

REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE POPULAIRE D'ALGERIE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie civil



## MÉMOIRE

Présenté dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

## THÈME

**Étude de l'influence de fibre naturelle et les additions  
sur le comportement du Béton de Terre comprimé  
(méthode par plans d'expériences)**

Par :

**GUEDROUR Aicha & BENABID Racha**

Soutenu publiquement le : ..... / ..... / 2024 devant le Jury composé de :

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.BENAMMAR Abdelhafid</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. HAMPLA Wafa</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. KHENNOUF Abdelaziz</i>	<i>MAB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ACHOUR Yacine</i>	<i>Professeur</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. MAAFI Nabil</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

2023/2024

## Remerciements

*Qu'il me soit permis de présenter à tout un petit monde de personnes qui ont rendu possible la présente étude et qui ont contribué à son élaboration sous quelque forme que ce soit.*

*Mes remerciements au Professeur **HAMLA Wafa**, notre encadrante et notre Co- Encadreur **KHENNOUF Abdelaziz**, d'avoir accepté de diriger ce mémoire de master, qui a développé en moi une capacité de recherche et d'adaptation. Merci pour l'attention, la proximité avec laquelle vous avez suivi ce travail. Vos judicieuses observations, vos apports multiples tant du point de vue de la forme que du fond m'ont davantage poussée à l'exigence. Nous sommes ravis, et nous devons nous estimer chanceuse de vous avoir eu comme directeur de mémoire. Merci pour votre formation.*

*Nous ne manquerons pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury qui ont accepté, sans réserve aucune, d'évaluer ce mémoire à sa juste valeur, et de me faire part de leurs remarques, sûrement pertinentes qui, avec un peu de recul, contribueront, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail.*

## إهداء

### عائشة قدرور

من قال أنا لها "نالها "

وإن أبت رغماً عنها أتيت بها.

نلتها وعانقت اليوم مجداً عظيماً فعلتها بعد ان كانت مستحيلة، كانت دروباً قاسية  
وطرقاً خسرت بها الكثير ولكني "وصلت" والحمد لله حياً وشكراً وإمتناناً الحمد لله  
الذي بفضلله أدركت أسمى الغايات

انظر لنفسي ولنجاحي كالذي ينظر الى معجزته، إلى الحلم الذي طال انتظاره وتتحقق  
بفضل الله وأصبح واقعاً افتخر به.

وبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجي إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب  
من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم  
والمعرفة، داعمي الأول في مسيرتي ابي

الى من غمرتني بالحنان واشعرتني بالأمان الى من كان دعائها سر نجاحي أُمي  
الى رفيق الدرب وصديق الايام جميعا بخلوها كان الاول دوما في مساندتي جاد علي  
بوقته فكان خير عون وسند لي زوجي

الى من شد الله بهم عضدي فكانوا صناع قوتي وخير حافز لي اخوتي الى جميع من  
امدوني بالقوة زملائي و زميلاتي وفقهم الله.

## إهداء

رشا بن عبید

من قال أنا لها "نالها "

وإن أبت رغباً عنها أتيت بها.

نلتها وعانقت اليوم مجداً عظيماً فعلتها بعد ان كانت مستحيلة، كانت دروباً قاسية وطرقاً  
خسرت بها الكثير ولكني "وصلت" الحمد لله حباً وشكراً وإمتناناً، الحمد لله الذي  
بفضله أدركت أسمى الغايات

انظر لنفسني ولنجاحي كالذي ينظر الى معجزته، إلى الحلم الذي طال انتظاره وتتحقق  
بفضل الله وأصبح واقعاً افتخر به.

وبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجني إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، من دعمني  
بلا حدود وأعطاني بلا مقابل إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة،  
داعمي الأول في مسيرتي ابي

الى من كللها الله بالهبة والوقار من افتقدتها منذ الصغر ويرتعث قلبي لذكرها، الى  
الراحلة الباقية في قلبي جدتي

الى من جعل الله الجنة تحت اقدامها أمي الى رفيق الدرب وصديق الايام جميعا بحلوها  
ومرها والنجم الذي اضاء لي الطريق من آمن بي ودعمني في الاوقات الصعبة زوجي  
الى من شد الله بهم عضدي فكانوا صناع قوتي و خير حافز لي اخوتي الى جميع من  
امدوني بالقوة زملائي و زميلاتي وفقهم الله.

# Résumé

Ce travail vise à valoriser et modéliser le comportement des bétons de terre comprimé (BTC) renforcés par des fibres de laine naturelle en utilisant la méthode des surfaces de réponse (RSM). La RSM permet de varier simultanément les facteurs choisis, à savoir le pourcentage de filler de calcaire et le pourcentage de fibre de mouton naturelle (laine naturelle), afin de trouver des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats des essais de résistance à la compression, de résistance à la flexion et de conductivité thermique.

Les résultats montrent clairement que l'incorporation de fibres de mouton avec un pourcentage compris entre 4% et 8% améliore à la fois la résistance à la compression et à la flexion du BTC. Les modèles obtenus présentent un coefficient de détermination  $R^2$  compris entre 0,84 et 0,98, indiquant une forte influence des modèles quadratiques sur les propriétés étudiées du BTC.

En revanche, l'utilisation d'un pourcentage de filler de calcaire supérieur à 12,5% a un impact négatif sur les propriétés mécaniques du BTC. Les propriétés thermiques du BTC ont également été influencées par les deux paramètres, filler de calcaire et fibre de mouton.

En conclusion, l'étude démontre l'efficacité de l'utilisation de fibres de laine naturelle pour renforcer les BTC, tout en soulignant l'importance de maintenir un équilibre optimal entre le pourcentage de fibres et celui du filler de calcaire pour garantir des propriétés mécaniques et thermiques optimales. Les modèles mathématiques obtenus grâce à la méthode des surfaces de réponse fournissent des outils précieux pour la formulation et l'optimisation des mélanges de BTC dans le contexte de la construction durable et de la performance des matériaux de construction.

**Mots-clés :** Béton de Terre Comprimé, laine naturelle, additifs, conductivité thermique, plans d'expérience, construction Durable.

# ملخص

هذا العمل يهدف إلى تقييم ونمذجة سلوك الخرسانة المضغوطة المعززة بألياف الصوف الطبيعي باستخدام طريقة الردود السطحية (RSM). تُسمح طريقة الردود السطحية بتغيير العوامل المختارة في نفس الوقت، وهي نسبة حشوة الحجر الجيري ونسبة ألياف الخرسانة الطبيعية (الصوف الطبيعي)، من أجل إيجاد نماذج رياضية تفسر بشكل أفضل نتائج اختبارات المقاومة للضغط والمقاومة للانحناء والتوصيل الحراري.

تُظهر النتائج بوضوح أن إدخال ألياف الصوف بنسبة تتراوح بين 4% و 8% يحسن كل من مقاومة الضغط والانحناء للخرسانة المضغوطة. النماذج المُحصَل عليها تظهر معامل تحديد  $R^2$  يتراوح بين 0.84 و 0.98، مما يُشير إلى تأثير قوي للنماذج التريبعية على الخواص المدروسة للخرسانة المضغوطة. من ناحية أخرى، فإن استخدام نسبة حشوة الحجر الجيري التي تتجاوز 12.5% يؤثر سلبيًا على الخواص الميكانيكية للخرسانة المضغوطة. تم تأييد الخواص الحرارية للخرسانة المضغوطة أيضًا بواسطة المعلمات الحشو الجيري والصوف الطبيعي.

في الختام، تُظهر الدراسة فعالية استخدام ألياف الصوف الطبيعي لتعزيز الخرسانة المضغوطة، مع التأكيد على أهمية الحفاظ على توازن مثالي بين نسبة الألياف ونسبة حشوة الحجر الجيري لضمان خواص ميكانيكية وحرارية مثلى. توفر النماذج الرياضية المحصل عليها بفضل طريقة الردود السطحية أدوات قيمة لتصميم وتحسين مزيج الخرسانة المضغوطة في سياق البناء المستدام وأداء المواد الإنشائية.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة طينية مضغوطة، صوف طبيعي، مواد إضافية، توصيل حراري، خطط تجريبية، بناء مستدام.

# Abstract

This work aims to valorize and model the behavior of compressed earth concretes (CEC) reinforced with natural wool fibers using the response surface method (RSM). The RSM allows simultaneous variation of the chosen factors, namely the percentage of limestone filler and the percentage of natural sheep fiber (wool), to find mathematical models that best explain the results of tests on compressive strength, flexural strength, and thermal conductivity.

The results clearly show that incorporating sheep fibers with a percentage between 4% and 8% improves both the compressive and flexural strength of CEC. The obtained models have a determination coefficient  $R^2$  ranging from 0.84 to 0.98, indicating a strong influence of quadratic models on the studied properties of CEC. On the other hand, using a percentage of limestone filler higher than 12.5% has a negative impact on the mechanical properties of CEC. The thermal properties of CEC have also been influenced by both parameters, limestone filler and sheep fiber.

In conclusion, the study demonstrates the effectiveness of using natural wool fibers to reinforce CEC, while emphasizing the importance of maintaining an optimal balance between the percentage of fibers and limestone filler to ensure optimal mechanical and thermal properties. The mathematical models obtained through the response surface method provide valuable tools for the formulation and optimization of CEC mixes in the context of sustainable construction and material performance.

**Keywords:** Compressed earth concrete, natural wool, additives, thermal conductivity, experimental designs, sustainable construction.

# Table de matière

- ❖ Remerciements
- ❖ إهداء
- ❖ Résumé
- ❖ Table de matière
- ❖ Liste des abréviations
- ❖ Introduction générale

## Chapitre 01 : État de l'art

1.1. Introduction .....	1
1.2. La terre crue .....	1
1.2.1. Définition .....	1
1.2.2. Composition granulométrique et minéralogique.....	3
1.2.3. Classification des sols .....	4
1.2.4 Propriétés physico-mécaniques de la terre .....	5
1.2.5. Classification et composition des Argiles .....	6
1.2.6. La stabilisation .....	9
1.3. Présentation du BTC .....	10
1.3.1. Historique et développement du BTC dans le monde .....	10
1.3.2. Définition du BTC et ses caractéristiques principales.....	11
1.3.3. La fabrication du BTC .....	12
1.3.4. Principales caractéristiques du BTC .....	13
1.3.5. Applications du BTC dans le domaine de la construction.....	15
1.3.6. Les Fibres : origine, caractéristiques et applications .....	16
1.3.7. Influence de la laine naturelle sur le comportement du BTC .....	17
1.4. Propriété mécanique du BTC stabilisé .....	18
1.4.1. Stabilisation par ciment .....	18
1.4.2. Stabilisation par fibres .....	19



1.4.3. Les fibres brutes de palmier dattier .....	20
1.5. Conclusion .....	20

## **Chapitre 02 : Matériaux et Techniques Expérimentales**

2.1. Introduction.....	22
2.1.1. Contexte.....	22
2.1.2. Objectif.....	22
2.2. Matériaux utilisés.....	22
2.2.1. Sol.....	22
2.2.1.1 Essais d'identifications du sol.....	23
2.2.1.2. Essais chimique et minéralogique .....	27
2.2.1.3 Résultats et discussions.....	28
2.2.2. Filler de calcaire.....	35
2.2.3. Laine de mouton.....	36
2.3. Conclusion.....	36

## **Chapitre 03 : Formulation des mélanges de béton de terre comprimé**

3.1. Introduction.....	38
3.2. Préparation des mélanges.....	38
3.3. Optimisation de la teneur en eau .....	40
3.4 Compactage des mélanges.....	47
3.4.1 Principe de Fonctionnement.....	48
3.4.2 Conservation et Confection des éprouvettes.....	48
3.5 Caractéristiques à l'état durci .....	49
3.5.1 Résistance à la compression.....	49
3.5.2 Résistance à la flexion.....	52
3.6 La densité.....	54
3.7 Résultats statiques.....	55
3.7.1. Résistance à la compression .....	55
3.7.2. Résistance à la flexion .....	58

3.7.3. Conductivité thermique .....	60
3.8 Conductivité thermique.....	61
3.9 Conclusion.....	63
<b>❖ Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>65</b>

## Liste des Figures

<b>Figure 1.1</b> : Les différents types de terre crue (argile, limon, sable) .....	2
<b>Figure 1.2</b> : Les différentes applications de la terre crue dans la construction (bâtiments, murs, voûtes) .....	2
<b>Figure 1.3</b> : Les étapes de préparation et de traitement de la terre crue .....	3
<b>Figure 1.4</b> : L'échelle granulométrique .....	4
<b>Figure 1.5</b> : Structure cristalline de la kaolinite .....	7
<b>Figure 1.6</b> : Structure cristalline de la montmorillonite .....	8
<b>Figure 1.7</b> : Structure cristalline de l'illite .....	8
<b>Figure 1.8</b> : Rapport entre le teneur en eau et la densité sèche .....	9
<b>Figure 1.9</b> : Effets de l'énergie de compactage sur la structure du sol .....	10
<b>Figure 1.10</b> : Pratique d'utilisation du BTC .....	12
<b>Figure 1.11</b> : Méthode de fabrication du BTC .....	12
<b>Figure 1.12</b> : Résistance en compression sèche en fonction du dosage en chaux .....	13
<b>Figure 1.13</b> : Illustration de la durabilité du BTC dans différents environnements (humide, sec, froid, chaud).....	13
<b>Figure 1.14</b> : Schéma montrant la transmission du son à travers différentes épaisseurs de BTC.....	14
<b>Figure 1.15</b> : Exemple pratique de construction par BTC .....	15
<b>Figure 1.16</b> : La fibre biologique : la laine .....	18
<b>Figure 1.17</b> : Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment .....	19
<b>Figure 1.18</b> Les résistances à la compression maximales avec les teneurs en fibres de palmier dattier.....	20

<b>Figure 2.1</b> : Localisation de l'échantillon de sol (région de Bordj Bou Arreridj – Algérie).....	23
<b>Figure 2.2</b> : Distribution granulométrique par tamisage de sol.....	24
<b>Figure 2.3</b> : Appareillage de l'essai de pycnomètre à eau.....	24
<b>Figure 2.4</b> : Analyse granulométrique du sol (a) par tamisage, (b) par sédimentométrie.....	25
<b>Figure 2.5</b> : Détermination de la limite de liquidité WL à l'aide de la boîte de Casagrande.....	25
<b>Figure 2.6</b> : Détermination de la limite de plasticité Wp.....	26
<b>Figure 2.7</b> : Structure cristalline de la montmorillonite.....	26
<b>Figure 2.8</b> : Structure cristalline de l'illite.....	27
<b>Figure 2.9</b> : Effets de l'énergie de compactage sur la structure du sol.....	27
<b>Figure 2.10</b> : Rapport entre le teneur en eau et la densité sèche.....	28
<b>Figure 2.11</b> : Courbe granulométrique par tamisage.....	30
<b>Figure 2.12</b> : Courbe granulométrique par sédimentométrie.....	31
<b>Figure 2.13</b> : Classification de sol selon la classification LPC des sols fins.....	32
<b>Figure 2.14</b> : Limites d'Atterberg de l'argile étudiée et plage de BTC.....	32
<b>Figure 2.15</b> : Courbe de compactage.....	33
<b>Figure 2.16</b> :Filler de calcaire utilisé dans cette étude.....	35
<b>Figure 2.17</b> :Laine de mouton utilisé dans cette étude.....	36
<b>Figure 3.1</b> : Préparation des mélanges.....	38
<b>Figure 3.2</b> : Optimisation de la teneur en eau.....	40
<b>Figure 3.3</b> : Courbe Proctor de mélange 1.....	40
<b>Figure 3.4</b> : Courbe Proctor de mélange 2.....	41
<b>Figure 3.5</b> : Courbe Proctor de mélange 3.....	42
<b>Figure 3.6</b> : Courbe Proctor de mélange 4.....	42
<b>Figure 3.7</b> : Courbe Proctor de mélange 5.....	43
<b>Figure 3.8</b> : Courbe Proctor de mélange 6.....	44
<b>Figure 3.9</b> : Courbe Proctor de mélange 7.....	44
<b>Figure 3.10</b> : Courbe Proctor de mélange 8.....	45

<b>Figure 3.11</b> : Courbe Proctor de mélange 9.....	46
<b>Figure 3.12</b> : Diagramme en barres : Comparaison des caractéristiques des mélanges FM-FC en termes de $p_{dmax}$ et $W_{opt}$ .....	47
<b>Figure 3.13</b> : Optimisation des mélanges.....	48
<b>Figure 3.14</b> : Courbes des propriétés thermiques.....	49
<b>Figure 3.15</b> : Courbes des propriétés mécaniques.....	49
<b>Figure 3.16</b> : Courbes des propriétés physiques.....	51
<b>Figure 3.17</b> : Courbe de Surface en 3D pour l'évaluation des propriétés du BTC renforcé par FM.....	51
<b>Figure 3.18</b> : Visualisation des conditions d'utilisation souhaitables pour le BTC renforcé par FC.....	52
<b>Figure 3.19</b> : Résistance à la compression résidus en fonction des réponses prévues.....	52
<b>Figure 3.20</b> Rupture d'échantillon du BTC par flexion .....	53
<b>Figure 3.21</b> Résistance à la flexion pour différents mélanges.....	54
<b>Figure 3.22</b> Courbe de Surface en 3D pour l'évaluation des propriétés du BTC renforcé par FM.....	55
<b>Figure 3.23</b> Visualisation des conditions d'utilisation souhaitables pour le BTC renforcé par FC.....	56
<b>Figure 3.24</b> Résistance à la flexion résidus en fonction des réponses prévues.....	57
<b>Figure 3.25</b> Variation de la densité pour différents mélanges.....	58
<b>Figure 3.26</b> Conductivité thermique.....	60
<b>Figure 3.27 (a)</b> Courbe de Surface en 3D pour l'évaluation des propriétés du BTC renforcé.....	60
<b>Figure 3.28</b> Conductivité thermique résidus en fonction des réponses prévues.....	61
<b>Figure 3.29</b> Chauffage utilisé pour mesurer la conductivité thermique.....	61

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1.2</b> : Comparaison des performances en isolation thermique entre le BTC et d'autres matériaux de construction.....	14
<b>Tableau 1.3</b> Comparaison de l'empreinte carbone du BTC avec d'autres matériaux de construction.....	15
<b>Tableau 2.1</b> : Mesure de la teneur en eau du sol.....	29
<b>Tableau 2.2</b> : Mesure de la masse volumique des grains solide à l'aide d'un pycnomètre.....	29
<b>Tableau 2.3</b> : Résultats d'analyse granulométrique par tamisage.....	30
<b>Tableau 2.4</b> : Résultats d'analyse granulométrique par sédimentométrie.....	31
<b>Tableau 2.5</b> : Compositions chimiques de l'argile étudiée.....	34
<b>Tableau 2.6</b> : Compositions minéralogiques de l'argile étudiée.....	34
<b>Tableau 2.7</b> : Compositions chimiques de filler de calcaire étudié.....	35
<b>Tableau 2.8</b> : Compositions minéralogiques de filler de calcaire étudié.....	35
<b>Tableau 3.1</b> : Tableaux des compositions et propriétés.....	39
<b>Tableau 3.2</b> : Synthèse des résultats d'essai Proctor.....	39
<b>Tableau 3.3</b> : Synthèse des résultats d'essai Proctor.....	46
<b>Tableau 3.4</b> : Résultats de la résistance à la compression à 28 jours.....	50
<b>Tableau 3.5</b> : Densité des mélanges.....	54
<b>Tableau 3.6</b> : Conductivité thermique.....	55
<b>Tableau 3.7</b> Densité des mélanges.....	59
<b>Tableau 3.8</b> Conductivité thermique des mélanges.....	60

## LISTE DES ABREVIATION

BTC	Briques en Terre Comprimée (Compressed Earth Bricks)
NF	Norme Française (French Standard)
$\rho_d$	Masse Volumique du Matériau Sec (Dry Material Bulk Density)
$\rho_h$	Masse Volumique du Sol Humide (Wet Soil Bulk Density)
$V_s$	Volume des Particules Solides (Volume of Solid Particles)
$m_w$	Masse d'Eau Évaporée (Mass of Evaporated Water)
$m_s$	Masse des Grains Solides (Mass of Solid Grains)
$m_W$	Masse de l'Eau (Mass of Water)
$m_s$	Masse des Grains Solides (Mass of Solid Grains)
$m_1$	Masse de la Coupelle Vide (Mass of Empty Dish)
$m_2$	Masse de la Coupelle avec Sol Sec (Mass of Dish with Dry Soil)
$m_3$	Masse de la Coupelle avec Sol et Eau (Mass of Dish with Soil and Water)
$m_4$	Masse de la Coupelle Remplie d'Eau (Mass of Dish Filled with Water)
WL	Limite de Liquidité (Liquid Limit)
WP	Limite de Plasticité (Plastic Limit)
$I_p$	Indice de Plasticité (Plasticity Index)
$V_w$	Volume d'Eau (Volume of Water)
$\gamma_d$	Masse Volumique du Matériau Sec (Dry Material Density)
$\gamma_h$	Masse Volumique du Sol Humide (Wet Soil Density)
$\gamma_{OPN}$	Masse Volumique Optimale Normal (Optimum Normal Density)
$w_{OPN}$	Teneur en Eau Optimale Normal (Optimum Normal Moisture Content)

# **Introduction générale**



## I.1 Contexte

Depuis près de 10 000 ans la terre est l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. Plus d'un tiers des habitants du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre. Les matériaux de construction en terre crue qui existent depuis des temps immémoriaux, et qui possèdent une grande variété des techniques, sont appelés à revenir comme solution pour enrichir le secteur du bâtiment. Le béton de terre à base d'argile et granulats de carrière offre une adaptation à l'environnement désertique des zones arides et répond aux critères de la durabilité [1].

En effet que le problème de la résistance de béton de terre a toujours intéressé les ingénieurs en bâtiment, il reste encore difficile à résoudre dans un cadre général. Cependant, ce travail de recherche se propose de faire une étude des formulations de béton de terre stabilisé par le filler de calcaire [1].

Pour obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques du BTC, réduction de sa porosité, variations de volume (gonflement et retrait) et amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité du bloc), plusieurs stabilisants peuvent être utilisés : comme le ciment, la chaux, le bitume, les fibres, etc.

Le béton de terre comprimé émerge comme une alternative innovante et durable dans le domaine de la construction, répondant aux impératifs écologiques et économiques contemporains. Ce matériau, issu de la combinaison judicieuse de terre crue, de fibres naturelles et d'additions, incarne les fondements d'une construction respectueuse de l'environnement, de par sa faible empreinte carbone et son cycle de vie vertueux [1].

Elle se positionne au cœur des enjeux de durabilité en offrant une alternative écologique aux matériaux traditionnels de construction. Sa production requiert des ressources locales abondantes, réduisant ainsi les coûts liés au transport et limitant l'empreinte environnementale. De plus, sa capacité à s'inscrire dans une logique d'économie circulaire en favorisant la valorisation des terres locales et des matériaux naturels en fait un acteur majeur de la transition écologique dans le secteur de la construction [2] [3].

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence de la laine naturelle et des additions (notamment le filler de calcaire) sur le comportement du BTC. L'étude de l'influence de la laine naturelle et des additions sur le comportement du BTC trouve sa pertinence dans le contexte actuel de recherche de solutions durables et performantes en matière de construction. En intégrant des éléments naturels et des améliorations techniques, cette étude vise à optimiser les propriétés mécaniques et thermique du BTC.

## **I.2. Présentation de la problématique**

La fabrication de BTC écologiques pour les zones sahariennes revêt une importance cruciale en raison des conditions climatiques extrêmes. Ces BTC, fabriquées à partir de matériaux locaux et naturels, offrent une solution durable et adaptée aux hautes températures du désert. En exploitant la terre crue, elles possèdent d'excellentes propriétés d'isolation thermique, permettant de maintenir des températures intérieures plus fraîches sans recourir à une climatisation énergivore. De plus, la production de briques de terre écologiques réduit l'empreinte carbone et favorise l'utilisation de ressources renouvelables, tout en offrant une alternative économique et accessible pour les communautés locales. Cette approche contribue non seulement à un habitat plus confortable et durable, mais aussi à la préservation de l'environnement saharien.

L'utilisation de la laine de mouton dans le domaine du génie civil présente une solution innovante et durable pour améliorer les propriétés des matériaux de construction tout en adressant un problème environnemental. La laine de mouton, grâce à ses excellentes qualités isolantes et sa résistance à l'humidité, peut être intégrée dans les mélanges de BTC pour augmenter l'isolation thermique et acoustique.

La laine du montons utiliser dans ce travail considéré comme un matière noble, la figure 1 représente des photos ont été prises par des internautes faisant état de nombreuses saletés jonchant les rues de la capitale après le sacrifice du mouton de

### **I.3. Objectifs de l'étude**

Les objectifs principaux de cette recherche sont multiples et ambitieux. Tout d'abord, il s'agit d'analyser les effets des fibres naturelles sur les propriétés mécaniques du BTC, en mettant l'accent sur le renforcement et la résistance à la compression. Ensuite, l'étude vise à évaluer l'influence des additions, telles que le filler de calcaire sur les performances du Béton de Terre Comprimé (BTC). Cette étude s'articule autour de plusieurs axes clés, tels que l'amélioration de la résistance mécanique et l'optimisation de la résistance thermique.

### **I.4. Organisation du mémoire**

**Nous avons structuré notre mémoire comme suit :**

**Le chapitre 1** aborde divers aspects cruciaux du sujet abordé. Nous débutons par présentation de la matière première centrale de notre étude, à savoir la terre, en explorant sa composition, ses propriétés physico-mécaniques et sa classification conforme aux normes établies. Dans la continuité, une mise en contexte de l'étude en soulignant l'importance de la laine dans le domaine de la construction durable, mettant en évidence son potentiel influent.

La section sur la stabilisation souligne les divers objectifs et procédés essentiels pour garantir la qualité et la durabilité des sols, notamment en analysant l'influence de facteurs tels que la teneur en eau, l'énergie de compactage et la granulométrie du sol.

**Le chapitre 2** est consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés pour la fabrication de béton de terre comprimé qui sont la terre extrait à partir de gisement sélectionner ainsi que le filler de calcaire et la laine du mouton, ce chapitre présente aussi les essais d'identification de ces matériaux locaux (Caractéristiques physiques, mécaniques et physico-chimique).

**Le chapitre 3** comprendra la collecte de données sur les caractéristiques physico-mécaniques des BTC a base des fibres naturelles et des additions, ainsi que les résultats des essais réaliser au laboratoire pour évaluer les performances du BTC avec différents mélanges,

ainsi que des analyses statistiques pour interpréter les résultats et tirer des conclusions significatives.

Cet mémoire se termine par une conclusion générale qui représente une synthèse des résultats obtenus décrits aux chapitres précédents.

# **CHAPITRE 1 : État de l'art**

## **1.1 Introduction**

Depuis des siècles, l'être humain a exploité la terre crue comme matériau de construction majeur, une ressource naturelle toujours utilisée par plus d'un tiers de la population mondiale [3]. Ce matériau se distingue par sa simplicité d'utilisation et son caractère économique, notamment à une époque où les techniques de construction n'étaient pas aussi avancées qu'aujourd'hui. Traditionnellement, le sol était compacté en blocs pour améliorer ses propriétés, telles que sa résistance mécanique ou ses capacités isolantes thermiques et acoustiques [4]. Les sols argileux ont été largement privilégiés pour ces usages, du fait de leur cohésion naturelle. Aujourd'hui, de nombreux chercheurs se penchent sur l'étude des propriétés thermomécaniques des terres destinées à la construction, et à optimiser ces matériaux pour des applications modernes et durables. Le présent chapitre a pour objectif de présenter une synthèse bibliographique globale sur le béton de terre comprimé [22].

## **1.2 La terre crue**

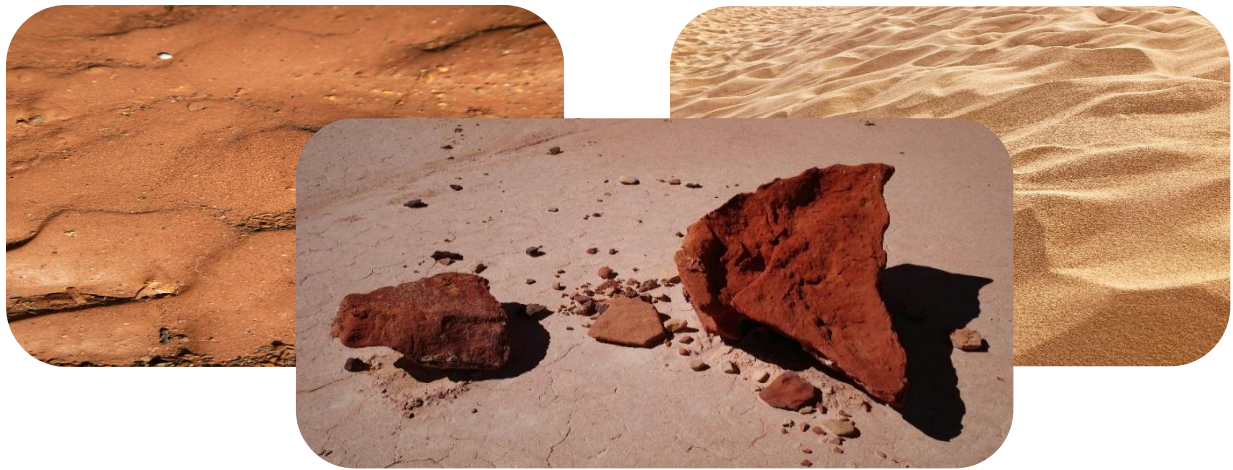
### **1.2.1 Définition**

La compréhension approfondie des propriétés et des caractéristiques de la terre crue est fondamentale pour appréhender le fonctionnement et les performances du Béton de Terre comprimée (BTC). Cette section se propose donc d'explorer en détail la définition de la terre crue, ses propriétés physico-mécaniques, en passant par ses différentes classifications et utilisations dans le domaine de la construction.

La composition de la terre joue également un rôle essentiel dans son comportement et ses propriétés. Elle est principalement constituée de particules minérales issues de la décomposition de roches, telles que les argiles, les limons et les sables. Ces composants minéraux confèrent à la terre crue ses caractéristiques uniques, notamment en termes de cohésion, de plasticité et de résistance [24].

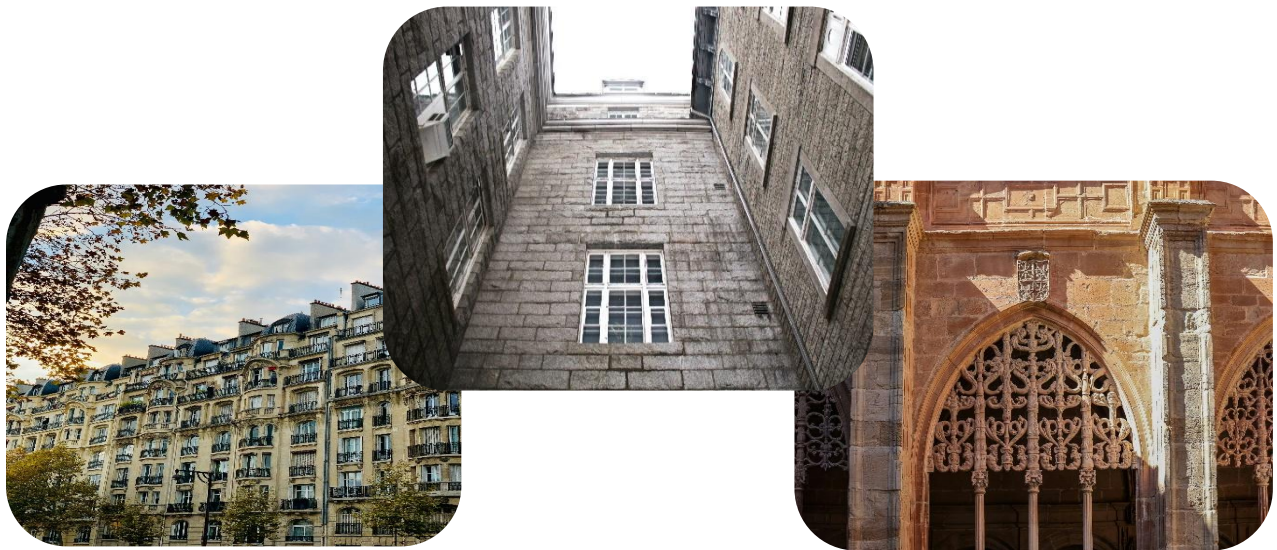
Les argiles, riches en minéraux comme la kaolinite, la montmorillonite et l'illite, sont souvent présentes en grande quantité dans la terre crue. Elles jouent un rôle crucial dans sa capacité à être compactée et à former des structures solides. En parallèle, les limons apportent une certaine plasticité à la terre, tandis que les sables contribuent à sa stabilité et à sa résistance mécanique.

Ainsi, la composition spécifique de la terre crue influence directement ses performances en matière de construction, ce qui en fait un matériau polyvalent et adaptatif aux besoins variés de l'industrie du bâtiment. [4] [18]



**Figure 1.1** Les différents types de terre crue (argile, limon, sable) [1].

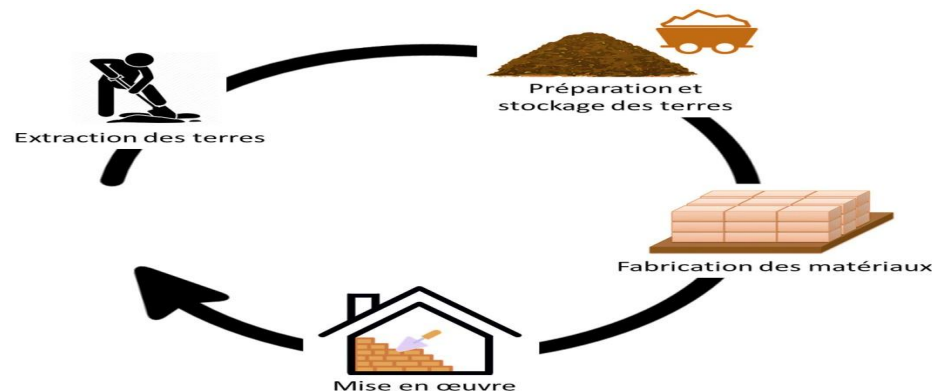
La terre crue, également appelée "terre battue" ou "terre argileuse", est un matériau ancestral largement utilisé dans la construction traditionnelle à travers le monde. Elle est principalement composée de particules minérales telles que l'argile, le limon et le sable, dont les proportions influencent directement ses propriétés mécaniques et sa plasticité.



**Figure 1.2** Les différentes applications de la terre crue dans la construction (bâtiments, murs, voûtes) [2]

La granulométrie de la terre, c'est-à-dire la répartition des différentes tailles de particules, joue un rôle crucial dans sa compacité, sa plasticité et sa capacité à supporter des charges. Les terres argileuses, par exemple, sont connues pour leur forte plasticité et leur capacité à retenir l'eau, tandis que les terres sableuses offrent une meilleure résistance mécanique, mais sont moins adaptées aux ouvrages nécessitant une grande plasticité [2].

En outre, la terre crue peut être soumise à divers traitements et techniques de préparation, tels que le tamisage, le séchage et le broyage, afin d'optimiser ses caractéristiques pour son utilisation dans la construction. Cette phase de préparation est cruciale pour garantir une terre homogène, exempte d'impuretés et répondant aux normes de qualité requises.



**Figure 1.3** Les étapes de préparation et de traitement de la terre crue [4].

### 1.2.2 Composition granulométrique et minéralogique

La composition granulométrique et minéralogique de la terre est un aspect essentiel à étudier pour comprendre ses propriétés mécaniques et son comportement dans la construction. La granulométrie fait référence à la répartition des différentes tailles de particules dans la terre, tandis que la minéralogie se réfère à la nature des minéraux présents [7].

La granulométrie de la terre crue varie en fonction de sa composition en argile, limon et sable. Les terres argileuses ont une granulométrie fine, avec une prédominance de particules de taille inférieure à 0,002 mm, ce qui leur confère une forte plasticité. Les terres limoneuses ont une granulométrie intermédiaire, tandis que les terres sableuses ont une granulométrie plus grossière, avec une prédominance de particules de taille supérieure à 0,05 mm, leur conférant une bonne perméabilité, mais une moindre plasticité [7].





Argiles	Limons	Sables	Graviers	Cailloux	Pierres	Blocs
0,002 mm	0,05 mm	2 mm	2 cm	5 cm	20 cm	

**Figure 1.4** L'échelle granulométrique [3].

Sur le plan minéralogique, la terre peut contenir différents minéraux tels que l'argile, le quartz, le feldspath, etc. La composition minéralogique influe sur les propriétés mécaniques de la terre, notamment sa résistance, sa plasticité et sa compressibilité [16]. Par exemple, les terres argileuses riches en minéraux argileux sont souvent très plastiques et peuvent subir des déformations importantes sous charge [2].

### 1.2.3 Classification des sols

La caractérisation et la classification des sols selon les normes sont des étapes essentielles pour évaluer leur adéquation à être utilisés dans la construction, notamment dans le cadre du Béton de Terre Comprimé (BTC). Les normes telles que la NF DTU 21 P1-2 et la XP P13-901 fournissent des critères et des méthodes de classification reconnus internationalement [4] [18].

La classification des sols repose sur plusieurs critères, notamment la granulométrie, la plasticité, la teneur en matière organique, la compacité, la résistance et la perméabilité. Les sols sont généralement classés en différentes catégories telles que les sols argileux, limoneux, sableux, caillouteux, etc., en fonction de leurs caractéristiques physiques et mécaniques [2].

La classification des sols permet de déterminer leur aptitude à être utilisés dans la construction de différentes structures et de prescrire les précautions nécessaires lors de leur

utilisation. Par exemple, les sols argileux peuvent nécessiter des traitements spécifiques pour améliorer leur compacité et leur stabilité, tandis que les sols sableux peuvent être utilisés comme matériaux de drainage [6] [17].

En outre, la caractérisation des sols selon les normes permet de garantir la qualité et la durabilité des ouvrages construits avec du BTC en prenant en compte les propriétés spécifiques du sol utilisé. Cela contribue à réduire les risques de défaillance des structures et à assurer la sécurité des bâtiments construits.

#### **1.2.4 Propriétés physico-mécaniques de la terre**

Les propriétés physico-mécaniques de la terre sont déterminantes pour évaluer sa capacité à être utilisée dans la construction, notamment dans le contexte du Béton de Terre Comprimé (BTC). Ces propriétés englobent des aspects tels que la compacité, la plasticité, la résistance mécanique et la compressibilité [2] [6].

La compacité d'une terre se réfère à son degré de densification et d'occupation des vides entre les particules. Une terre bien compactée présente une plus grande résistance mécanique et une meilleure capacité à supporter des charges sans se déformer excessivement.

La plasticité fait référence à la capacité d'une terre à changer de forme sans se rompre. Les terres argileuses sont souvent très plastiques, ce qui les rend appropriées pour des applications nécessitant une déformation sans rupture, comme dans la construction de BTC.

La résistance mécanique d'une terre est sa capacité à résister à des forces externes telles que la compression, la traction ou la flexion. Cette propriété est cruciale pour assurer la durabilité et la stabilité des structures construites avec du BTC.

La compressibilité d'une terre quantifie sa capacité à se tasser sous une charge appliquée. Une faible compressibilité est préférable dans la construction pour éviter les mouvements excessifs du sol et les dommages potentiels aux structures.

L'évaluation de ces propriétés nécessite des tests en laboratoire tel que des essais de compactage, des essais de résistance à la compression, des essais de plasticité, etc. Ces tests permettent de caractériser de manière précise le comportement de la terre et d'ajuster les formulations de BTC pour obtenir des performances optimales [6].

### 1.2.5 Classification et composition des argiles

Les argiles sont des minéraux composés principalement de silicates en feuillets (phyllosilicates), riches en alumine et plus ou moins hydratés. Elles se caractérisent par leur structure en couches, avec des feuillets minces résultant de la superposition de tétraèdres et d'octaèdres. Ces minéraux présentent une forte affinité pour l'eau, ce qui leur confère des propriétés plastiques et une capacité d'absorption [24].

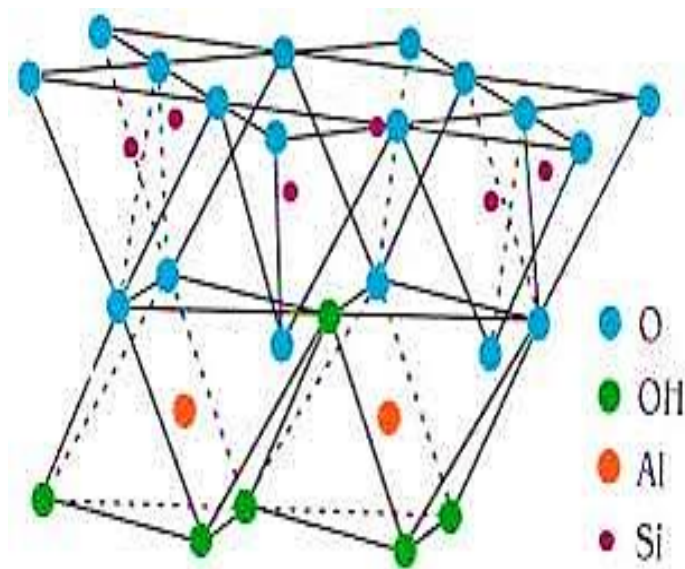
La classification des argiles repose sur plusieurs critères, notamment leur structure cristalline, leur composition chimique, leur degré d'hydratation, et leur comportement en présence d'eau. On distingue généralement plusieurs types d'argiles :

1. **Argiles kaolinitiques** : Elles sont principalement constituées de kaolinite, un minéral argileux à structure en feuillets simples. Les argiles kaolinitiques sont utilisées dans la fabrication de la porcelaine, des céramiques et des matériaux réfractaires.
2. **Argiles smectiques** : Elles comprennent des minéraux comme la montmorillonite, la saponite et la hectorite. Ces argiles ont une structure en feuillets très expansible et présentent une grande capacité d'absorption d'eau. Elles sont utilisées dans l'industrie pétrolière, la fabrication de bentonite, et comme agents de rétention d'eau dans les sols.
3. **Argiles illitiques** : Elles sont riches en minéraux comme l'illite, la muscovite et la glauconite. Les argiles illitiques ont une structure en feuillets non expansible et sont souvent associées à des roches sédimentaires. Elles sont utilisées dans l'industrie céramique et dans la fabrication de matériaux de construction.
4. **Argiles chloritiques** : Elles comprennent des minéraux comme le chlorite, la clinochlore et la penninite. Ces argiles ont une structure en feuillets empilés et sont souvent associées à des roches métamorphiques. Elles sont utilisées comme matériaux de remplissage et dans l'industrie du papier.

### 1.2.5.1 Types de minéraux argileux

- **La kaolinite**

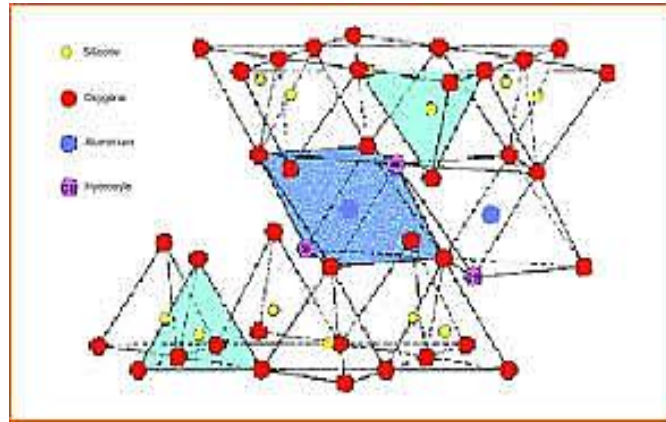
La kaolinite est un type d'argile couramment trouvé dans les sols et les roches sédimentaires. Elle se caractérise par sa couleur blanche à jaune clair et sa texture fine. La kaolinite est largement utilisée dans l'industrie de la céramique pour la fabrication de porcelaine, de carrelage et de divers articles en céramique. Elle est également utilisée dans l'industrie du papier pour son rôle d'agent de blanchiment et d'épaississant [21].



**Figure 1.5** Structure cristalline de la kaolinite [1].

- **La montmorillonite**

La montmorillonite est une argile du groupe des smectites, connue pour son expansion en présence d'eau (Figure 1.6). Elle est souvent de couleur beige à verte et possède des propriétés d'absorption exceptionnelles, ce qui la rend utile dans la fabrication de produits absorbants comme les litières pour chats, les adsorbants pour l'industrie pétrolière et les matériaux de géosynthétique pour l'étanchéité des sols [21].

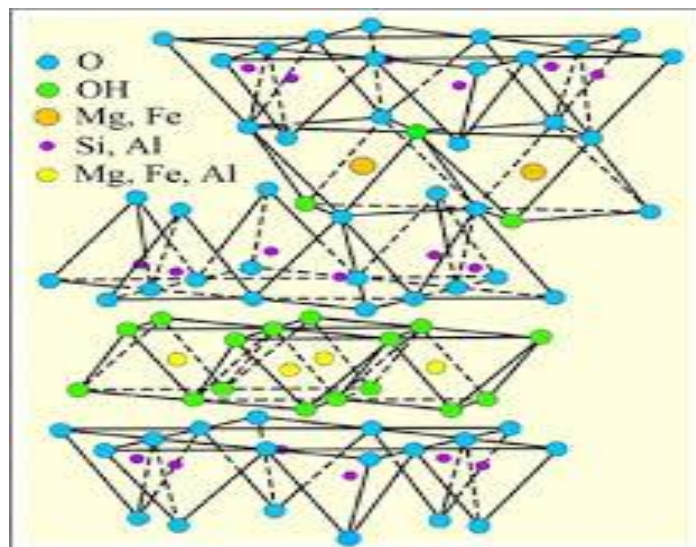


**Figure 1.6** Structure cristalline de la montmorillonite [1].

- **L'illite**

L'illite est une argile souvent associée aux schistes et aux argiles feuilletées (Figure 1.7). Elle se distingue par sa couleur allant du vert au brun et par sa texture fine. L'illite est utilisée dans l'industrie des cosmétiques pour ses propriétés adoucissantes et purifiantes. Elle est également utilisée comme matière première dans la fabrication de certains types de ciments et dans l'industrie du papier pour améliorer la rétention d'eau et la résistance.

Ces différents types d'argiles démontrent la diversité des applications et des caractéristiques de ce matériau essentiel dans de nombreux secteurs industriels [21].



**Figure 1.7** Structure cristalline de l'illite [1].

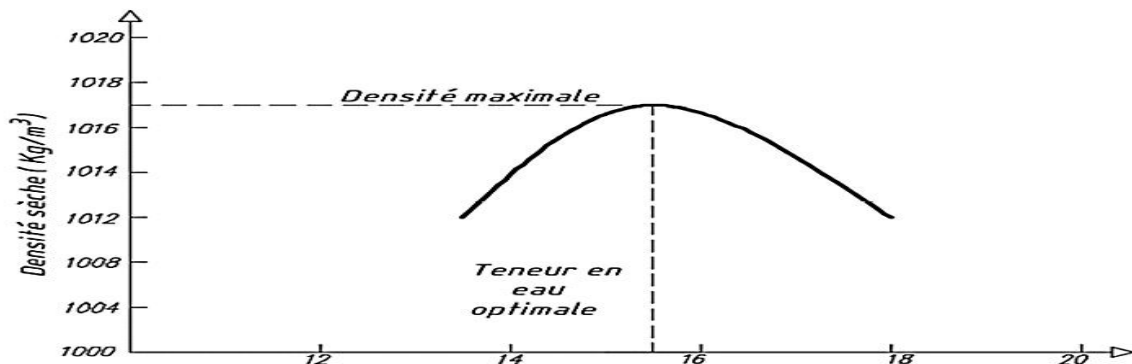
## 1.2.6 La stabilisation

La stabilisation des sols vise plusieurs objectifs, notamment améliorer la portance et la résistance mécanique du sol, réduire la perméabilité, contrôler l'érosion, augmenter la durabilité, et faciliter la mise en œuvre des travaux de construction. Ces objectifs sont atteints en modifiant les caractéristiques physico-chimiques du sol [21] [2].

Les principaux procédés de stabilisation des sols comprennent l'ajout d'agents stabilisants tels que le ciment, la chaux, les liants hydrauliques, les fibres, les adjuvants, etc. Ces agents réagissent avec les particules du sol pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur résistance aux contraintes [21].

- **Influence de la teneur en eau sur la densité**

La teneur en eau du sol joue un rôle crucial dans la densification du matériau stabilisé. Un taux d'humidité optimal est nécessaire pour obtenir une densité optimale et garantir la qualité de la stabilisation [21].



**Figure 1.8** Rapport entre le teneur en eau et la densité sèche [21].

- **Influence de l'énergie de compactage**

L'énergie de compactage, généralement appliquée à l'aide de compacteurs, impacte directement la compaction du sol stabilisé. Une énergie adéquate est requise pour obtenir une compaction uniforme et une distribution homogène des agents stabilisants dans le sol [21].

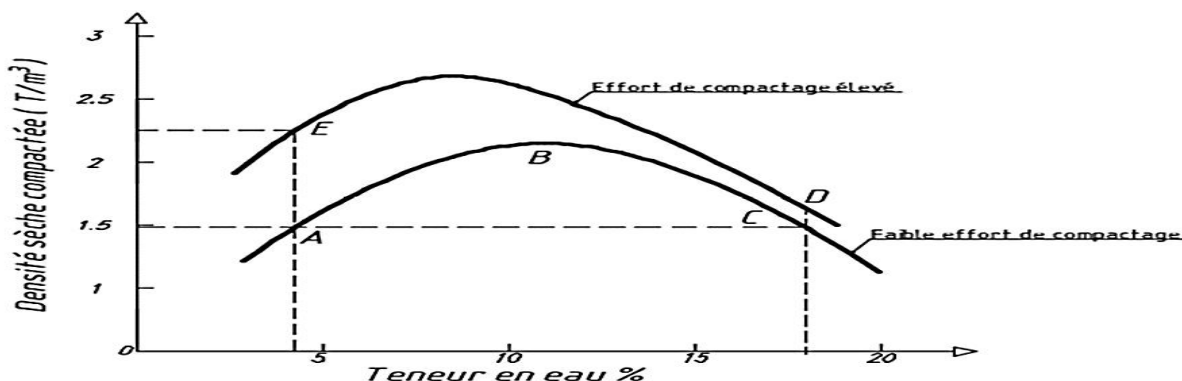


Figure 1.9 Effets de l'énergie de compactage sur la structure du sol [21].

- **Influence de la granulométrie du sol**

Les sols avec une granulométrie fine nécessitent souvent plus d'agent stabilisant pour atteindre les objectifs de stabilisation par rapport aux sols à granulométrie plus grossière.

En outre, la stabilisation des sols s'inscrit pleinement dans une approche d'amélioration continue de la durabilité des constructions, en favorisant une utilisation optimale des ressources naturelles disponibles. En renforçant les caractéristiques mécaniques des sols, elle contribue à réduire les besoins en matériaux supplémentaires, en énergie et en coûts associés à la maintenance et à la réhabilitation des ouvrages [21].

Par conséquent, intégrer des techniques de stabilisation des sols dans les projets de construction représente une démarche proactive et responsable, alignée sur les principes du développement durable et de la préservation de l'environnement [21].

## 1.3 Présentation du BTC

### 1.3.1 Historique et développement du BTC dans le monde

Le Béton de Terre Comprimé (BTC) a une histoire riche et diversifiée, évoluant au fil du temps pour devenir un matériau de construction durable et respectueux de l'environnement [2] [3].

- **Antiquité** : Les civilisations anciennes utilisaient déjà la terre crue pour construire des structures simples, mais durables. Les Égyptiens utilisaient des briques de terre séchée au

soleil, tandis que les Romains utilisaient des mélanges de terre pour des applications diverses.

- **XIXe siècle** : Des techniques de compression plus avancées ont été développées, permettant la création de blocs de terre plus solides et résistants. Ces avancées ont conduit à une utilisation plus fréquente du BTC dans des projets de construction structurale.
- **Années 1940-1960** : Avec l'émergence de mouvements architecturaux prônant le retour à des matériaux naturels et durables, le BTC a été redécouvert et valorisé pour ses propriétés écologiques et sa disponibilité locale.
- **Années 1970** : Le BTC a connu un regain d'intérêt significatif en réponse aux préoccupations croissantes concernant l'environnement. Sa faible empreinte carbone et sa capacité à valoriser des ressources locales en ont fait un choix attrayant pour la construction durable.
- **Années 2000 à aujourd'hui** : Le BTC continue de bénéficier de recherches et d'innovations constantes, avec des avancées technologiques telles que l'intégration de fibres naturelles, l'optimisation des processus de fabrication et l'utilisation de techniques de compactage modernes.

### 1.3.2 Définition du BTC et ses caractéristiques principales

Le Béton de Terre Comprimé (BTC) est un matériau de construction novateur qui combine la terre crue et des techniques de compression pour créer des éléments de construction robustes et durables. Pour mieux comprendre ses propriétés, nous allons définir le BTC et énumérer ses principales caractéristiques [3].

Le BTC est un matériau composite constitué principalement de terre crue, souvent mélangée à des fibres naturelles comme la paille ou le chanvre, ainsi qu'à des additions telles que le ciment ou la chaux. Ce mélange est compacté sous haute pression pour former des éléments de construction tels que des blocs, des briques ou des panneaux [3].





**Figure 1.10** Pratique d'utilisation du BTC [1].

### 1.3.3 La fabrication du BTC

La fabrication du Béton de Terre Comprimé (BTC) implique plusieurs étapes cruciales pour obtenir un matériau final de qualité. Tout d'abord, la sélection et la préparation des matières premières sont essentielles. Cela inclut la terre crue, qui doit être choisie avec soin en fonction de ses propriétés physiques et mécaniques. Ensuite, la terre est tamisée et mélangée de manière homogène avec des additifs et éventuellement des fibres naturelles pour améliorer ses propriétés.

Une fois le mélange préparé, il est compacté dans des moules spécifiques à l'aide d'une presse hydraulique ou manuelle. Cette étape de compactage est cruciale pour garantir une bonne cohésion et une résistance mécanique optimale du BTC. Après le compactage, les blocs de BTC sont séchés naturellement ou artificiellement selon les conditions climatiques et les exigences du projet [25].



**Figure 1.11** Méthode de fabrication du BTC [1].

### 1.3.4 Principales caractéristiques du BTC

- **Résistance à la compression** : la résistance à la compression du BTC est liée à plusieurs paramètres tel que les ajouts de stabilisation. La Figure 1.11 représente la résistance en compression sèche en fonction du dosage en chaux [2].

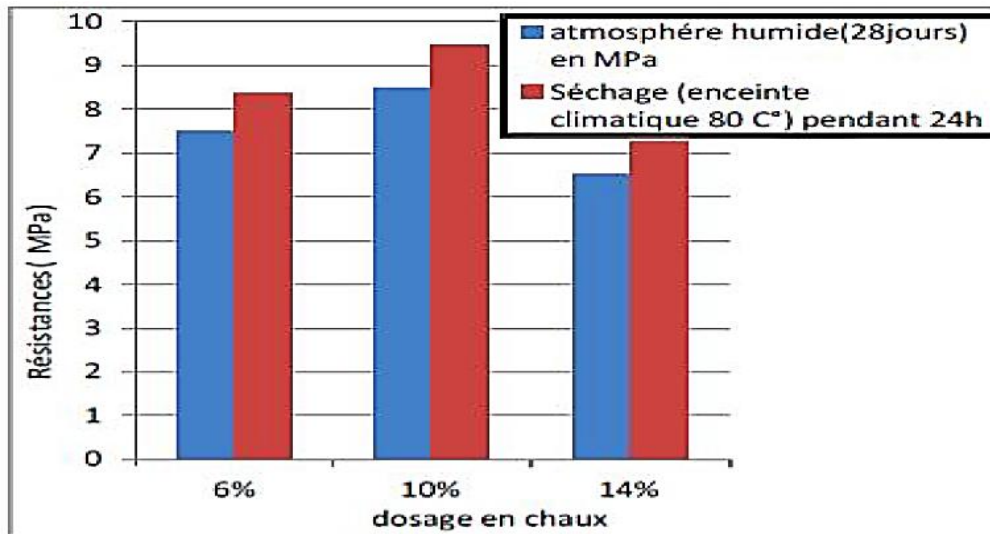
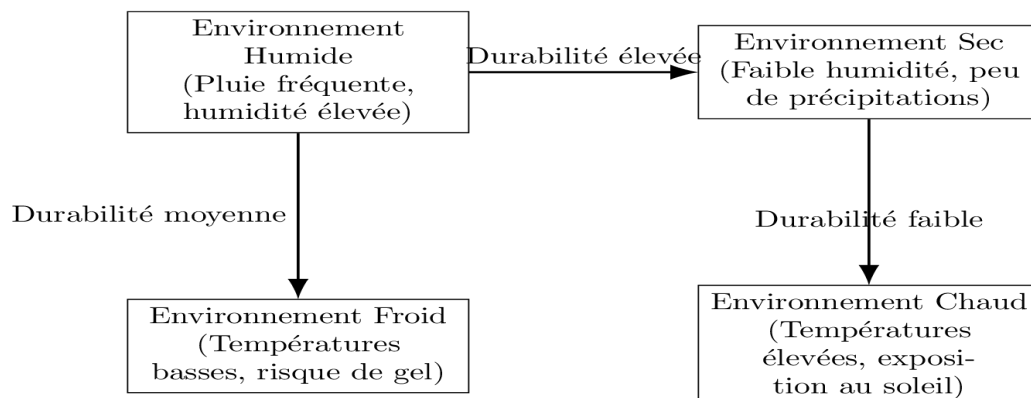


Figure 1.12 Résistance en compression sèche en fonction du dosage en chaux [23].

Izemouren et al. (2020), ont montré que le traitement à la chaux des blocs de terre comprimée et durcie par vapeur améliore les caractéristiques mécaniques spécialement la résistance en compression humide [23].

- **Durabilité** : Sa composition naturelle et son processus de fabrication lui confèrent une grande durabilité, le rendant résistant aux intempéries, à la corrosion et aux attaques biologiques [3].



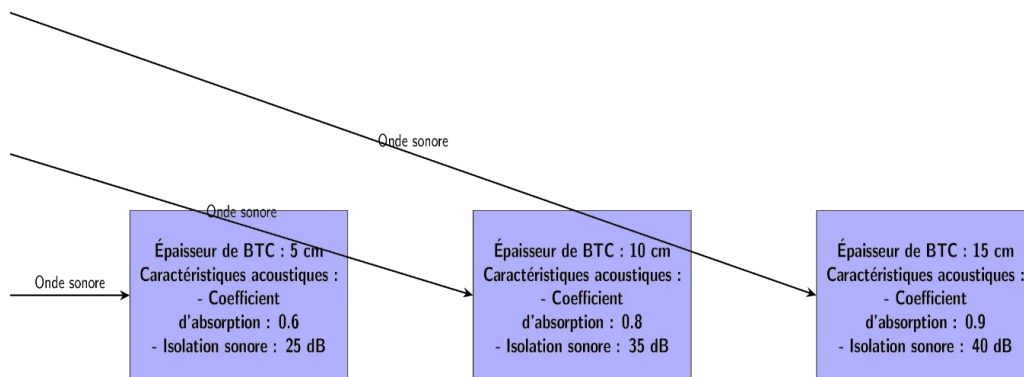
**Figure 1.13** Illustration de la durabilité du BTC dans différents environnements (humide, sec, froid, chaud) [7].

- **Isolation thermique** : Le BTC offre une bonne isolation thermique, réduisant les pertes de chaleur en hiver et maintenant la fraîcheur en été [7].

**Tableau 1.2** Comparaison des performances en isolation thermique entre le BTC et d'autres matériaux de construction [6].

Matériau	Conductivité thermique (W/mK)	Coefficient d'isolation (U-value)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> K/W)
BTC	0.5	0.3	2
Béton traditionnel	1.2	0.8	1.25
Bois (chêne)	0.15	0.2	5
Isolation synthétique	0.03	0.1	10

- **Isolation acoustique** : Il possède également des propriétés d'isolation acoustique, atténuant les bruits extérieurs et internes [8].



**Figure 1.14** Schéma montrant la transmission du son à travers différentes épaisseurs de BTC [8].

- **Respect de l'environnement** : L'utilisation de matériaux naturels locaux et la réduction des émissions de carbone liées à sa fabrication en font un matériau respectueux de l'environnement.

**Tableau 1.3** : Comparaison de l'empreinte carbone du BTC avec d'autres matériaux de construction [3].

Matériau	Empreinte carbone (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
BTC	10
Béton traditionnel	15
Bois (chêne)	5
Acier	30

En intégrant des tableaux comparatifs et des schémas illustratifs, nous pouvons visualiser les propriétés clés du BTC, ce qui facilite la compréhension de son utilisation et de ses avantages dans le domaine de la construction durable.

### 1.3.5 Applications du BTC dans le domaine de la construction

Parmi les différentes applications et utilisations du Béton de Terre Comprimé (BTC) dans le domaine de la construction durable [3] [2]. On trouve :

#### ➤ Applications résidentielles

- Utilisation du BTC dans la construction de maisons individuelles

#### ➤ Applications commerciales

- Intégration du BTC dans les bâtiments commerciaux et les structures publiques

#### ➤ Applications industrielles

- Utilisation du BTC dans les installations industrielles et les entrepôts

#### ➤ Applications infrastructurelles

- Utilisation du BTC dans les infrastructures routières, ferroviaires et hydrauliques



Cameroun



Côte d'Ivoire

**Figure 1.15** Exemple pratique de construction par BTC [1].

### 1.3.6 Les Fibres : origine, caractéristiques et applications

Les fibres sont des matériaux naturels ou synthétiques, de forme allongée et mince, qui peuvent être tissés ou mélangés pour former des structures plus solides et résistantes. Elles sont largement utilisées dans divers domaines tels que la construction, l'industrie textile, l'aérospatiale, l'automobile, etc [12]. Voici une définition des fibres et une classification basée sur leurs caractéristiques et leurs sources :

#### 1. Fibres naturelles

- **Fibres végétales** : Elles proviennent de plantes comme le coton, le lin, le chanvre, le jute, etc. Ces fibres sont renouvelables et biodégradables, ce qui en fait des choix durables pour de nombreuses applications.
- **Fibres animales** : Elles sont extraites d'animaux, comme la laine de mouton, la soie de vers à soie, ou le cachemire de chèvre. Ces fibres ont des propriétés isolantes, résistantes et douces au toucher.
- **Fibres minérales** : Elles sont issues de matières minérales comme la fibre de verre, la fibre de basalte, ou la fibre de céramique. Ces fibres sont principalement utilisées pour leur résistance à la chaleur et leur capacité à renforcer les matériaux composites.

#### 2. Fibres synthétiques

- **Fibres thermoplastiques** : Elles comprennent le polyester, le polyamide (nylon), le polypropylène, etc. Ces fibres sont fabriquées à partir de polymères synthétiques et sont largement utilisées dans l'industrie textile pour leur résistance et leur durabilité.
- **Fibres thermodurcissables** : Elles incluent la fibre de carbone, la fibre aramide (comme le Kevlar), et la fibre de verre renforcée de résine. Ces fibres sont connues pour leur grande résistance mécanique et leur utilisation dans des applications nécessitant une forte rigidité et une faible conductivité électrique.

- **Fibres semi-synthétiques** : Elles sont obtenues à partir de matières naturelles modifiées chimiquement, comme la viscose (ou rayonne) dérivée de la cellulose. Ces fibres combinent souvent les avantages des fibres naturelles et synthétiques.

### 1.3.7 Influence de la laine naturelle sur le comportement du BTC

La présence de laine naturelle dans le Béton de Terre Comprimé (BTC) modifie considérablement ses propriétés et son comportement. La laine naturelle agit comme une fibre de renfort, renforçant la structure du BTC et améliorant ses performances globales.

La laine naturelle utilisée dans le BTC est généralement issue de sources naturelles telles que la laine de mouton ou d'autres animaux. Ces fibres sont intégrées dans le mélange de terre pour améliorer divers aspects du béton. On peut résumer leur influence dans les points suivants :

- **Renforcement de la résistance mécanique** : Les fibres de laine ajoutent de la résistance à la compression, à la flexion et à la traction du BTC, ce qui renforce sa capacité à supporter des charges structurelles.
- **Amélioration des propriétés thermiques** : La laine naturelle contribue à l'isolation thermique du BTC, réduisant les pertes de chaleur et améliorant son efficacité énergétique.
- **Absorption sonore accrue** : Les propriétés d'absorption sonore de la laine réduisent la transmission des bruits à travers les structures en BTC, créant des environnements intérieurs plus calmes et confortables.
- **Impact environnemental positif** : La laine naturelle étant un matériau renouvelable et biodégradable, son utilisation dans le BTC favorise des pratiques de construction durables et respectueuses de l'environnement [2] [3].
- **Stabilité et durabilité** : Analyser la stabilité et la durabilité du BTC avec et sans laine naturelle face aux conditions environnementales et aux contraintes structurelles. La laine peut contribuer à améliorer la résistance aux intempéries et aux variations climatiques, prolongeant ainsi la durée de vie des constructions [2].



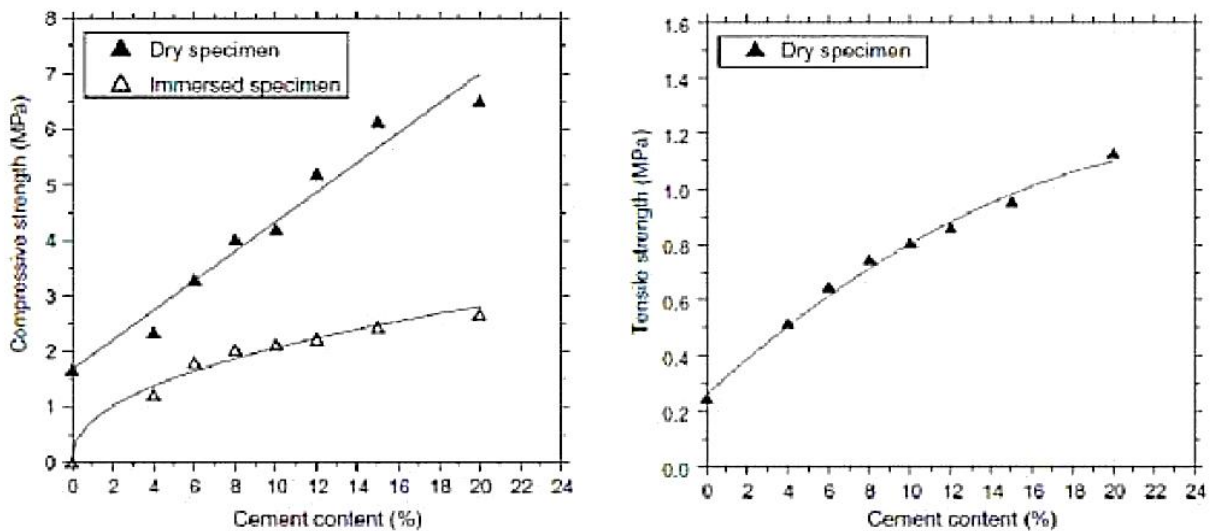
**Figure 1.16** La fibre biologique : la laine [9].

#### **1.4. Propriété mécanique du BTC stabilisé**

La stabilisation du Béton de Terre Comprimé (BTC) peut être réalisée selon différents procédés, notamment par l'utilisation de filler de calcaire ou de fibres. Ces méthodes de stabilisation sont cruciales pour améliorer les propriétés mécaniques du BTC, en lui conférant une résistance accrue et une durabilité améliorée.

##### **1.4.1. Stabilisation par ciment**

La stabilisation du BTC par l'ajout de ciment est une technique couramment utilisée pour renforcer ses propriétés mécaniques. L'incorporation de ciment dans le mélange de terre contribue à augmenter la résistance à la compression et à la flexion du BTC. Ce processus de stabilisation permet également de réduire la sensibilité du matériau aux variations hygrométriques, améliorant ainsi sa durabilité dans des conditions diverses [3].



**Figure 1.17** Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004) [24].

L'effet principal de la stabilisation au ciment est l'insensibilisation à l'eau du matériau. Par un traitement au ciment bien conduit, on peut obtenir des résultats très satisfaisants. Une étude réalisée par Venkatrama et al. [24], a montré que la résistance à la compression humide et la résistance à traction des blocs de terre stabilisée au ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, et qu'en doublant la teneur en ciment, la résistance à la compression humide augmente par 2,3 fois [24].

#### 1.4.2. Stabilisation par fibres

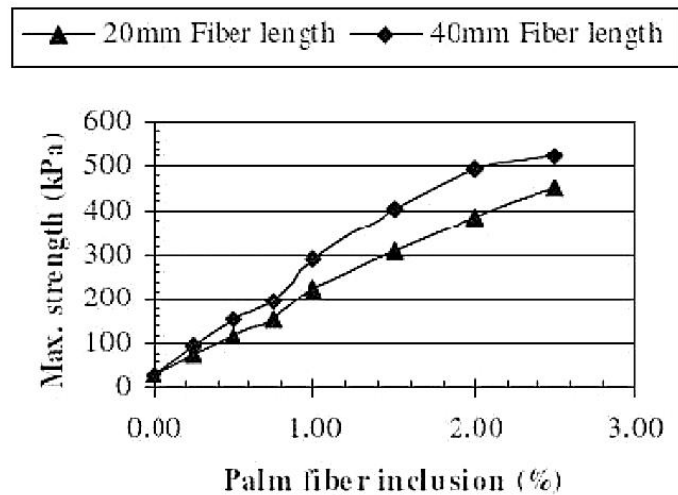
Une autre méthode de stabilisation efficace du BTC est l'ajout de fibres naturelles ou synthétiques. Ces fibres agissent comme des renforts dans la matrice de terre, améliorant ainsi sa résistance à la traction et sa capacité à absorber les contraintes. Les fibres naturelles telles que la paille, la laine, ou le jute sont souvent privilégiées pour leur compatibilité avec les pratiques de construction durable. En outre, la stabilisation par fibres contribue à réduire les fissurations et à améliorer la résilience du BTC face aux sollicitations mécaniques.

Ces méthodes de stabilisation offrent des solutions innovantes pour optimiser les performances mécaniques du BTC, ouvrant ainsi la voie à des applications plus diversifiées et durables dans le domaine de la construction [2].



### 1.4.3 Les fibres brutes de palmier dattier

D'après Swamy (Swamy, 1984), les fibres extraites des palmiers décomposés s'avèrent fragiles, elles ont une faible résistance à la traction, un faible module d'élasticité et une absorption d'eau très élevée. Marandi et al. ont réalisé des essais de résistance à la compression non confiné, l'indice de portance californien et de compactage sur des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier. Ils ont constaté qu'avec la même longueur de fibre et avec l'augmentation de la teneur en fibres (de 0 % à 1 %), les résistances maximums et résiduelles ont augmenté, tandis que la différence entre les résistances résiduelles et maximums a diminué. Une tendance similaire a été observée avec l'augmentation de la longueur de la fibre de palmier (de 20 mm à 40 mm) pour une teneur en fibres constante [22].



**Figure 1.18** Les résistances à la compression maximales avec les teneurs en fibres de palmier dattier [22].

### 1.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description du Béton de Terre Comprimé (BTC). Les caractéristiques principales et le mode de fabrication du BTC ont été expliqué en détail. Aussi, son interaction avec les ajouts de stabilisation tel que le ciment, la chaux et les fibres naturelles était clairement expliqué, afin d'examiné les propriétés mécaniques, thermiques et durables du BTC dans le domaine de construction.

## **CHAPITRE 2**

### **Matériaux et Techniques Expérimentales**

## **2.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à une exploration approfondie des matériaux utilisés ainsi que des techniques expérimentales mises en œuvre dans le cadre de cette étude. Dans cette section introductive, nous présenterons les principaux éléments qui seront abordés dans les sections suivantes, offrant ainsi un aperçu global du contenu du chapitre.

### **2.1.1 Contexte**

L'étude des matériaux naturels et des techniques expérimentales revêt une importance capitale dans la conception et la mise en œuvre des briques en terre comprimée (BTC). En effet, ces matériaux locaux, notamment le sol, jouent un rôle essentiel dans la fabrication des BTC, et leur caractérisation approfondie est nécessaire pour garantir la qualité et la durabilité des produits finaux. De même, l'utilisation de techniques expérimentales normalisées permet une évaluation rigoureuse des propriétés physiques, mécaniques et thermiques des matériaux, contribuant ainsi à une approche scientifique et méthodique dans le processus de recherche.

### **2.1.2 Objectif**

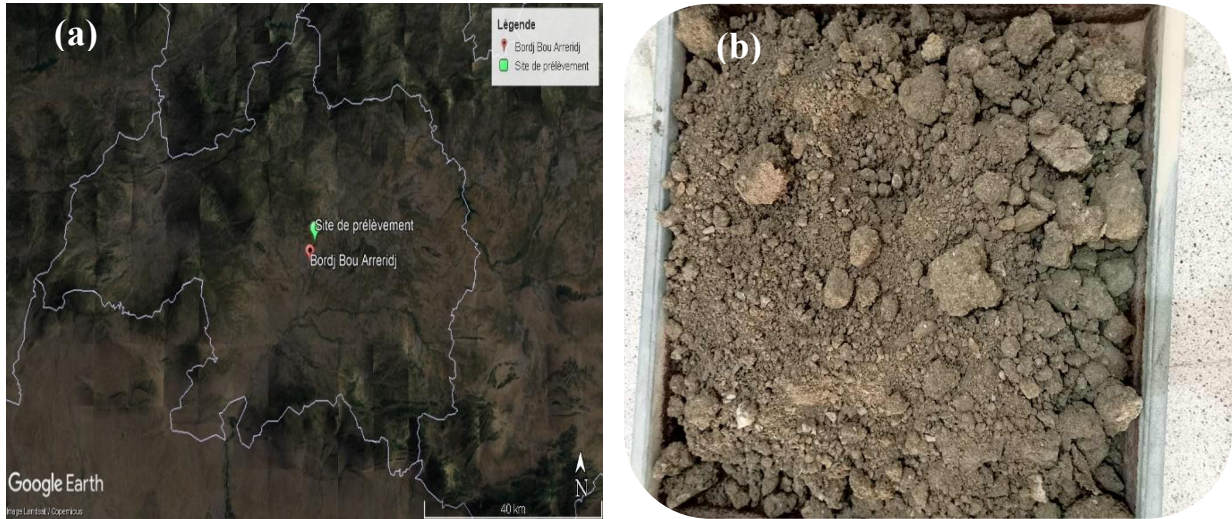
L'objectif principal de ce chapitre est de présenter le protocole expérimental standardisé utilisé pour identifier les caractéristiques physiques, de compactage des matériaux naturels et les caractéristiques physico-chimiques, en mettant particulièrement l'accent sur le sol, élément central dans la fabrication des BTC.

## **2.2 Matériaux utilisés**

Les matières premières de base utilisées dans cette étude pour la fabrication de béton en terre comprimée (BTC) sont : le sol (argile), le filler de calcaire, la laine naturelle et l'eau.

### **2.2.1 Sol**

Le sol local a été prélevé dans la région de Bordj Bou Arreridj – Algérie (Figure 2.1). Le sol a été extrait manuellement et placé dans des sacs en plastique pour être conservé.



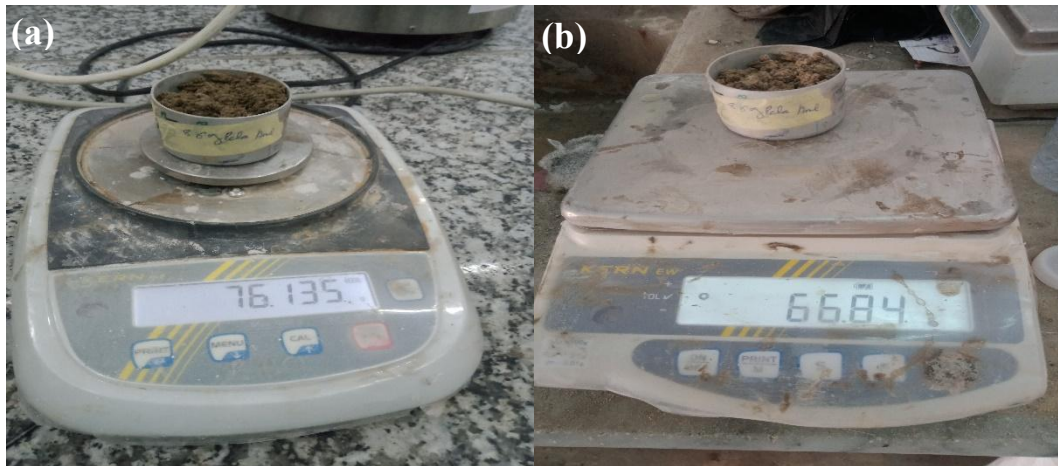
**Figure 2.1** (a) Localisation géographique du site de prélèvement de sol. (b) le sol argileux livré au laboratoire.

### 2.2.1.1 Essais d'identification du sol

Les matériaux locaux utilisés, tels que le sol, présentent des propriétés spécifiques qui influencent directement la qualité et les performances des BTC. L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols. Dans ce contexte, l'étude expérimentale comporte les essais d'identification physique et de compactage. Le but principal de cette partie est de présenter les caractérisations physiques et de compactage du sol.

#### A. Teneur en eau

La teneur en eau des sols est une caractéristique essentielle à évaluer pour comprendre leur comportement et leurs propriétés physiques. La teneur en eau ( $w$ ) d'un sol représente la masse d'eau contenue dans ce sol. Elle définit par le rapport entre la masse d'eau du sol et la masse du sol sec (NF P94-050). La méthode par étuvage a été utilisée, elle implique le séchage d'un échantillon de sol dans une étuve à une température de  $105^{\circ}\text{C}$  pendant 24 heures.



**Figure 2.2** Mesure de la teneur en eau, (a) avant l'étuvage, (b) après l'étuvage.

### B. Masse volumique des particules solides

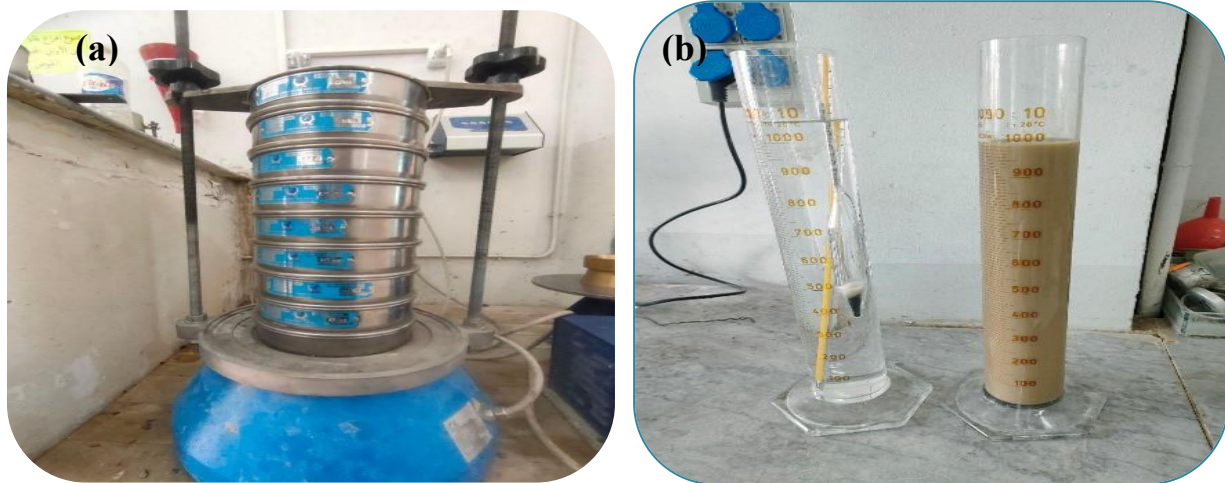
La masse volumique des particules solides d'un sol est un paramètre clé pour évaluer sa compacité et sa densité. Le principe de cet essai est conforme à la norme NF P 94-054 (1991). La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au moyen d'un récipient à volume calibré, appelé pycnomètre (volume de 500 ml). La masse volumique des solides est ainsi déterminée directement au pycnomètre, qui contient un volume prédéterminé de liquide, en étant rempli jusqu'à la marque supérieure du pycnomètre. Cette méthode permet d'obtenir la masse volumique des particules solides, une donnée importante dans la caractérisation des matériaux utilisés dans les BTC.



**Figure 2.3** Appareillage de l'essai de pycnomètre à eau.

### C. Analyses granulométriques

L'analyse granulométrique du sol est une étape cruciale pour évaluer sa composition en termes de tailles de particules. Deux méthodes normalisées sont employées pour cette analyse, à savoir le tamisage (éléments de dimension  $\geq 63 \mu\text{m}$ ) selon la norme NF P 94-056 et la sédimentométrie (éléments de dimension  $< 63 \mu\text{m}$ ) conforme à la norme NF P 94-057. Ces techniques permettent de déterminer la répartition des différentes fractions granulométriques dans le sol, offrant ainsi des informations précieuses pour la fabrication des BTC.



**Figure 2.4** Analyse granulométrique du sol (a) par tamisage, (b) par sédimentométrie.

### D. Limites d'Atterberg

Le comportement de l'argile dépend essentiellement de son état physique, ce dernier étant défini en fonction de la teneur en eau. L'essai aux limites d'Atterberg permet de connaître la limite de liquidité  $W_L$  et la limite de plasticité  $W_p$ . L'essai se fait sur une partie du matériau passant au tamis 0.40 mm (NF P 94-051).



**Figure 2.5** Détermination de la limite de



considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.



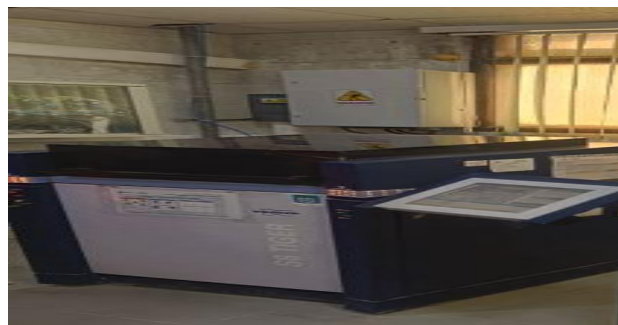
**Figure 2.8** Travail expérimental de l'essai Proctor normale.

### **2.2.1.2 Essais chimique et minéralogique**

Les essais chimiques et minéralogiques sont effectués au laboratoire de LAFARGE groupe de Cimenterie Hammam Dalaa, Wilaya de M'sila.

#### **A. Essai chimique par fluorescence des rayons X**

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) est une technique analytique chimique basée sur une propriété physique de la matière, soit la fluorescence des rayons X. Sous l'effet d'un bombardement avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous cette même forme. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition chimique de l'échantillon. À partir de l'analyse de ce spectre, il devient possible d'en déduire la composition élémentaire ainsi que les concentrations massiques des éléments.





**Figure 2.9** Spectromètre de fluorescence X BRUKER S6.

## **B. Essai minéralogique par Diffraction des Rayons X**

L'étude par diffraction des rayons X (DRX) est une technique analytique de pointe largement utilisée pour l'identification et la caractérisation des phases minéralogiques présentes dans des échantillons solides naturels, tels que les roches, les sols, les sédiments et les poussières. La diffraction de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique. Cette analyse concerne exclusivement la matière cristallisée, telle que les minéraux, métaux, céramiques et les composites. Elle n'est généralement pas applicable aux liquides.

Dans cette méthode, l'échantillon à analyser est rayonné par un faisceau de rayons X. Les plans réticulaires pourront diffracter l'onde électromagnétique incidente dans les conditions définies par la loi de Bragg.



**Figure 2.10** Diffractomètres à rayons X BRUKER D4.

### **2.2.1.3 Résultats et discussions**

#### **A. Teneur en eau**

Les essais ont été réalisés sur trois échantillons différents : Essai 1, Essai 2 et Essai 3. La teneur en eau moyenne ( $w_{moy}$ ) des échantillons est de 21.39 %. Les résultats de la teneur en eau sont reportés dans le Tableau 2. 1.

**Tableau 2.1** Mesure de la teneur en eau du sol.

	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 3</b>
Masse totale humide (échantillon humide + Tare) : m2 (g)	76.135	61.922	56.136
Masse totale sèche (échantillon sèche +Tare) : m3 (g)	66.84	54.82	50.44
Masse de la Tare : m1 (g)	22.54	23.22	22.98
Masse d'eau évaporé : mw = m2 - m3 (g)	9.295	7.101	5.696
Teneur en eau en w %	20.98	22.47	20.74
La teneur en eau moyenne $w_{moy}$ %	<b>21.39</b>		

**B. Masse volumique des particules solides**

Les résultats de la masse volumique des grains solides sont rassemblés dans le Tableau 2.2. Le sol présente une masse volumique absolue de 2.51 g/cm<sup>3</sup>.

**Tableau 2.2** Mesure de la masse volumique des grains solide à l'aide d'un pycnomètre.

N° de l'échantillon	Masse de l'échantillon (g)	Masse de pycnomètre vide et son bouchon (g)	Masse de l'échantillon + Pycnomètre (g)	Masse de l'échantillon + Pycnomètre + eau (g)	Masse d'eau + pycnomètre (g)
<b>1</b>	50	173	223	697	669
<b>2</b>	50	169	219	693	668

N° de l'échantillon	Masse volumique $\rho_s$ (kg/m3)	Masse volumique moyenne $\rho_s$ moy (kg/m3)	Densité des grains solides Gs	Densité des grains solides moyens Gs moy
<b>1</b>	2500	2513	2.5	2.51
<b>2</b>	2526		2.52	

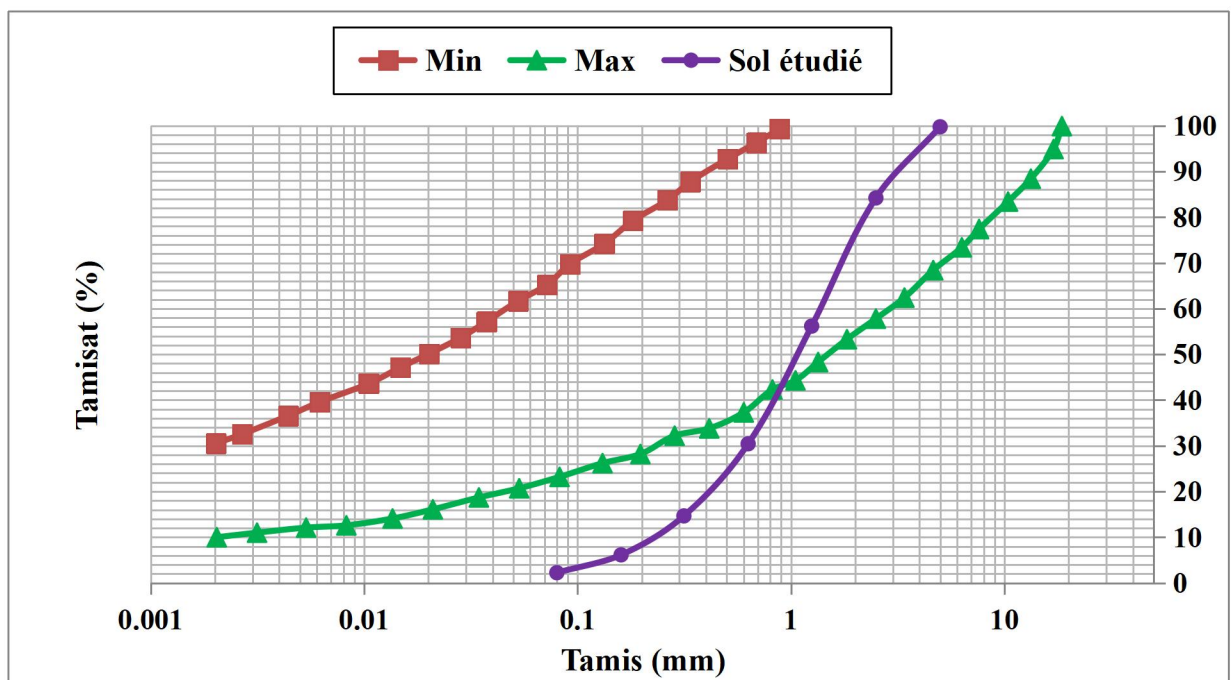
**C. Analyse granulométrique**

Le sol a été criblé et tamisé à 5 mm pour obtenir un matériau de classe granulaire 0/5 mm selon les recommandations de la norme NF XP P13-901 [26]. La Figure 2.9 présente la

distribution granulométrique par tamisage de sol ainsi que la gamme standard de BTC selon la norme NF XP P13-901 [Réf]. La distribution granulométrique d'échantillon du sol indique qu'il se compose de 69.32 % de sable, de 28.43 % de limon. Il est à noter qu'une partie de la courbe de sol est située en dehors de la plage recommandée. Cependant, il est généralement admis que de nombreux sols qui ne se situent pas dans la gamme recommandée peuvent en pratique donner des résultats acceptables.

**Tableau 2.3** Résultats d'analyse granulométrique par tamisage.

Ouverture des tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	2.45	2.45	0.245	99.755
2.5	155.59	158.04	15.804	84.196
1.25	280.28	438.32	43.832	56.168
0.63	257.33	695.65	69.565	30.435
0.315	157.71	853.36	85.336	14.664
0.16	85.19	938.55	93.855	6.145
0.08	38.99	977.54	97.754	2.246
fond	22.45	999.99	99.999	0.001

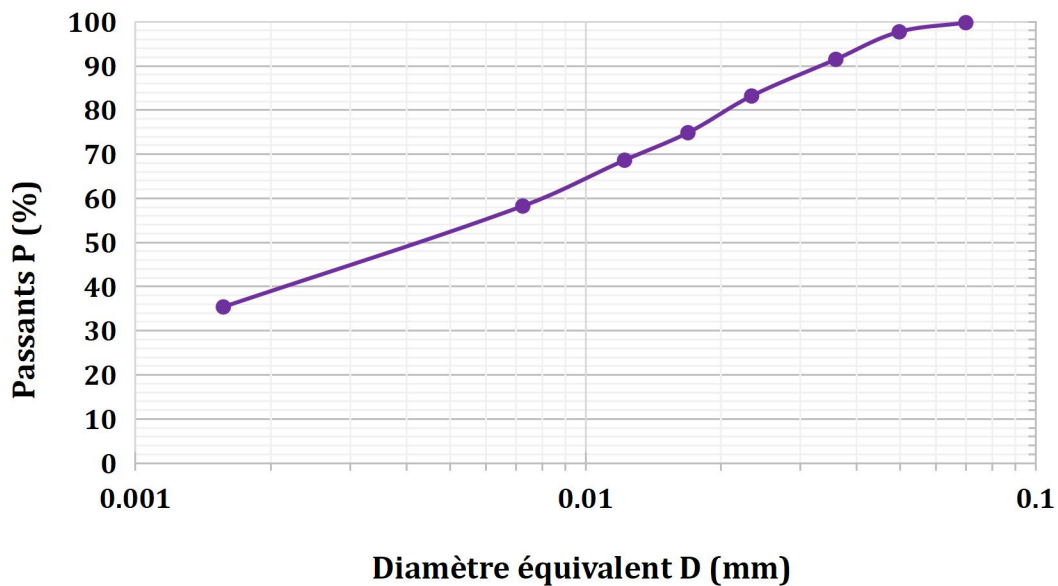


**Figure 2.11** Courbe granulométrique par tamisage.

La Figure 2.12 présente la distribution granulométrique par sédimentométrie de sol fin inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . Le pourcentage de passants à 80  $\mu\text{m}$  est de 99.73% (plus de 50% d'éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$ ), cela indique que le sol présente une granulométrie très fine.

**Tableau 2.4** Résultats d'analyse granulométrique par sédimentométrie.

Temps (min)	Température (C°)	Lecture Rt (g/cm <sup>3</sup> )	Lecture R (g/cm <sup>3</sup> )	Profondeur effective H <sub>t</sub> (cm)	Diamètre des grains D (mm)	Pourcentage des particules P (%)
0.5	23	1	1.024	13.08	0.0700	99.73509934
1	23	1	1.0235	13.27	0.0498	97.65728477
2	23	1	1.022	13.84	0.0360	91.42384106
5	23	1	1.02	14.6	0.0234	83.11258278
10	23	1	1.018	15.36	0.0169	74.8013245
20	23	1	1.0165	15.93	0.01222	68.56788079
60	23	1	1.014	16.88	0.00726	58.17880795
1440	23	1	1.0085	18.97	0.00157	35.32284768



**Figure 2.12** : Courbe granulométrique par sédimentométrie.

#### D. Limites d'Atterberg

Les résultats de l'essai de consistance sur le sol indiquent que la valeur de limite de liquidité  $W_L$  est de 44.4% et la limite de plasticité  $W_p$  est de 25.37%. L'indice de plasticité  $I_p$  est égale 18.37%. Ces résultats indiquent que le sol est une argile limoneuse peu plastique. Selon la

classification LPC compatible a la classification USCS (Figure 2.12), il s'agit d'un sol argileux peu plastique et donc insensible à la variation de la teneur en eau.

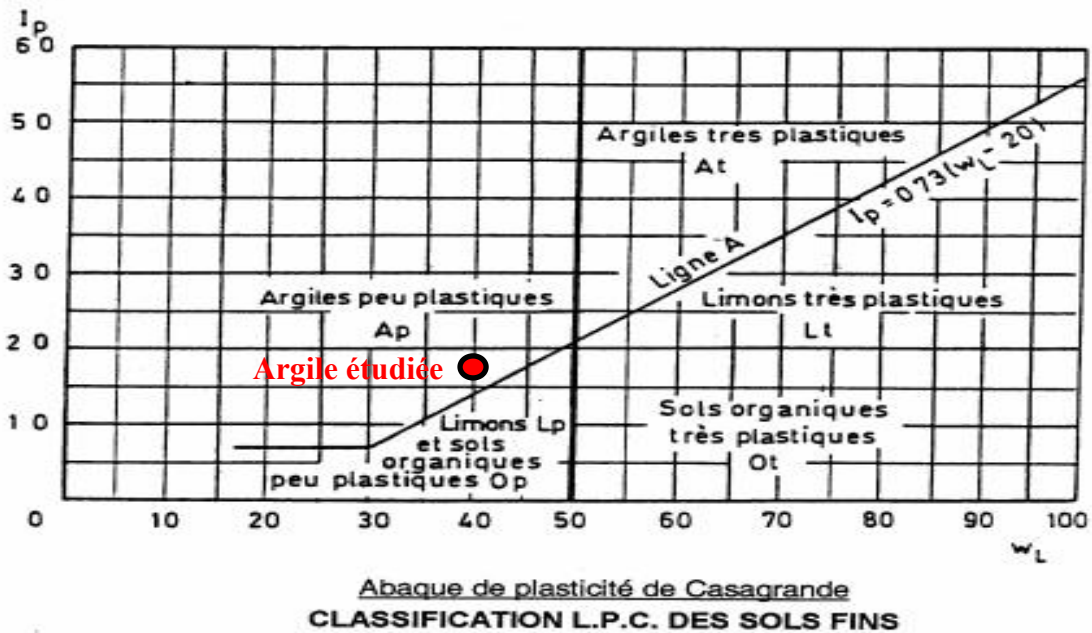
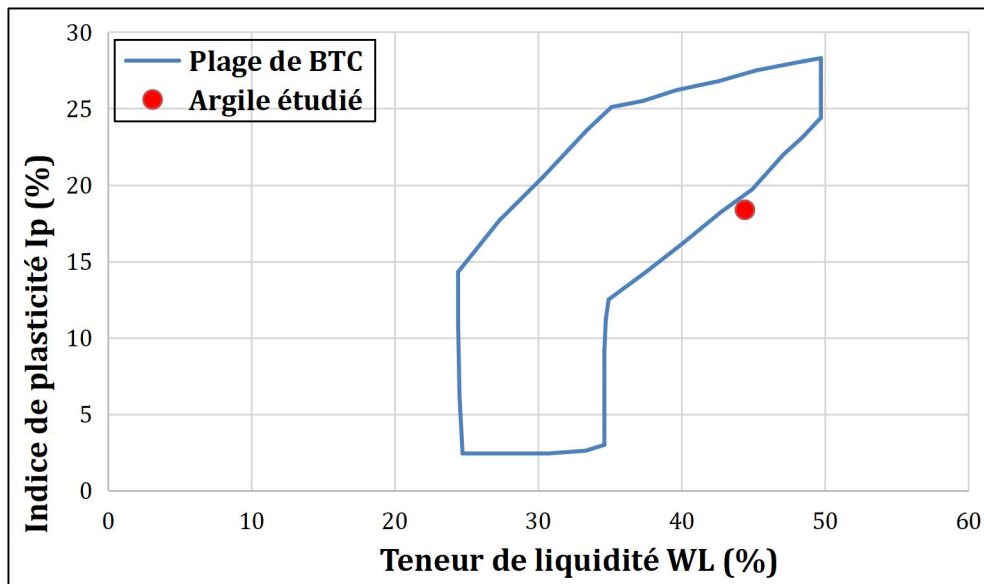


Figure 2.13 Classification de sol selon la classification LPC des sols fins.

La Figure 2.14 présente les couples Indice de plasticité (IP), limite de liquidité (WL) et la gamme standard de BTC selon la norme NF XP P13-901. Le sol est situé à droite au voisinage du fuseau indicatif recommandé des BTC proposées par la norme XP P 13-901. Cela peut en pratique donner des résultats satisfaisants.



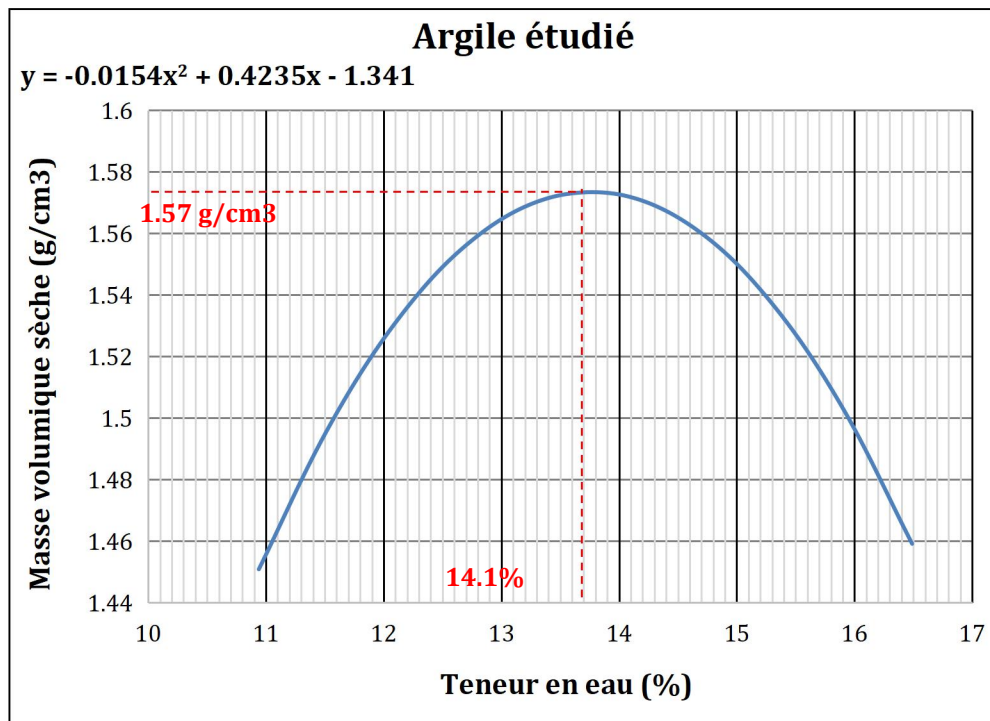
**Figure 2.14** Limites d'Atterberg de l'argile étudiée et plage de BTC.

### E. Essai au bleu de méthylène

La valeur de bleu de méthylène  $V_{bs}$  est de  $2.16 \text{ g}/100\text{g}$  entre les deux valeurs 1.5 et 2.5, il s'agit d'un sol sablo-argileux à limoneux peu plastique d'après la norme française NF-P11-300. La valeur de la surface spécifique totale SST est égale  $45.208 \text{ m}^2/\text{g}$ .

### F. Essai Proctor

La Figure 2.15 présente les résultats de l'essai Proctor normale réalisée sur le sol avec des teneurs en eau variées de 10% jusqu'à 16% avec une augmentation de 2%. La courbe donne une teneur en eau optimale  $w_{opt}=14.1\%$  et une masse volumique sèche maximale  $\rho_{dmax}=1.57\text{g}/\text{cm}^3$ .



**Figure 2.15** Courbe de compactage.

### G. Essai chimique

Les résultats de l'analyse chimique de l'argile sont rassemblés dans le Tableau 2.5. L'analyse chimique réalisée montre que les constituants dominants sont la silice (44.50%), l'alumine

(13.24%) et la chaux (13.19%). Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$  élevé et la somme de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} > 75\%$  sont en accord avec les recommandations pour la fabrication du BTC.

**Tableau 2.5** Compositions chimiques de l'argile étudiée.

Constituants	Quantities (%)
Silice ( $\text{SiO}_2$ )	44.50
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	13.24
Chaux ( $\text{CaO}$ )	13.19
Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	5.39
Magnésie ( $\text{MgO}$ )	1.37
$\text{K}_2\text{O}$	1.04
$\text{TiO}_2$	0.63
$\text{Na}_2\text{O}$	0.31
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.18
$\text{SO}_3$	0.12
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	0.04
$\text{SrO}$	0.04
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.02
$\text{ZnO}$	0.01

## H. Essai minéralogique

Le tableau montre les constituantes cristallines de l'argile étudiée. Les principaux constituants sont le quartz et la calcite, ce qui cohérent avec la composition chimique qui a montré que le silice  $\text{SiO}_2$  et la chaux  $\text{CaO}$  sont les oxydes majoritaires. En plus, l'argile contient aussi de kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) cela justifié le pourcentage élevé de la Silice et de l'Aluminium.

**Tableau 2.6** Compositions minéralogiques de l'argile étudiée.

Constituants	Quantities (%)
Quartz	25.15
Calcite	26.29
Kaolinite	16
Illite	13.75
Pyrophyllite	7.96
Chlorite	4.25
Microcline	3.25
Albite	1.38
Diaspore	0.87
Fluorite	0.72
Topaz	0.34
Dolomite	0.04

### 2.2.2 Filler de calcaire

Les résultats de l'analyse chimique de filler de calcaire utilisé dans cette étude sont rassemblés dans le Tableau 2.7. L'analyse chimique réalisée montre que le constituant dominant est la chaux (56.13%).

**Tableau 2.7** Compositions chimiques de filler de calcaire étudié.

Constituants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	SrO
Quantities (%)	0.05	0.04	56.13	0.01	0.13	0.07	0.01



**Figure 2.16** Filler de calcaire utilisé dans cette étude.

Le tableau 2.8 présente les constituantes cristallines de filler de calcaire étudié. Le principal constituant est la calcite 98.15%, ce qui cohérent avec la composition chimique qui a montré que le la chaux CaO est l'oxyde majoritaire.

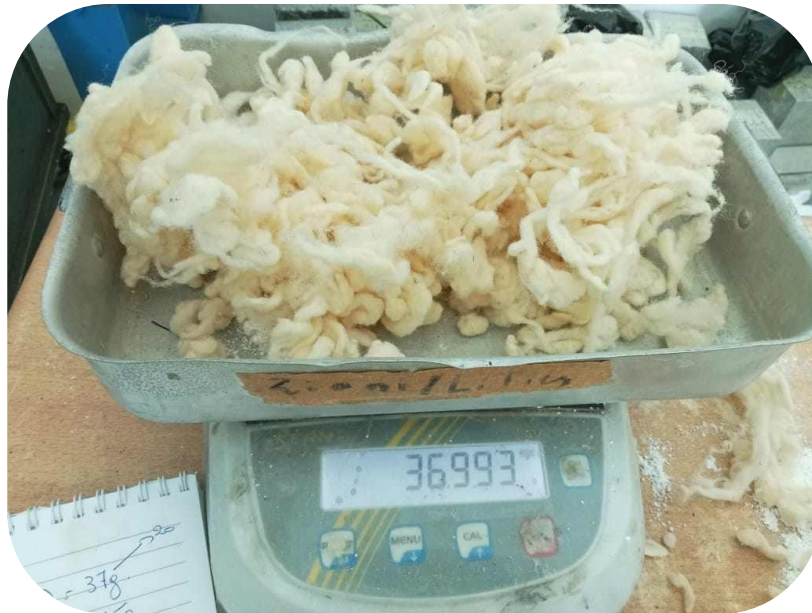
**Tableau 2.8** Compositions minéralogique de filler de calcaire étudié.

Constituants	Quartz	Calcite	Illite	Kaolinite	Dolomite	Chlorite
Quantities (%)	0.09	98.15	0.75	0.94	0.02	0.05

### 2.2.3 Laine de mouton



Dans cette étude, une laine de mouton naturelle impure a été utilisée, tel qu'il été frotté en petits morceaux (Figure 2.17).



**Figure 2.17** Laine de mouton utilisé dans cette étude.

### **2.3 Conclusion**

Ce chapitre porté sur une analyse détaillée des matériaux utilisés et des techniques expérimentales mises en œuvre dans le cadre de l'étude sur le béton en terre comprimée (BTC). Plusieurs aspects cruciaux ont été abordés, notamment la caractérisation du sol local, le filler de calcaire et la laine de mouton. Cependant, les essais d'identifications du sol tel que l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg ont permis de classer le sol. Les essais chimiques et minéralogiques ont été réalisés pour quantifier les constituants de l'argile et le filler de calcaire. Par conséquent, le sol a été argileux peu plastique insensible à la variation de la teneur en eau, cela montrés que le sol étudié a accepté pour la fabrication de béton en terre comprimé (BTC).

En conclusion, ce chapitre a fourni une base solide pour la compréhension des matériaux et des techniques utilisés dans la fabrication des BTC, contribuant ainsi à une approche méthodique et scientifique dans le processus de recherche et de développement de ces briques.

## **CHAPITRE 3**

### **Formulation des mélanges de béton en terre comprimé**

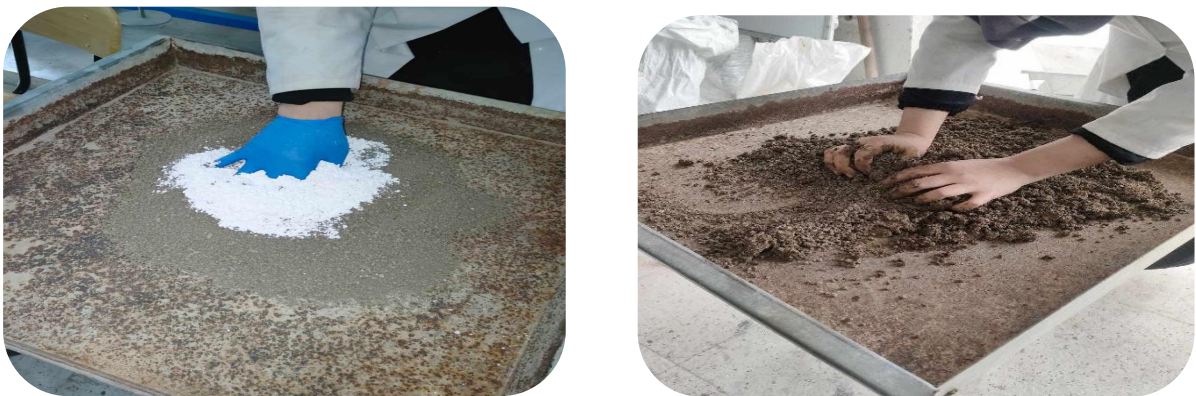
### 3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la formulation des mélanges de béton en terre comprimé (BTC), en mettant l'accent sur les différentes étapes de préparation des mélanges et leur optimisation. La formulation des mélanges joue un rôle crucial dans la qualité, la durabilité et les propriétés mécaniques du BTC. Nous abordons ici les aspects liés à la préparation des mélanges, l'optimisation de la teneur en eau et le processus de compactage, en examinant comment ces facteurs influent sur les caractéristiques des mélanges et sur leur performance à l'état durci. Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie du processus de formulation des mélanges de BTC et de son impact sur les propriétés finales du matériau.

### 3.2 Préparation des mélanges

Les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'une argile sèche. Cela nécessite un séchage préalable de l'argile. Après avoir séché l'argile dans l'étuve pendant 24h à 105°C, l'argile est passé par un tamis de 5mm et mélangée à sec avec les autres matériaux manuellement. Les matériaux secs utilisés sont l'argile, le filer de calcaire, et la laine. L'homogénéisation des mélanges secs est effectuée et le malaxage avec l'eau est ensuite réalisé supplémentaires.

Après le malaxage, le compactage du mélange est effectué dans des moules prismatiques de dimensions 4 cm x 4 cm x 16 cm pour garantir une densité uniforme et l'élimination des poches d'air. Avant l'utilisation, les moules sont huilés pour faciliter le démoulage. Pour les tests de compression, des moules de dimensions 10 cm x 10 cm x 10 cm sont utilisés.



**Figure 3.1** Préparation des mélanges.

Enfin, le démoulage est effectué avec soin pour éviter tout endommagement des éprouvettes, qui sont ensuite prêtes pour la réalisation des essais à l'état frais et pour les tests d'écrasement. Les tableaux ci-dessous présentent les proportions des différents composants ainsi que les propriétés finales des mélanges préparés.

**Tableau 3.1** Tableaux des compositions et propriétés

Mélange	Filer de calcaire (g)	Fibre de laine (g)	Argile (g)	Wopt
01	0	0	25008	14.1%
02	636,16	0	1863,849	18%
03	0	1,888	2498,128	14.3%
04	636,169	1,888	1862	18.2%
05	318,089	0	2182	16%
06	318,089	1.88	2180,12	16.2%
07	0	0,942	2499,05	14.1%
08	636,169	0,9429	1862,89	18%
09	318,08	0,942	2181	16%

Mélange	FM (%)	FC (%)	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Quantité d'eau (ml)
01	0%	0%	1.57	1499,25
02	0%	25%	1,67	1324,26
03	8%	0%	1,48	1483,8
04	8%	25%	1,69	1310,58
05	0%	12,5%	1,61	1380,64
06	8%	12.5%	1.61	1382,88
07	4%	0%	1,47	1484,4
08	4 %	25%	1,68	1339,74
09	4%	12,5%	1,63	1394,4

### 3.3 Optimisation de la teneur en eau

L'optimisation de la teneur en eau des mélanges était faite par l'essai de compactage (essai Proctor). Cette méthode est efficace et permet de donner une teneur en eau optimale pour atteindre un meilleur compactage.



Figure 3.2 Optimisation de la teneur en eau

#### Mélange 01 : 0% FM + 0% FC

Cette courbe montre la variation de la masse volumique en fonction de la teneur en eau pour un mélange contenant 0% de fibres et 0% de filer de calcaire (FC). La teneur en eau optimale, correspondant à la masse volumique maximale, semble être autour de 14,1%. La masse volumique diminue significativement lorsque la teneur en eau augmente ou diminue par rapport à ce point optimal. Cela indique que la quantité adéquate d'eau est cruciale pour atteindre une densité maximale dans ce mélange.

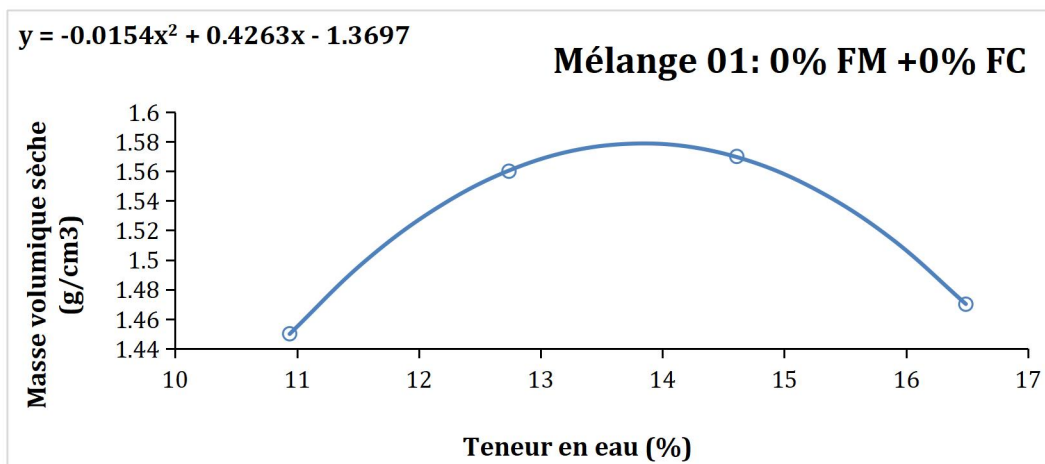
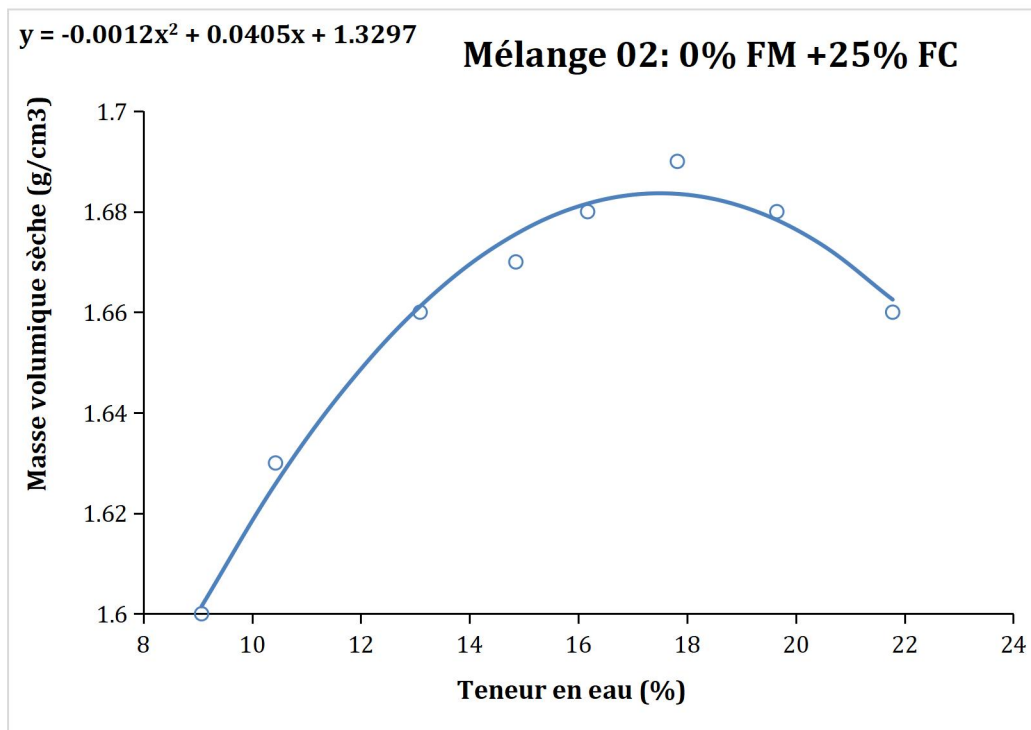


Figure 3.3 Courbe Proctor de mélange 1.

### Mélange 02 : 0% FM + 25% FC

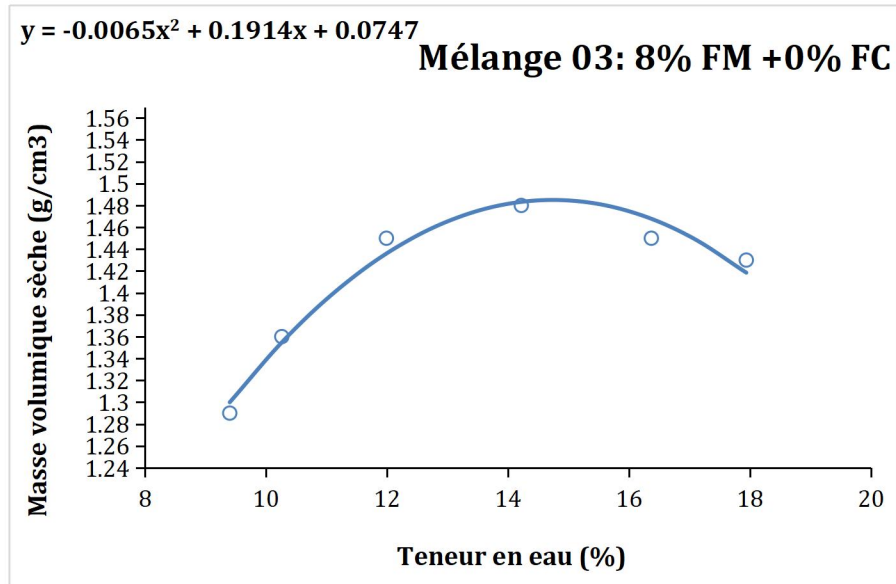
Pour ce mélange contenant 0% de fibres et 25% de filer de calcaire (FC), la courbe démontre que la masse volumique atteint son pic à une teneur en eau plus élevée par rapport au Mélange 01. La teneur en eau optimale pour une masse volumique maximale est d'environ 18%. L'ajout de filler de calcaire nécessite plus d'eau pour atteindre une compaction maximale, soulignant l'importance d'ajuster la teneur en eau en fonction des composants du mélange.



**Figure 3.4** Courbe Proctor de mélange 2.

### Mélange 03 : 8% FM + 0% FC

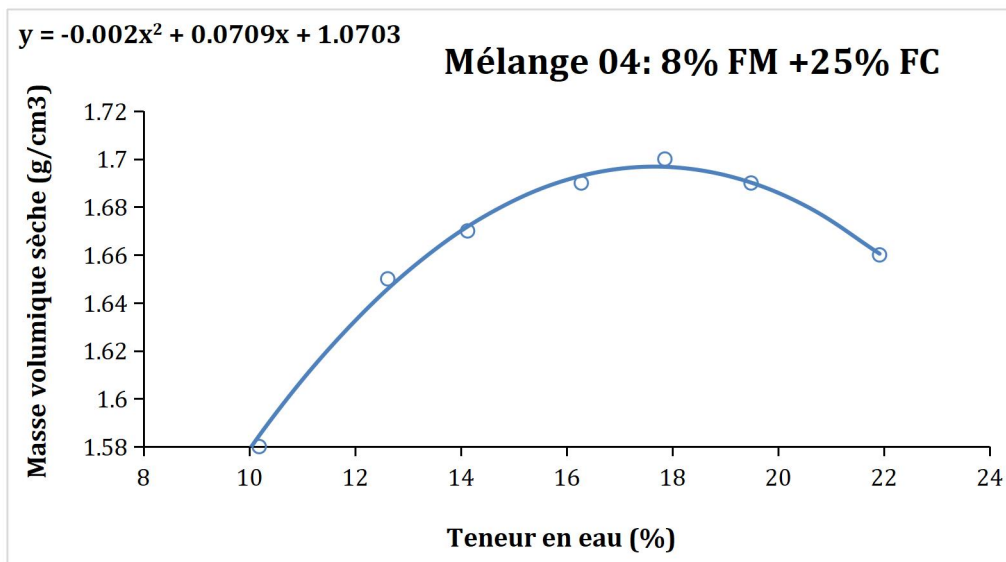
Dans cette courbe pour le mélange avec 8% de fibres et 0% de filer de calcaire (FC), la teneur en eau optimale pour atteindre la masse volumique maximale est d'environ 14.3 %. La présence de fibres réduit légèrement la teneur en eau nécessaire pour atteindre la densité maximale, indiquant que les fibres influencent l'absorption et la distribution de l'eau dans le mélange, ce qui peut être crucial pour optimiser les propriétés du matériau.



**Figure 3.5** Courbe Proctor de mélange 3.

**Mélange 04 : 8% FM + 25% FC**

Cette courbe représentant le mélange avec 8% de fibres et 25% de filer de calcaire (FC). Les résultats montrent que la teneur en eau optimale est d'environ 18.2 %. L'effet combiné des fibres et du filler de calcaire entraîne une teneur en eau optimale plus haut par rapport au mélange ne contenant pas les fibres et le filler de calcaire. Cela suggère un effet synergique entre les fibres et le filler de calcaire pour optimiser la masse volumique et la densité globale du mélange.



**Figure 3.6** Courbe Proctor de mélange 4.

### Mélange 05 : 0% FM + 12.5% FC

Cette courbe montre la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau pour un mélange contenant 0% de fibres et 12.5% de filler de calcaire (FC). La teneur en eau optimale pour atteindre la masse volumique maximale est d'environ 16 %. Sans fibres, le filler de calcaire joue un rôle crucial dans la liaison des particules, et la teneur en eau doit être bien ajustée pour maximiser la densité et les propriétés mécaniques.

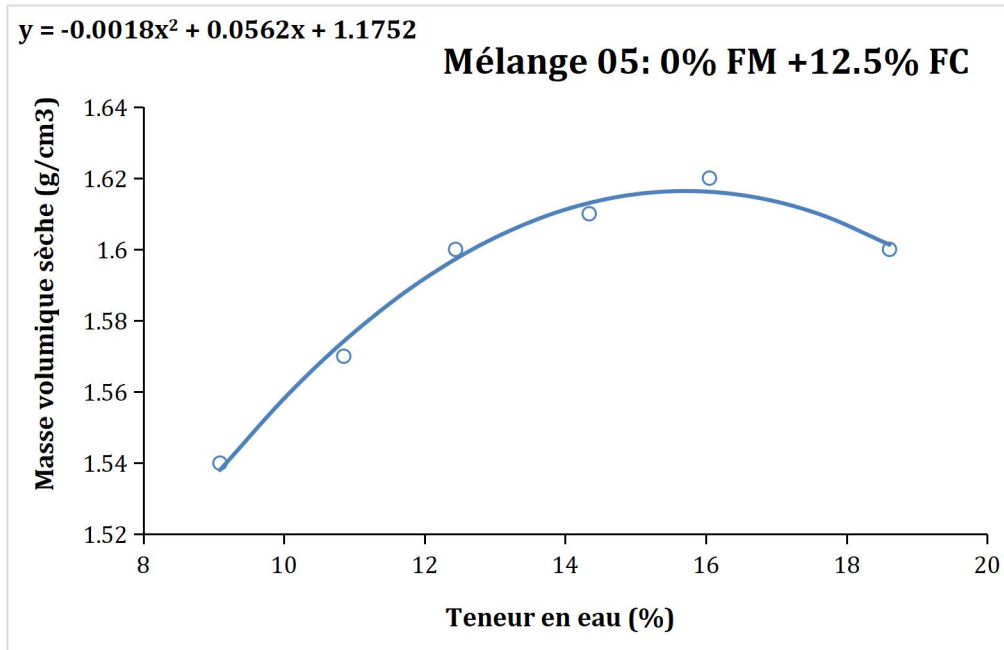
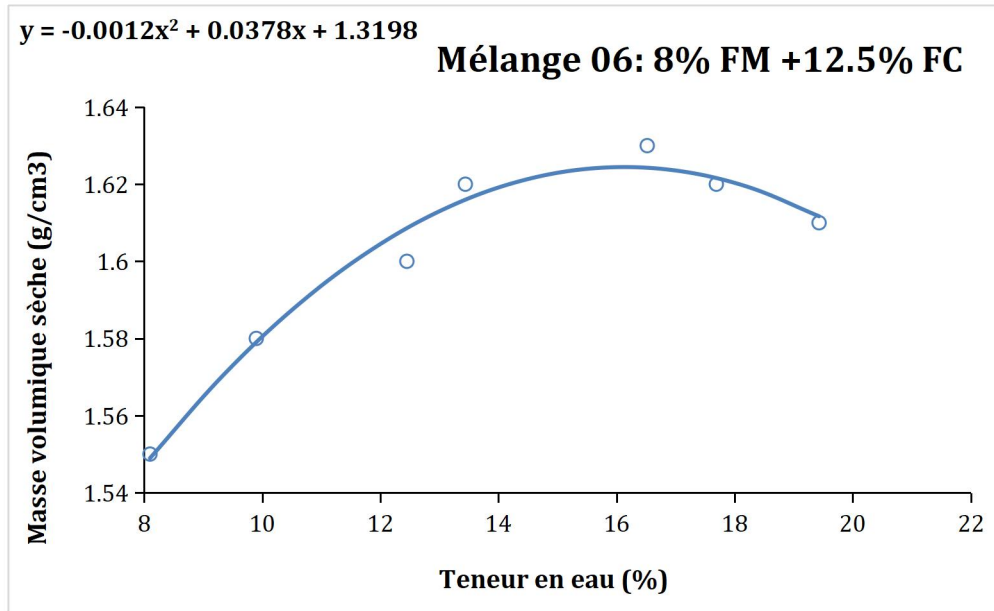


Figure 3.7 Courbe Proctor de mélange 5.

### Mélange 06 : 8% FM + 12.5% FC

Pour ce mélange contenant 8% de fibres et 12.5% de filler de calcaire (FC), la courbe indique que la masse volumique atteint son pic à une teneur en eau d'environ 16.2 %. L'ajout de fibres réduit légèrement la teneur en eau nécessaire, démontrant l'effet des fibres sur la rétention d'eau et la densité du mélange.

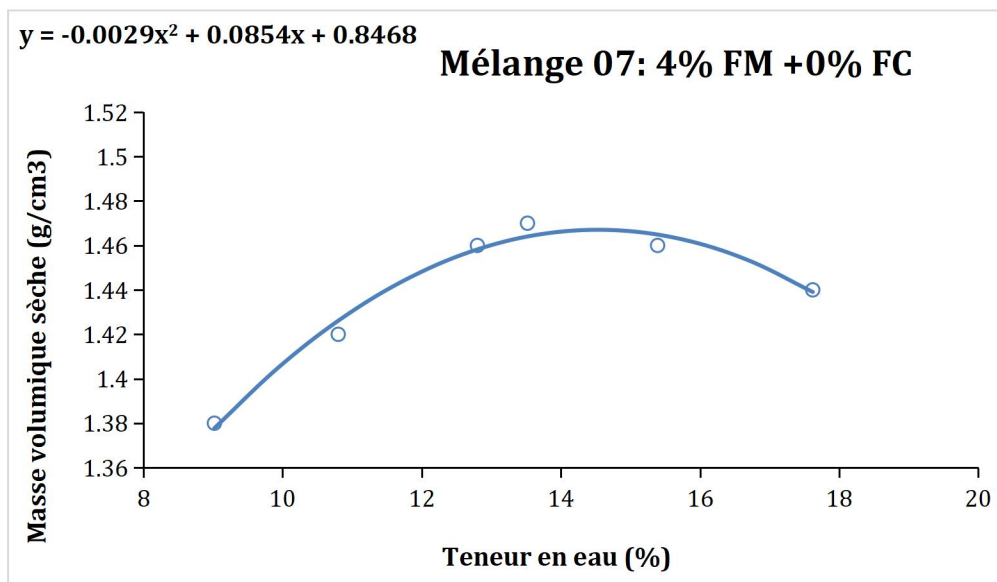




**Figure 3.8** Courbe Proctor de mélange 6.

**Mélange 07 : 4% FM + 0% FC**

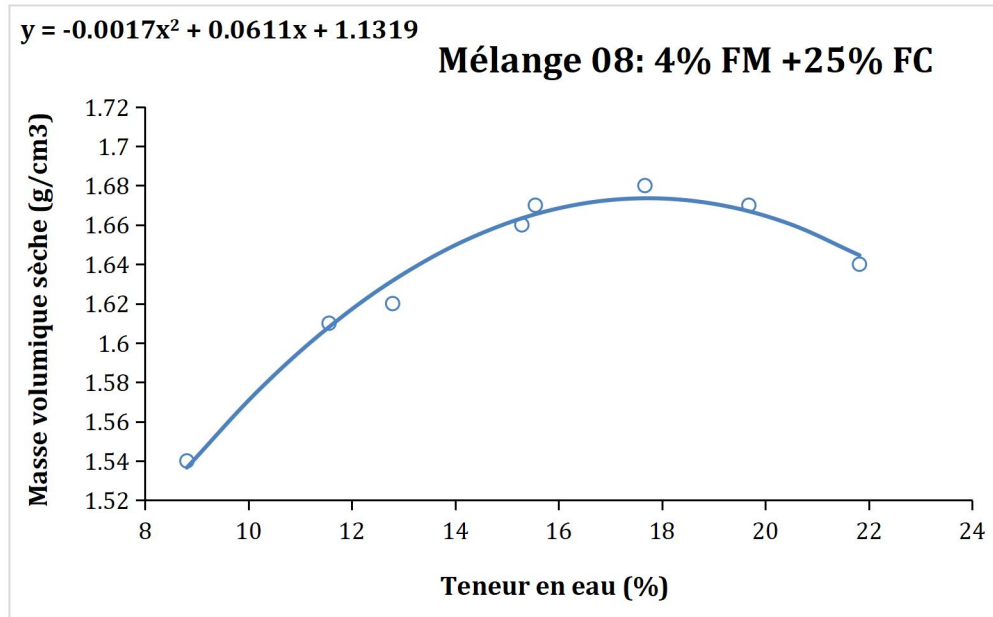
Dans cette courbe pour un mélange avec 4% de fibres et 0% de filer de calcaire (FC), la teneur en eau optimale pour atteindre la masse volumique maximale est d'environ 14.1 %. L'absence de filler de calcaire signifie que les fibres doivent compenser pour fournir la cohésion nécessaire, ce qui nécessite une gestion précise de la teneur en eau pour maximiser la densité.



**Figure 3.9** Courbe Proctor de mélange 7.

### Mélange 08 : 4% FM + 25% FC

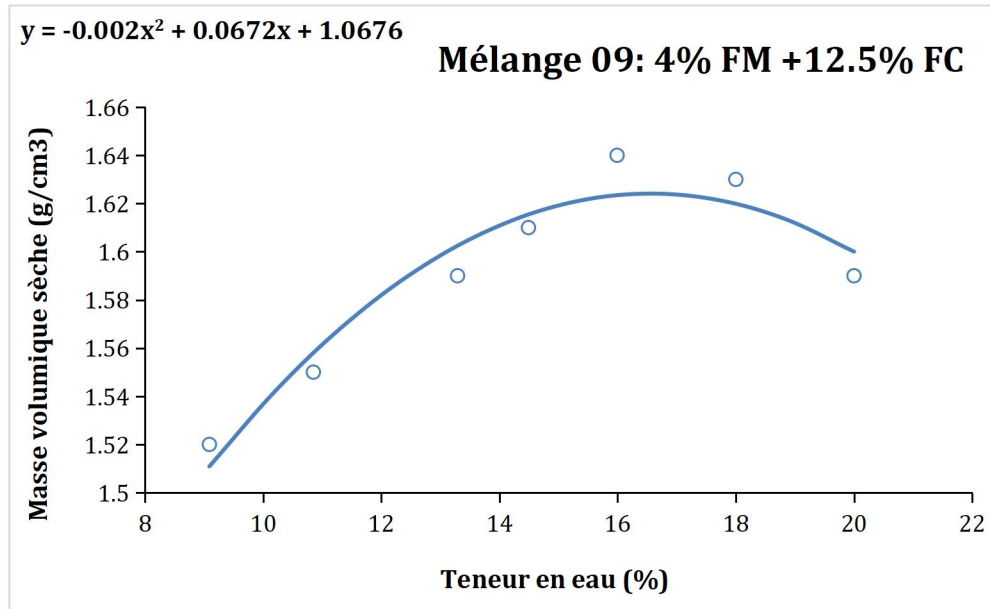
Cette courbe représente le mélange avec 4% de fibres et 25% de filer de calcaire (FC). La teneur en eau optimale pour une masse volumique maximale est d'environ 18 %. L'effet combiné des fibres et d'un pourcentage élevé de filler de calcaire montre la nécessité d'une teneur en eau plus élevée pour atteindre une densité maximale, suggérant une interaction complexe entre les fibres, le filler et l'eau.



**Figure 3.10** Courbe Proctor de mélange 8.

### Mélange 09 : 4% FM + 12.5% FC

Pour le mélange contenant 4% de fibres et 12.5% de filer de calcaire (FC), la courbe montre que la teneur en eau optimale pour atteindre la masse volumique maximale est d'environ 16%. Ce mélange démontre l'équilibre entre fibres et le filler de calcaire nécessaire pour optimiser la densité, soulignant l'importance de chaque composant dans la formulation du BTC.

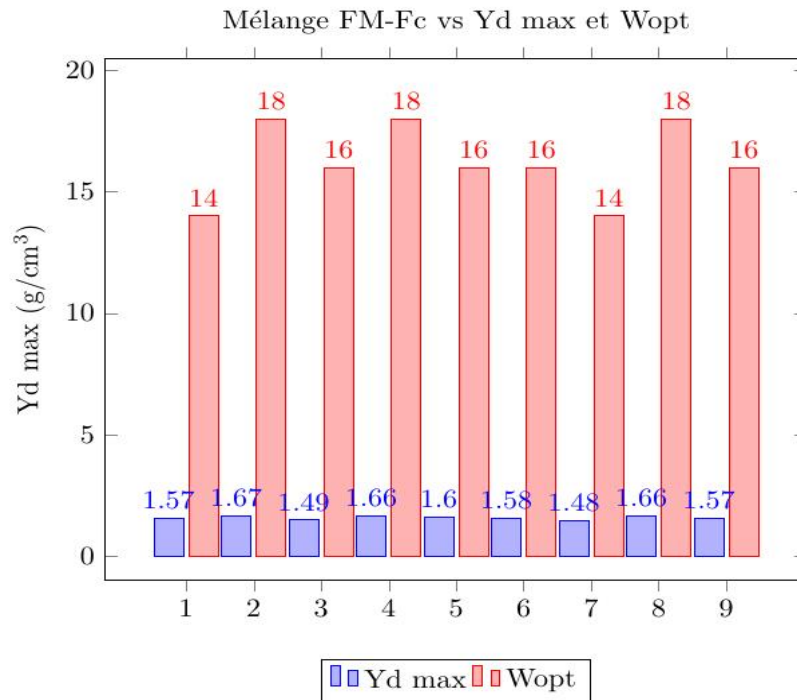


**Figure 3.11** Courbe Proctor de mélange 9.

La tableau 3.3 fournit une comparaison détaillée de différents mélanges, chacun comprenant des proportions variables de (FM) et de Filer de calcaire (FC). Elle montre comment ces compositions influent sur des propriétés clés telles que la densité maximale à sec ( $\rho_{dmax}$ ) et la teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ). Les données indiquent que les ajustements dans les ratios FM et FC ont un impact direct sur la compacité et les niveaux d'humidité idéaux pour les mélanges, des aspects cruciaux en construction et en génie pour atteindre l'intégrité structurelle et la stabilité désirées.

**Tableau 3.3** Synthèse des résultats d'essai Proctor

Mélange	FM (%)	FC (%)	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)
1	0	0	1.57	14.1
2	0	25	1.67	18
3	8	0	1.48	14.3
4	8	25	1.69	18.2
5	0	12.5	1,61	16
6	8	12.5	1.61	16.2
7	4	0	1.47	14.1
8	4	25	1.68	18
9	4	12.5	1.63	16



**Figure 3.12** Diagramme en barres : comparaison des caractéristiques des mélanges FM-FC en termes de  $\rho_{dmax}$  et Wopt

Le diagramme en barres compare les valeurs de densité maximale ( $\rho_{dmax}$ ) et la teneur en eau optimale (Wopt) pour différents mélanges. Chaque barre représente une combinaison spécifique de FM (Fraction de fibre de mouton) et FC (Fraction de Filler de calcaire). Les valeurs de  $\rho_{dmax}$  et Wopt sont indiquées sur l'axe des ordonnées, tandis que les mélanges sont représentés sur l'axe des abscisses. Les barres montrent les variations des caractéristiques des mélanges en termes de densité et de teneur en eau, ce qui permet une comparaison visuelle rapide des performances des différentes compositions.

### 3.4 Compactage des mélanges

La technique de compactage utilisée est par pression statique, utilisant une presse hydraulique avec une force de 3 MPa, repose sur le principe de la pression hydraulique pour obtenir une compaction optimale des sols. Cette méthode est particulièrement appréciée dans le domaine de la construction en raison de sa capacité à produire des matériaux de construction homogènes et cohérents.

### 3.4.1 Principe de Fonctionnement

Le compactage statique s'effectue à l'aide d'une pompe hydraulique qui génère une pression uniforme sur le sol. La force appliquée est mesurée directement par une jauge, permettant un contrôle précis du processus de compactage. Ce type de compactage se distingue par sa capacité à compacter le sol en une seule couche, contrairement au compactage dynamique qui requiert plusieurs couches (trois à cinq) pour atteindre le même niveau de densité.

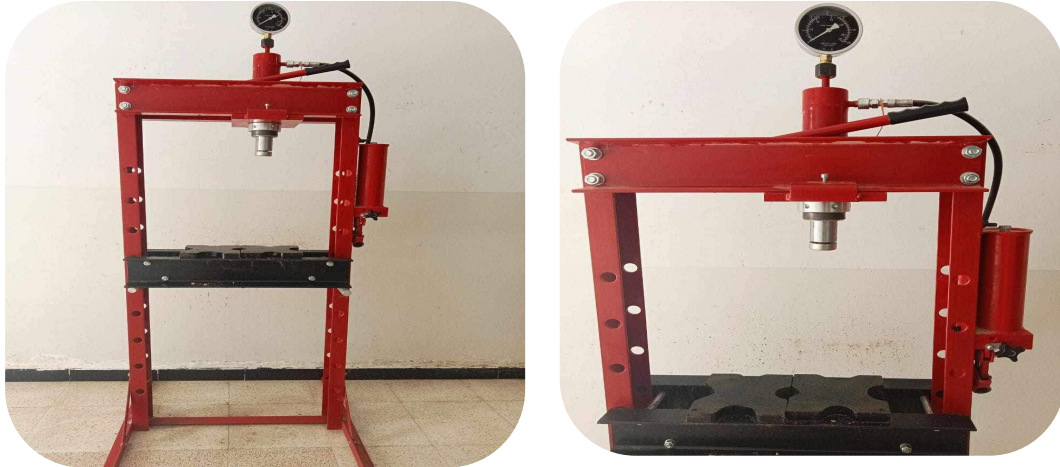


Figure 3.12 Presse statique de capacité 20 tone

### 3.4.2 Conservation et confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont maintenues dans l'environnement du laboratoire pendant les 24 premières heures. Après cela, elles sont stockées dans des sacs plastiques pour maintenir leur humidité, puis placées dans une chambre humide à une température ambiante d'environ 20°C jusqu'à la date des essais.



**Figure 3.13** Confection des éprouvettes (chambre humide)

### 3.5 Caractéristiques à l'état durci

#### 3.5.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un matériau est sa capacité à résister à une force appliquée dans le sens de la compression. Cette caractéristique est essentielle pour évaluer la solidité et la résistance structurelle du matériau en question. Des essais de compression sont réalisés pour déterminer la capacité du matériau à supporter des charges importantes sans se déformer de manière permanente ou à écraser.



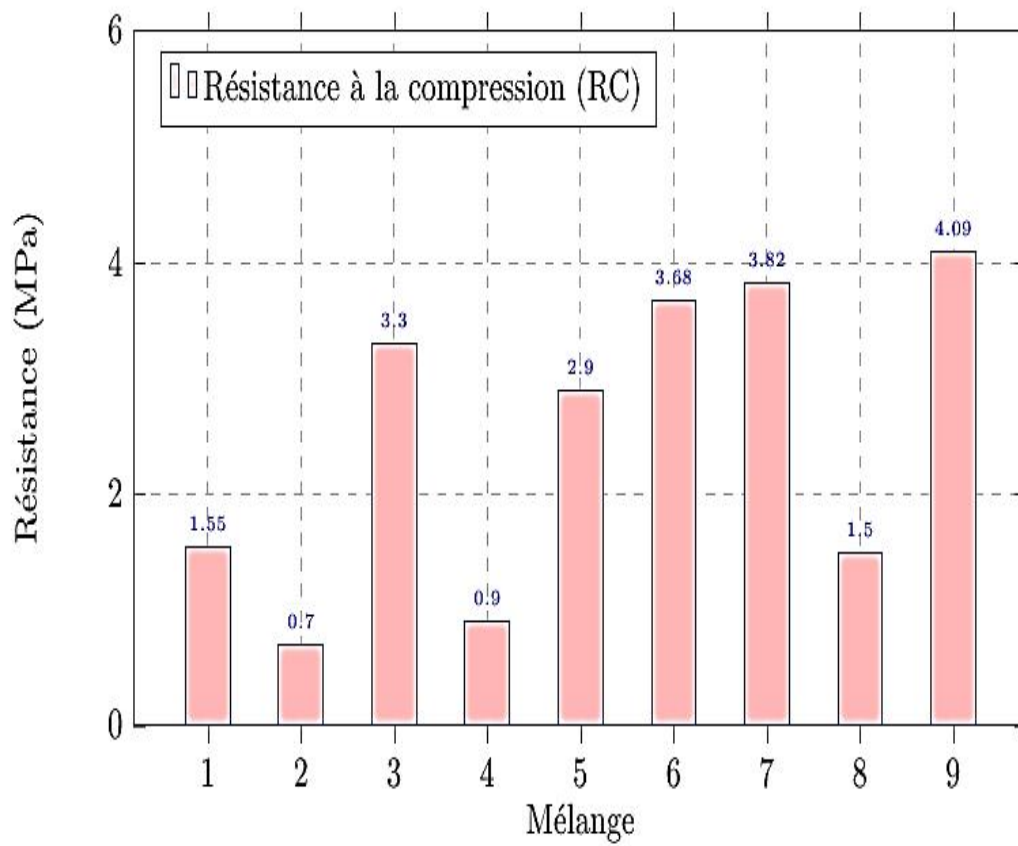
**Figure 3.14** Presse utilisé pour déterminer la résistance à la compression

**Tableau 3.4** Résultats de la résistance à la compression à 28 jours

Mélange	FM (%)	FC (%)	RC (MPa)
1	0	0	1.55
2	0	25	0.7
3	8	0	3.3
4	8	25	0.9
5	0	12.5	2.90
6	8	12.5	3.68
7	4	0	3.82
8	4	25	1.5
9	4	12.5	4.09

Tableau 3.4 présente les résultats de la résistance à la compression (RC) après 28 jours pour différents mélanges de BTC. Les mélanges avec des proportions variées de fibre de mouton (FM) et de filer de calcaire (FC) montrent des performances distinctes. Les mélanges avec 8% de FM (mélanges 3, 4, 6) affichent des résistances élevées, notamment le mélange 6 avec 3,68 MPa en compression. Les mélanges avec 4% de FM (7, 8, 9) démontrent également de bonnes performances, en particulier le mélange 9 avec 4,09 MPa en compression. En général, l'ajout de FM semble améliorer les propriétés mécaniques, tandis que l'effet de FC varie en fonction des proportions utilisées.

Le graphique ci-dessous illustre les résistances à la compression (RC) pour différents mélanges de BTC après 28 jours. Les barres en rose représentent la résistance à la compression. Les mélanges avec 8% de FM, notamment les mélanges 3, 4, et 6, montrent des résistances significatives, avec le mélange 6 affichant la plus haute résistance en compression (3,68 MPa). Les mélanges avec 4% de FM, en particulier le mélange 9, se démarquent également par une forte résistance à la compression (4,09 MPa). En général, l'ajout de fibres (FM) semble améliorer les performances mécaniques des mélanges, tandis que l'effet du filer de calcaire (FC) varie selon les proportions utilisées.



**Figure 3.15** Résistance à la compression pour différents mélanges.



**Figure 3. 16** Rupture d'échantillon du BTC par compression



### 3.5.2 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est la capacité d'un matériau à résister à une contrainte appliquée qui le plie. Cette caractéristique est cruciale dans de nombreux domaines, notamment la construction, où les matériaux doivent être capables de supporter des charges et des contraintes qui entraînent des flexions sans se rompre. Les essais de flexion fournissent des informations précieuses sur la ductilité et la capacité de déformation du matériau avant la rupture.



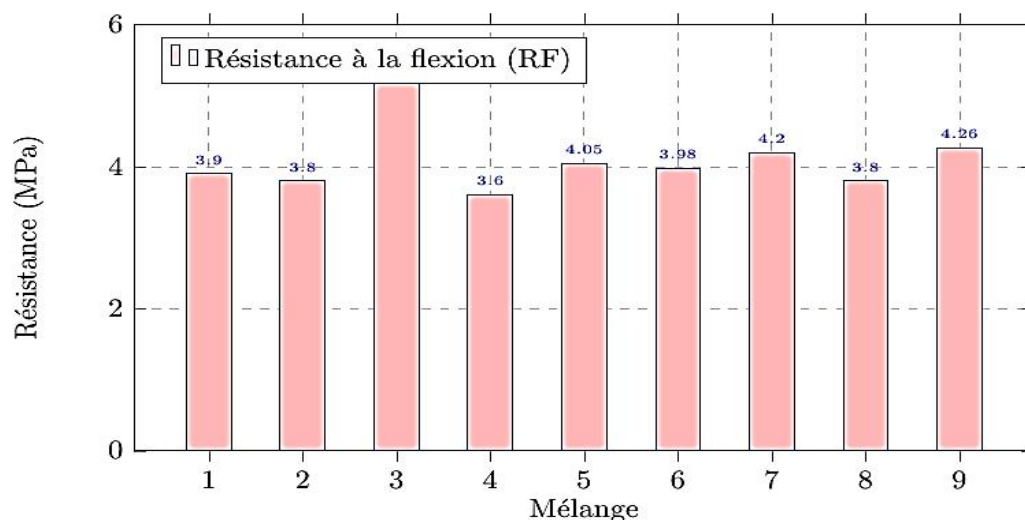
**Figure 3.17** Rupture d'échantillon du BTC par flexion

Tableau 3.5 présente les résultats de la résistance à la flexion (RF) après 28 jours pour différents mélanges de BTC. Les mélanges avec des proportions variées de fibre de mouton (FM) et de filer de calcaire (FC) montrent des performances distinctes. Les mélanges avec 8% de FM (mélanges 3, 4, 6) affichent des résistances élevées, notamment le mélange 3 avec 5,25 MPa en flexion. Les mélanges avec 4% de FM (7, 8, 9) démontrent également de bonnes performances, en particulier le mélange 9 avec 4,26 MPa en flexion. En général, l'ajout de FM semble améliorer les propriétés mécaniques, tandis que l'effet de FC varie en fonction des proportions utilisées.

**Tableau 3.5** Résultats de la résistance à la flexion à 28 jours

Mélange	FM (%)	FC (%)	RF (MPa)
1	0	0	3,9
2	0	25	3,8
3	8	0	5,25
4	8	25	3,6
5	0	12.5	4,05
6	8	12.5	3,98
7	4	0	4,2
8	4	25	3,8
9	4	12.5	4,26

Le graphique ci-dessous illustre les résistances à la flexion (RF) pour différents mélanges de BTC après 28 jours. Les mélanges avec 8% de FM, notamment les mélanges 3, 4, et 6, montrent des résistances significatives, avec le mélange 3 affichant la plus haute résistance en flexion (5,25 MPa). Les mélanges avec 4% de FM, en particulier le mélange 9, se démarquent également par une forte résistance à la flexion (4,26 MPa). En général, l'ajout de fibres (FM) semble améliorer les performances mécaniques des mélanges, tandis que l'effet du filer de calcaire (FC) varie selon les proportions utilisées.



**Figure 3.18** Résistance à la flexion pour différents mélanges

**Tableau 3.6** Résultats de la résistance à la compression et la flexion à 28 jours.

Mélange	FM (%)	FC (%)	RC (MPa)	RF (MPa)
1	0	0	1,55	3,9
2	0	25	0,7	3,8
3	8	0	3,3	5,25
4	8	25	0,9	3,6
5	0	12,5	2,90	4,05
6	8	12,5	3,68	3,98
7	4	0	3,82	4,2
8	4	25	1,5	3,8
9	4	12.5	4,09	4,26

### 3.6 La densité

La densité, également appelée masse volumique, est une caractéristique physique fondamentale des matériaux, y compris des échantillons de sol utilisés dans les essais. Elle est définie comme la masse d'un matériau par unité de volume et est généralement exprimée en grammes par centimètre cube (g/cm<sup>3</sup>) ou kilogrammes par mètre cube (kg/m<sup>3</sup>).

#### Calcul de la densité :

- Utiliser la formule de la densité :

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Où  $\rho$  est la densité,  $M$  est la masse du sol, et  $V$  est le volume de l'éprouvette.

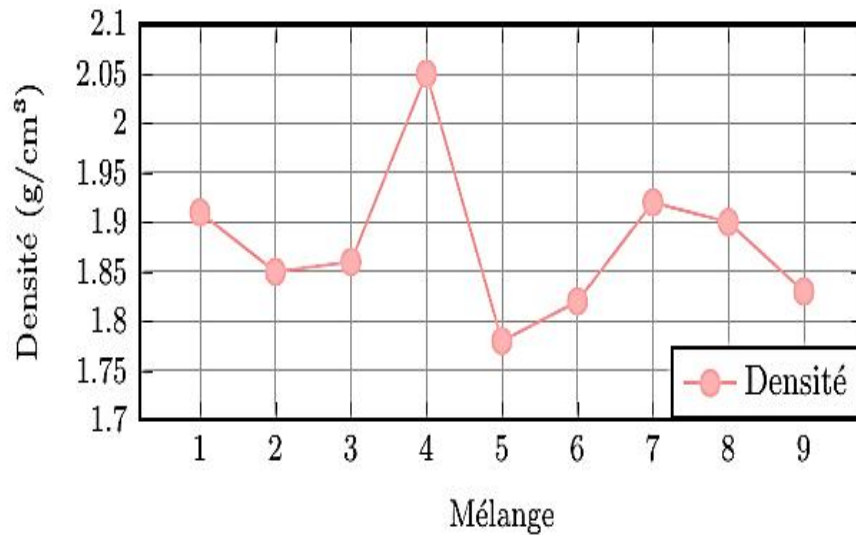
La tableau 3.7 présente les valeurs de densité (en  $\text{g/cm}^3$ ) pour neuf mélanges différents. On observe que le mélange 4 a la densité la plus élevée à  $2,05 \text{ g/cm}^3$ , tandis que le mélange 5 affiche la densité la plus faible à  $1,78 \text{ g/cm}^3$ . Cela indique une variation significative de la densité en fonction des compositions des mélanges, ce qui peut être dû aux différentes proportions et types de matériaux utilisés dans chaque mélange. Une telle variation de densité peut influencer les propriétés mécaniques et de compactage des mélanges, soulignant l'importance de sélectionner la composition appropriée pour des applications spécifiques.

**Tableau 3.7** Densité des mélanges.

Mélange	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densité ( $\text{g/cm}^3$ )	1,91	1,85	1,86	2,05	1,78	1,82	1,92	1,90	1,83

La courbe de densité des mélanges, comme illustrée dans le graphique de la figure 3.19, met en évidence les variations de densité pour neuf mélanges différents.

- **Mélange 1 à Mélange 9** : La densité varie de  $1,78 \text{ g/cm}^3$  à  $2,05 \text{ g/cm}^3$ .
- **Point culminant** : Le mélange 4 présente la densité la plus élevée, atteignant  $2,05 \text{ g/cm}^3$ , ce qui suggère une composition plus compacte ou une meilleure cohésion des matériaux utilisés.
- **Point bas** : À l'inverse, le mélange 5 a la densité la plus faible à  $1,78 \text{ g/cm}^3$ , indiquant une composition potentiellement moins compacte ou avec une porosité plus élevée.
- **Tendances générales** : Les autres mélanges montrent des densités variantes entre ces extrêmes, avec des valeurs comme  $1,91 \text{ g/cm}^3$  pour le mélange 1,  $1,85 \text{ g/cm}^3$  pour le mélange 2, et ainsi de suite.

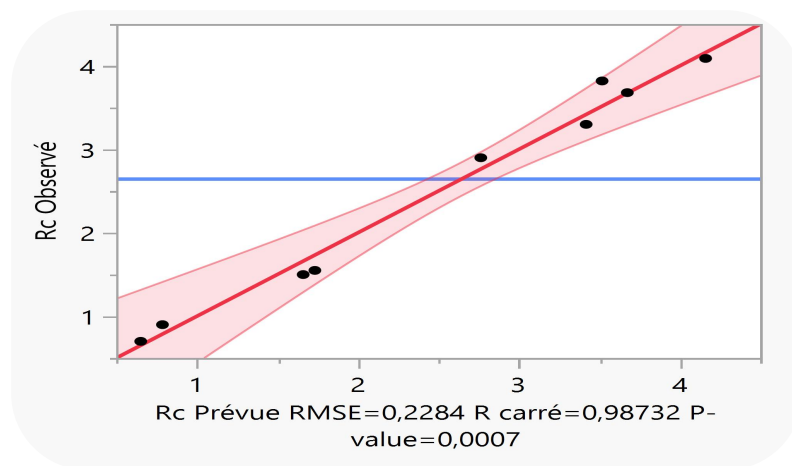


**Figure 3.19** Variation de la densité pour différents mélanges.

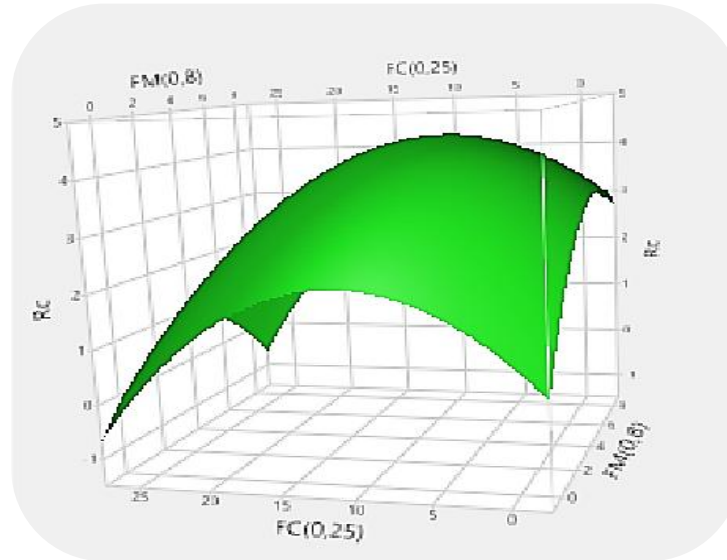
### 3.7. Résultats statiques

#### 3.7.1 Résistance à la compression

La courbe de surface en 3D nous aide à visualiser la surface de réponse étudiée et à évaluer de la relation éventuelle et interactive entre les paramètres de conception du mélange et les propriétés du BTC renforcés par FM et FC. Ces graphiques permettent d'établir les valeurs de réponses étudiées et les conditions d'utilisation souhaitables et peuvent donner une image plus claire de la surface de réponse.



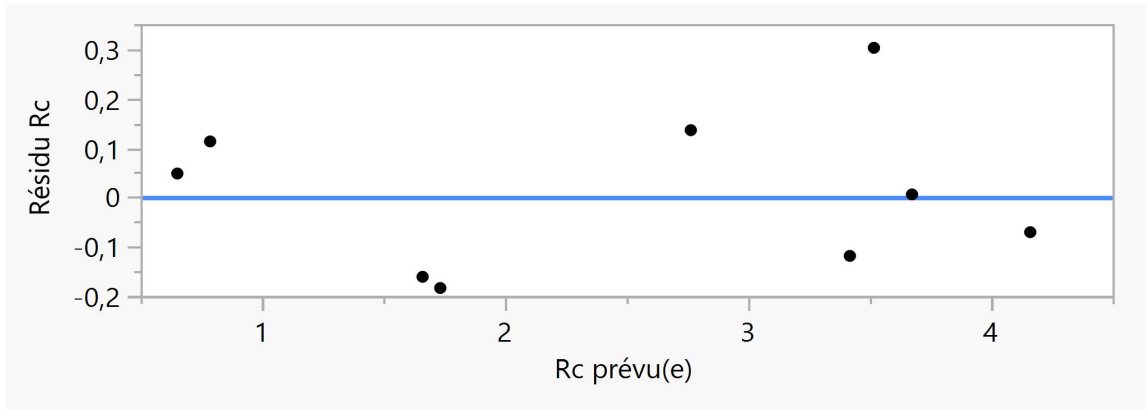
**Figure 3.20** Courbe de Surface en 3D pour l'évaluation des propriétés du BTC renforcé par FM.



**Figure 3.21** Visualisation des conditions d'utilisation souhaitables pour le BTC renforcé par FC

Pour la résistance à la compression, on peut écrire un modèle avec lequel on prédit les réponses dans l'ensemble du domaine d'étude :

$$\begin{aligned}
 & 4,1607142857 \\
 & + 0,455 \cdot \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \\
 & + -0,9283333333 \cdot \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \\
 & + \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot -0,3875 \right) \\
 & + \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot -0,941428571 \right) \\
 & + \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot -1,571428571 \right)
 \end{aligned}$$

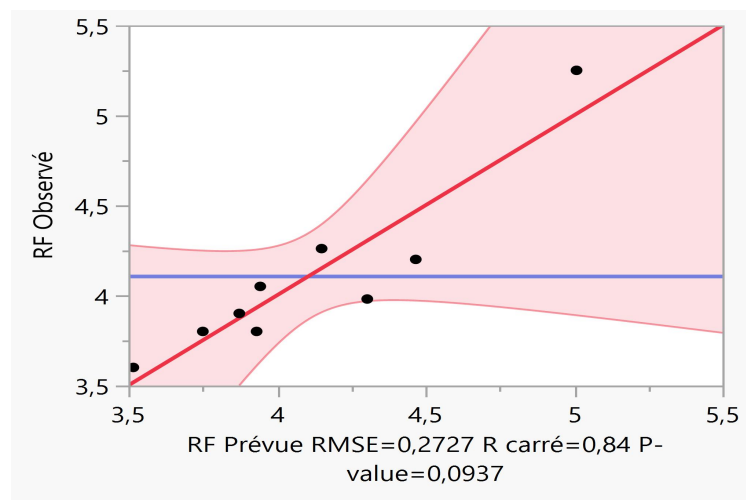


**Figure 3.22** Résistance à la compression résidus en fonction des réponses prévues.

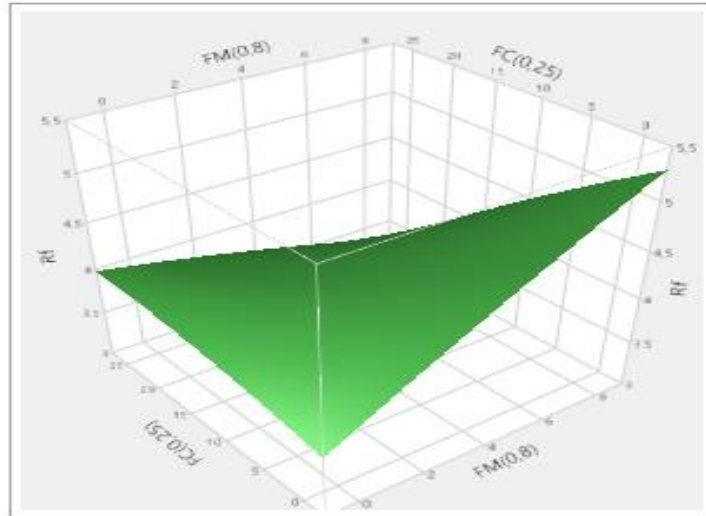
La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues, donne une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En fait, selon la figure 3.22, les résidus semblent être distribués de manière aléatoire (pas une tendance particulière).

### 3.7.2 Résistance à la flexion

La courbe de surface en 3D nous aide à visualiser la surface de réponse étudiée et à évaluer de la relation éventuelle et interactive entre les paramètres de conception du mélange et les propriétés du BTC renforcés par FM et FC. Ces graphiques permettent d'établir les valeurs de réponses étudiées et les conditions d'utilisation souhaitables et peuvent donner une image plus claire de la surface de réponse.



**Figure 3.23** Courbe de Surface en 3D pour l'évaluation des propriétés du BTC renforcé par FM.

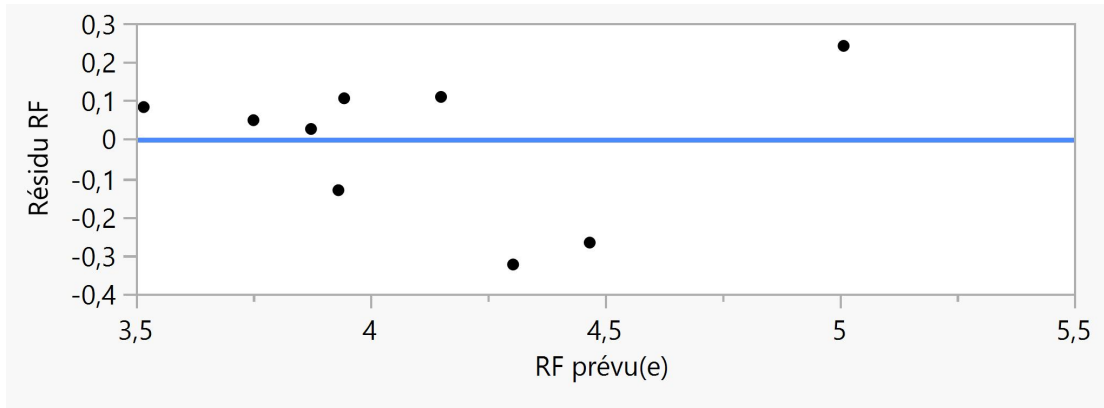


**Figure 3.24** Visualisation des conditions d'utilisation souhaitables pour le BTC renforcé par FC

Pour la résistance à la flexion, on peut écrire un modèle avec lequel on prédit les réponses dans l'ensemble du domaine d'étude :

$$\begin{aligned}
 &4,1507142857 \\
 &+ 0,18 \cdot \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \\
 &+ -0,3583333333 \cdot \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \\
 &+ \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot -0,3875 \right) \\
 &+ \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot -0,026428571 \right) \\
 &+ \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot -0,041428571 \right)
 \end{aligned}$$



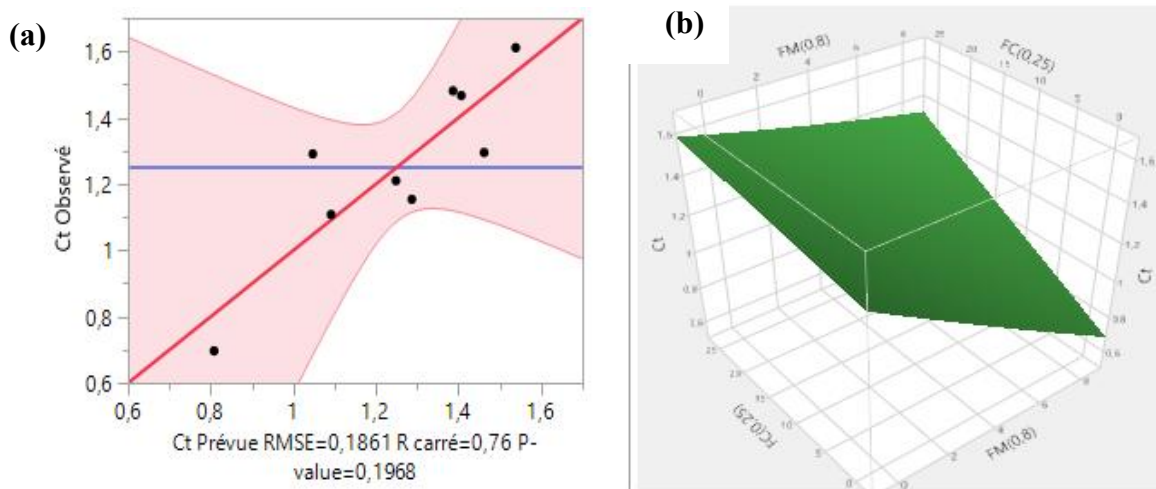


**Figure 3.25** Résistance à la flexion résidus en fonction des réponses prévues.

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues, donne une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En fait, selon la figure 3.25, les résidus semblent être distribués de manière aléatoire (pas une tendance particulière).

### 3.7.3 Conductivité thermique

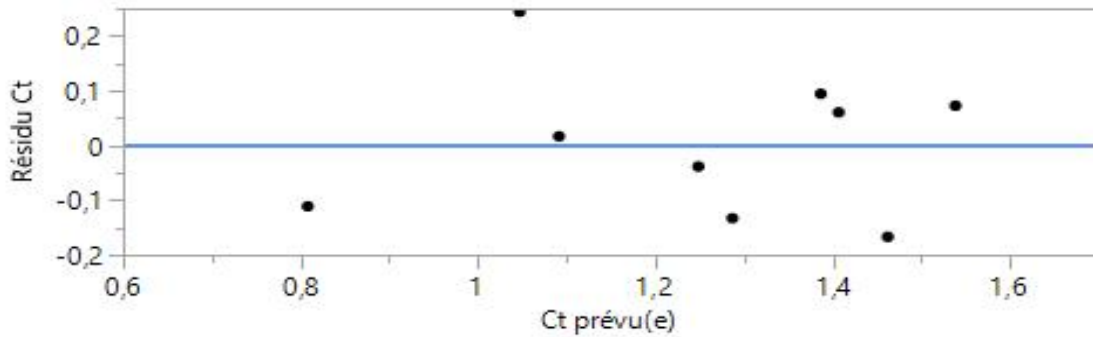
La courbe de surface en 3D nous aide à visualiser la surface de réponse étudiée et à évaluer de la relation éventuelle et interactive entre les paramètres de conception du mélange et les propriétés du BTC renforcés par FM et FC. Ces graphiques permettent d'établir les valeurs de réponses étudiées et les conditions d'utilisation souhaitables et peuvent donner une image plus claire de la surface de réponse.



**Figure 3.26** (a) Courbe de Surface en 3D pour l'évaluation des propriétés du BTC renforcé par FM. (b) Visualisation des conditions d'utilisation souhaitables pour le BTC renforcé par FC.

Pour la conductivité thermique, on peut écrire un modèle avec lequel on prédit les réponses dans l'ensemble du domaine d'étude :

$$\begin{aligned}
 & 1,2485 \\
 & + -0,2075 \cdot \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \\
 & + 0,1576666667 \cdot \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \\
 & + \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot 0,08175 \right) \\
 & + \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FM - 4)}{4} \right) \cdot 0,006 \right) \\
 & + \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot \left( \left( \frac{(FC - 12,5)}{12,5} \right) \cdot 0,0005 \right)
 \end{aligned}$$



**Figure 3.27** Conductivité thermique résidus en fonction des réponses prévues.

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues, donne une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En fait, selon la figure 3.27 les résidus semblent être distribués de manière aléatoire (pas une tendance particulière).

### 3.8 Conductivité thermique

Le tableau 3.8 offre une comparaison des propriétés thermiques de neuf mélanges différents. Chaque ligne du tableau correspond à un mélange spécifique, tandis que les colonnes affichent la conductivité thermique (en W/m.K) et la chaleur spécifique. La conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur, une valeur plus élevée

indiquant une meilleure conductivité. La chaleur spécifique, quant à elle, indique la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse du matériau d'un degré Kelvin.

**Tableau 3.8** Conductivité thermique des mélanges.

Mélanges	Conductivités (W/m.K)	Chaleur spécifique
01	1,481	4092,18
02	1,611	4040,5
03	0,697	1837,7
04	1,154	2987,3
05	1,295	3121
06	1,291	3341,9
07	1,108	3009,5
08	1,467	3512,0
09	1,210	3151,6



**Figure 3.28** Chauffage utilisé pour mesurer la conductivité thermique.

### 3.9 Conclusion

Les résultats obtenus à partir des essais pratiques effectués sur le Béton de Terre Comprimé (BTC) renforcé par la laine naturelle (FM) mettent en lumière des performances distinctes en termes de résistance mécanique. Les mélanges incorporant des proportions variées de fibre de mouton ont montré des améliorations significatives dans leurs propriétés, notamment en ce qui concerne la résistance à la compression (RC) et la résistance à la flexion (RF).

Dans le cas des résistances à la compression (RC), les mélanges contenant 8% de FM ont affiché des résistances élevées, en particulier le mélange 6 avec une valeur de 3,68 MPa, témoignant ainsi de l'impact positif de l'ajout de laine sur la capacité du BTC à résister à des charges de compression. De même, pour la résistance à la flexion (RF), les mélanges avec 8% de FM ont également montré des performances remarquables, notamment le mélange 3 avec une résistance de 5,25 MPa, soulignant ainsi la contribution significative de la laine à renforcer la capacité du BTC à résister à des contraintes de flexion.

Par ailleurs, l'analyse de la densité des mélanges a révélé des variations importantes, soulignant l'importance de la composition des mélanges dans la détermination des propriétés mécaniques et de compactage du BTC. Ces résultats démontrent donc l'influence bénéfique de l'incorporation de la laine naturelle dans le BTC, en particulier dans l'amélioration de sa résistance mécanique, ce qui ouvre la voie à des applications potentielles dans des domaines de construction nécessitant des matériaux robustes et durables.

# **Conclusion générale et perspectives**

## Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif de ce travail de recherche était la compréhension de l'influence de la laine naturelle et les additions sur le comportement du Béton de Terre comprimé (BTC) selon la méthode des plans d'expérience. Une bonne compréhension de ce sujet repose sur la caractérisation adéquate de sol qui est le composant principale de produit du BTC et la bonne formulation du mélange des différents constituants. Pour ce faire, neuf (09) mélanges ont été étudiés et stabilisés avec différentes teneurs de filler de calcaire (0, 12.5 et 25%) et teneurs de la laine de mouton naturelle varié de 0, 4 et 8%. Ces teneurs de filler de calcaire et la laine de mouton sont déterminés utilisant la méthode des surfaces de réponse (RSM). La RSM permet de varier simultanément les facteurs choisis. Des échantillons cubiques et prismatique ont été confectionnés et soumis aux essais mécaniques et thermiques. Les propriétés physiques (masse volumique), mécanique (la résistance à la compression et la flexion) et thermique des BTC ont été déterminées et largement discutés. Les essais expérimentaux que nous avons effectués nous avons permis de montrer que :

- Le type de sol est argileux peu plastique, avec la présence des minéraux de type quartz et la calcite cohérent avec la composition chimique de type silice, l'alumine et la chaux. Cela justifié que le sol étudié a accepté et introduire dans la plage pour la fabrication de béton en terre comprimé (BTC).
- En utilisant une approche basée sur les plans d'expériences, l'étude cherche à optimiser la qualité et les propriétés mécaniques du BTC en identifiant les meilleures combinaisons de matériaux et d'additifs. Les avantages futurs incluent une amélioration de la résistance mécanique, une meilleure résistance aux intempéries et une réduction des coûts de production grâce à une utilisation efficace des matériaux disponibles localement.
- Les résultats des tests pratiques ont montré que l'incorporation de la laine naturelle (FM) a eu un impact significatif sur les propriétés mécaniques du BTC. Les mélanges avec des proportions plus élevées de FM ont affiché des résistances à la compression et à la flexion plus élevées, mettant en évidence la capacité de la laine à renforcer la structure du BTC.

- Le graphique illustrant la résistance à la compression et à la flexion pour différents mélanges de BTC confirme ces observations, montrant des performances améliorées pour les mélanges contenant de la laine naturelle. La variation de densité entre les mélanges indique également l'importance de la formulation précise des mélanges pour obtenir des propriétés optimales du BTC.
- Les résultats thermiques montrent que l'ajout de la laine de mouton réduit considérablement la conductivité thermique et la chaleur spécifique du BTC, mettant en évidence la capacité de la laine à réduire la propagation de la chaleur.

En conclusion, l'étude souligne l'importance de l'utilisation de matériaux naturels comme la laine dans la conception de BTC durables et performants. Elle offre des perspectives prometteuses pour le développement de solutions de construction écologiques et résilientes, tout en mettant en évidence la nécessité d'une approche méthodique et expérimentale pour optimiser les performances du BTC en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Nous vous recommandons également d'étudier la durabilité du BTC renforcé par la laine naturelle.

## REFERENCES

- [1] DAHBI Asma ; AZZI Roqiya. "Caractérisation du béton de terre à base des matériaux locaux".
- [2] Gernot Minke – 1994 - "Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture".
- [3] ASTM International (astm.org) – 1998 - Normes et spécifications pour les matériaux de Construction.
- [4] Salah Altoubat – 2015 - "Sustainable Construction Materials: Wood, Concrete, Steel, and Fibre-Reinforced Concrete"
- [5] Karl Terzaghi et Ralph B. Peck – 1948 - "Soil Mechanics in Engineering Practice"
- [6] "Influence of Natural Fibers on Soil-Cement Composites" - Journal of Materials in Civil Engineering
- [7] "Impact of Additives on the Compressive Strength of Compressed Earth Blocks" - Construction and Building Materials
- [8] "Comparative Study of Thermal Properties of Compressed Earth Blocks with Different Additives" - Energy and Buildings
- [9] "Performance Evaluation of Compressed Earth Blocks with Natural Fibers" - International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology
- [10] "Characterization of Clayey Soils for Earth Construction" - Geotechnical and Geological Engineering
- [11] Earth Architecture (eartharchitecture.org) – 2008 - Site spécialisé dans les techniques de construction en terre
- [12] Sustainable Building Alliance (sballiance.org) - 2010 - Ressources sur les pratiques durables en construction.
- [13] International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (issmge.org) – 1997 - Organisation professionnelle pour la géotechnique et la mécanique des sols
- [14] ResearchGate (researchgate.net) - 2008 - Plateforme pour accéder à des articles de recherche et des études dans le domaine de la géotechnique
- [15] Pierre Kermen – 1995 – "Le Béton de Terre: Fabrication, Propriétés, Applications"



- [16] Alain Pecker - 2016 - "Précis de mécanique des sols: Tome 1, Géotechnique – Notions fondamentales"
- [17] Claude Bourguignon – 2009 - "Le sol, la terre et les champs: Pour retrouver une agriculture saine", 67.
- [18] Patrice Doat et Éric Bosc – 2004 - "Architecture et construction durables en terre crue"
- [19] Remy Jean – 1996 – "Manuel de la construction écologique: Construire en terre"
- [20] 2018 - Thèse de doctorat : Caractéristiques Mécaniques et Thermiques de l'Argile Stabilisée par la Gomme Arabique et Renforcée par la Paille de Riz
- [21] 2022 - Rapport de master : Étude de l'influence du laitier sur le béton de terre comprimé et stabilisé par le ciment et/ou la chaux par la méthode de plan de mélange
- [22] DAHBI Asma et AZZI Roqiya - 2022 - Caractérisation du béton de terre à base des matériaux locaux
- [23] Taallah. B, 2014 - Thèse de Doctorat, "Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres", Université de Biskra.
- [24] XP P13-901 - 2001 - Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions – Spécifications – Méthodes d'essais – Conditions de réception
- [25] Braja M. Das - "Principles of Geotechnical Engineering"