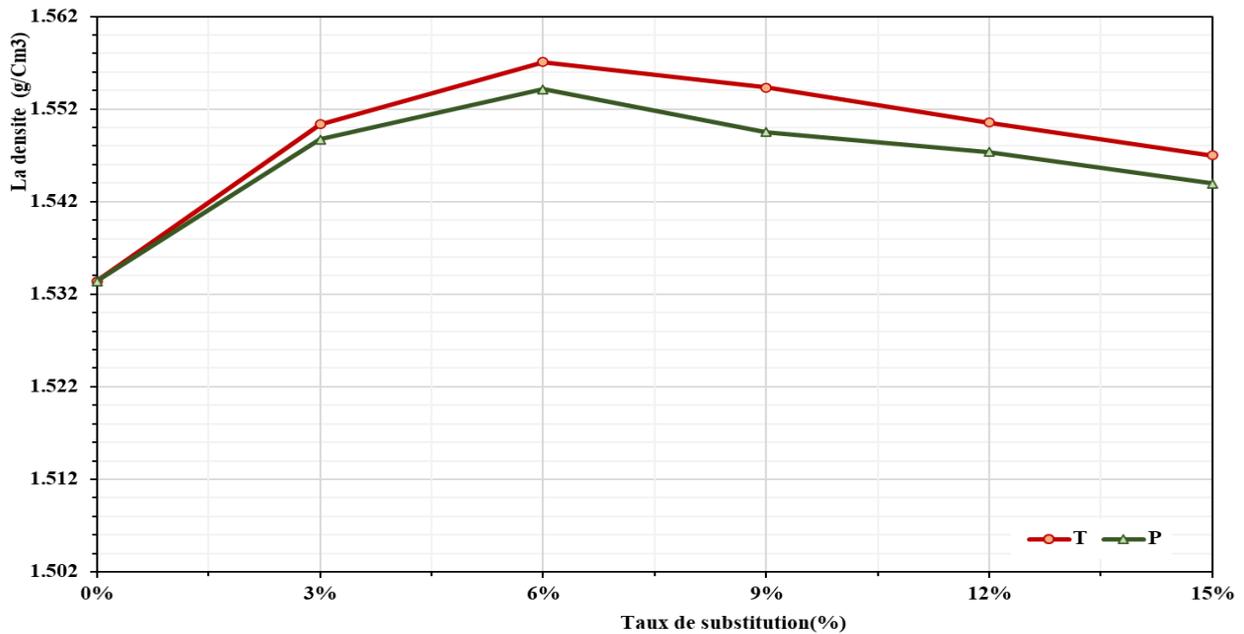
**Figure 3.4 :** L'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (A) et piments (B) sur la résistance à la flexion du mortier de terre.

## Partie 2 :

### 3.5 Etude des propriétés physiques :

#### 3.5.1 La masse volumique (la densité) :

Les valeurs de densité du mortier de terre rapportées dans la littérature scientifique varient de  $1400 \text{ kg/m}^3$  à  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Dans cette étude, la densité apparente des spécimens séchés a été déterminée en calculant le rapport entre le poids du bloc de sol et son volume. Le volume a été mesuré géométriquement en prenant les trois dimensions avec un pied à coulisse électronique précis à  $0,01 \text{ mm}$ . Les valeurs moyennes de densité du matériau formulé sont présentées dans la figure (3.5). Il a été observé que ces valeurs varient de  $1533 \text{ kg/m}^3$  à  $1557 \text{ kg/m}^3$  pour les échantillons contenant de la cendre de tomate. Pour les échantillons contenant de la cendre de piment, les valeurs varient de  $1533 \text{ kg/m}^3$  à  $1554 \text{ kg/m}^3$ . L'ajout de cendre a entraîné la formation de nouveaux produits d'hydratation et une réduction de la porosité, expliquant ainsi l'augmentation de la densité observée. Ce résultat est confirmé par de nombreuses études.

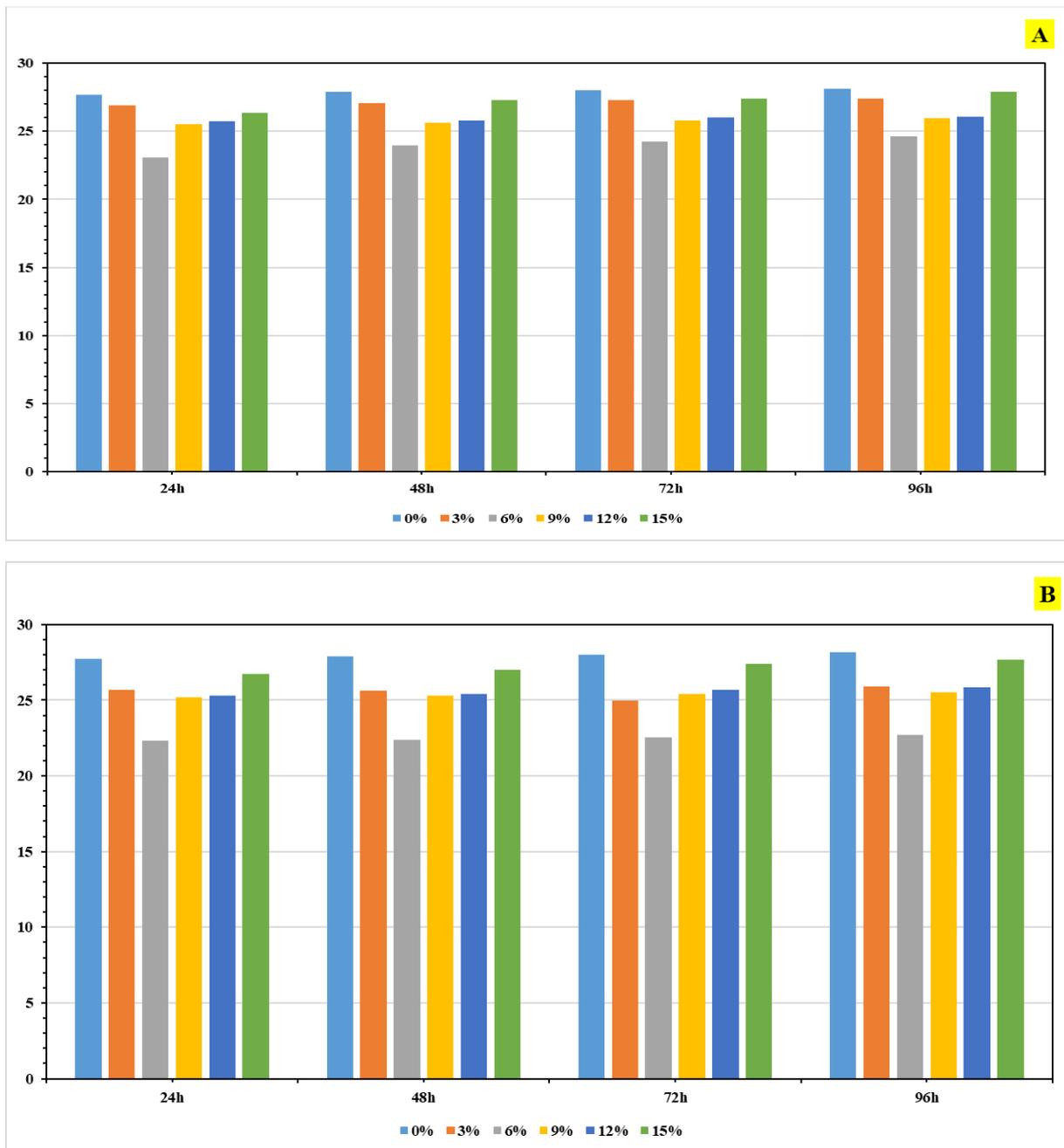


**Figure 3.5 :** l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (T) et piments (P) sur la densité volumique du mortier de terre.

### 3.5.2 : Absorption totale

Dans cette essai, nous avons cherché à déterminer la capacité de charge des échantillons et leur stabilité après avoir été immergés dans l'eau pendant environ 4 jours. La figure (3.6) présente les résultats de l'immersion dans de l'eau ordinaire. Nous avons observé que la plus grande absorption d'eau a eu lieu au cours des premières 24 heures, suivie d'une augmentation relative jusqu'à stabilisation. Globalement, les résultats d'absorption totale ont indiqué que l'ajout de cendres réduisait l'absorption d'eau. Plus précisément, la valeur moyenne d'absorption totale a diminué de 7,87 % pour les échantillons contenant de la cendre de tomate. Pour les échantillons contenant de la cendre de piment, la valeur d'absorption totale a diminué de 25,6 %. Cette diminution significative de l'absorption est attribuée à la réduction des vides, en particulier à un contenu de cendre de 6 %, où la plus faible absorption d'eau a été enregistrée, comme en témoignent les mesures de densité des échantillons.

Ces résultats suggèrent que l'incorporation de cendres améliore non seulement la densité mais aussi la résistance à l'eau des échantillons, ce qui pourrait potentiellement prolonger leur durabilité et leur intégrité structurelle dans des conditions humides.



**Figure 3.6 :** l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (A) et piments (B) en fonction de temps sur l'absorption totale du mortier de terre.

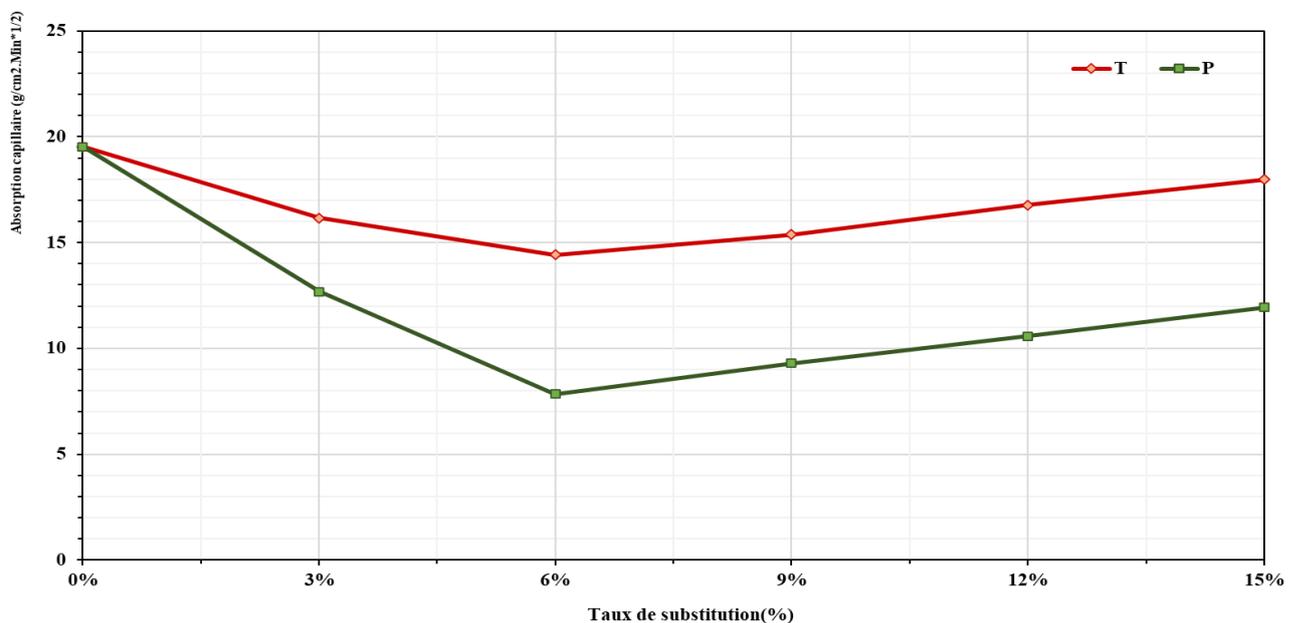
### 3.5.3 Absorption capillaire

L'absorption capillaire des échantillons de mortier de terre mélangés avec de la cendre de tomate et de la cendre de piment a été étudiée. En examinant les résultats dans la Figure (3.7) , on observe que l'échantillon de référence, qui n'avait aucun type de cendre végétale ajoutée, a montré une valeur d'absorption capillaire de 17,68. En revanche, l'échantillon contenant 6% de

cencre de tomate a montré une valeur d'absorption capillaire inférieure de 15,11, et l'échantillon contenant 6% de cencre de piment a montré la plus faible valeur d'absorption capillaire de 9,88.

Ces résultats peuvent être interprétés comme l'ajout de cencre de tomate et de cencre de piment a conduit à une amélioration des propriétés d'absorption capillaire du mortier de terre. Cela indique que ces matières premières alternatives ont la capacité de réduire l'absorption d'eau et ainsi d'améliorer la stabilité du mortier dans des conditions d'utilisation pratiques.

La performance améliorée est attribuée à la nature poreuse de la cencre de tomate et de la cencre de piment, où ces matériaux contribuent à réduire les vides à l'intérieur du mortier, réduisant ainsi la capacité d'absorption de l'eau.

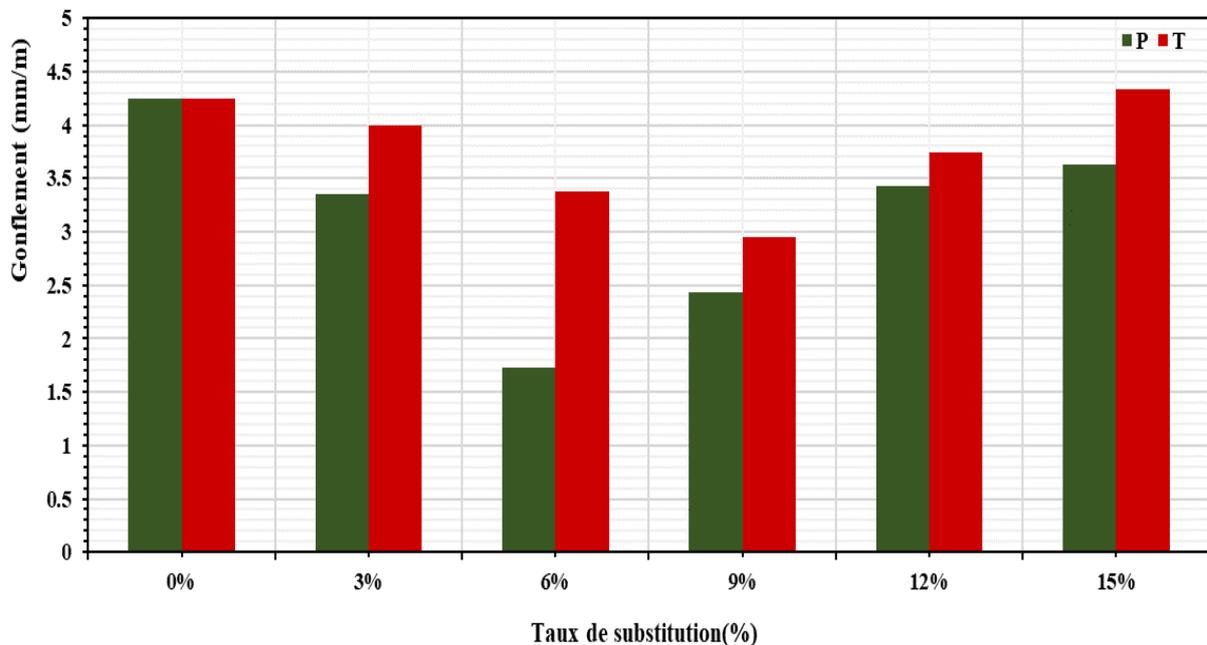


**Figure 3.7 :** l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (T) et piments (P) sur l'absorption capillaire du mortier de terre.

### 3.5.4 Gonflement par immersion

La Figure (3.8) met en évidence l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomate (CT) et piment (CP) sur le gonflement du mortier de terre, on constate que le gonflement par totale immersion dans l'eau (96h) est une indication de l'effet de l'eau sur les propriétés chimiques et physiques du matériau. D'après cette figure, on constate que l'augmentation du taux de substitution de la chaux par les cendres de tomate (CT) et piment (CP) entraîne une diminution de l'amplitude des valeurs de gonflement.

Les valeurs minimales de gonflement sont obtenues en taux de substitution de 6% dans les deux cas, passant de la valeur de 4.3 pour les mortiers témoins sans substitution à la valeur de 1.7 pour les mortiers avec substitution de la chaux par les cendres piment en taux de substitution 6% avec une diminution presque de la moitié avec les mêmes tendances ont été enregistré pour les mortiers avec (CT) passant de la valeur de 4.3 pour les mortiers témoins sans substitution à la valeur de 3.4. En revanche, la diminution du gonflement est reculée après le point de substitution 6%, tendent à augmenter avec l'augmentation progressive du contenu de CT et de CP de 6% à 15% dans les échantillons de mortier de terre. Ces résultats peuvent être expliqué d'un côté, par le fait que la diminution de la porosité, où se logent généralement les eaux absorbées et exercent ses pressions sur la matrice de terre lors du test de gonflement.



**Figure 3.8 :** l'effet du taux de substitution partielle de la chaux par les cendres de tomates (T) et piments (P) sur le gonflement du mortier de terre.

### 3.6 Conclusion :

Cette partie de recherche a été consacrée en premier lieu à étudier expérimentalement un matériau en terre stabilisée à la chaux remplacée avec différents pourcentages de cendres de déchets de tomates et piments. Les principales propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques ont été mesurées en faisant varier la teneur en cendres de déchets de tomates et

piments de 3% à 15% en poids. En deuxième lieu, on s'est penché sur l'étude de la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques par introduction de ces cendres.

Le traitement, L'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux nous a permis de conclure principalement ce qui suit :

- L'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en cendres de tomates et piments par rapport au poids de chaux.
- Pour obtenir les meilleures caractéristiques mécaniques, Il a été constaté que la terre utilisée dans cette étude nécessite une teneur optimale en chaux de 12% en poids du mélange.
- Pour la densité , l'ajout de cendre a entraîné la formation de nouveaux produits d'hydratation et une réduction de la porosité, expliquant ainsi l'augmentation de la densité observée. Ce résultat est confirmé par de nombreuses recherches.
- Pour l'absorption totale la diminution significative de l'absorption est attribuée à la réduction des vides, en particulier à un contenu de cendre de 6 %, où la plus faible absorption d'eau a été enregistrée, comme en témoignent les mesures de densité des échantillons.
- L'absorption capillaire montre que l'ajout de cendre de tomate et de cendre de piment a conduit à une amélioration des propriétés d'absorption capillaire du mortier de terre où ces cendres contribuent à réduire les vides à l'intérieur du mortier, réduisant ainsi la capacité d'absorption de l'eau
- Pour les propriétés mécaniques, les résultats de la résistance à la flexion montrent que l'ajout de 6% de CT et de CP au mélange de mortier de terre a entraîné des améliorations significatives de la résistance à la compression et la flexion. Cette amélioration des propriétés mécaniques peut être attribuée à l'augmentation de la teneur en hydrates de silicate de calcium (C-S-H) dans le mélange de mortier, ce qui renforce la liaison entre les particules et renforce ainsi le matériau et la résistance à la compression l'ajout de CT et de CP réduit la porosité, renforçant ainsi la résistance. Cependant, la déficience de résistance observée au-delà de 6% de CT et de CP peut être attribuée à un manque de chaux pour faciliter la réaction pouzzolanique, ce qui implique qu'un remplacement partiel de la chaux dépassant 6% par du CT et du CP ne confère aucun bénéfice supplémentaire en termes de résistance.

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés physico-mécaniques du mortier de terre en incorporant différentes proportions de cendres (CP) et (CT), mais le pourcentage de 6 % de CP et de CT comme remplacement de la chaux représente la teneur optimale comme le témoignent les mesures des propriétés mécanique et physiques et réohologiques du mortier de terre .

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La terre a été utilisée par l'homme dans la construction depuis l'antiquité en raison de son faible coût, de sa sécurité et de sa contribution au confort thermique, résolvant ainsi le problème de la consommation énergie et des émissions de dioxyde de carbone, qui sont parmi les problèmes majeurs actuels du globe.

Pour atteindre notre but, nous avons scindé notre étude en trois chapitres :

**Le chapitre 1 :** a présenté une synthèse bibliographique qui comporte des généralités sur la construction en terre, notamment les multiples avantages des matériaux de construction en terre, à savoir la disponibilité du matériau terre, le faible coût et l'énergie de consommation réduite et l'impact environnemental limité. Il a été mentionné aussi qu'à travers le patrimoine mondial de construction en terre, on dénombre plusieurs techniques d'utilisation de terre pour la construction : l'adobe, le pisé, le torchis, la terre paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée. Ce chapitre a présenté aussi l'effet des cendres agricoles sur le comportement des matériaux cimentaires, notamment le mortier en terre.

**Le chapitre 2 :** est dédié aux caractéristiques des matériaux utilisés (sol, chaux, sable concassé, et les cendres des déchets de tomates et piments. Il présente aussi les mélanges, la procédure de confection des éprouvettes, le mode de conservation et finalement les essais réalisés.

**Le chapitre 3 :** a fait l'objet de présentation des résultats et discussions de l'étude expérimentale. Ces résultats ont montré les effets des cendres des déchets de tomates et piments sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier en terre.

Dans cette recherche, nous nous sommes concentrés sur mortier de terre, où nous avons découvert que le niveau optimal de chaux représente 12 % du poids du mélange (sol+sable). L'étape suivante était d'étudier l'influence du remplacement partiel de la chaux par la cendre CP et CT sur les propriétés physiques et mécaniques et hygroscopiques du mortier de terre. A travers ces résultats, on a conclu que le remplacement de la chaux par les cendres a un effet bénéfique sur les propriétés mécanique et physiques et réologiques de mortier de terre . La présence des cendres a contribué à la réduction des vides dans la matrice ce qui s'est traduit par l'amélioration des propriétés du mortier de terre notamment à l'état durci. Cette amélioration des propriétés mécaniques peut être attribuée à l'augmentation de la teneur en hydrates de silicate de calcium (C-S-H) dans le mélange de mortier, ce qui renforce la liaison entre les particules et renforce ainsi le matériau et augmente la résistance à la compression et à la flexion

en réduisant la porosité. Autres propriétés ont été touchées par cette amélioration, à savoir l'absorption totale et l'absorption capillaire. Mais cet effet bénéfique a été enregistrée seulement pour 6% de cendres par rapport au poids de la chaux, donc il s'agit d'une valeur optimale. Par ce qu'au-delà de cette valeur, Cependant, une réduction de la résistance au-delà de 6% de CT et de CP a été observée. Cet effet défavorable peut être attribuée à un manque de chaux nécessaire à la réaction pouzzolanique, ce qui implique qu'un remplacement partiel de la chaux dépassant 6% par du CT et du CP ne confère aucun bénéfice supplémentaire en termes de résistance.

## *Listes des références*

**Abdellaoui C. (2007).** « Etudes des phénomènes d’adsorption et de diffusion des métaux lourds dans les sols argileux- application aux sites de charges » mémoire de magister en génie civil de l’université de Tlemcen-Algérie.

**ADEME . (2001)** {S. ADEME, Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois ; MARCHE N° 00 01 026 ; Novembre 2001 }

**AFNOR XP P 13-901** essai d’absorption capillaire. 2001

**Aissa Mamoune S.M. (2009).** « Caractérisation et modélisation des argiles de la région de Tlemcen en utilisant les réseaux de neurones » Thèse de doctorat de l’université de Tlemcen Algérie

**Almeasar, Kamal Saleh, Bachir Taallah, Izemmouren Ouarda, Elhoussine Atiki, and Abdelhamid Guettala. (2023).** “Effect of Addition Date Palm Ash on Physical and Mechanical Properties and Hygroscopicity Behavior of Earth Mortars.” *International Journal of Architectural Heritage* 17 (4): 585–603. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1950235>

**Amouri, C. (2009)** Contribution à l’étude de l’influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité). Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, pp. 158.

**Anger R., Fontain L., (2010),** « Bâtir en terre, Du grain de sable à l’architecture », France, Edition Belin.

**Anger, R., & Fontaine, L. (2009).** Bâtir en terre. Du grain de sable à l’architecture. Paris, Belin/Cité des sciences et de l’industrie. ‘ (La technique de construction) p 26-42.

**Azeredo, Givanildo Alves D. E.(2005),** Leur Rheologie, Horacio Colina, Claude-henri Lamarque, Jean-claude Morel, and Jean-marie Reynouard. “Givanildo ALVES DE AZEREDO.”

**BAALI et all (2015)** {**K. BAALI et K. BELBARKA** ; effet de l’ajout de la cendre des déchets de palmier sur les performances mécaniques des tufs gypso-calcaire ; 2015 ; Master : Génie Civil : Constructions civiles et industrielles (C.C.I) : Université Kasdi Merbah – Ouargla.}.

**Bellebcir O, (2019).** Effet des déchets de palmier dattier sur la durabilité de l’adobe stabilisé à la chaux. Mémoire de Master. Université Mohamed khider –Biskra. P 64.

**Bergaya, F. and Lagaly, G. (2006)** General Introduction : Clays, Clay Minerals, and Clay Science. In: Bergaya, F., Theng, B.K.G. and Lagaly, G., Eds., *Handbook of Clay Science: Développements in Clay Science*, Vol. 1, Elsevier, Amsterdam, 1-18.

- Champire, F. (2017).** Étude expérimentale du comportement hydromécanique de la terre crue compactée pour la construction (Doctoral dissertation, Université de Lyon). P28-29
- Chourouk, Hamel, and Bouheka Abdia. (2022).** “ÉTUDE DES MORTIERS à BASE D’UNE POUZZOLANE NATURELLE LOCALE.”
- CRATerre, (1979)** (Centre international de la construction en terre), l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble,
- DERABLA Riad (2002)** « Propriétés physico – mécaniques des mortiers et des ciments élaborés à base de laitier granulé d’El Hadjar » mémoire En vue de l’obtention du diplôme de MAGISTER.UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA.
- Doat, P et al. (1983).** Construire en terre. Paris : Alternative
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979).** Construire en terre, par le **CRATerre**, Collection And Architecture. 272p. Novembre. ISBN 2-862227-009-1, France. P09
- Duc, Myriam (2020).** Les argiles dans le génie civil : pathologies et propriétés remarquables. Diss. Université Paris Est-Marne-la-Vallée.
- EN 1015-11** Le moule utilisé pour le moulage et la confection des éprouvettes de mortier de terre. 2007.
- EN12-358 essai de maniabilité ; 2018.
- Ferraris, C. F., Obla, K. H. and Hill, R. (2001)** ‘The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete’, Cement and Concrete Research, 31(2), pp. 245–255. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00454-3.
- Galmiche V., (2019),** « Construction et réhabilitation en terre crue : points de vigilance », Ministère de l’environnement, de l’énergie et de la mer, France.
- Grigoletto, S. (2015).** Applications de l'argile crue en construction. P 2-4
- Guide de bonnes pratiques du 15 oct. (2020) | BRIQUE DE TERRE CRUE** (mortier de terre)
- Hafsa, Mme LAMOURI.( 2022).** “Etude Des Maçonneries Entre Tradition et Modernité. Pratiques Au Sud Algérien (Adrar).”
- HALL, M. & DJERBIB, Y. (2004).** Rammed earth simple production : contexte, recommandations and consistency. Construction and Building Materials, 18, 281-286
- HAMEL DJAMEL, EDDINE BEN HAMMADI ILYES (2020/2021)** « Étude physico-mécanique d’un mortier à base de sable de dune et déchets industrielles (déchet de brique et déchet de plastique PET) » Mémoire de Master, Année universitaire.

- HERNOT, F(2016).**Thèse pour le Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie, L'ARGILE, SON UTILISATION A L'OFFICINE, Faculté de Pharmacie.p12
- Houben H, Guillaud H, (1994).** « Earth construction—a comprehensive guide ». London : Inter médiate Technology ;
- Houben, Hugo, H. Guillaud, M. Dayre, et I (2006).** Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Grenoble : Villefontaine). Traité de construction en terre. Marseille : Éd. Parenthèses.p39  
[http://dx.doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01001-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01001-9)
- Iii, Toulouse, and Paul Sabatier. (2008).** “T h è s E.”
- IZEMMOUREN, O. (2016).** Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée. These de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra- Algerie.
- KHOUDJA Daifallah (2022).** Etude des propriétés thermo-physiques et mécaniques des briques de terre crue à base de déchets de palmiers dattiers.
- Kribi S. (2005).** « Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage » Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquent de Lyon-France.
- Martin, (2015)** {P. Martin ; Midi de la biomasse, Pistes de valorisation des cendres de chaufferies biomasse en Wallonie ; 21 avril 2015}
- MILLOGO, Y., HAJJAJI, M. & OUEDRAOGO, R. (2008).** Microstructure and physical properties of limeclayey adobe bricks. Construction and Building Materials, 22, 2386-239
- Minke G (2006).** Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser - Publishers for Architecture, Berlin. 198 p.
- NF EN 12390-5.** Essai pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes. **AFNOR, Octobre 2001.**
- NF EN 196-6** essai de la finesse ; P15-476. Aout 1990
- NF P 18-554 et NF P 18-555 et NA 255 ;** normes de la masse volumique des granulats
- NF P18-592.** Essai au bleu de méthylène. AFNOR ; p 5. 1996
- NF P94-051.** Détermination des limites d'Atterberg–Limite de liquidité à la coupelle Limite de plasticité au rouleau. AFNOR ; 15 pages, 1993.
- NF P94-054.** Sols reconnaissance et essais – Détermination de la masse volumique des particules solides des sols – Méthode du pycnomètre à eau. Octobre 1991.
- NF P94-056.** Analyse granulométrique des sols tamisage à sec après lavage. AFNOR ; P15, 1996.

- NF XP P13-901. (2001).** Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications-Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR ; p. 35
- NFP 18-404** (Taallah, 2014b ; Izemmouren, 2016).
- Norme NF P94-077 Sols : Reconnaissance et essais – Essais de compression uniaxiale**
- Pascal MAILLARD, (2013)** - Responsable Projets R&D. centre technique de matériaux naturels de construction, Construire en terre : passé, présent... future !
- Paulus, J. (2015).** Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales–Application à un cas pratique : Ouagadougou, p 31
- Rais, Sara ,( 2021)** “Étude Des Propriétés Physico-Mécaniques Des Briques de Terre Crue Stabilisée Par La Chaux et Brique Cuite.”
- Rezig, (2012)** {R. DJEBAILI ; Etude d'un béton à haute performance à base de sable de dune destinés aux ouvrages en milieu agressif et très agressif ; 2012 ; Magister : Génie Civil : Géo Matériaux : Université Kasdi Merbah – Ouargla}.
- Rigassi V, (1995).** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p.
- ROWELL, R. M. & ROWELL, J. (1996).** Paper and composites from agro-based resources, **CRC press.**
- SAGBANSUA, L. & BALO, F. (2017).** Ecological impact & financial feasibility of Energy Recovery (EIFFER) Model for natural insulation material optimization. *Energy and Buildings*, 148, 1-14.
- SEGUI ; (2011)** {Pauline P. SEGUI ; élaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie ; 2011}.
- SMITH, J. C. & AUGARDE, C. (2014).** Optimum water content tests for earthen construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 167, 114-123.
- TAALLAH, B. & GUETTALA, A. (2016).** The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62.
- TAALLAH, B. (2014b).** Study of the physico-mechanical behavior of the compressed earth block with fibers (in french). Doctoral thesis, Mohamed KHIDER University - Biskra- Algeria.
- Taallah. (2014).** Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de doctorat, Université de Biskra.

**Temimi M. (1995).** Réactivité des cendres volantes de cordemais : Propriétés pouzzolaniques. La revue Algérie Équipement. . Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics Francis Jeanson, Algérie. n°18, Rubrique:Essais.

**Tokyay, M. (2016)** Cement And Concrete Mineral Admixtures. Taylor & Francis Group.

**Viviani ; (2018)** {M. Viviani ; Cendres de biomasse : valorisations ; 3 mai 2018}.

**Wikipédia** wikipedia.org.

**ZAMI, M. S. & LEE, A. (2009).** USE OF STABILISED EARTH IN THE CONSTRUCTION OF LOW-COST SUSTAINABLE HOUSING IN AFRICA--AN ENERGY SOLUTION IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE. ArchNet-ijar, 3.