



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة غرداية

D'enregistrement

Université de Ghardaïa

/...../...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية

Département d'Hydraulique et Génie Civil

Mémoire présentée en vue de l'obtention du diplô²me de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème :

**Etude de formulation d'un BTS à base de Tuf
et de poudrette de sable de dune.**

Présenté par :

BOUGHEDIR Israa

Devant le jury composé de :

Nessil hamid	M.A.A	Université de Ghardaïa	Président
Amieur abdenacer	Directeur technique	Université de Ghardaïa	Encadrant
Saiti issam	M.A.A	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

Ma mère et mon père, pour leur amour, leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières qui

M'ont toujours guidée vers la réussite.

Je dédie ce travail à ma chère Many, pour son amour, ses prières et son soutien précieux. »

À ma chère sœur et à mon cher frère,

Pour leur présence, leur encouragement et leur soutien permanent.

À la femme de mon frère,

Pour sa gentillesse et son soutien.

*À mes adorables neveux **Ghadir**, **Nadir** et **Léa**,*

Pour la joie et le bonheur qu'ils apportent à ma vie.

À toute ma famille,

*Mon ami intime **chaima***

Pour leur amour et leur soutien précieux.

À mes chers amis,

Pour leur présence, leurs encouragements et les bons moments partagés.

Remerciements

Je tiens, en premier lieu, à rendre grâce à Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la volonté, la santé et

La patience nécessaire pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **AmieurAbdenacer**, pour avoir accepté*

D'encadrer ce mémoire. Je le remercie sincèrement pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa

Disponibilité ainsi que pour son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce travail.

*Mes vifs remerciements s'adressent également à Madame **Azzouz F.** pour ses orientations et son aide précieuse.*

Nous tenons à remercier tout l'équipe de LTPS, à l'aide sur le

Plan expérimental notamment nos essais réalisés en laboratoire,

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille, en particulier à mon cher oncle,

Qui m'a soutenu et aidé tout au long de la période de préparation de ce mémoire, pour son soutien

Indéfectible, sa présence et ses encouragements constants.

SOMMAIRE

Résumé	II
Contents	III
List de Figures	V
List de Tableaux	VI
Introduction Générale	01
CHAPITRE I : Généralités sur le Béton de Terre stabilisée (BTS)	
1.1 Introduction	04
1.2 Historique du Béton de Terre Stabilisée	04
1.3 Définition du Béton de Terre Stabilisée	05
1.4 Composition du Béton de Terre Stabilisée	05
1.5 Caractéristique des BTS	05
1.6 Les avantages et les inconvénients du Béton de terre stabilisée	06
1.7 Méthodes de formulation et de mise en œuvre du BTS	07
1.8 Propriétés géotechniques et choix du sol	09
1.9 Durabilité, pathologies et protection	09
1.10 Domaines d'application	09
1.11 Aspects économiques	10
1.12 Procédé de fabrication du BTS	10
1.13 Limites du Béton de Terre Stabilisée	11
1.14 Facteurs influençant les performances du BTS	11
Conclusion du chapitre	13
CHAPITRE II : Les Méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances en Béton de Terre stabilisée (BT)	
2.1 Introduction	14
2.2 Caractérisation du sol de base	14
2.2.1 Essais physiques	14
2.2.2 Analyse chimique	21
2.2.3 Essais mécaniques	22
2.2.3.1 Essai de compression simple	24
2.3 Caractérisation des matériaux étudiés	27
2.3.1 Matériaux étudiés	27
2.3.2 Essais réalisés	29
2.3.3 Objectif de la caractérisation	30
Conclusion du chapitre	31

SOMMAIRE

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.1. Protocole expérimental	32
3.2 Matériaux utilisés	32
3.3 Résultats de caractérisation des matériaux utilisés	37
3.4 Caractérisation du tuf 2	44
3.5 Caractérisation de Sable de dune et de la poudrette	49
3.6 Etude des formulations du BTS	54
3.7 Résultats des formulations à base du tuf 1	58
3.8 Résultats des formulations à base du tuf 2	66
3.9 Etude de la conductivité thermique	73
Conclusion du chapitre	78
Conclusion Générale	81
Références bibliographique	83
Annexe	

LISTE DES TABLEAUX

Liste des Tableaux

1.1	Comparaison avec béton traditionnel	06
1.2	Tableaux 1.2 : Comparaison des coûts estimatifs par unité (en Dinar Algérien - DA)	10
3.1	Résultats de l'analyse granulométrique tuf 1	37
3.2	Analyse granulométrique par sédimentométrie tuf 1	38
3.3	Résultats de la limite de plasticité du tuf 01	40
3.4	Analyse chimique du Tuf 1	42
3.5	Résultats de l'essai Proctor modifié du tuf 1	42
3.6	Résultats de l'essai compression simple de tuf 1	43
3.7	Résultats de l'analyse granulométrique tuf 2	44
3.8	Analyse granulométrique par sédimentométrie tuf 2	44
3.9	Résultats de la limite de plasticité du tuf 02	46
3.10	Résultats de la limite de liquidité du tuf 02	46
3.11	Analyse chimique du Tuf 2	48
3.12	Résultats De L'essai Proctor Du Tuf 2	48
3.13	Résultat de l'essai compression simple de tuf 2	49
3.14	Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune	49
3.15	Analyse granulométrique par tamisage de poudrette sable de dune	51
3.16	Analyse granulométrique par sédimentométrie de poudrette sable de dune	52
3.17	formulations des mélanges étudiées	54
3.18	Masses correspondantes pour 2500 g	54
3.19	Résultats de l'essai Proctor modifié du tuf 1 avec 3% de ciment	58
3.20	Résultat compression simple tuf 1 et 3% ciment	58
3.21	tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (5 %)	59
3.22	Résultats de l'essai Proctor de la formulation F1 (5 %)	59
3.23	de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F1 (5%)	60
3.24	tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (10 %)	61
3.25	Résultats de l'essai Proctor de la formulation F2 (10%)	62
3.26	l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F2 (10 %)	62
3.27	tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (15 %)	63
3.28	Résultats de l'essai Proctor de la formulation F3 (15%)	64
3.29	Résultats de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F3 (15%)	64
3.30	tableau comparatif des formulations du tuf 1	65
3.31	résultats de l'essai Proctor modifié du tuf 2 avec 3% de ciment	66
3.32	Résultat de compression simple tuf 2 et 3% ciment	66

LISTE DES TABLEAUX

3.33	tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (5 %)	67
3.34	Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F1 (5 %)	67
3.35	de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F1 (5%)	67
3.36	tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (10 %)	68
3.37	Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F1 (5 %)	68
3.38	Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F2(10%)	69
3.39	tableau détaillé de résultats de la formulation F3 (10 % +3%ciment)	69
3.40	Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F3 (10 %+ 3% ciment)	69
3.41	Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F3 (10 %+3%ciment)	70
3.42	tableau détaillé de résultats de la formulation F4 (15 %)	71
3.43	Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F4 (15 %)	71
3.44	Résultats de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F4 (15 %)	71
3.45	tableau comparatif des formulations du tuf 2	72
3.46	Formulations des éprouvettes pour l'essai de conductivité thermique	73
3.47	tuf 1 mesure 01	75
3.48	tuf 1 mesure 02	75
3.49	tuf 1 mesure 03	75
3.50	tuf 1 moyenne	75
3.51	tuf 2 mesure 01	75
3.52	tuf 2 mesure 02	75
3.53	tuf 2 mesure 03	75
3.54	tuf 2 moyenne	75

LISTE DES FIGURES

Liste des Figures

1.1	Fabrication des blocs de terre compressée (BTC) par presse manuelle ou mécanique	07
1.2	Réalisation d'un mur en béton de terre stabilisée par banchage monolithique	08
1.3	Stabilisation de la terre à la chaux pour L'amélioration des propriétés mécaniques	08
1.4	Béton de terre stabilisée renforcé par des fibres végétales	09
2.1	Préparation du tuf : (a) Immersion 24 h(b) Séchage à l'étuve.	15
2.2	Analyse granulométrique par tamisage	15
2.3	Analyse granulométrique par sédimentométrie	16
2.4	Définition des Limites d'Atterberg.	17
2.5	Boîte de Casa grande	18
2.6	Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante notre échantillon	19
2.7	Détermination la Limite de Liquidité	20
2.8	Détermination la Limite de Plasticité.	20
2.9	Essai Valeur au bleu de méthylène	21
2.10	Matériel Nécessaire de l'essai Proctor modifié	22
2.11	Différentes étapes de l'essai Proctor	24
2.12	Moules de confection ;(b) Préparation des éprouvettes	25
2.13	Démoulages d'éprouvettes de tuf	25
2.14	Les principales étapes de préparation des formulations sont illustrées dans les figures suivantes	26
2.15	(c)Ecrasement d'éprouvette par la presse CBR ; (d) éprouvette écrasé.	26
2.16	Schéma de dispositif de mesures	29
2.17	Compactage du mélange dans le moule.	29
2.18	Éprouvettes après démoulage	29
3.1	Tuf	33

LISTE DES FIGURES

3.2	Localisation de la carrière du tuf n01 (pares de la gare routière de Ghardaïa)	33
3.3	Localisation de la carrière du tuf n02 (PK 22, entre RN07 et RN01)	34
3.4	Sable de dune	35
3.5	Localisation du sable de dune au niveau de la RN1 (PK 631+300),	35
3.6	Préparation de la poudrette de sable de dune par broyage à boulets.	36
3.7	La courbe Analyse granulométrique de tuf 1	39
3.8	Détermination des limites de liquidité et de plasticité du tuf 01	41
3.9	Courbe Proctor Modifié (100 % de Tuf 1)	43
3.10	éprouvette après l'écrasement	43
3.11	La courbe Analyse granulométrique tuf 2	45
3.12	Détermination des limites de liquidité et de plasticité du tuf 02	47
3.13	Courbe Proctor Modifié (100 % de Tuf 2)	49
3.14	La courbe Analyse granulométrique de sable de dune	50
3.15	La courbe d'analyse granulométrique de poudrette sable de dune	53
3.16	Les principales étapes de préparation des formulations sont illustrées dans les figures suivantes	57
3.17	Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 3% de ciment)	58
3.18	mélanges Tuf 1+ poudrette de Sable de dune 5%	59
3.19	Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 5% de poudrette de sable de dune)	60
3.20	mélanges Tuf + poudrette de Sable de dune 10%	61
3.21	Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 5% de poudrette de sable de dune)	62
3.22	mélanges Tuf + poudrette de Sable de dune 15%	63
3.23	Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 15% de poudrette de sable de dune)	64
3.24	Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 3% de ciment)	66
3.25	Après écrasement	66
3.26	Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 5% de poudrette de sable de dune)	67
3.27	Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 10% de poudrette de sable de dune)	68

LISTE DES FIGURES

3.28	Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 10% de poudrette de sable de dune+3%ciment)	70
3.29	Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 15% de poudrette de sable de dune)	71
3.30	Pourcentage des constituions de chaque mélange (%)	74
3.31	Les éprouvettes après le démoulage	74
3.32	Essai de conductivité thermique sur l'échantillon TUF 01 et tuf 02	76

Liste De Notation

BTS : Béton de Terre Stabilisée

F1 : Formulation contenant 5 % de poudrette de sable de dune

F2 : Formulation contenant 10 % de poudrette de sable de dune

F3 : Formulation contenant 15 % de poudrette de sable de dune

Wopt: Teneur en eau optimale

d max : Densité sèche maximale

Rc : Résistance à la compression simple

C : Compacité

LL ou WL : Limite de liquidité

LP : Limite de plasticité

IP : Indice de plasticité

VBS : Valeur au bleu de méthylène

CaCO3: Carbonate de calcium

SO₃²⁻: Sulfates

D : Diamètre des particules

R : Lecture au densimètre

R' : Lecture corrigée du densimètre

R1 : Lecture finale corrigée

C (sédimentométrie) : Correction de température

% passant : Pourcentage des éléments passant au tamis

% refus : Pourcentage des éléments retenus

RN1 : Route Nationale n°1

PK : Point kilométrique

T° : Température

g/cm³ : Gramme par centimètre cube

Kg/cm² : Kilogramme par centimètre carré

Mm : Millimètre

Résumé

Cette étude vise à analyser et déterminer la formulation optimale du Béton de Terre Stabilisée (BTS) à base de tuf local et de poudrette de sable de dune. Cette recherche s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des propriétés des matériaux de construction locaux et de leur utilisation dans des projets de construction de manière durable et efficace.

Une série d'expériences en laboratoire a été réalisée, notamment l'essai Proctor pour déterminer la densité maximale et le taux d'humidité optimal, et l'essai de compression simple pour évaluer la résistance mécanique du béton. L'effet des différentes proportions de composants sur les performances du BTS, y compris la densité, la rigidité et la durabilité, a également été étudié.

Les résultats montrent que les proportions de tuf et de poudrette de sable influencent significativement les propriétés physiques et mécaniques du béton. Les essais ont permis de déterminer la formulation optimale qui assure un équilibre entre résistance et densité, rendant ce béton adapté à une utilisation locale de manière efficace et sûre.

Cette étude contribue à proposer une solution pratique pour le développement du BTS local, en mettant l'accent sur l'utilisation des ressources naturelles disponibles et la réduction des coûts environnementaux et économiques de la construction.

Mots-clés : Béton de terre stabilisée (BTS) -Tuf local-Sable de dune-Essai Proctor-Résistance à la compression

Abstract

This study aims to analyze and determine the optimal formulation of Stabilized Earth Concrete (BTS) using local tuf and dune sand powder. The research focuses on improving the properties of local construction materials and utilizing them in building projects in a sustainable and efficient way.

A series of laboratory tests were conducted, including the Proctor test to determine the maximum density and optimal moisture content, and the simple compression test to evaluate the mechanical strength of the concrete. The effect of different component proportions on BTS performance, including density, stiffness, and durability, was also studied.

The results show that the proportions of tuf and sand powder significantly influence the physical and mechanical properties of the concrete. The tests allowed for determining the optimal formulation, which balances strength and density, making this concrete suitable for local construction applications efficiently and safely.

This study contributes to providing a practical solution for developing local BTS, emphasizing the use of available natural resources and reducing environmental and economic construction costs.

Keywords: Stabilized earth concrete (BTS)-Local tuff-Dune sand-Proctor test-Compressive strength

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتحديد التركيبة المثلى للخرسانة الترابية المثبتة باستخدام التوف المحلي ورمل الكثبان. يساهم هذا البحث في تحسين خصائص مواد البناء المحلية واستخدامها المستدام والفعال في مشاريع البناء.

أجريت سلسلة من التجارب المخبرية شملت اختبار بروكتور لتحديد الكثافة القصوى ومحتوى الرطوبة الأمثل واختبار الضغط البسيط لتقييم المقاومة الميكانيكية للخرسانة. كما درست تأثيرات نسب المكونات المختلفة على أداء الخرسانة الترابية المثبتة بما في ذلك الكثافة والصلابة والمتانة. تُظهر النتائج أن نسب مسحوق التوف والرمل تؤثر بشكل كبير على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة. وقد مكّنت الاختبارات من تحديد التركيبة المثلى التي تضمن التوازن بين المقاومة والكثافة، مما يجعل هذه الخرسانة مناسبة للاستخدام المحلي الآمن والفعال. تُساهم هذه الدراسة في اقتراح حل عملي لتطوير أنظمة البناء الترابية المثبتة محلياً، مع التركيز على استخدام الموارد الطبيعية المتاحة وتقليل التكاليف البيئية والاقتصادية للبناء.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الترابية المثبتة - التوف المحلي - رمل الكثبان - اختبار بروكتور - مقاومة الضغط



Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur du bâtiment constitue l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et d'énergie à l'échelle mondiale. L'utilisation intensive du béton conventionnel à base de ciment contribue significativement à l'épuisement des ressources naturelles ainsi qu'à l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone (CO_2), posant ainsi un enjeu environnemental majeur.

Dans ce contexte, le développement de matériaux de construction durables et à faible impact environnemental devient une nécessité, notamment dans les régions arides et semi-arides. Parmi ces alternatives, le béton de terre stabilisée (BTS) apparaît comme une solution prometteuse, permettant la valorisation des matériaux locaux tout en réduisant les coûts de construction et l'empreinte écologique.

Cependant, les sols naturels utilisés dans ce type de matériaux présentent généralement des caractéristiques mécaniques limitées, notamment une faible résistance et une sensibilité élevée à l'eau et aux conditions climatiques, ce qui nécessite leur stabilisation afin d'améliorer leurs performances et leur durabilité.

Dans ce cadre, plusieurs études ont démontré l'efficacité des techniques de stabilisation des sols. En Algérie, notamment dans les régions sahariennes comme Ouargla, l'ajout de liants a permis d'améliorer significativement les propriétés mécaniques des sols sableux. D'autres travaux ont également montré que l'incorporation de matériaux locaux tels que le sable de dune dans les bétons de terre stabilisée contribue à améliorer la durabilité tout en réduisant la consommation de ciment et les émissions de CO_2 .

Malgré les potentialités des ressources locales dans le Sud algérien, l'utilisation des tufs bruts reste limitée en raison de leurs propriétés mécaniques initiales insuffisantes et leur sensibilité aux conditions climatiques. Cette situation soulève une problématique majeure liée à leur valorisation. Dès lors, la question principale de notre recherche est la suivante : **Comment peut-on améliorer les performances physiques, mécaniques et thermiques d'un béton de terre stabilisée à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme agent de stabilisation, afin d'obtenir un matériau durable et adapté au contexte saharien ?**

Dans ce contexte, le présent travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des matériaux locaux disponibles dans le sud algérien. Il vise à étudier la formulation d'un béton de terre stabilisée (BTS) à base de tuf et de poudrette de sable de dune, ainsi qu'à évaluer ses performances physiques et mécaniques à travers des essais expérimentaux réalisés en laboratoire.

L'objectif général de cette étude est d'optimiser la formulation d'un BTS adapté aux conditions locales. Pour atteindre cet objectif, plusieurs objectifs spécifiques sont définis : la caractérisation des matériaux utilisés (tuf et sable de dune), l'étude de l'influence de la granulométrie sur les

INTRODUCTION GENERALE

performances, la réalisation des essais de compactage (Proctor) et de résistance mécanique, ainsi que la détermination d'une formulation optimale.

Pour répondre à cette problématique, notre travail est structuré en trois chapitres essentiels :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique générale sur le matériau béton de terre stabilisée. Il aborde ses définitions, sa composition, ses caractéristiques globales, ainsi que les avantages, les limites et les principaux facteurs qui influencent ses performances et sa durabilité.

Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie expérimentale. Il décrit de manière globale l'ensemble des essais physiques, chimiques et mécaniques standardisés, ainsi que les protocoles de laboratoire nécessaires pour caractériser les sols et vérifier les performances du matériau étudié.

Le troisième chapitre expose et discute l'ensemble des résultats expérimentaux. Il englobe la caractérisation des différents matériaux locaux utilisés, l'évaluation des propriétés des mélanges compactés à travers plusieurs formulations intégrant la poudrette de sable de dune, ainsi que l'étude du comportement mécanique et de la conductivité thermique du matériau final.

Enfin, une conclusion générale est présentée pour résumer les principaux résultats obtenus et les perspectives de ce travail.

Chapitre I :
Généralités sur le Béton
de Terre Stabilisée
(BTS)

1. Généralités sur le Béton de Terre Stabilisée (BTS) :

1.1 Introduction générale :

Dans le contexte actuel marqué par la hausse des coûts de construction et la nécessité de réduire la consommation énergétique ainsi que l'impact environnemental du secteur du bâtiment, la recherche de matériaux de construction alternatifs et durables est devenue indispensable. Parmi ces matériaux, le Béton de Terre Stabilisée (BTS) apparaît comme une solution prometteuse grâce à l'utilisation de ressources locales, à son faible coût et à ses performances thermiques intéressantes.

1.2 Historique du Béton de Terre Stabilisée

L'utilisation de la terre comme matériau de construction remonte à des milliers d'années. Depuis l'Antiquité, l'homme a exploité la terre crue pour édifier des habitations, des fortifications et des ouvrages divers. Des exemples emblématiques de constructions en terre sont observés en Afrique du Nord, au Moyen-Orient, en Asie [3].

Ainsi que dans le sud algérien, notamment à travers les ksour et les habitats traditionnels.

On estime qu'environ 40 % de la population mondiale a, à un moment donné, vécu dans des constructions en terre. Les premières formes de construction en béton de terre apparaissent sous forme de pisé, constitué naturellement d'environ 70 % de sable et 30 % d'argile, offrant une résistance à la compression comprise entre 1 et 3 MPA[3]. Ce type de construction représente environ 15 % du patrimoine bâti français et près de 17 % des sites classés au patrimoine mondial de l'UNESCO. La terre crue présente également une capacité remarquable de régulation hygrométrique, maintenant l'humidité intérieure autour de 55 % sans recours à une consommation énergétique supplémentaire. Dès les constructions anciennes, des fibres végétales telles que le chanvre ou le lin étaient utilisées afin d'améliorer la cohésion et la résistance du matériau.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, la terre crue demeure sensible à l'eau et présente une résistance mécanique limitée. Avec l'apparition des liants hydrauliques tels que la chaux puis le ciment au cours des XIX^e et XX^e siècles, la notion de terre stabilisée a émergé. Cette technique repose sur l'ajout de faibles pourcentages de liant, permettant, grâce à des réactions pouzzolaniques, la formation de silicates de calcium hydratés améliorant ainsi la résistance, la durabilité et la stabilité du matériau[1].

Au cours du XX^e siècle, le Béton de Terre Stabilisée s'est particulièrement développé dans les pays en voie de développement afin de répondre à la demande croissante en logements à faible coût. Cette évolution a conduit à l'apparition des Blocs de Terre Compressée (BTC), permettant de réduire les coûts de construction d'environ 30 % et l'empreinte carbone jusqu'à 75 % par

CHAPITRE I : *Généralités sur le Béton de terre stabilisée (BTS)*

rapport au béton conventionnel. Plus récemment, l'intégration des outils numériques et de l'intelligence artificielle a permis d'optimiser les formulations locales du BTS.

1.3 Définition du Béton de Terre Stabilisée

Le Béton de Terre Stabilisée (BTS) est un matériau de construction écologique composé principalement de terre naturelle (argile, sable et parfois limon), à laquelle est ajouté un liant hydraulique tel que le ciment ou la chaux, ainsi que de l'eau. La stabilisation permet d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité de la terre, tout en conservant ses avantages environnementaux[1].

Après malaxage et durcissement, le BTS forme un matériau solide pouvant être utilisé sous forme de blocs, de dalles ou directement mis en œuvre sur chantier.

1.4 Composition du Béton de Terre Stabilisée

La composition du BTS repose sur trois éléments principaux :

- **La terre:** constituant principal, elle doit présenter une proportion équilibrée entre argile et sable afin d'assurer la cohésion et la résistance du matériau[1].
- **Le liant:** généralement le ciment ou la chaux, il améliore la résistance mécanique, la durabilité et la résistance à l'eau [5].
- **L'eau :** nécessaire à l'hydratation du liant et à la mise en œuvre du mélange.

Des adjuvants peuvent également être ajoutés afin d'améliorer certaines propriétés spécifiques du matériau[5].

1.5 Caractéristique des BTS

1.5.1 Propriétés mécaniques

- Résistance typique : 2–5 MPA pour BTC, jusqu'à 7 MPA avec stabilisation mixte[5].
- Module d'élasticité : 1500–2500 MPA[1].
- Sensibilité à la traction : fibres recommandées.
- Durabilité : perte de poids <10% après 12 cycles mouillage-séchage, gonflement <0,15%.

1.5.2 Propriétés thermiques et hygrothermiques

- Conductivité thermique λ : 0,8–1,3 W/m.K (meilleure que béton classique)[5].
- Effusivité : $30 \text{ W} \cdot \text{h}^{0,5} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Chaleur spécifique : 1500 J/kg.K[3].
- Régulation de l'humidité : environ 55% HR sans COV, masse thermique élevée pour confort passif[3].

CHAPITRE I : Généralités sur le Béton de terre stabilisée (BTS)

1.5.3 Propriétés physiques

- Porosité : 20–30%
- Absorption d'eau : <15% avec protection
- Recyclable à 100%

1.5.4 Propriétés environnementales

- Empreinte carbone : réduction de 75% vs béton traditionnel Sensible à l'humidité (zones sèches <500 mm/an).
- Acoustique favorable (absorption sonore).
- Granulométrie optimale pour cohésion.

❖ Comparaison avec béton traditionnel :

Tableau 1.1 : Comparaison avec béton traditionnel

Propriété	BTS	Béton traditionnel
Masse volumique	1700-2200 kg/m ³	2300-2500 kg/m ³
λ thermique	0,8-1,3 W/m.K	1,5-2,5 W/m.K
Résistance compression	3-7 MPa	20-50 MPa
Empreinte CO ₂	Faible (local)	Élevée

1.6 Avantages et Inconvénients du Béton de Terre Stabilisée

1.6.1 Les avantages

Le BTS présente de nombreux avantages, notamment :

- **Avantage écologique**: utilisation de matériaux locaux et réduction de l'empreinte carbone[6].
- **Avantage économique**: diminution des coûts de construction grâce à la réduction de l'utilisation des matériaux industriels[2].
- **Bonnes performances thermiques et acoustiques** : le BTS offre une bonne inertie thermique et contribue au confort intérieur des bâtiments[5].
- **Durabilité** : lorsqu'il est correctement formulé et protégé, le BTS présente une bonne résistance aux conditions climatiques[5].

1.6.2 Inconvénients du Béton de Terre Stabilisée

- Sensibilité à l'eau en absence de protection Variabilité des propriétés du sol
- Nécessité d'un contrôle rigoureux du dosage

CHAPITRE I : *Généralités sur le Béton de terre stabilisée (BTS)*

- Résistance inférieure au béton armé

1.7 Méthodes de formulation et de mise en œuvre du BTS

Plusieurs méthodes de formulation et de mise en œuvre du Béton de Terre Stabilisée existent, selon l'usage et les conditions locales.

1.7.1 Blocs de Terre Compressée (BTC)

Les Blocs de Terre Compressée constituent une technique traditionnelle modernisée largement utilisée.

Les principales étapes sont :

1. Tamiser la terre (0–7 mm) afin d'éliminer les éléments végétaux.
2. Mélanger à sec 9 à 10 volumes de terre avec 1 volume de ciment.
3. Ajouter progressivement de l'eau jusqu'à obtention d'une consistance plastique.
4. Remplir les moules et compacter à l'aide d'un psoir ou d'une presse manuelle ou mécanique.
5. Démouler les blocs, les stocker à l'ombre et assurer une cure humide pendant 7 à 28 jours.

Cette méthode offre une bonne résistance mécanique (3 à 5 MPA) et une grande adaptabilité aux sols locaux.



Figure 1.1 : Fabrication des blocs de terre compressée (BTC)

Par presse manuelle ou mécanique.

1.7.2 Banchage monolithique

Le banchage monolithique consiste à couler le BTS directement en place pour former des murs continus.

Les étapes principales sont :

- analyse granulométrique du sol,
- dosage du liant (5 à 10 % de ciment),
- malaxage du mélange terre-liant-eau,
- mise en place dans des coffrages par couches successives,

CHAPITRE I : Généralités sur le Béton de terre stabilisée (BTS)

- compactage et cure humide.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux grands volumes et aux zones sèches.

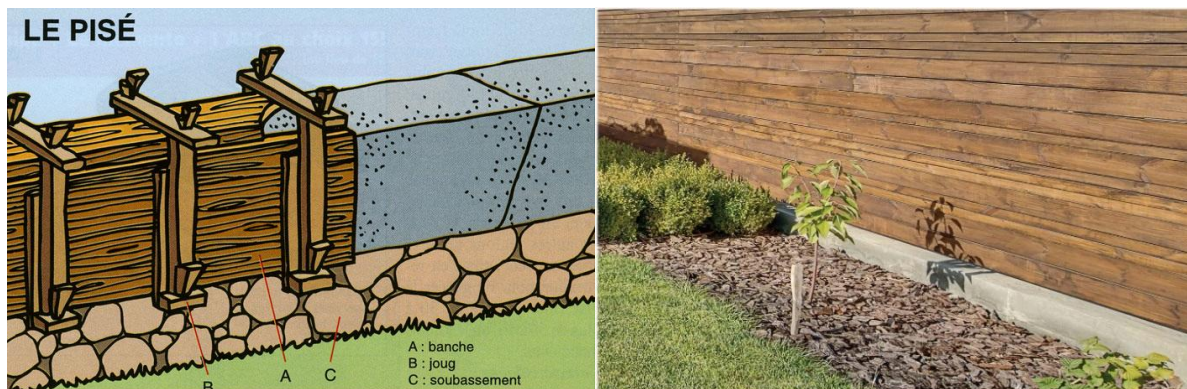


**Figure 1.2: Réalisation d'un mur en béton de terre stabilisée
par banchage monolithique**

1.7.3 Stabilisation à la chaux

La stabilisation à la chaux est utilisée pour les sols argileux humides ou acides.

La chaux (5 à 8 %) améliore la portance du sol par réaction pouzzolanique lente.

Cette méthode est plus écologique que le ciment mais nécessite un temps de cure plus long.



**Figure 1.3 : Stabilisation de la terre à la chaux pour
L'amélioration des propriétés mécaniques**

1.7.4 Stabilisation mixte

La stabilisation mixte combine ciment, chaux et parfois des fibres végétales. Elle permet d'atteindre des résistances plus élevées (4 à 7 MPA) et une meilleure durabilité, notamment dans les zones pluvieuses.



Figure 1.4 : Béton de terre stabilisée renforcé par des fibres végétales

1.8 Propriétés géotechniques et choix du sol

➤ **Le choix du sol est une étape essentielle dans la formulation du BTS.**

Les paramètres importants sont :

- Granulométrie du sol
- Limites d'Atterberg
- Valeur au bleu de méthylène (VB)
- Teneur en argile
- Absence de matières organiques

Un sol bien équilibré entre sable et argile garantit une meilleure stabilité.

1.9 Durabilité, pathologies et protection

➤ **Pathologies :**

- Fissuration due au retrait
- Érosion par l'eau
- Dégradation superficielle

➤ **Solutions de protection**

- Enduits à la chaux ou au ciment
- Débords de toiture
- Drainage des eaux
- Stabilisation de surface

1.10 Domaines d'application

Le Béton de Terre Stabilisée est utilisé dans plusieurs domaines de la construction :

➤ **Bâtiment :**

- murs porteurs et murs de remplissage,

CHAPITRE I : Généralités sur le Béton de terre stabilisée (BTS)

- fondations légères,
- cloisons et façades.

➤ Infrastructures et aménagements extérieurs :

- routes à faible trafic,
- dalles et revêtements de sol,
- aménagements paysagers.

1.11 Aspects économiques

L'utilisation du Béton de Terre Stabilisée (BTS) à base de matériaux locaux (tuf et poudrette de sable de dune) présente un intérêt économique majeur dans le secteur de la construction en Algérie. En valorisant ces ressources locales abondantes, il est possible de réduire considérablement l'impact financier lié au transport et à l'achat de matériaux conventionnels coûteux.

Tableaux 1.2 : Comparaison des coûts estimatifs par unité (en Dinar Algérien - DA)

Aspect	Béton de terre stabilisée (BTS)	Béton traditionnel
Prix public (ex. brique 4x20x19 cm)	1200-1600 € TTC/m ² hors pose	11000 - 16000 DA TTC/\$m^{2}\$ pose comprise (dalle))
Coût m ³ (matériau seul)	6000 - 9000 DA	12000 - 18000 DA
Empreinte carbone	Réduction de 75%	Empreinte carbone

Facteurs influençant le prix

- Le BTS est low-tech : compression ou coulage simple → main-d'œuvre réduite de 20–40 % vs béton industriel.
- Dans les zones rurales, les coûts des murs porteurs en BTS sont **environ 30 % inférieurs**.
- Le béton traditionnel implique transport et énergie élevés → prix plus élevés.

1.12 Procédé de fabrication du BTS

Le procédé de fabrication du BTS comprend plusieurs étapes essentielles :

1. **Préparation de la terre** : sélection et nettoyage du sol pour éliminer les éléments indésirables.

2. **Dosage et mélange:** incorporation du liant et de l'eau à la terre selon des proportions définies.
3. **Mise en œuvre:** moulage, compactage ou coulage du mélange selon la technique choisie.
4. **Cure et durcissement :** phase indispensable pour permettre au matériau d'atteindre ses performances mécaniques[5].

1.13 Limites du Béton de Terre Stabilisée

Malgré ses nombreux avantages, le BTS présente certaines limites :

- Sensibilité à l'eau en l'absence de protection adéquate[1].
- Nécessité d'un contrôle précis des dosages et de la mise en œuvre[4].
- Performances mécaniques inférieures à celles du béton armé pour certaines applications structurelles.[1].

1.14 Facteurs influençant les performances du BTS

Le comportement et les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS) dépendent de plusieurs paramètres essentiels liés à la nature du sol, au dosage des matériaux et aux conditions de mise en œuvre.

➤ Nature et composition du sol

La granulométrie du sol est un facteur déterminant dans la qualité du BTS. Un équilibre entre sable, limon et argile permet d'obtenir une bonne cohésion et une compacité optimale. Une analyse granulométrique et une étude des limites d'Atterberg sont nécessaires pour caractériser le sol utilisé [13], [12].

➤ Taux de liant (ciment ou chaux)

Le pourcentage de liant influence directement la résistance mécanique et la durabilité du matériau. Les études montrent que des dosages optimisés permettent d'améliorer significativement les performances mécaniques du BTS [2], [8].

➤ Teneur en eau

La teneur en eau joue un rôle fondamental dans la compaction et la cohésion du mélange. Un dosage inadéquat peut entraîner une diminution de la résistance finale du matériau [9].

➤ Energie de compactage

Le degré de compactage influence la densité et la porosité du BTS. Une compaction insuffisante entraîne une diminution de la résistance à la compression, mesurée selon des essais normalisés [8], [14].

➤ Conditions de cure

CHAPITRE I : *Généralités sur le Béton de terre stabilisée (BTS)*

Les conditions de cure (humidité et température) influencent fortement le développement des réactions d'hydratation du ciment, ce qui impacte la résistance finale du matériau [5].

➤ Ajout de fibres et adjuvants

L'ajout de fibres végétales ou synthétiques permet de réduire la fissuration et d'améliorer la ductilité du matériau [6], [7].

➤ Sensibilité du sol et paramètres géotechniques

Les caractéristiques géotechniques telles que la valeur au bleu de méthylène permettent d'évaluer la plasticité et la sensibilité du sol à l'eau, ce qui influence directement la stabilité du BTS [16].

❖ Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités du Béton de Terre Stabilisée (BTS), en mettant en évidence son importance dans le domaine de la construction durable. Nous avons d'abord défini le BTS et décrit sa composition à base de sol naturel, de liant hydraulique et d'eau. Ensuite, ses propriétés mécaniques, thermiques et environnementales ont été détaillées, montrant l'intérêt de ce matériau comme alternative écologique au béton traditionnel.

Par la suite, les différentes méthodes de mise en œuvre ainsi que les facteurs influençant ses performances ont été abordés, notamment la nature du sol, le dosage en liant et les conditions de compactage et de cure.

Enfin, les domaines d'application, les aspects économiques, la durabilité ainsi que les limites du BTS ont été présentés afin de mieux comprendre son comportement et ses performances globales.

Ce chapitre permet ainsi de poser les bases théoriques nécessaires pour la suite de cette étude, qui sera consacrée à la formulation et aux essais expérimentaux du BTS.

Conclusion du chapitre:

Le Béton de Terre Stabilisée constitue un matériau de construction durable et économique répondant aux exigences actuelles du développement durable. Grâce à ses propriétés thermiques, environnementales et économiques, il représente une alternative intéressante aux matériaux conventionnels, notamment dans les zones disposant de ressources locales abondantes [1].

Dans la continuité de cette étude théorique, le chapitre suivant sera consacré à l'étude expérimentale du BTS. Il portera principalement sur la formulation des mélanges à base de tuf et de sable de dune, ainsi que sur les essais de caractérisation permettant d'évaluer les performances mécaniques et physiques du matériau.

Chapitre II :
Les méthodes et les moyens
permettant de vérifier les
performances du Béton de
Terre Stabilisée (BTS)

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

2.1 Introduction

L'évaluation des performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS) repose sur des méthodes expérimentales normalisées permettant de caractériser ses propriétés mécaniques, physiques, hydriques et thermiques. [1],

Selon Houben & Guillaud (1994) et Walker (2005), la validation d'un matériau en terre stabilisée nécessite une approche multidimensionnelle intégrant :

- La caractérisation du sol de base [2]
- L'évaluation mécanique [8]
- L'analyse de la durabilité [5],
- La mesure des propriétés physiques et thermiques [6]

Ces essais permettent de vérifier l'aptitude du BTS à un usage structurel ou non structurel [2]

2.2 Caractérisation du sol de base

Durant cette phase, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques initiales des matériaux de base avant tout traitement. Cette caractérisation permet d'identifier les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du sol, indispensables pour une bonne formulation du matériau. [2], [4] Les caractéristiques des matériaux de base peuvent être classées en trois catégories principales :

- Essais physiques.
- Analyses chimiques.
- Essais mécaniques.

2.2.1 Essais physiques

Les essais physiques ont pour objectif d'identifier les sols et d'évaluer leurs paramètres fondamentaux tels que la granulométrie, la forme des grains et la densité.

a) Analyse granulométrique

✓ Objet de l'essai

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la distribution des tailles de grains du matériau. Elle permet d'évaluer la qualité du mélange et de vérifier la nécessité d'une correction granulométrique, notamment par l'ajout de sable de dune afin d'améliorer la structure du sol. [13]

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisé (BTS)

✓ Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer les particules du sol selon leur taille à l'aide de tamis normalisés. Pour les éléments fins, l'analyse est réalisée par voie humide [13].

✓ Matériel utilisé

- Série de tamis normalisés
- Balance
- Agitateur mécanique
- Bac de lavage

✓ Mode opératoire

L'essai est réalisé selon la norme NFP 94-056. Dans notre cas, l'analyse a été effectuée par voie humide pour le tuf.

Étant donné la sensibilité du tuf à l'eau, l'échantillon a été imbibé pendant 24 heures avant l'essai. Cette opération permet aux mottes de se désagréger afin d'obtenir des conditions défavorables de friabilité.

Après imbibition, l'échantillon est lavé puis passé à travers une série de tamis. Les refus sont récupérés, séchés et pesés afin de déterminer la répartition granulométrique.



Figure 2.1 : Préparation du tuf :

(a) Immersion 24 h

(b) Séchage à l'étuve.



Figure 2.2 : Analyse granulométrique par tamisage

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

- **Analyse granulométrique par sédimentométrie**

- ✓ **Principe**

Basée sur la vitesse de sédimentation des particules fines dans un liquide [17].

- ✓ **Domaine d'application**

Fraction d'un matériau comprise entre 80 μm et 50mm Pour les éléments inférieure 80 μm on se reportera à la norme NF P94- 057 (méthode par sédimentation) éléments supérieurs à 50mm le GTR préconise une estimation visuelle

- ✓ **Procédure :**

- On prend **80 g de tuf**.
 - On ajoute **440 ml d'eau distillée**.
 - On ajoute **60 ml d'hexamétaphosphate de sodium**.
 - Agitation pendant **5 minutes**.
 - Transfert dans une éprouvette de **2 litres**.
 - Complément d'eau jusqu'à 2 L.
 - Homogénéisation ($\approx$ 30 retournements).
 - Introduction du densimètre et démarrage du chronomètre.
 - Lectures à différents temps (30 s, 1 min, 2 min...).



Figure 2.3 : Analyse granulométrique par sédimentométrie

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

b) Limites d'Atterberg selon la norme NF p 94-051 :

- **Objectif** : Identifie et caractérise l'argilosité du sol [10]
- **Domaine d'application** : Cet essai s'applique généralement sur les sols composant un pourcentage des fines (80 μm) supérieur à 35%. Basé sur la détermination des deux limites d'Atterberg (Limite de Liquidité à la coupelle et Limite de Plasticité au rouleau) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 μm .
- **Définition** : Pour les besoins du présent essai, les définitions suivantes s'appliquent :
- **Limite d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité)** : teneur en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.
- **Limite de liquidité W_L** : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- **Limite de plasticité W_P** : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- **Indice de plasticité IP** : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique $P = W_L - W_P$ [12]
- **L'indice de consistance** : $I_c = (w_L - w_{nat}) / (w_L - w_P)$. Il permet de caractériser la consistance d'un sol :
 - I_c inférieur à une valeur de l'ordre de 0,7 : sols peu consistants avec lesquels on risque d'avoir des problèmes de traficabilité.
 - I_c supérieur à une valeur de l'ordre de 1,3 : sols de consistance élevée avec lesquels on risque d'être confronté à des problèmes d'extraction. Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

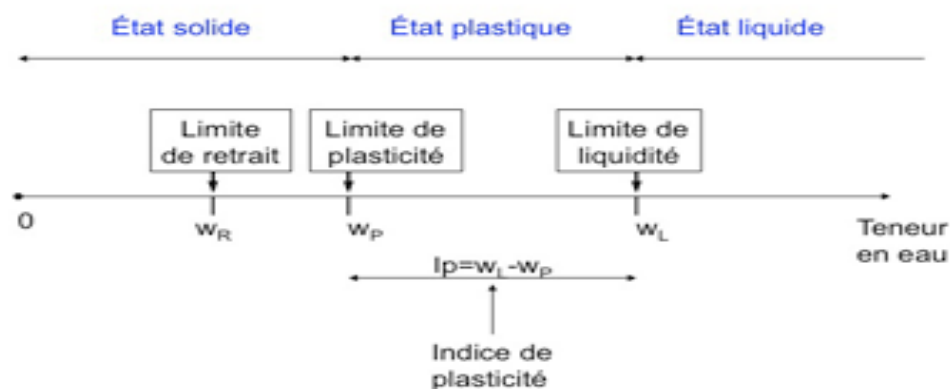


Figure 2.4 : Définition des Limites d'Atterberg.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

- **Principe de détermination des limites d'Atterberg :**

L'essai s'effectue en deux phases : [10]

- ✓ Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque cette dernière et son contenu sont soumis à des chocs répétés.
- ✓ | Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée confectionné manuellement, se fissure.

- **Appareillage :** Le matériel nécessaire à préparation du sol est distingué du matériel utilisé pour la détermination des limites.

- ❖ **Matériel pour la préparation du sol :** un récipient d'eau moins 2L, un bac et un tamis à la maille carrée de 400 μ m d'ouverture.

- ❖ **Matériel pour la détermination la limite de liquidité :** un appareil de Casagrande une étuve de dessiccation à température réglable à 50° C, une balance et des capsules ou boites de pétri, spatule, truelles.

- ❖ **Matériel pour la détermination la limite de plasticité :** une plaque lisse en marbre pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol, spatules une balance, une étuve et une plaque de verre de 5 cm de largeur et de 10.5 cm de longueur portant une graduation tous les 1 cm et une cale de 0.5 cm ou tout autre dispositif permettant d'apprécier le diamètre des rouleaux de sol de 3 mm $\pm$ 0.5 mm



Figure 2.5: Boite de Casagrande

- **Préparation du sol :**

- ✓ Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24H, une masse de matériau.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

- ✓ Tamiser par voie humide au tamis de 400 μm .
- ✓ Recueillir l'eau de lavage et le tamisât dans un bac.
- ✓ Siphonner le mélange sol-eau après une décantation au moins 12 Heures.
- ✓ Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépassant pas 50°C.
- ✓ Homogénéiser par malaxage à la truelle du mortier.



Figure 2.6 : Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante notre échantillon

• Mode Opératoire :

Détermination de la Limite de Liquidité à la coupelle :

- ✓ Contrôler si le fonctionnement de l'appareil est bien.
- ✓ Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- ✓ Mettre dans une coupelle propre et sèche, une masse du sol malaxé avec l'eau.
- ✓ Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer.
- ✓ Fixer délicatement sur le support métallique de l'appareil de CASAGRANDE.
- ✓ Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de choc à la cadence de 2 coups/s.
- ✓ Noter le nombre N des chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm.
- ✓ Prélever environ de 5g de pâte de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermée afin d'en déterminer la teneur en eau. On note poids total humide.
- ✓ Placer le prélèvement dans une capsule de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccations. On note poids total sec.
- ✓ Effectuer au moins 4 fois la même opération complète sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. On note teneur en eau.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisé (BTS)



Figure 2.7 : Détermination la Limite de Liquidité

Détermination de la Limite de Plasticité au rouleau :

- ✓ Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- ✓ Rouler la boulette sur une plaque lisse à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3 mm et une longueur d'environ 10 cm et ne doit être creux.
- ✓ La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteigne $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$.
- ✓ Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau réintégré à la boulette et reformer à nouveau.
- ✓ Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau, et placer la dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.
- ✓ Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette



Figure 2.8: Détermination la Limite de Plasticité.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisé (BTS)

c) Valeur au bleu de méthylène

✓ Objet de l'essai

Cet essai permet de déterminer la teneur en argile et l'activité des fines dans le sol [16].

✓ Principe de l'essai

L'essai consiste à ajouter progressivement une solution de bleu de méthylène au sol jusqu'à saturation des particules argileuses [16].

Mode opératoire

- Une suspension de sol est préparée dans l'eau.
- On ajoute le bleu de méthylène goutte à goutte en agitant.
- Des gouttes sont déposées sur papier filtre pour vérifier la saturation.
- La quantité utilisée permet de calculer la valeur au bleu.



Figure 2.9 : Essai Valeur au bleu de méthylène

A. Pycnomètre utilisé pour l'essai ;

B. Mélange du sol avec l'eau dans le pycnomètre

C. Détermination de la valeur au bleu de méthylène par observation de la tache sur papier filtre.

2.2.2 Analyse chimique

L'analyse chimique permet de déterminer la composition du sol, notamment la présence de minéraux, de sels ou de matières organiques pouvant influencer la stabilisation [3].

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

2.2.3 Essais mécaniques

Les essais mécaniques permettent d'évaluer le comportement du sol sous l'effet des charges et de déterminer ses caractéristiques de résistance et de compacité. Dans cette étude, nous avons réalisé l'essai Proctor et l'essai de compression simple [15].

a) Essai Proctor modifié

✓ Objet de l'essai

L'essai Proctor modifié a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale du sol [9].

Il permet de déterminer les caractéristiques de compactage du matériau sous une énergie de compactage plus élevée, représentant des conditions plus sévères que l'essai Proctor normal.

Principe de l'essai

L'essai consiste à humidifier le sol avec différentes teneurs en eau, puis à le compacter dans un moule normalisé.

Pour chaque teneur en eau, on détermine la densité sèche afin de tracer la courbe Proctor et trouver les valeurs optimales. [9]

- **Matériel Nécessaire :** Moule Proctor modifié , Dame Proctor modifié, Règle à araser, Disque d'espacement, Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau, Tamis 5 mm, Truelle, spatule, pinceau, , Eprouvette graduée 150 ml environ, Petits récipients (mesures des teneurs en eau), Balance portée 20 kg et Etuve 105°C.



Etuve petit modèle



Moule Proctor modifié



Eprouvette graduée 150 ml environ

Figure 2.10: Matériel Nécessaire de l'essai Proctor modifié

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

✓ Mode opératoire

L'essai est réalisé selon la norme ASTM D1557.

Dans notre cas, nous avons :

- préparé le sol et éliminé les éléments supérieurs à 5 mm
- ajouté différentes quantités d'eau pour obtenir plusieurs teneurs en eau
- compacté le sol dans un moule Proctor modifié en cinq couches à l'aide d'une dame Proctor modifié
- chaque couche a reçu 25 coups
- arasé la surface et pesé l'échantillon
- déterminé la teneur en eau après séchage à l'étuve
- calculé la densité sèche pour chaque essai
- tracé la courbe Proctor afin de déterminer l'optimum

Préparation du mélange :

Le sol est d'abord séché à l'étuve jusqu'à obtenir un état suffisamment sec. Ensuite, une quantité d'eau est ajoutée et le mélange est malaxé manuellement.

Préparation du moule :

Le moule, l'embase et la rehausse sont bien fixés afin d'éviter tout déplacement pendant le compactage.

Compactage :

- Le matériau est introduit dans le moule en cinq couches.
- Chaque couche est compactée par 25 coups de dame Proctor modifié.
- L'opération est répétée pour les cinq couches.

Arasage et extraction :

Après compactage, la rehausse est retirée. L'excédent de matériau est arasé soigneusement au niveau du moule, puis l'échantillon est extrait.

Pesée et teneur en eau :

L'échantillon compacté est pesé immédiatement.

Un échantillon est prélevé pour déterminer la teneur en eau après séchage à l'étuve.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisé (BTS)



Figure 2.11 : Différentes étapes de l'essai Proctor

2.2.3.2 Essai de compression simple

L'essai de compression simple a pour objectif de déterminer la résistance à la compression du matériau sans confinement. [8]

Il permet d'évaluer la capacité du sol stabilisé à supporter les charges.

✓ Principe de l'essai

L'essai consiste à appliquer une charge axiale croissante sur une éprouvette cylindrique jusqu'à rupture.

La contrainte maximale atteinte correspond à la résistance à la compression simple. [15]

Mode opératoire (préparation des éprouvettes)

Dans notre cas, la préparation des échantillons s'est déroulée comme suit :

- **Préparation du matériau :**

Après séchage à l'air, le tuf a été tamisé à 5 mm afin d'éliminer les éléments grossiers.

- **Ajout d'eau :**

Une quantité d'eau correspondant à l'optimum Proctor (OPM) a été ajoutée, puis le mélange a été effectué manuellement afin d'obtenir une bonne homogénéité.

- **Maturation du mélange :**

Le matériau a été conservé dans un sac plastique fermé pendant 24 heures afin d'assurer une répartition uniforme de l'humidité.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisé (BTS)

- **Compactage :**

Le compactage a été réalisé selon la norme NFP 98-230-2 à l'aide d'une presse CBR, avec une vitesse de 1,27 mm/min. [15]

Le matériau a été compacté en une seule opération dans des moules cylindriques ($\varnothing = 5$ cm, H = 10 cm), permettant une répartition homogène de la contrainte.

- **Homogénéisation:**

Une attention particulière a été portée à l'élimination des grumeaux. Le mélange a été réalisé manuellement et tamisé plusieurs fois afin d'obtenir un matériau homogène.



Figure 2.12 : (a) Moules de confection ; (b) Préparation des éprouvettes



Figure 2.13 Démoulages des éprouvettes de tuf

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)



Figure 2.14 : Etuvages des éprouvettes : °C pour 72 H pour les matériaux non gypseux



Figure 2.15 : (c)Ecrasement d'éprouvette par la presse CBR ; (d) éprouvette écrasé.

Sur la feuille d'essai, les renseignements suivants seront conjoints éprouvettes :

- ✓ La densité sèche maximale Proctor modifiée
- ✓ La teneur en eau optimale Proctor modifiée
- ✓ Le poids théorique humide de l'éprouvette
- ✓ La teneur en eau réelle du compactage
- ✓ La hauteur de l'éprouvette
- ✓ Le diamètre de l'éprouvette
- ✓ Le volume de l'éprouvette ;
- Ecrasement : RC en Kg /

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

2.3 Caractérisation des matériaux étudiés

▪ Introduction

Après la caractérisation du sol de base, il est nécessaire d'étudier les propriétés des matériaux élaborés, notamment le Béton de Terre Stabilisée (BTS).

Cette étape permet d'évaluer le comportement du matériau après stabilisation et compactage. [5]

2.3.1 Matériaux étudiés

Les matériaux étudiés dans ce travail sont constitués de :

- tuf naturel
- tuf stabilisé avec liant (ciment)
- sable de dune (si utilisé pour correction granulométrique)

2.3.2 Essais réalisés

Afin de caractériser les matériaux étudiés, plusieurs essais ont été réalisés, notamment :

- essai Proctor modifié (détermination de l'optimum de compactage déjà présenté précédemment))
- essai de compression simple (évaluation de la résistance mécanique déjà détaillée précédemment)
- essai de conductivité thermique (évaluation du comportement thermique du matériau)

2.3.2.1 Essai de conductivité thermique

✓ Objet de l'essai

L'essai de conductivité thermique permet de déterminer la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur.

Il est utilisé pour évaluer les performances thermiques des différents mélanges étudiés et leur aptitude à assurer une bonne isolation thermique dans le domaine de la construction. [18], [20].

✓ Principe de l'essai

La méthode d'investigation mise en évidence. C'est des tests de conductivité ou résistivité thermique (TCT ou TRT) demandée par le client et qui consiste à apporter des informations physiques caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction (conductivité thermique) sur la base fondamentale de la loi de Fourier qui représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température le kelvin (K). Suivant le système international d'unités (SI).

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

La conductivité thermique (λ) est exprimée en watts par mètre par kelvin, (W/m*K) où :

- Le watt est l'unité de puissance
- Le mètre est l'unité de longueur

$$\lambda = \frac{Q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)}$$

- Le kelvin est l'unité de température
- La formule de la conductivité thermique est la suivante :

Q = apport de chaleur (W)

λ = conductivité thermique [W / (m • K)],

T1 = température initiale (K),

T2 = température finale (K),

t1 = instant de mesure 1 (s),

t2 = instant de mesure 2 (s),

✓ Matériel utilisé

Appareil de mesure de conductivité thermique

Éprouvettes des différents mélanges

Balance

Étuve de séchage

Thermomètres ou capteurs thermiques

✓ Mode opératoire

La méthode de mesure de la conductivité thermique du sol, est précédée par une sonde à choc thermique, elle est constituée de 2 parties :

- un élément cylindrique résistif dans lequel est dissipée, par effet Joule, une quantité de chaleur constante pendant la durée de la mesure ;
- une sonde de calcul de la température placée à l'interface sol-sonde.
- Le courant et la tension sont appliqués à la sonde et l'élévation de la température avec le temps sont mesurés pour une durée moyenne de 10 minutes.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisé (BTS)

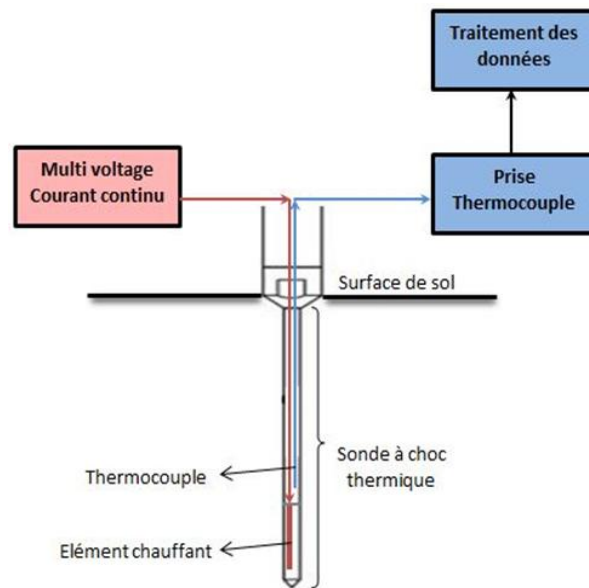


Figure 2.16 : Schéma de dispositif de mesures.

➤ Préparation des éprouvettes pour l'essai de conductivité thermique

Les éprouvettes destinées à l'essai de conductivité thermique ont été préparées par compactage dans des moules métalliques, puis conservées à l'air libre avant l'essai afin d'assurer leur stabilisation et leur séchage partiel.



Figure 2.17 : Compactage du mélange dans le moule.



Figure 2.18 : Éprouvettes après démoulage

2.3.3 Objectif de la caractérisation

Cette caractérisation vise à :

- évaluer l'influence de la stabilisation sur les propriétés du matériau
- déterminer les performances mécaniques du BTS
- vérifier l'adéquation du matériau pour une utilisation en construction.

CHAPITRE II : Les méthodes et les moyens permettant de vérifier les performances du Béton de Terre Stabilisée (BTS)

Conclusion partielle

Les résultats de ces essais permettent de mieux comprendre le comportement du matériau étudié et d'optimiser sa formulation pour garantir de bonnes performances. [1]

Transition vers le chapitre suivant

Au terme de ce chapitre consacré aux méthodes expérimentales et aux essais de caractérisation du Béton de Terre Stabilisée, il apparaît que la compréhension des propriétés physiques et mécaniques des matériaux constitue une étape indispensable avant toute formulation [5].

Les résultats obtenus à travers ces essais ont permis d'identifier les paramètres essentiels influençant le comportement du matériau, notamment la compacité, la résistance mécanique et la stabilité hydrique [1].

Dans le chapitre suivant, une étude de formulation du BTS à base de tuf sera présentée, en intégrant la poudrette de sable de dune comme matériau de stabilisation, afin d'évaluer son influence sur l'amélioration des performances du matériau élaboré. [2,5].

Chapitre III :
Etude de formulation du BTS à
base de tuf en utilisant la
poudrette de sable de dune
comme matériaux
De stabilisation

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.1. Protocole expérimental

Dans le cadre de cette étude, un protocole expérimental a été mis en place afin d'élaborer et de caractériser le béton de terre stabilisée à base de tuf et de poudrette de sable de dune.

L'approche adoptée consiste à préparer plusieurs mélanges en faisant varier la teneur en sable de dune, dans le but d'évaluer son influence sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau.

Le protocole expérimental comprend les étapes suivantes :

- préparation des matériaux (séchage, pesée) ;
- mélange à sec du tuf et de la poudrette de sable de dune ;
- ajout progressif de l'eau jusqu'à obtention d'un mélange homogène ;
- compactage des échantillons selon les conditions de l'essai Proctor ;
- conservation des éprouvettes dans des conditions contrôlées ;
- réalisation des essais en laboratoire.

Ce protocole permet d'assurer la reproductibilité des résultats et la fiabilité des mesures obtenues.

3.2 Matériaux utilisés

3.2.1. Le tuf 1

Le tuf est un matériau naturel largement disponible dans les régions désertiques. Il se caractérise généralement par :

- une teneur élevée en fines,
- une cohésion naturelle variable,
- une résistance mécanique relativement faible à l'état brut.

Malgré ces limitations, il présente l'avantage d'être facilement exploitable et économique. Toutefois, son utilisation nécessite souvent une stabilisation afin d'améliorer ses performances.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation



Figure 3.1 : Tuf

3.2.2 Localisation d'échantillon tuf 1

Le tuf n°01 provient d'une carrière située à proximité de la gare routière de Ghardaïa.



Figure 3.2 : Localisation de la carrière du tuf n01 (près de la gare routière de Ghardaïa)

3.2.3 Le tuf 2

Le tuf 2 est de même nature que le tuf 1, mais il provient d'une autre zone de prélèvement.

- Il est utilisé dans cette étude afin de comparer l'influence de l'origine du matériau sur ses caractéristiques granulométriques.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.2.4 Localisation d'échantillon tuf 2

Le tuf n°02 a été prélevé au niveau de la carrière PK 22, située sur la route reliant la RN n°07 (Brezina) à la RN n°01, au sud de l'Algérie.



Figure 3.3 : Localisation de la carrière du tuf n02 (PK 22, entre RN07 et RN01)

3.2.5 La poudrette de sable de dune

3.2.6 Définition du sable de dune

Le sable des dunes provient de l'érosion et de la sédimentation de différentes roches, suivies de phénomènes de transport fluvial et parfois éolien. Il est principalement constitué de quartz et se caractérise par une granulométrie fine.

La poudrette de sable de dune correspond à la fraction fine issue de ces formations dunaires. Elle présente une granulométrie fine et homogène, une faible plasticité et une grande disponibilité dans les régions sahariennes, notamment le Sahara. Grâce à son abondance, son coût d'extraction quasi nul et sa propreté apparente, elle constitue une ressource intéressante et une alternative aux matériaux conventionnels.

Son incorporation dans le tuf permet d'améliorer la distribution granulométrique du mélange, de réduire le volume des vides et d'augmenter ainsi la compacité globale du matériau, ce qui en fait un composant pertinent pour les matériaux de construction durables.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation



Figure 3.4 : Sable de dune

3.2.7 Localisation de sable de dune

Le sable de dune utilisé dans cette étude a été prélevé au niveau de la Route Nationale n°1 (RN1), au point kilométrique PK 631+300, situé entre Ghardaïa et El Meniaa, dans une zone caractérisée par la

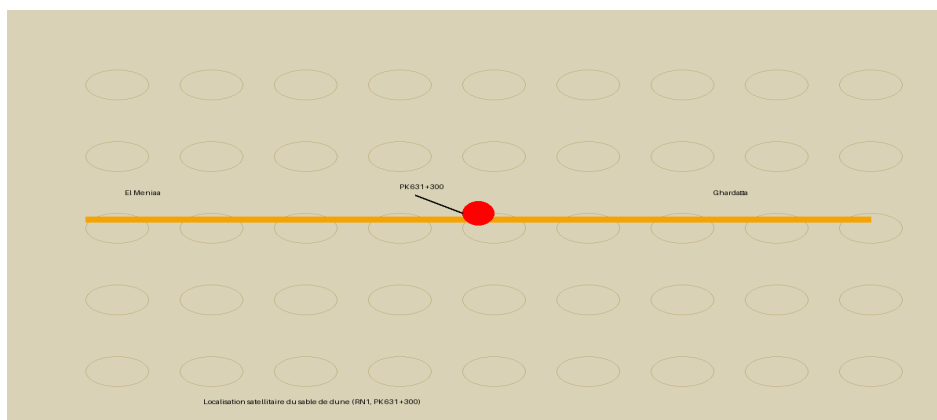


Figure 3.5 : Localisation du sable de dune au niveau de la RN1 (PK 631+300), entre Ghardaïa et El Meniaa

3.2.8 La poudrette de sable de dune

Ce matériau est caractérisé par une granulométrie fine, une texture homogène et une forte teneur en silice, ce qui en fait un matériau intéressant pour les formulations de matériaux de construction.

Afin d'obtenir une fraction encore plus fine, le sable de dune a subi une opération de broyage mécanique à l'aide d'un broyeur à boulets de laboratoire contenant des billes en acier.

Sous l'effet des chocs répétés entre les billes et les grains de sable, la taille des particules a été réduite pour produire une poudre très fine appelée : poudrette de sable de dune

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Cette poudrette a ensuite été utilisée comme addition minérale dans les différentes formulations étudiées.

- Préparation de la poudrette de sable de dune

Le sable de dune a été séché à l'air libre pendant 24 heures afin d'éliminer l'humidité superficielle.

La poudrette de sable de dune a été préparée au laboratoire par broyage mécanique à l'aide d'un broyeur à boulets : avant le broyage, une quantité de 500 g de sable de dune préalablement séché à l'étuve a été introduite dans le tambour avec une charge de 5 kg de billes en acier pour assurer une attrition optimale. Après un cycle de broyage d'une heure, le mélange a été vidé et la poudrette ultrafine a été soigneusement séparée des billes par tamisage. Une fois récupérée, cette poudrette a été utilisée directement dans nos formulations de BTS sans subir aucun autre traitement complémentaire (thermique ou chimique).



A: Micro-Deval

B: Sable de dune avec billes de broyage à l'intérieur du broyeur.

Figure 3.6 : Préparation de la poudrette de sable de dune par broyage à boulets.

3.2.9 Eau utilisée

L'eau utilisée pour la préparation des échantillons et la réalisation des essais est :

➤ eau de robinet

Elle a été utilisée pour :

- le trempage des échantillons (24 h)
- la préparation des suspensions
- les essais granulométriques

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.3 Résultats de caractérisation des matériaux utilisés

Le tuf et le sable de dune utilisés dans cette étude ont fait l'objet de plusieurs essais de caractérisation afin de déterminer leurs propriétés physiques, granulométriques et chimiques.

Le programme expérimental repose sur la réalisation d'une série d'essais conformément aux normes françaises en vigueur, avec certaines adaptations liées aux conditions du matériau et aux objectifs de l'étude.

Ces investigations comprennent notamment les analyses et essais suivants :

- Analyses granulométriques.
- Les limites d'Atterberg.
- Essai Valeur au bleu de méthylène.
- Analyses chimiques.
- Essais de Proctor.
- Essai compression simple.

3.3.1. Analyse granulométrique de tuf 1

➤ Résultats et courbe granulométrique

Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse granulométrique tuf 1

Tamis (mm)	Poids refus partiels(g)	Poids refus cumulés(g)	Poids refus cumulés (%)	Tamisât (%)
5	101,64	10,16	89,84	38
2	70,25	17,19	82,81	39
1	29,72	20,16	79,84	49
0,4	36,24	23,79	76,22	76
0,2	269,17	50,70	49,30	80
0,1	104,53	61,16	38,85	83
0,008	6,1	61,77	38,24	90

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie tuf 1

➤ Résultats granulométrique

Tableau 3.2 : Analyse granulométrique par sédimentométrie tuf 1

Température	Temps	Durée de chute	R'=R-1000 R : lecture au densimètre	Correction	lecture corrigée R1=R'+C ou R1=R'-C	Diamètre	% des éléments(D) sur l'ensemble de l'échantillon
19.8°C	8h10	30"	22	-0,036	21,964	0,075	38
19.8°C	8h11	1'	21	-0,036	20,964	0,055	36
19.8°C	8h12	2'	20	-0,036	19,964	0,038	34
19.8°C	8h15	5'	17	-0,036	16,964	0,025	29
19.8°C	8h20	10'	15	-0,036	14,964	0,017	26
19.8°C	8h30	20'	14	-0,036	13,964	0,012	24
19.6°C	8h50	40'	12	-0,072	11,928	0,008	21
19.6°C	9h30	80'	10	-0,072	9,828	0,006	17
19.6°C	10h50	160'	7	-0,072	6,928	0,004	12
19.6°C	13h30	320'	5	-0,072	4,928	0,003	8
20°C	24h	1440'	3	0,000	5	0,002	5
-	48h	-	-	-	-	0,001	-
-	72h	-	-	-	-	0,0005	-

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} \times p \quad \text{avec } y = \% \text{ du passant à } 0,080 \text{ mm} = 38\%$$

$$R1 = R' + C \quad \text{Si } T^\circ > a \text{ } 20^\circ\text{C}$$

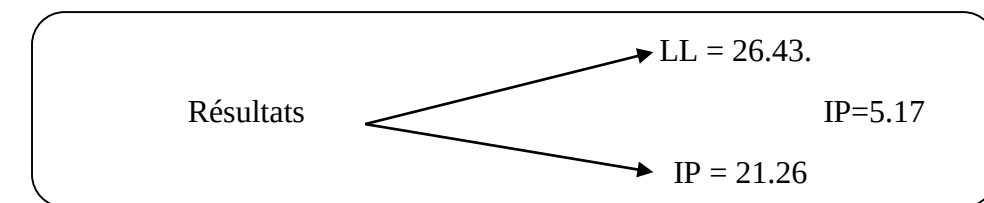
$$R1 = R' - C \quad \text{Si } T^\circ < a \text{ } 20^\circ\text{C}$$



Figure 3.7 :La courbe Analyse granulométrique de tuf 1

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.3.2 Résultat de limites d'Atterberg tuf 1



LIMITE DE PLASTICITE

Tableau 3.3: Resultats de la limite de plasticite du tuf 01

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
N° de la tare	X61		A5		R	
Poids total humide	36,25		39,8		37,22	
Poids total sec	36,41		39,55		36,97	
Poids de la tare	36,27		38,37		35,81	
Poids de l'eau	0,24		0,25		0,25	
Poids du sol sec	1,14		1,18		1,16	
Teneur en eau (%)	21,05		21,19		21,55	
Moyenne	21,05		21,19		21,55	
LP 21,26						
LIMITE DE LIQUIDITE						
	1er Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		25		31	
N° de la tare	N	K1	K8	ZDE	B6	D6
Poids total humide	20, 9	18,36	20,38	19,47	17,90	18,37
Poids total sec	18,23	16,07	17,88	17,05	15,86	16,35
Poids de la tare	8,53	7,79	8,46	7,83	7,79	8,48
Poids de l'eau	2,67	2,29	2,5	2,42	2,04	2,02
Poids du sol sec	9,7	8,28	9,42	9,22	8,07	7,87
Teneur en eau (%)	427,53	27,66	26,54	26,25	25,28	25,67
Moyenne	27,59		26,39		25,47	

W.L=26,43

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

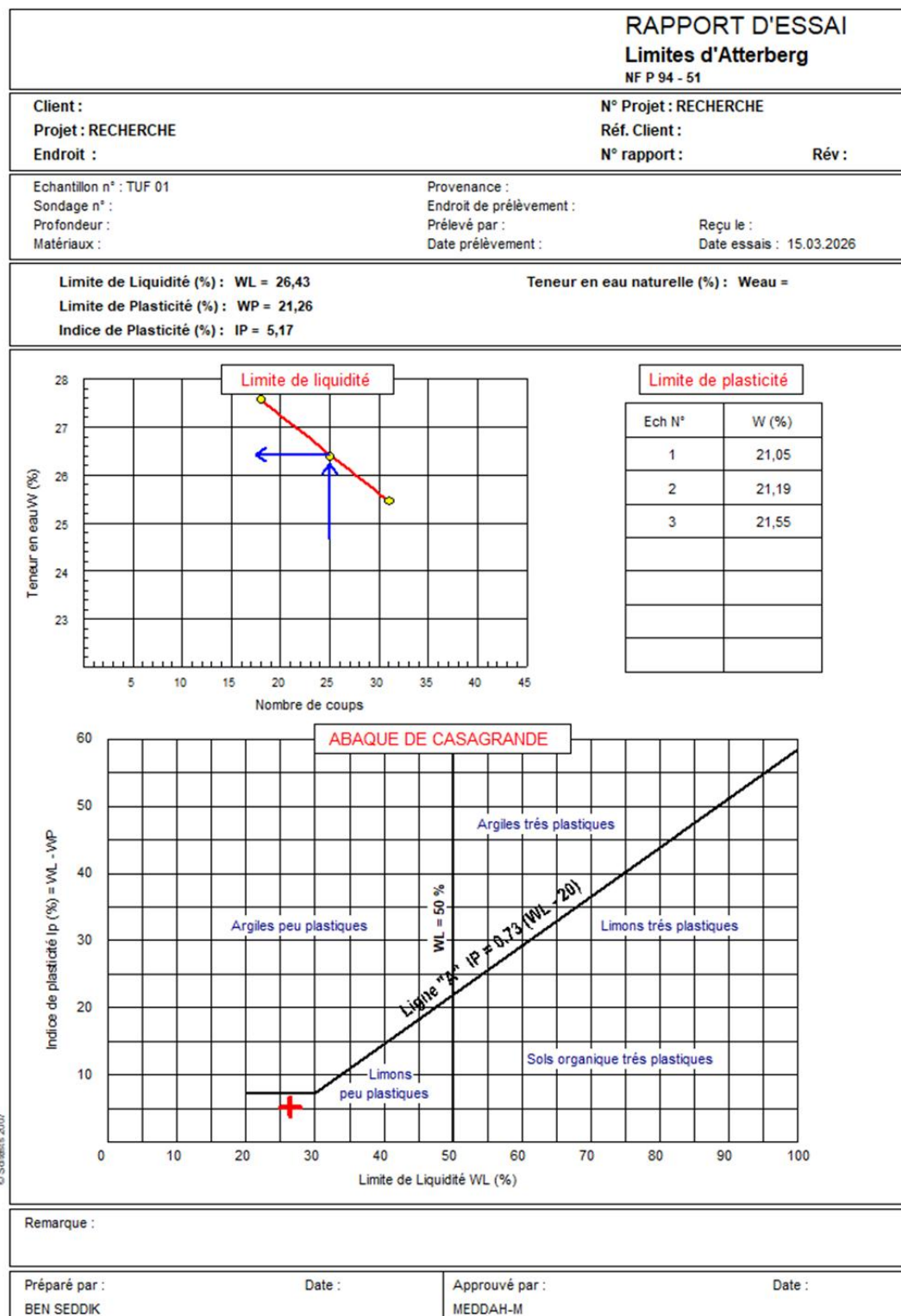


Figure 3.8 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité du tuf 01

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.3.3 Résultat essai Valeur au bleu de méthylène de tuf 1

VBS = 1,00 g/100g

3.3.4 Analyse chimique du tuf 1 étudié

➤ Résultats chimique

Tableau 3.4: Analyse chimique du Tuf 1

Echantillon	Caractéristique	Tuf
Insolubles NFP 15-461	Creuset + précipite	29.724
	Creuset vide	29.199
	Poids du résidu	0.525
	% insolubles	52.5
SULFATES BS 1377	Creuset + précipite	16.261
	Creuset vide	16.121
	Poids du résidu	0.080
	% SO ₃ ²	2.74
CARBONATES NFP 15-461	V NaOH	
	% CaCO ₃	34

3.3.5 Résultat Essai Proctor

➤ Résultats et courbe de tuf 1

w_{opt} (%)	10.9
Densité	1.89

Tableau 3.5: Résultats de l'essai Proctor modifié du tuf 1

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

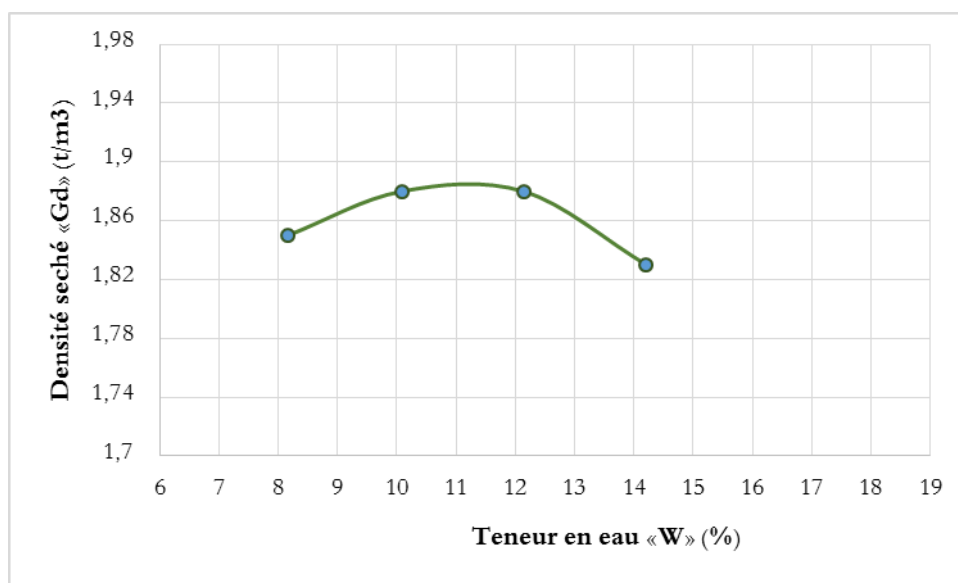


Figure 3.9: Courbe Proctor Modifié (100 % de Tuf 1)

3.3.6 Essai de compression simple tuf 1

- Résultat de l'essai compression simple de tuf 1

Tableau 3.6 : Résultats de l'essai compression simple de tuf 1

Rc (Kg/cm²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf	14,14	9,61	7,93



Figure 3.10 : éprouvette après l'écrasement

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.4 Caractérisation du tuf 2

3.4.1 Analyse granulométrique du tuf 2

3.4.1.1 Analyse granulométrique par tamisage de tuf 2

Tableau 3.7: Résultats de l'analyse granulométrique tuf 2

Poids de <i>L'Echantillon</i> (g)	Tamis (mm)	Poids Refus Partiels (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisé (%)
	0	0	0	0	0	100
1000	5	53,72	53,72	5,37	94,63	95
	2	80,48	134,2	13,42	86,58	87
	1	44	178,2	17,82	82,18	82
	0,4	48,04	226,24	22,62	77,38	77
	0,2	149,33	375,57	37,56	62,44	62
	0,1	31,22	406,79	40,68	59,32	59
	0,008	2,7	409,49	40,95	59,05	59

3.4.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie tuf 2

➤ Résultats granulométrique

Tableau 3.8 : Analyse granulométrique par sédimentométrie tuf 2

Température	Temps	Durée de chute	R'=R-1000 R : lecture au densimètre	Correction	lecture corrigée	Diamètre	% des éléments(D) sur l'ensemble de l'échantillon
-------------	-------	----------------------	--	------------	---------------------	----------	--

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

					R1=R'+C ou R1=R'-C		
26.2°C	8h10	30 "	21	+1.310	22.310	0.075	59
26.2°C	8h11	01'	20	+1.310	21.310	0.055	56
26.2°C	8h12	02'	19	+1.310	20.310	0.038	54
26.2°C	8h15	05'	18	+1.310	19.310	0.025	51
26.2°C	8h20	10'	16	+1.310	17.310	0.017	46
26.2°C	8h30	20'	14	+1.310	15.310	0.012	41
25.8°C	8h50	40'	12	+1.212	13.212	0.008	35
25.8°C	9h30	80'	10	+1.212	11.212	0.006	30
24.8°C	10h50	160'	08	+0.974	8.974	0.004	24
24.2°C	13h30	320'	06	+0.836	6.836	0.003	18
25.8°C	24h	1440'	3.5	+1.212	4.712	0.002	12
25.8°C	48h	-	01	+1.212	2.212	0.001	06
-	72h	-	-	-	-	0.0005	

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} x p \quad \text{avec } y = \% \text{ du passant à } 0.080 \text{ mm} = 59\%$$

100

R1= R' + C Si T° > à 20 ° C

R1= R' - C Si T° < à 20 ° C

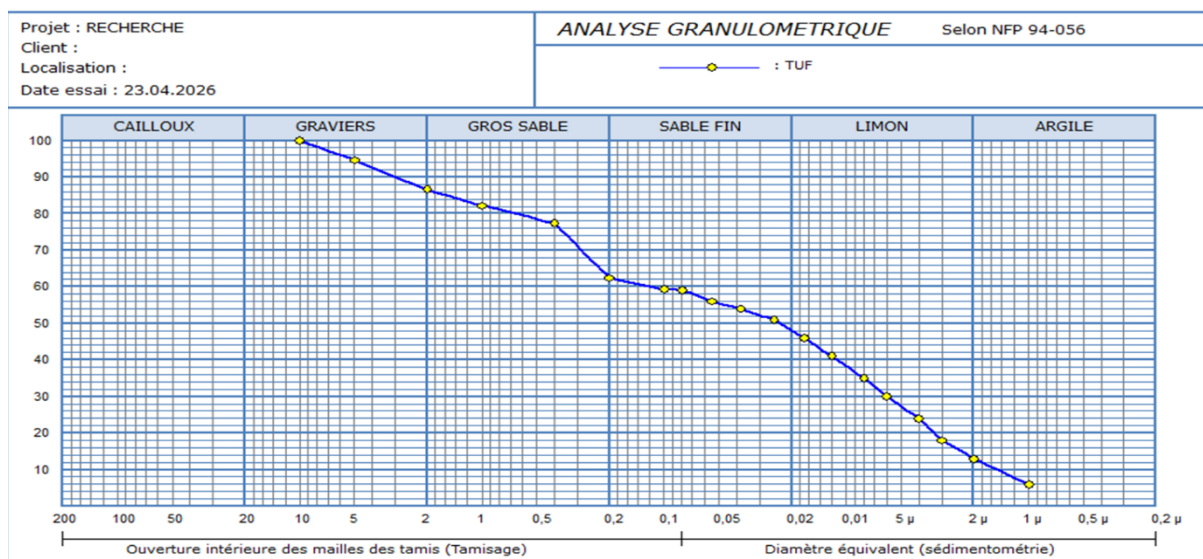


Figure 3.11 : La courbe Analyse granulométrique tuf 2

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.4.2 Résultat de limites d'Atterberg tuf 2

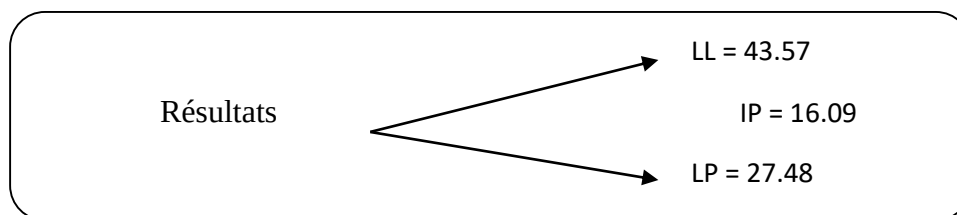


Tableau 3.9 : Résultats de la limite de plasticité du tuf 02

LIMITE DE PLASTICITE

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
N° de la tare	X4		W		A	
Poids total humide	35,97		37,02		32,38	
Poids total sec	35,85		36,88		32,25	
Poids de la tare	35,42		36,37		31,77	
Poids de l'eau	0,12		0,14		0,13	
Poids du sol sec	0,43		0,51		0,48	
Teneur en eau (%)	27,91		27,45		27,08	
Moyenne	27,91		27,45		27,08	
LP = 27.48						

Tableau 3.10 : Résultats de la limite de liquidité du tuf 02

LIMITE DE LIQUIDITE						
	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		25		31	
N° de la tare	sol	B10	M10	L5	L1	B36
Poids total humide	20,89	18,53	18,77	18,96	15,64	18,05
Poids total sec	17,06	15,45	15,43	15,77	13,55	14,98
Poids de la tare	8,5	8,5	7,75	8,45	8,63	7,77
Poids de l'eau	3,83	3,08	3,34	3,19	2,09	3,07
Poids du sol sec	8,56	6,95	7,68	7,32	4,92	7,21
Teneur en eau (%)	44,74	44,32	43,49	43,58	42,48	42,58
Moyenne	44,53		43,53		42,53	

W.L=43,57

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

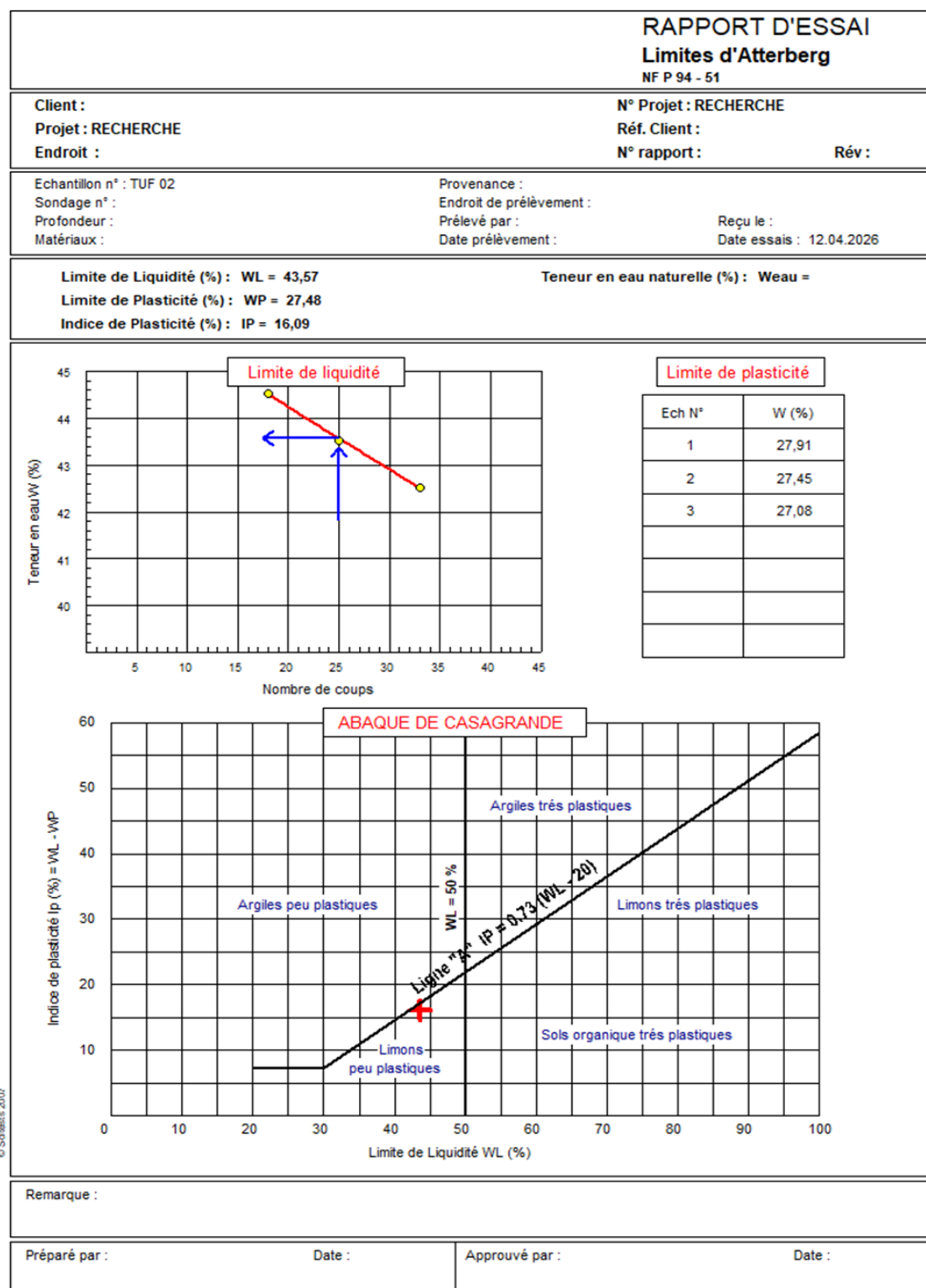


Figure 3.12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité du tuf 02

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.4.3 Résultat essai Valeur au bleu de méthylène de tuf 2

VBS = 5,50 g/kg

3.4.4 Analyse chimique du tuf 2 étudié

➤ Résultats chimique

Tableau 3.11 : Analyse chimique du Tuf 2

Echantillon	Caractéristique	Tuf
Insolubles NFP 15-461	Creuset + précipite	30.384
	Creuset vide	29.956
	Poids du résidu	0.428
	% insolubles	42.8
SULFATES BS 1377	Creuset + précipite	15.448
	Creuset vide	15.278
	Poids du résidu	0.170
	% SO ₃ ²	5.38
CARBONATES NFP 15-461	V NaOH	
	% CaCO ₃	38

3.4.5 Essai Proctor modifié

➤ Résultats et courbe de tuf 2

Tableau 3.12 : Résultats De L'essai Proctor Du Tuf 2

$w_{opt} (%)$	12,4
Densité	1,89

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

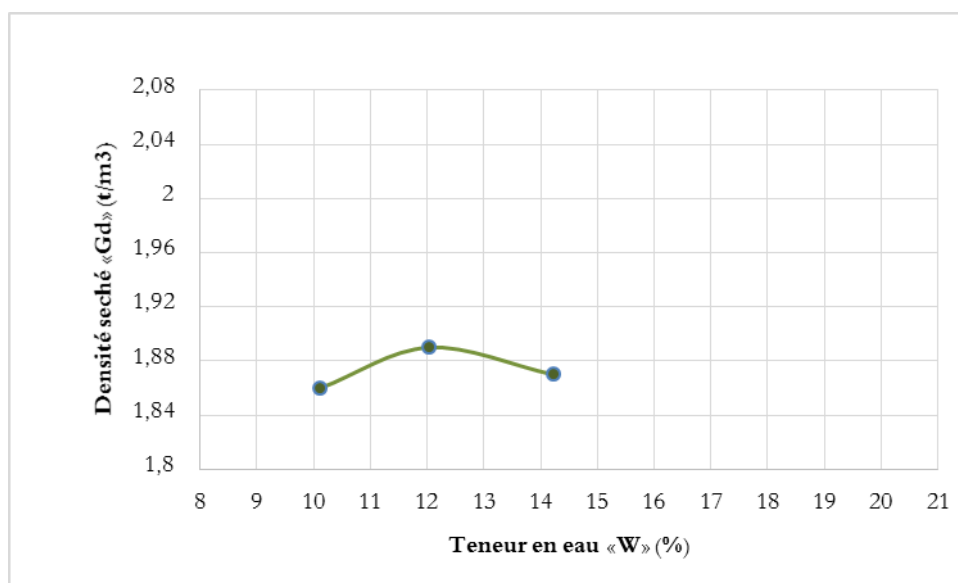


Figure 3.13 : Courbe Proctor Modifié (100 % de Tuf 2)

3.4.5 Essai de compression simple tuf 2

➤ Résultat de l'essai compression simple de tuf 2

Tableau 3.13 : Résultat de l'essai compression simple de tuf 2

Rc (Kg/cm²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf	12,86	9,51	8,88

3.5 Caractérisation de Sable de dune et de la poudrette

3.5.1 Analyse granulométrique de sable de dune

➤ Résultats et courbe granulométrique

Tableau 3.14 : Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune

Tamis	refus partiel	refus cumulés	pourcentage refus	pourcentage passant
2	0	0	0	100
1	0	0	0	100
0.500	6.4	6.4	3.2	96.8
0.250	73.2	79.6	93.8	60.2
0.125	67.7	147.3	73.65	26.35
0.063	48.6	195.9	97.95	2.05

N° De Dossier interne : ETUDE RECHERCHE

DATE :

SABLES

GRAVILLONS

CAILLoux

Sables admissibles		Fuseaux		Modules de finesse	
Préférentiel	un peu trop fin	A	B	2,20 à 2,80	1,80 à 2,20
un peu trop grossier <td>C</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2,80 à 3,20</td>	C				2,80 à 3,20

Module de Finesse **0,74**

FUSEAUX PROPOSES POUR LA GRANULARITE DES SABLES A BETON SELON DTR BE 2.1 : 2010

- 50 -

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.5.2 Analyse granulométrique par tamisage de poudrette sable de dune

3.5.2.1 Analyse granulométrique par tamisage de poudrette sable de dune.

Tableau 3.15: Analyse granulométrique par tamisage de poudrette sable de dune

Poids de <i>L'Echantillon</i> (g)	Tamis (mm)	Poids Refus Partiels (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisat (%)
	0	0	0	0	0	100
500	5	0	0	0,00	100	100
	2	0	0	0,00	100	100
	1	0	0	0,00	100	100
	0,4	4,98	4,98	1,00	99	99
	0,2	23,93	28,9	5,78	94,22	94
	0,1	27,57	56,47	11,29	88,71	89
	0,008	4,78	61,25	12,25	87,75	88

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.5.2.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie de poudrette sable de dune.

Tableau 3.16: Analyse granulométrique par sédimentométrie de poudrette sable de dune

Température ° C	Temps	Durée de chute	R'=R - 1000 R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée R1=R'+C Ou R1=R'-C	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
26.2°C	8h20	30 "	22	+1.310	22.310	0.075	88
26.2°C	8h21	01'	20	+1.310	21.310	0.055	80
26.2°C	8h22	02'	17	+1.310	18.310	0.038	69
26.2°C	8h25	05'	15	+1.310	16.310	0.025	62
26.2°C	8h30	10'	12	+1.310	13.310	0.017	50
26.2°C	8h40	20'	10	+1.310	11.212	0.012	42
25.8°C	9h00	40'	08	+1.212	9.212	0.008	35
25.8°C	9h40	80'	06	+1.212	6.974	0.006	26
24.8°C	11h00	160'	04	+0.974	4.974	0.004	19
24.2°C	13h40	320'	03	+0.836	3.836	0.003	08
25.8°C	24 h	1440'	01	+1.212	2.712	0.002	-
25.8°C	48h	-	-	+1.212	-	0.001	-
-	72 h	-	-	-	-	0.0005	

Remarque :

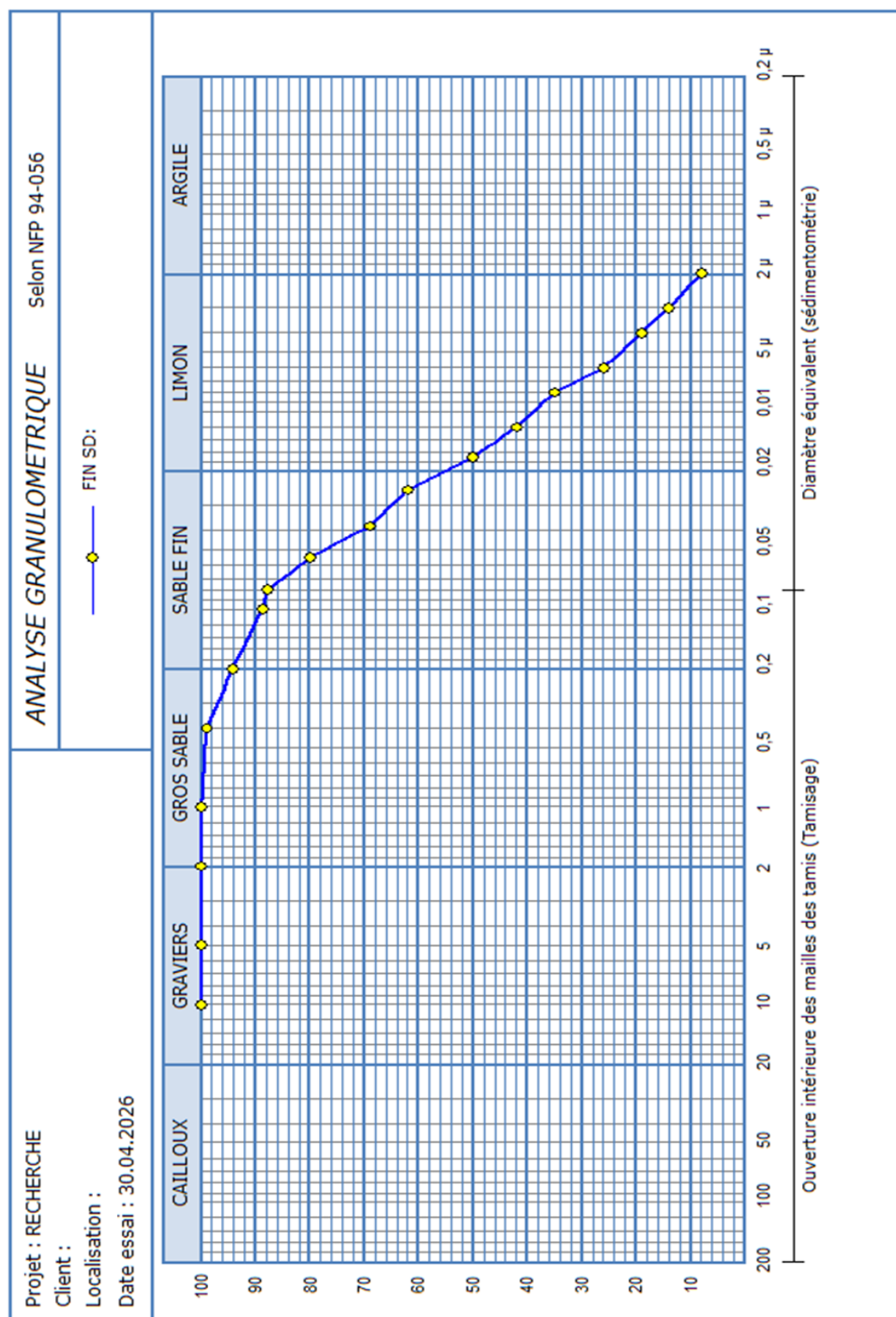
$$p' = \frac{y}{100} \times p \quad \text{avec } y = \% \text{ du passant à } 0.080 \text{ mm} = 88\%$$

100

$$R1 = R' + C \quad \text{Si } T^\circ > \text{à } 20^\circ \text{ C}$$

$$R1 = R' - C \quad \text{Si } T^\circ < \text{à } 20^\circ \text{ C}$$

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation



CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.6 Etude des formulations du BTS

3.6.1 Etude des mélanges : Tuf + poudrette de Sable de dune

3.6.1.1 Préparation des mélanges

Après la caractérisation des deux matériaux étudiés, à savoir le tuf et la poudrette de sable de dune, plusieurs formulations ont été préparées afin d'évaluer l'influence de la poudrette sur les performances du béton de terre stabilisée.

La quantité totale de chaque mélange a été fixée à **2500 g**. Le pourcentage du ciment a été maintenu constant à **3 %**, tandis que la proportion de la poudrette de sable de dune a été variée de **5 %, 10 % et 15 %**. La quantité de tuf a été ajustée de manière à compléter la masse totale de chaque formulation.

3.6.2.2 formulations étudiées :

Tableau 3.17 : formulations des mélanges étudiées

Formulation	Tuf (%)	Poudrette (%)
F1	95	5
F2	90	10
F3	85	15

Tableau 3.18: Masses correspondantes pour 2500 g

Formulation	Tuf (g)	Poudrette (g)
F1	2375	125
F2	2250	250
F3	2125	375

3.6.2.3 Mode opératoire

Les différentes formulations ont été préparées en respectant les proportions définies pour chaque mélange.

Dans un premier temps, les quantités de tuf, de ciment et de poudrette de sable de dune ont été pesées séparément à l'aide d'une balance de précision.

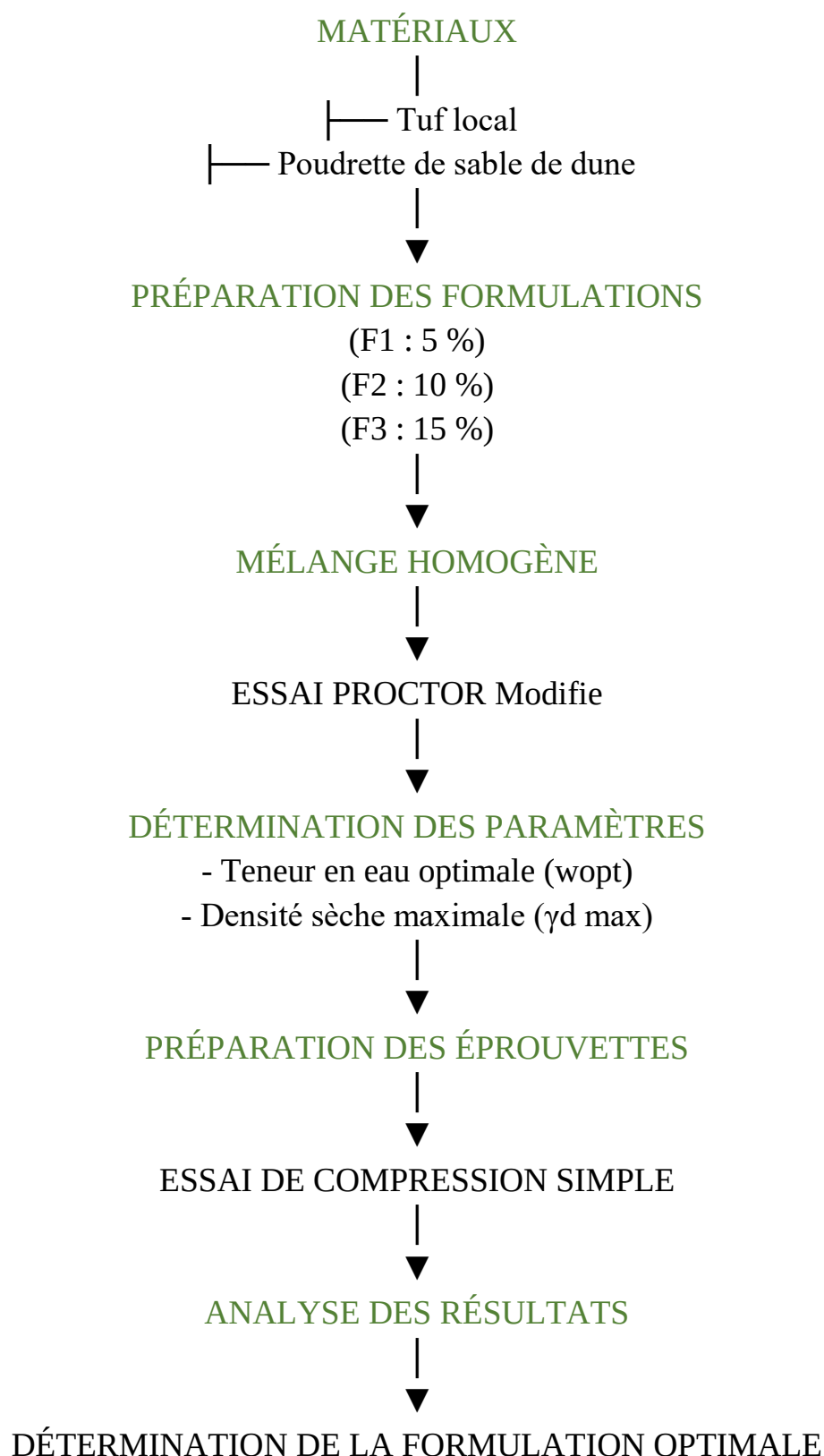
Ensuite, les constituants secs ont été mélangés manuellement jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène afin d'assurer une répartition uniforme des particules fines dans l'ensemble du matériau.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Après homogénéisation à sec, l'eau a été ajoutée progressivement tout en poursuivant le malaxage, jusqu'à atteindre la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor. Cette étape permet d'obtenir une consistance favorable au compactage.

Le mélange humide a ensuite été introduit dans les moules en plusieurs couches successives. Chaque couche a été soigneusement compactée afin de limiter la présence de vides et d'améliorer la densité du matériau, Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans des conditions appropriées de laboratoire pendant la période de cure prévue avant la réalisation des essais mécaniques.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation



CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation



A : Pesée des matériaux



B : Homogénéisation des constituants à sec



C : Ajout progressif de l'eau au mélange



D : Malaxage du mélange



E : compactage du mélange dans le moule



F : Éprouvette après démoulage et surfacage

Figure 3.16 : Les principales étapes de préparation des formulations sont illustrées dans les figures suivantes

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

- ❖ Après la préparation des différents mélanges, les échantillons ont été soumis à l'essai Proctor afin de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

3.7 Résultats des formulations à base du tuf 1

3.7.1 Formulation tuf 1 + ciment

3.7.1.1 Essai Proctor tuf 1 + 3% ciment

Note : Le choix du dosage de **3% de ciment** est un choix expérimental propre à notre étude, adopté afin d'évaluer l'effet d'une faible pré-stabilisation sur les performances du tuf.

- Résultats et courbe de tuf 1 et 3% ciment.

Tableau 3.19: Résultats de l'essai Proctor modifié du tuf 1 avec 3% de ciment

Wopt (%)	12.6
Densité	1.85

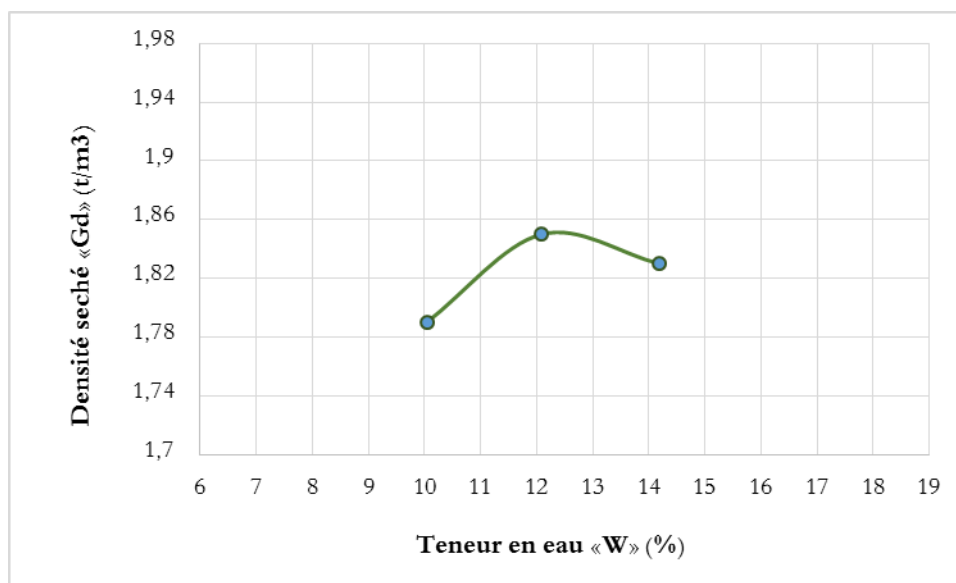


Figure 3.17 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 3% de ciment)

3.7.1.2 Essai de compression simple tuf 1 et 3% ciment

- Résultat de l'essai compression simple de tuf 1

Tableau 3.20 : Résultat compression simple tuf 1 et 3% ciment

Rc (Kg/cm²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+3% ciment	17,67	11,94	8,76

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.7.2 Résultats de l'essai Proctor tuf 1 pour la formulation F1 (5 %)

Texte d'introduction

L'essai Proctor normal a été réalisé sur la formulation contenant 5 % de poudrette de sable de dune, afin de déterminer la teneur en eau optimale ainsi que la densité sèche maximale du mélange.



Figure 3.18 : mélanges Tuf 1+ poudrette de Sable de dune 5%

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

3.7.2.1 Essai Proctor (5%)

Tableau 3.21 : tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (5 %)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
8	1.85
10	1.88
12	1.88
14	1.83

➤ (5 %)

Tableau 3.22 : Résultats de l'essai Proctor de la formulation F1 (5 %)

Formulation	w_{opt} (%)	Densité sèche (g/cm ³)
F1 (5 %)	11,2	1.89

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

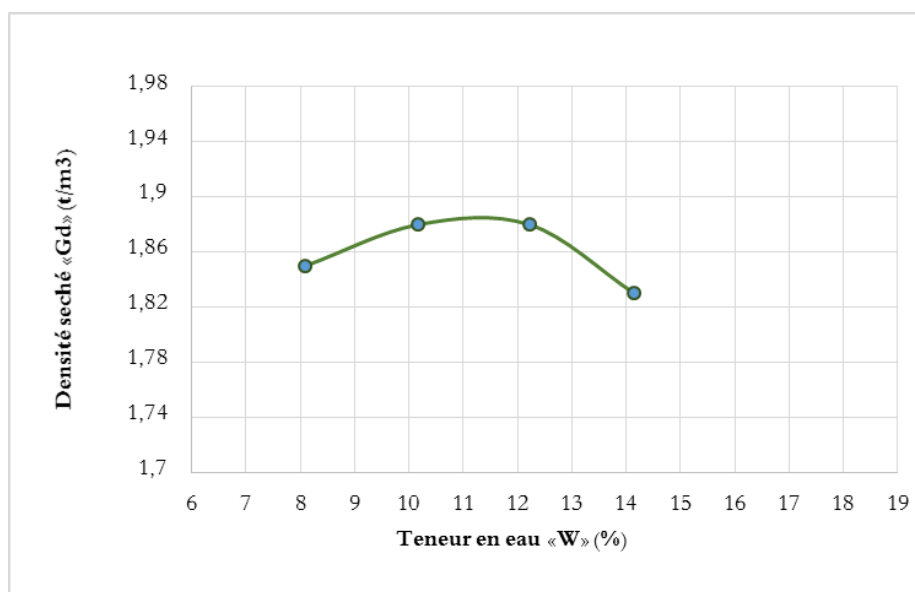


Figure 3.19 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 5% de poudrette de sable de dune)

3.7.2.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F1 (5 %)

Tableau 3.23 : de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F1 (5%)

Rc (Kg/cm²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+5% poudrette de sable de dune	18,52	11,44	6,47

❖ Interprétation

3.7.2.3 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple – Formulation F1 (5 %))

L'essai Proctor réalisé sur la formulation F1 contenant 5 % de poudrette de sable de dune a permis de déterminer une teneur en eau optimale (**Wopt**) de 11,2 % ainsi qu'une densité sèche maximale de 1,89 g/cm³. Cette densité relativement élevée traduit une bonne compacité du mélange, résultant d'un meilleur arrangement granulaire grâce à l'ajout de la poudrette de sable de dune, dont les particules fines comblent les vides entre les grains du tuf.

Les résultats de l'essai de compression simple confirment cette amélioration. En effet, la résistance mécanique atteint 18,52 kg/cm² pour une compacité C = 100 %, puis diminue à 11,44kg/cm² pour C = 98 % et à 6,47kg/cm² pour C = 95 %. Cette évolution montre clairement que la résistance à la compression dépend fortement du degré de compacité du matériau.

Le lien entre les deux essais est donc évident : la densité sèche maximale obtenue lors de l'essai Proctor correspond à un état de compacité élevé, qui favorise une meilleure cohésion interne du matériau et, par conséquent, une résistance mécanique plus importante. À l'inverse, toute

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

diminution de la compacité entraîne une augmentation des vides et une baisse significative de la résistance.

Par ailleurs, la faible teneur en eau optimale indique que le mélange nécessite une quantité d'eau modérée pour atteindre sa compacité maximale, ce qui contribue également à améliorer ses performances mécaniques.

En conclusion, l'ajout de 5 % de poudrette de sable de dune améliore à la fois la compacité et la résistance mécanique du matériau. La formulation F1 présente ainsi un comportement satisfaisant, confirmant l'importance du compactage et de l'optimisation de la formulation dans les bétons de terre stabilisée.

3.7.3 Résultats de l'essai Proctor pour la formulation F2 (10 %)



Figure 3.20 : mélanges Tuf + poudrette de Sable de dune 10%

3.7.3.1 Essai Proctor 10 %

Tableau 3.24 : tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (10 %)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
8	1.84
10	1.89
12	1.89
14	1.83

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

➤ (10%)

Tableau 3.25 : Résultats de l'essai Proctor de la formulation F2 (10%)

Formulation	W_{opt} (%)	Densité sèche (g/cm^3)
F2 (10%)	11,1	1.90

Courbe Proctor 10%

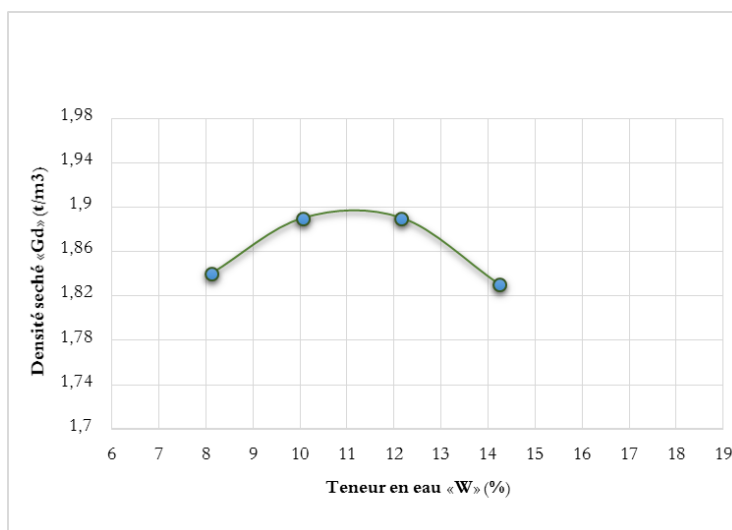


Figure 3.21 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 5% de poudrette de sable de dune)

3.7.3.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F2 (10 %)

Tableau 3.26 : l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F2 (10 %)

Rc (Kg/cm²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+10% poudrette de sable de dune	25,06	16,66	8,28

3.7.3.3 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple –F2 (10 %))

L'essai Proctor réalisé sur la formulation F2 contenant 10 % de poudrette de sable de dune a permis de déterminer une teneur en eau optimale (**W_{opt}**) de 11,1 % et une densité sèche maximale de 1,90 g/cm³. Par rapport à la formulation F1, on observe une légère augmentation de la densité sèche, traduisant une amélioration de la compacité du mélange grâce à une meilleure organisation des particules et à la réduction des vides internes. La teneur en eau optimale reste quasiment stable, ce qui montre que l'ajout de 10 % de poudrette n'influence pas significativement le besoin en eau pour le compactage maximal.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Les résultats de l'essai de compression simple montrent que la résistance mécanique augmente avec la compacité du matériau. La résistance maximale enregistrée est de 25,06 kg/cm² pour une compacité C = 100 %, puis elle diminue progressivement à 16,66 kg/cm² pour C = 98 % et atteint 8,28 kg/cm² pour C = 95 %. Cette diminution s'explique par l'augmentation des vides dans le mélange lorsque la compacité baisse, ce qui réduit la cohésion entre les grains et affaiblit le comportement mécanique du matériau.

Par rapport à la formulation F1, la formulation F2 présente des résistances globalement satisfaisantes et cohérentes avec les résultats obtenus à l'essai Proctor. L'ajout de la poudrette de sable de dune améliore la répartition granulaire du mélange, favorise un meilleur arrangement des particules et contribue ainsi à obtenir une structure plus compacte et plus résistante.

3.7.4 Résultats de l'essai Proctor pour la formulation F3 (15 %)



Figure 3.22 : mélanges Tuf + poudrette de Sable de dune 15%

3.7.4.1 Essai Proctor 15%

Tableau 3.27 : tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (15 %)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
8	1.83
10	1.88
12	1.88
14	1.85

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

➤ (15%)

Tableau 3.28 : Résultats de l'essai Proctor de la formulation F3 (15%)

Formulation	w_{opt} (%)	Densité sèche (g/cm ³)
F3(15%)	11.1	1.88

Courbe Proctor 15%

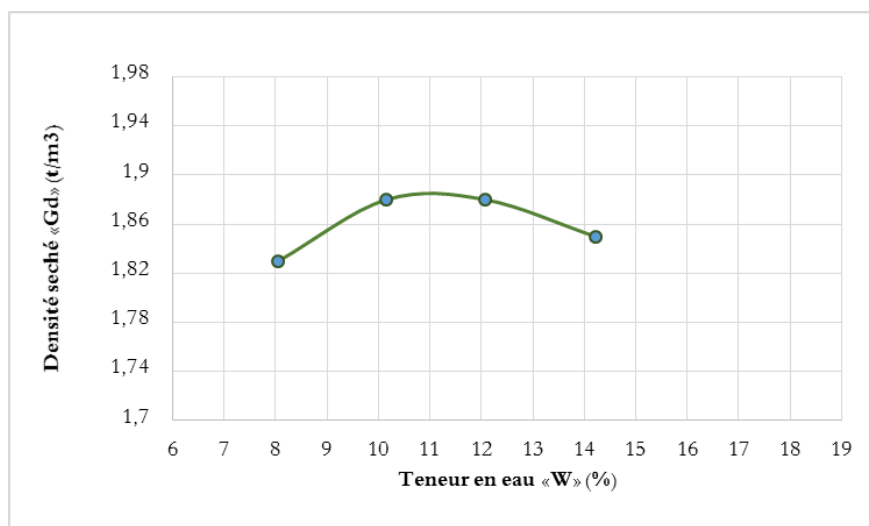


Figure 3.23 : Courbe Proctor Modifiée (Tuf 1 avec 15% de poudrette de sable de dune)

3.7.4.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F3 (15 %)

Tableau 3.29 : Résultats de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F3 (15%)

Rc (Kg/cm ²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+15%poudrette de sable de dune	18,24	11,26	6,25

3.7.4.3 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple –F3 (15 %))

L'essai Proctor réalisé sur la formulation F3 contenant 15 % de poudrette de sable de dune a permis de déterminer une teneur en eau optimale (w_{opt}) de 11,1 % et une densité sèche maximale de 1,88 g/cm³. Par rapport à la formulation F2 (10 %), on observe une légère diminution de la densité sèche maximale, alors que la teneur en eau optimale reste pratiquement constante.

Cette diminution peut être expliquée par l'excès de fines apporté par le taux élevé de poudrette de sable de dune, qui peut perturber l'arrangement granulaire optimal du mélange et augmenter les vides internes, ce qui réduit la compacité globale du matériau.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Les résultats de l'essai de compression simple confirment ce comportement. La résistance atteint 18,24 kg/cm² pour une compacité C = 100 %, puis diminue à 11,26kg/cm² pour C = 98 % et à 6,25 kg/cm² pour C = 95 %. Cette variation met en évidence l'influence directe de la compacité sur les performances mécaniques du matériau, comme observé pour les formulations précédentes.

Ainsi, bien que la formulation F3 reste acceptable, les résultats montrent que l'augmentation du taux de poudrette au-delà de 10 % n'améliore pas la compacité et peut même entraîner une légère dégradation des performances. Par conséquent, la formulation F2 (10 %) semble représenter le dosage le plus optimal pour l'ensemble des performances étudiées.

3.7.5 Analyse comparative des formulations (F1, F2 et F3)

➤ Tableau comparatif des résultats

Tableau 3.30 : tableau comparatif des formulations du tuf 1

Formulation	Wopt (%)	γ_d max (g/cm ³)	Rc C=100 (kg/cm ²)	Rc C=98 (kg/cm ²)	Rc C=95 (kg/cm ²)
F1 (5 %)	11.2	1.89	8.52	7.55	3.80
F2 (10 %)	11.1	1.90	8.40	6.66	3.29
F3 (15 %)	11.1	1.88	8.46	5.75	4.36

➤ Analyse des résultats

L'analyse des résultats montre que la teneur en eau optimale (Wopt) reste globalement stable pour les trois formulations, avec des valeurs comprises entre **11,1 % et 11,2 %**, ce qui indique que l'ajout de poudrette de sable de dune n'influence pas significativement les besoins en eau du matériau.

Concernant la densité sèche maximale obtenue à l'essai Proctor, on observe une légère amélioration pour la formulation **F2 (10 %)** avec **1,90 g/cm³**, comparée à **F1 (1,89 g/cm³)**, suivie d'une légère baisse pour **F3 (1,88 g/cm³)**. Cela montre qu'un dosage intermédiaire de poudrette permet une meilleure compacité, tandis qu'un excès peut perturber l'arrangement granulaire et augmenter les vides.

Du côté des résistances mécaniques, les résultats de compression simple montrent une tendance similaire. La formulation **F1** présente une bonne résistance initiale, mais **F2** montre un comportement global plus équilibré. En revanche, **F3** affiche une diminution notable de la résistance, notamment à C = 98 %, ce qui confirme que l'excès de fines peut nuire à la cohésion du matériau.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.8 Résultats des formulations a base du tuf 2

3.8.1 Tuf 2 avec 3% de ciment

3.8.1.1 L'essai Proctor est utilisé tuf 2 et 3% ciment

Tableau 3.31 : résultats de l'essai Proctor modifié du tuf 2 avec 3% de ciment

W %	11,4
Densité (T/m3)	1,86

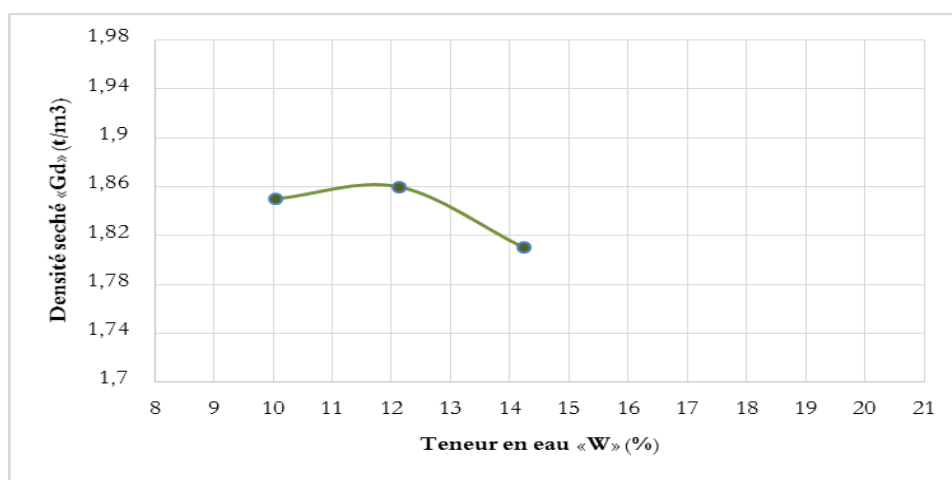


Figure 3.24 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 3% de ciment)

3.8.1.2 Essai de compression simple tuf 2 et 3% ciment

Tableau 3.32 : Résultat de compression simple tuf 2 et 3% ciment

Rc (Kg/cm ²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf	51,46	29,09	18,65



Figure 3.25 : Après écrasement

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.8.2 Résultats de l'essai Proctor tuf 2 pour la formulation F1 (5 %)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

3.8.2.1 Essai Proctor 5 %

Tableau 3.33 : tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (5 %)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
10,1	1,85
12,2	1,88
14,3	1,79

➤ (5 %)

Tableau 3.34 : Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F1 (5 %)

Formulation	w _{opt} (%)	Densité sèche (g/cm ³)
F1 (5 %)	11,7	1,88

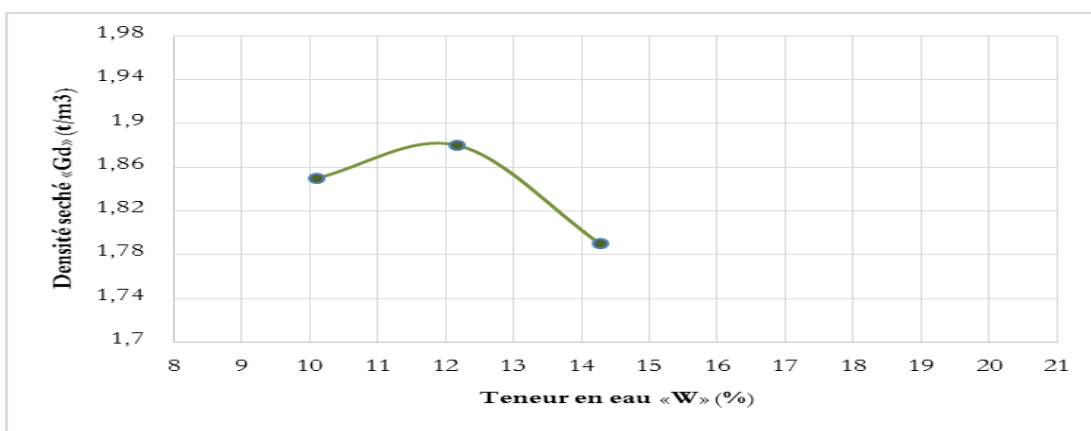


Figure 3.26 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 5% de poudrette de sable de dune)

3.8.2.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F1 (5 %)

Tableau 3.35 : de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F1 (5%)

Rc (Kg/cm ²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+ 5%poudrette de sable de dune	31,03	19,14	15,07

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.8.2.3 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple – F1(5 %))

L'essai Proctor réalisé sur la formulation F1 contenant 5 % de poudrette de sable de dune a donné une teneur en eau optimale de **11,7 %** et une densité sèche maximale de **1,88 g/cm³**, indiquant une bonne compacité du mélange.

Les résultats de l'essai de compression simple montrent une résistance élevée à forte compacité, avec **31,03 kg/cm²** pour C = 100 %, puis une diminution progressive à **19,14 kg/cm²** pour C = 98 % et **15,07 kg/cm²** pour C = 95 %.

Cette évolution confirme que l'augmentation de la compacité améliore directement la résistance mécanique du matériau. Ainsi, l'ajout de 5 % de poudrette de sable de dune permet d'obtenir un mélange compact et présentant de bonnes performances mécaniques.

3.8.3 Résultats de la formulation F2 (10 %)

3.8.3.1 Essai Proctor 10%

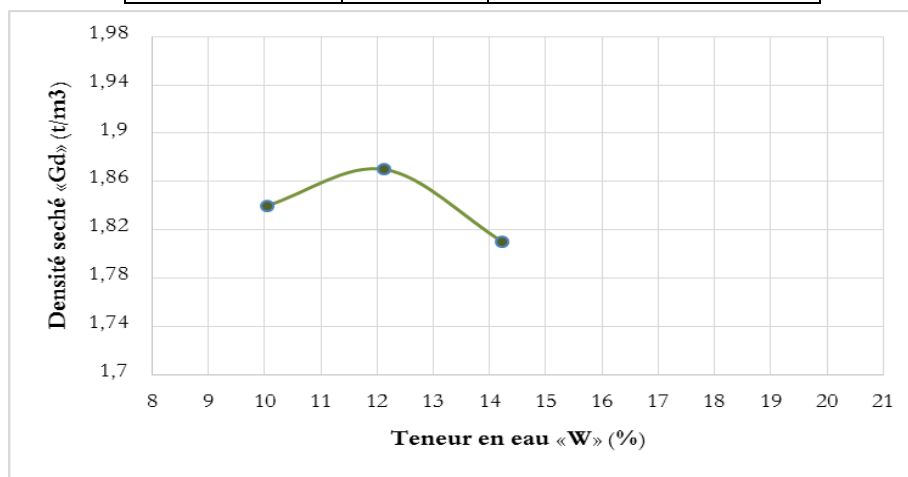
Tableau 3.36 : tableau détaillé de résultats de la formulation F1 (10 %)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
10	1,84
12,1	1,87
14,2	1,81

➤ (10 %)

Tableau 3.37 : Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F1 (5 %)

Formulation	w_{opt} (%)	Densité sèche (g/cm ³)
F1 (5 %)	11,8	1,87



CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Figure 3.27 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 1 avec 10% de poudrette de sable de dune)

3.8.3.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F2 (10%)

Tableau 3.38 : Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F2(10%)

Rc (Kg/cm ²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+10%poudrette de sable de dune	45,39	21,31	12,17

3.8.3.2 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple –F2(10 %))

L'essai Proctor de la formulation F2 contenant 10 % de poudrette de sable de dune a permis d'obtenir une teneur en eau optimale de 11,8 % et une densité sèche maximale de 1,87 g/cm³. Cette valeur montre que le mélange conserve une bonne compacité malgré l'augmentation du taux de poudrette.

Les résultats de l'essai de compression simple montrent une résistance mécanique élevée, atteignant 45,39 kg/cm² pour une compacité C = 100 %, puis diminuant à 21,31 kg/cm² pour C = 98 % et à 12,17 kg/cm² pour C = 95 %.

Ces résultats indiquent que la formulation F2 présente de très bonnes performances mécaniques à forte compacité, ce qui confirme l'effet positif de l'ajout de 10 % de poudrette de sable de dune sur le comportement du matériau.

3.8.4 Résultats de la formulation F3 (10 % +3%ciment)

3.8.4.1 Essai Proctor 10 % +3%ciment

Tableau 3.39 : tableau détaillé de résultats de la formulation F3 (10 % +3%ciment)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
10	1,82
12,1	1,86
14.1	1,80

➤ (10 %) + 3%ciment

Tableau 3.40 : Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F3 (10 %+ 3% ciment)

Formulation	w _{opt} (%)	Densité sèche (g/cm ³)
F1 (5 %)	11,8	1,86

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Courbe Proctor 10%+ 3% ciment

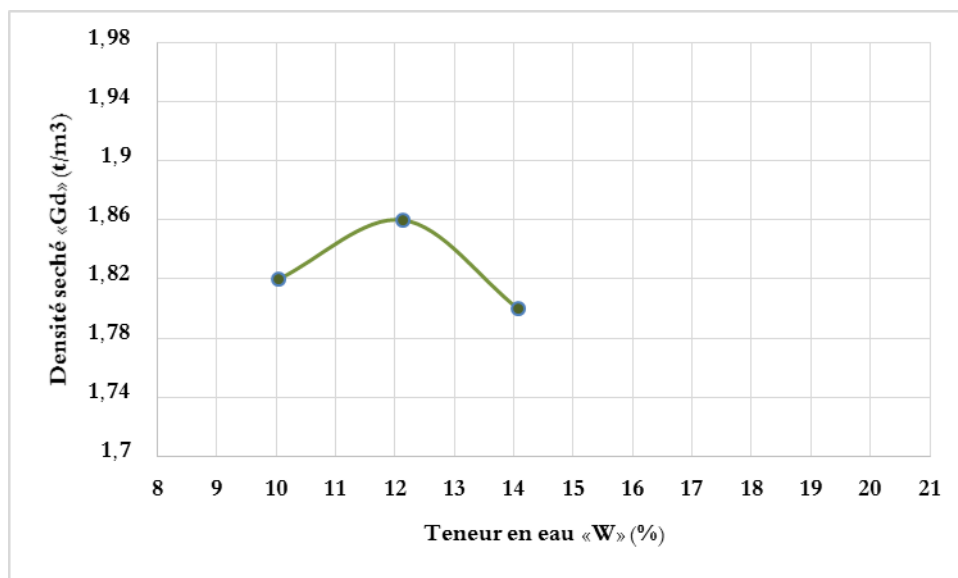


Figure 3.28 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 10% de poudrette de sable de dune+3%ciment)

3.8.4.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F3 (10 %p+ 3% c)

Tableau 3.41 : de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F3 (10 %+3%ciment)

Rc (Kg/cm²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+15%poudrette de sable de dune	32,27	27,95	17,64

3.8.4.3 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple–Formulation F3 (10 %))

L'essai Proctor réalisé sur la formulation contenant 10 % de poudrette de sable de dune et 3 % de ciment a donné une teneur en eau optimale de 12,1 % et une densité sèche maximale de 1,86 g/cm³. La légère augmentation de la teneur en eau peut être liée à la présence du ciment, qui nécessite davantage d'eau pour l'hydratation du mélange.

Les résultats de l'essai de compression simple montrent des résistances de 32,27 kg/cm² pour C = 100 %, 27,95 kg/cm² pour C = 98 % et 17,64 kg/cm² pour C = 95 %. Ces valeurs indiquent une amélioration de la cohésion et de la stabilité mécanique du matériau grâce à l'ajout du ciment.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Ainsi, cette formulation présente un comportement mécanique satisfaisant, notamment aux fortes compacités, ce qui confirme l'effet bénéfique combiné de la poudrette de sable de dune et du ciment sur les performances du béton de terre stabilisée.

3.8.5 Résultats de la formulation F4 (15 %)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

3.8.5.1 essai Proctor (15%)

Tableau 3.42 : tableau détaillé de résultats de la formulation F4 (15 %)

Teneur en eau (%)	Densité sèche (g/cm ³)
10,2	1,81
12,1	1,86
14,2	1,79

➤ (5 %)

Tableau 3.43 : Résultats de l'essai Proctor tuf 2 de la formulation F4 (15 %)

Formulation	w_{opt} (%)	Densité sèche (g/cm ³)
F1 (5 %)	12	1,86

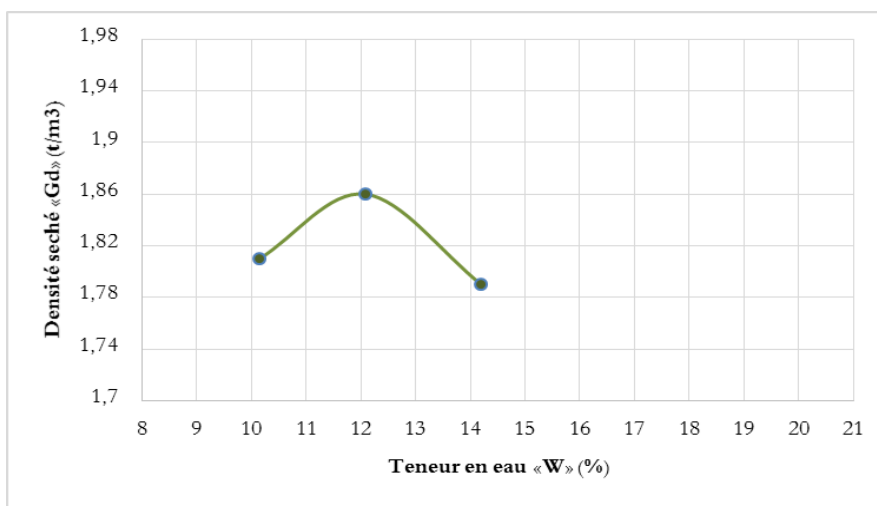


Figure 3.29 : Courbe Proctor Modifié (Tuf 2 avec 15% de poudrette de sable de dune)

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.8.5.2 Résultats de l'essai compression simple tuf 2 pour la formulation F4 (15 %)

Tableau 3.44 : de l'essai compression simple tuf 1 pour la formulation F4 (15 %)

Rc (Kg/cm ²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf+ 5% poudrette de sable de dune	42,41	23,59	12,31

3.8.5.3 Interprétation des résultats (Proctor et compression simple –F4(15 %))

L'essai Proctor réalisé sur la formulation contenant 15 % de poudrette de sable de dune a permis d'obtenir une teneur en eau optimale de 12,1 % et une densité sèche maximale de 1,86 g/cm³. Ces résultats montrent que le mélange conserve une compacité acceptable malgré l'augmentation du taux de poudrette.

Les résultats de l'essai de compression simple montrent une résistance de 42,41 kg/cm² pour une compacité C = 100 %, puis une diminution à 23,59 kg/cm² pour C = 98 % et 12,31 kg/cm² pour C = 95 %. Cette diminution confirme l'influence directe de la compacité sur les performances mécaniques du matériau.

Ainsi, l'ajout de 15 % de poudrette de sable de dune permet d'obtenir de bonnes résistances mécaniques, particulièrement à forte compacité, ce qui montre l'efficacité de cette formulation dans l'amélioration du comportement du béton de terre stabilisée.

3.8.6 Analyse comparative des formulations (F1, F2 et F3) Tuf 2

➤ Tableau comparatif des résultats

Tableau 3.45 : tableau comparatif des formulations du tuf 2

Formulation	Wopt (%)	γ_d max (g/cm ³)	Rc C=100 (kg/cm ²)	Rc C=98 (kg/cm ²)	Rc C=95 (kg/cm ²)
F1 (5 %)	11.7	1.88	31,03	19,14	15,07
F2 (10 %)	11.8	1.87	45,39	21,31	12,17
F3 (10 %) +3% c	12	1.86	32,27	27,95	17,64
F3 (15 %)	12	1,86	42,41	23,59	12,31

Analyse des résultats

L'analyse comparative des résultats des essais Proctor et de compression simple montre que les différentes formulations présentent des comportements variables selon le taux de poudrette de sable de dune et l'ajout du ciment.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Les valeurs de la teneur en eau optimale (W_{opt}) restent relativement proches pour les formulations F1, F2 et F4, avec des valeurs comprises entre **11,7 % et 12 %**, tandis que la formulation contenant **10 % de poudrette + 3 % de ciment** présente une valeur plus faible (**9,3 %**). Cela peut s'expliquer par l'effet du ciment sur la réduction du besoin en eau du mélange.

Concernant la densité sèche maximale, les résultats restent globalement stables entre **1,86 et 1,88 g/cm³**, ce qui indique une bonne compacité pour l'ensemble des formulations. La formulation F1 et la formulation avec ciment présentent les valeurs les plus élevées (**1,88 g/cm³**).

Du point de vue mécanique, les résultats de compression simple montrent que la formulation **F2 (10 %)** présente la résistance maximale à forte compacité avec **45,39 kg/cm²** pour $C = 100 \%$, suivie de la formulation **F4 (15 %)** avec **42,41 kg/cm²**. La formulation **F1 (5 %)** donne également des résultats satisfaisants, tandis que la formulation contenant **3 % de ciment** présente les résistances les plus faibles.

Pour toutes les formulations, une diminution progressive de la résistance est observée lorsque la compacité passe de $C = 100 \%$ à $C = 95 \%$, ce qui confirme l'influence directe du compactage sur les performances mécaniques du matériau.

Ainsi, les résultats montrent que l'ajout de poudrette de sable de dune améliore globalement les caractéristiques mécaniques du béton de terre stabilisée, avec un comportement optimal observé pour la formulation contenant **10%** de poudrette de sable de dune .

3.9 Etude de la conductivité thermique

3.9.1 Résultats de l'essai de conductivité thermique

– Afin de réaliser notre protocole expérimental nous avons choisis les formulations montrées dans le tableau.

➤ Pour la formulation 10 %

Tableau 3.46 : Formulations des éprouvettes pour l'essai de conductivité thermique

Formulations	Pourcentage des constituions de chaque mélange (%)			
	Poids total	tuf	Poudrette	Eau
TUF 1	5683,48	5115,14	568,35	630,87
TUF2	5593,75	5034,38	559,38	660,06

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

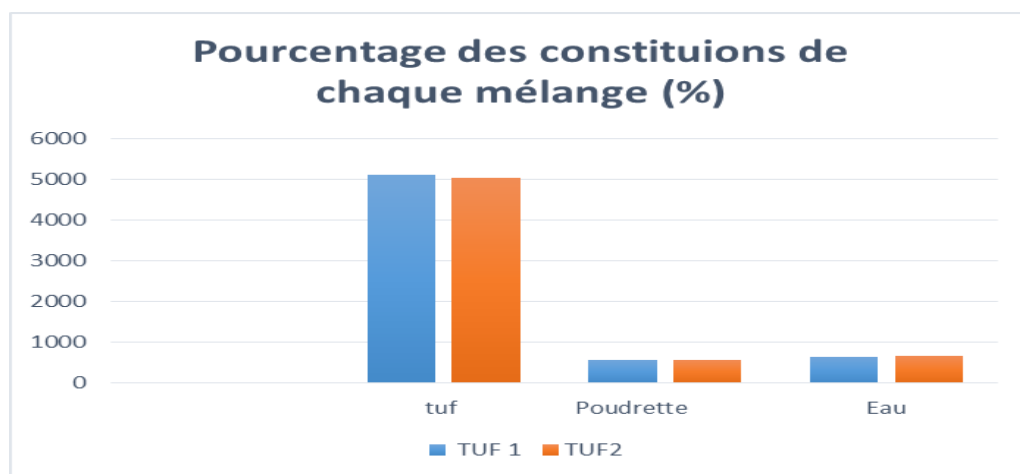


Figure 3.30 : Pourcentage des constituions de chaque mélange (%)

- La confection des éprouvettes des bétons de terre stabilise a été réalisée à l'aide d'un moule de dimensions de 15,1×28,3×7 cm. Après le remplissage du moule avec le matériau un compactage statique
- Les éprouvettes après le démoulage ont été de plein air pendant 48 heures.



Figure 3.31 : Les éprouvettes après le démoulage

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

3.9.1.1 Présentation des résultats pour tuf 1

échantillon	Article	Valeur
TUF 01 mesure 01	standard deviation	0.011
	Conductivité (W/m.K)	1.372
	résistance thermique	0.729
	T0 (K)	25.102

Tableau 3.47 :tuf 1 mesure 01

échantillon	Article	Valeur
TUF 01 mesure 02	standard deviation	0.003
	Conductivité (W/m.K)	1.103
	résistance thermique	0.907
	T0 (K)	24.5

Tableau 3.48 :tuf 1 mesure 02

échantillon	Article	Valeur
TUF 01 mesure 03	standard deviation	0.005
	Conductivité (W/m.K)	1.12
	résistance thermique	0.8932
	T0 (K)	24.2

Tableau 3.49 : tuf 1 mesure 03

échantillon	Article	Valeur
TUF 01 moyenne	standard deviation	0.15
	Conductivité (W/m.K)	1.198
	résistance thermique	0.843

Tableau 3.50 :tuf 1 moyenne

3.9.1.2 Présentation des résultats pour tuf 2

échantillon	Article	Valeur
TUF 02 mesure 01	standard deviation	0.018
	Conductivité (W/m.K)	1.835
	résistance thermique	0.545
	T0 (K)	26.8

Tableau 3.51 : tuf 2 mesure 01

échantillon	Article	Valeur
TUF 02 mesure 02	standard deviation	0.005
	Conductivité (W/m.K)	1.122
	résistance thermique	0.891
	T0 (K)	25.5

Tableau 3.52 :tuf 2 mesure 02

échantillon	Article	Valeur
TUF 02 mesure 03	standard deviation	0.011
	Conductivité (W/m.K)	1.604
	résistance thermique	0.624
	T0 (K)	27

Tableau 3.53 :tuf 2 mesure 03

échantillon	Article	Valeur
TUF 02 moyenne	standard deviation	0.34
	Conductivité (W/m.K)	1.52
	résistance thermique	0.687

Tableau 3.54 :tuf 2 moyenne

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation



Figure 3.32 : Essai de conductivité thermique sur l'échantillon TUF 01 et tuf 02

3.9.1.3 Interprétation des résultats de conductivité thermique

TUF 01 : Les résultats obtenus pour l'échantillon TUF 01 montrent que la conductivité thermique varie entre 1.103 et 1.372 W/m·K, avec une valeur moyenne de 1.198 W/m·K. Cette variation reste relativement faible, ce qui indique une bonne homogénéité des éprouvettes testées.

La résistance thermique moyenne obtenue est de 0.843, ce qui traduit une capacité modérée du matériau à limiter le transfert de chaleur. Plus la conductivité thermique diminue, plus la résistance thermique augmente, ce qui est observé dans les différentes mesures réalisées.

Les faibles valeurs de l'écart-type (standard déviation) enregistrées lors des essais montrent une bonne stabilité des mesures et une fiabilité acceptable des résultats expérimentaux.

D'une manière générale, le TUF 01 présente une conductivité thermique moyenne relativement faible, ce qui peut favoriser son utilisation comme matériau offrant une certaine isolation thermique.

TUF 02 : Pour l'échantillon TUF 02, les valeurs de conductivité thermique varient entre 1.122 et 1.835 W/m·K, avec une moyenne de 1.52 W/m·K. Cette valeur moyenne est supérieure à celle obtenue pour le TUF 01, indiquant que le TUF 02 transmet la chaleur plus facilement.

La résistance thermique moyenne mesurée est de 0.687, inférieure à celle du TUF 01. Cela signifie que le TUF 02 possède une capacité d'isolation thermique moins importante.

Les écarts observés entre les différentes mesures peuvent être liés à la structure interne du matériau, à la porosité ou encore à la répartition des vides dans les éprouvettes.

Les valeurs relativement faibles des écarts-types confirment néanmoins une bonne répétabilité des essais et une cohérence globale des résultats obtenus.

En conclusion, le TUF 02 présente une conductivité thermique plus élevée que le TUF 01, tandis que ce dernier offre une meilleure résistance au transfert thermique et donc un comportement isolant plus favorable.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

Remarque comparative

Les résultats obtenus montrent que le TUF 02 présente une conductivité thermique plus élevée que le TUF 01. Cette différence peut être expliquée par la nature et la structure interne des deux matériaux.

Le TUF 02 semble contenir davantage de vides et de porosité interne, ce qui influence directement le comportement thermique du matériau. En général :

- La porosité élevée modifie le transfert thermique.
- La présence d'air dans les pores influence la conductivité thermique.
- La compacité du matériau joue un rôle important dans la propagation de la chaleur.
- Plus le matériau est homogène et compact, plus les résultats deviennent stables.

Les variations enregistrées dans les mesures du TUF 02 peuvent donc être liées à une répartition non uniforme des pores et des vides internes. En revanche, le TUF 01 présente une structure plus homogène et des valeurs plus régulières, ce qui traduit une meilleure stabilité thermique et une meilleure résistance au transfert de chaleur.

Discussion générale

L'amélioration des performances du tuf par l'ajout de sable de dune s'explique principalement par:

- la correction de la courbe granulométrique,
- la réduction des vides inters granulaires,
- l'amélioration du contact entre les particules.

Cette approche permet de valoriser des ressources locales tout en réduisant la dépendance aux matériaux industriels, ce qui constitue un avantage économique et environnemental.

L'étude de formulation du béton de terre stabilisée à base de tuf et de poudrette de sable de dune met en évidence l'intérêt de l'utilisation de matériaux locaux dans la construction.

L'ajout de sable de dune permet d'améliorer significativement les propriétés du tuf, notamment en termes de compacité et de résistance mécanique. La détermination d'une formulation optimale est essentielle pour garantir la performance et la durabilité du matériau.

Ce type de matériau représente ainsi une solution adaptée aux conditions climatiques des régions arides.

L'étude de formulation du béton de terre stabilisée à base de tuf et de poudrette de sable de dune met en évidence l'intérêt de l'utilisation de matériaux locaux dans la construction.

CHAPITRE III : Etude de formulation du BTS à base de tuf en utilisant la poudrette de sable de dune comme matériaux de stabilisation

L'ajout de sable de dune permet d'améliorer significativement les propriétés du tuf, notamment en termes de compacité et de résistance mécanique. La détermination d'une formulation optimale est essentielle pour garantir la performance et la durabilité du matériau.

Ce type de matériau représente ainsi une solution adaptée aux conditions climatiques des régions arides.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, une étude expérimentale a été réalisée sur un béton de terre stabilisée à base de tuf local et de poudrette de sable de dune afin d'évaluer ses propriétés physiques, mécaniques et thermiques. Plusieurs essais de caractérisation ont été effectués, notamment les analyses granulométriques, les limites d'Atterberg, l'essai Proctor, l'essai de compression simple ainsi que l'essai de conductivité thermique.

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de la poudrette de sable de dune améliore la compacité du mélange grâce à une meilleure répartition granulométrique des particules. Les essais Proctor ont permis de déterminer les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales des différentes formulations étudiées, tandis que les essais de compression simple ont mis en évidence l'influence de la compacité sur les résistances mécaniques du matériau.

L'essai de conductivité thermique a également permis d'évaluer le comportement thermique des formulations élaborées. Les résultats montrent que la composition du mélange influence les échanges thermiques du matériau, ce qui confirme l'intérêt du béton de terre stabilisée dans les constructions adaptées aux régions arides et sahariennes.

Parmi les formulations étudiées, la formulation contenant 10 % de poudrette de sable de dune a présenté les résultats les plus satisfaisants en termes de compacité et de comportement global. Cette étude confirme ainsi la possibilité de valoriser les matériaux locaux disponibles pour produire un matériau de construction économique, durable et présentant des performances mécaniques et thermiques intéressantes.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

En faisant la synthèse de ce travail, la recherche bibliographique (**Chapitre I**) a mis en relief l'intérêt écologique et thermique du BTS, tandis que la démarche méthodologique (**Chapitre II**) a défini les protocoles indispensables pour caractériser nos matériaux, et l'étude expérimentale (**Chapitre III**) a évalué l'impact de l'incorporation de la poudrette de sable de dune (5%, 10% et 15%) ainsi que notre choix d'ajouter 3% de ciment.

La présente étude concerne le développement d'une étude de formulation d'un béton de terre stabilisée (BTS) à la base d'un Tuf de la région de Ghardaïa en utilisant la poudrette de sable de dune comme ajout de stabilisation au lieu des liants hydrauliques.

Cette étude permet une valorisation des matériaux locaux de la région de Ghardaïa et la production d'un éco-matériau qui sera utilisé dans domaine.

Le tuf est une roche naturelle friable, poreuse et légère, dont les caractéristiques varient selon sa composition. Quant à la poudrette de sable de dune, elle constitue une ressource locale abondante dans les régions sahariennes, mais présentant une faible cohésion lorsqu'elle est utilisée seule.

Cette étude, basée sur des essais de laboratoire et des références bibliographiques, a permis de mieux comprendre le comportement géotechnique des mélanges tuf-poudrette de sable de dune, ainsi que leur aptitude à être utilisés comme matériaux de construction en remplacement des briques et des parpaings. Elle s'inscrit dans une démarche visant à valoriser les matériaux locaux et à réduire l'utilisation des matériaux industriels.

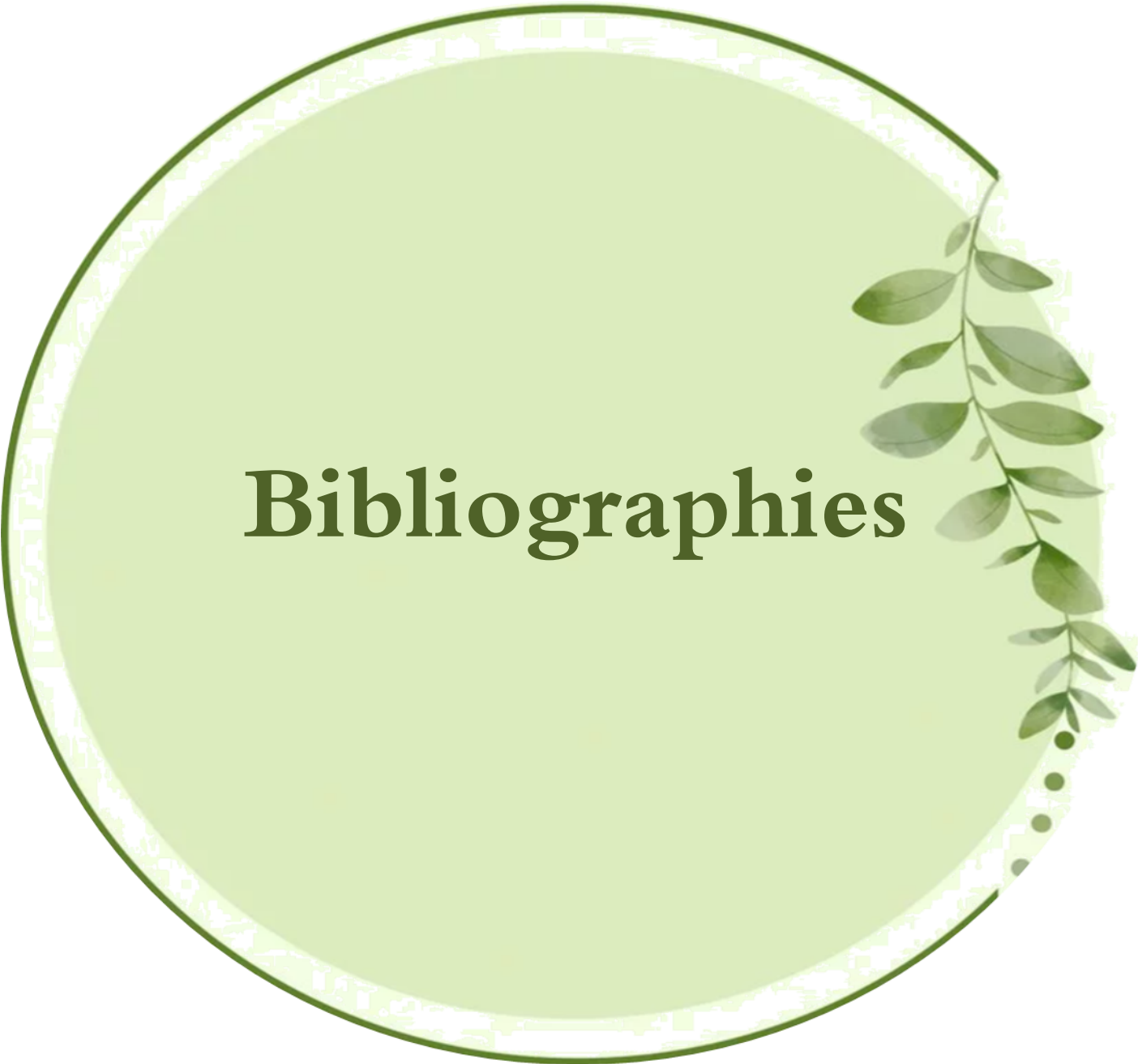
Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de la poudrette de sable de dune dans le tuf influence les caractéristiques mécaniques du mélange. En effet, bien que le matériau présente un comportement acceptable en termes de compactage et de structure, les essais de compression simple ont révélé une résistance relativement au-dessous des valeurs attendues, due principalement à la diminution de la cohésion.

Par ailleurs, les résultats de cette étude restent encourageants et montrent que ce type de matériau peut être valorisé dans les travaux de construction, notamment dans les régions sahariennes où les matériaux conventionnels sont coûteux ou difficiles à transporter.

Cependant, en comparaison avec les matériaux classiques, les caractéristiques obtenues ne répondent pas totalement aux exigences normatives actuelles. Malgré cela, leur utilisation peut être envisagée dans certaines applications locales, en attendant l'optimisation des formulations.

Ainsi, l'amélioration des performances du mélange peut être envisagée par une meilleure production de la poudrette de sable ou l'ajout de liants hydrauliques tels que le ciment ou la chaux, afin d'augmenter la résistance mécanique et la durabilité.

Enfin, cette étude ouvre des perspectives pour des recherches futures visant à améliorer la formulation du mélange tuf-poudrette de sable de dune et à optimiser ses performances mécaniques pour une utilisation plus large dans le domaine routier.



Bibliographies

Références bibliographique

- [1] Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Traité de construction en terre*. Marseille : CRA Terre–Éditions Parenthèses.
- [2] Messaoudene, I., Molez, L., & Amriou, A. (s.d.). *Béton de terre stabilisée et compressée*. Article scientifique / Rapport de recherche.
- [3] UNESCO. (1993). *La construction en terre : techniques traditionnelles et modernes*. Paris : Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture.
- [4] AFNOR. (s.d.). *Matériaux de construction en terre stabilisée – Guides et recommandations*. Paris : Association Française de Normalisation.
- [5] Walker, P., Keable, R., Martin, J., & Maniatidis, V. (2005). *Rammed earth: Design and construction guidelines*. BRE Press.
- [6] CRA Terre–ENSAG. (2018). *Earth construction and sustainable development*. Grenoble.
- [7] Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies. (s.d.). *Articles relatifs à la construction en terre stabilisée*.
- [8] AFNOR. (s.d.). NF EN 12390-3 – Essai de résistance à la compression
- [9] AFNOR. (s.d.). NF P 94-093 – Détermination des références de compactage d'un matériau (Essai Proctor).
- [10] AFNOR. (s.d.). NF P 94-051 – Détermination des limites d'Atterberg
- [11] AFNOR. (2001). *XP P13-901 – Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions et spécifications*.
- [12] AFNOR. (s.d.). NF P94-051 – Détermination des limites d'Atterberg.
- [13] AFNOR. (s.d.). NF P94-056 – Analyse granulométrique des sols.
- [14] AFNOR. (s.d.). NF EN 12390-3 – Essai de résistance à la compression.
- [15] AFNOR. (s.d.). NF P 94-420 – Détermination de la résistance à la compression simple des sols cohérents.
- [16] AFNOR. (s.d.). NF P94-068 – Détermination de la valeur au bleu de méthylène d'un sol.
- [17] AFNOR. (s.d.). NF P94-057 – Analyse granulométrique par sédimentométrie.
- [18] CEMEX France. (s.d.). *Essais sur la conductivité thermique des matériaux*.
- [19] AFNOR. (2001). NF EN 12667 – *Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment*. Paris : Association Française de Normalisation.
- [20] Hall, M., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (2012). *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*. Woodhead Publishing.

Annexe



مخبر الأشغال العمومية في جنوب
LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

VBS

FEUILLE DE PAILLASSE
ESSAIS GEOTECHNIQUES EN LABORATOIRE
Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche
NF EN 17542-3:2022

Structure	U/G	N° Dossier :	Recherche	
Lieu de travail	SCE ID	Échantillon :	TUF	

Vérification des équipements (étalonnage, vérification et état)	Équipement	N° Inventaire ou N° série	Constat*	Valeur de correction**
	Thermomètre	1724364	<	-
	Étuve	L.39.15.S.002	<	-
	Balance	L.022.15.S.009	<	-
	Tamis 5 mm	1203281	<	-
	Burette	/	-	-
	Agitateur	L.091.15.S.002	<	-
	Reference Solution 10g/l	N° PV	-	Date
Réactifs (N° Lot)	Bleu M poudre	-	Eau distillée	-

Description de l'échantillon :

(*) : C= conforme, NC=non conforme.

(**) Important : Toutes les valeurs mentionnées doivent être corrigées par les valeurs de correction

N°	ÉTALE	EXIGENCE	VALEUR
1	Date et Heure Début D'essai	15/03/2026 10h30	
2	Préparation de la prise d'essai selon D_{max}	- Si $D_{max} > 50$ mm ; $M=10$ Kg - Si 5 mm $< D_{max} < 50$ mm ; $M > 200$ Dmax - Si $D_{max} \leq 5$ mm ; $M > 200$ Dmax	$M=511.90$ g
3	Si $D_{max} > 5$ mm, tamiser l'échantillon au tamis 5 mm	- Effectuer un brossage à sec du refus - Si un lavage est nécessaire : - Tremper le refus à 5 mm - Laver sur un tamis de 5 mm, en utilisant le moins d'eau possible - Sécher à une température ne dépassant pas 50 °C - Mélanger les 2 fractions 0/5 mm obtenues par le tamisage initial et l'opération de lavage ; - Homogénéiser l'échantillon d'essai par quartage - Déterminer la proportion massique C	$C = \frac{\text{Tamisé 0/5}}{\text{Tamisé 0/50}}$ $C = \frac{51}{84}$
4	Homogénéiser la fraction 0/5 mm pour préparer 3 prises d'essai	30 g à 60 g pour les sols moyennement à très argileux	$M_0 = 60$ g

Annexe

	ayant approximativement les mêmes masses	> 60 g pour les autres sols. M_0 : utilisé pour l'essai à la tâche M_h : pour déterminer la teneur en eau M_2 : conservé au cas où l'essai nécessiterait d'être répété.	$M_h = 296,50 \text{ g}$ $M_2 = 155,40 \text{ g}$										
5	Déterminer la teneur en eau de la prise d'essai « M_h », noter « M_s »	- La durée entre deux pesées successive (M_i et M_{i+1}) est au minimum 1 h $R = \frac{M_i - M_{i+1}}{M_i} \times 100 < 0.1 \%$ $\omega = \left[\frac{M_h - M_s}{M_s} \right] \times 100$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>24 h</th> <th>2 h</th> <th>h</th> <th>h</th> <th>h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>293,25</td> <td>292,99</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> $R = 0,08 \%$ $M_s = 292,99 \text{ g}$ $\omega = 1,19 \%$	24 h	2 h	h	h	h	293,25	292,99			
24 h	2 h	h	h	h									
293,25	292,99												
6	Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée dans le bécher et ajouter la prise d'essai « M_0 »	En remuant bien avec la spatule	$M_0 = 60 \text{ g}$										
7	Agiter la solution colorée et remplir la burette de solution colorée		☒										
8	Mettre en marche l'agitateur et déclencher le minuteur.	- Positionner les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher ; - Agiter le contenu du bécher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min ; - Réduire la vitesse de l'agitateur à (400 ± 40) tr/min et agiter continuellement pendant la poursuite de l'essai.	☒										
9	Test à la tache	- Par dose de 5 ml avec 1 mn d'agitation ; - Auréole persiste pendant 5 min (6 taches) - Si l'auréole disparaît dans 4 minutes : ajouter une autre dose de 5 ml - Si l'auréole disparaît dans la 5^{ème} minute : ajouter une autre dose de 2 ml $M_1 = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{\omega}{100} \right)}$; $V_{B0/5} = \frac{V}{M_1}$; $V_{BS} = \frac{V}{M_1} \times C$	$\omega = 1,19 \%$ $V = 10 \text{ ml}$ $M_1 = 59,29 \text{ g}$ $C = 0,61 \%$ $V_{B0/5} = 0,17 \text{ g / 100 g}$ $V_{BS} = 0,10 \text{ g / 100 g}$ $V_{BS} = 1,00 \text{ g / kg}$										
10	Date et heure de fin d'essai	16/03/2026											

Observation :

Nom et Prénom du Technicien : _____ Visa : _____

Nom et Prénom du Contrôleur : Hedda H
 Date : 16/03/2026
 Visa : _____

Contrôle et vérification	Oui	Non
Qualification du technicien	☒	☐
Renseignement correct	☒	☐
Vérification du matériel	☒	☐
Calcul correct	☒	☐

Annexe



مخبر الأشغال العمومية في جنوب LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

FEUILLE DE PAILLASSE
ESSAIS GEOTECHNIQUES EN LABORATOIRE
Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche
NF EN 17542-3:2022

Structure	U/G	N° Dossier :	Recherche	
Lieu de travail	SCE ID	Échantillon :	TV#02	

Vérification des équipements (étalonnage, vérification et état)	Équipement	N° Inventaire ou N° série	Constat*	Valeur de correction**
	Thermomètre	1724364	✓	-
	Étuve	L.39.15.S.002	✓	-
	Balance	L.022.15.S.009	✓	-
	Tamis 5 mm	1203281	✓	-
	Burette	1	✓	-
	Agitateur	L.091.15.S.002	✓	-
	Reference Solution 10g/l	N° PV	10	Date
Réactifs (N° Lot)	Bleu.M.poudre	01645	Eau distillée	250

Description de l'échantillon : /

(*) : C= conforme, NC=non conforme.

(**) Important : Toutes les valeurs mentionnées doivent être corrigées par les valeurs de correction

N°	ÉTALE	EXIGENCE	VALEUR
1	Date et Heure Début D'essai	07/05/2026 9h15	
2	Préparation de la prise d'essai selon D_{max}	- Si $D_{max} > 50$ mm ; $M=10$ Kg - Si 5 mm $< D_{max} < 50$ mm ; $M > 200 D_{max}$ - Si $D_{max} \leq 5$ mm ; $M > 200 D_{max}$	$M = 482,40$ g
3	Si $D_{max} > 5$ mm, tamiser l'échantillon au tamis 5 mm	- Effectuer un brossage à sec du refus - Si un lavage est nécessaire : - Tremper le refus à 5 mm - Laver sur un tamis de 5 mm, en utilisant le moins d'eau possible - Sécher à une température ne dépassant pas 50 °C - Mélanger les 2 fractions 0/5 mm obtenues par le tamisage initial et l'opération de lavage ; - Homogénéiser l'échantillon d'essai par quartage - Déterminer la proportion massique C	$C = \frac{\text{Tamisé 0/5}}{\text{Tamisé 0/50}}$ $C = \frac{95}{100}$
4	Homogénéiser la fraction 0/5 mm pour préparer 3 prises d'essai	30 g à 60 g pour les sols moyennement à très argileux	$M_0 = 60$ g

Annexe

	ayant approximativement les mêmes masses	> 60 g pour les autres sols. M_0 : utilisé pour l'essai à la tâche M_h : pour déterminer la teneur en eau M_2 : conservé au cas où l'essai nécessiterait d'être répété.	$M_h = 213.35 \text{ g}$ $M_2 = 209.05 \text{ g}$										
5	Déterminer la teneur en eau de la prise d'essai « M_h », noter « M_s »	- La durée entre deux pesées successive (M_i et M_{i+1}) est au minimum 1 h $R = \frac{M_i - M_{i+1}}{M_i} \times 100 < 0.1 \%$ $\omega = \left[\frac{M_h - M_s}{M_s} \right] \times 100$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1 h</th> <th>2 h</th> <th>h</th> <th>h</th> <th>h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>213.05 g</td> <td>212.95 g</td> <td>g</td> <td>g</td> <td>g</td> </tr> </tbody> </table> $R = 0.05 \%$ $M_s = 212.95 \text{ g}$ $\omega = 0.19 \%$	1 h	2 h	h	h	h	213.05 g	212.95 g	g	g	g
1 h	2 h	h	h	h									
213.05 g	212.95 g	g	g	g									
6	Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée dans le bécher et ajouter la prise d'essai « M_0 »	En remuant bien avec la spatule	$M_0 = 60 \text{ g}$										
7	Agiter la solution colorée et remplir la burette de solution colorée	-	☒										
8	Mettre en marche l'agitateur et déclencher le minuteur.	- Positionner les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher ; - Agiter le contenu du bécher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min ; - Réduire la vitesse de l'agitateur à (400 ± 40) tr/min et agiter continuellement pendant la poursuite de l'essai.	☒										
9	Test à la tache	- Par dose de 5 ml avec 1 mn d'agitation ; - Auréole persiste pendant 5 min (6 taches) - Si l'auréole disparaît dans 4 minutes : ajouter une autre dose de 5 ml - Si l'auréole disparaît dans la 5^{ème} minute : ajouter une autre dose de 2 ml $M_1 = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{\omega}{100} \right)}$; $V_{B0/5} = \frac{V}{M_1}$; $V_{BS} = \frac{V}{M_1} \times C$	$\omega = 0.19 \%$ $V = 35 \text{ ml}$ $M_1 = 59.88 \text{ g}$ $C = 0.95 \%$ $V_{B0/5} = 0.58 \text{ g / 100 g}$ $V_{BS} = 0.55 \text{ g / 100 g}$ 5.50 g/kg										
10	Date et heure de fin d'essai	... 07.10.2026 ...	12h10										

Observation :

Nom et Prénom du Technicien : _____ Visa : _____

Nom et Prénom du Contrôleur : _____	Contrôle et vérification	Oui	Non
Date : _____	Qualification du technicien		
Visa : _____	Renseignement correct		
	Vérification du matériel		
	Calcul correct		

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Hydraulique et Génie Civil



كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم العلوم والتكنولوجيا

Université de Ghardaïa

Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures

Autorisation d'impression d'un mémoire du Master

Les membres du jury	Nom et prénom	Signature
Le président de jury	NESSIL Hamid	
Examineur 1	SAITI Issam	
Encadrant	AMIEUR Abdenacer	

Je soussigné M^r : Nessil Hamid

Président de jury de l' étudiante : BOUGHDIR Israa

Thème

Etude de formulation d'un BTS à base de Tuf et de poudrette de sable de dune.

J'autorise les étudiants mentionnés ci-dessus d'imprimer et déposer leur manuscrit final au niveau du département.

Président de jury :

Le chef de département :



عبد الكبير إبراهيم
رئيس قسم المي والهندسة المدنية
كلية العلوم والتكنولوجيا